www.kses.re.kr

2026 한국태양에너지학회
추계학술발표대회

2026. 10. 14(수)
~ 16(금)

무창포 비체팰리스



주관

한국태양에너지학회 THE KOREAN SOLAR ENERGY SOCIETY

후원

한국에너지공단 | 한국에너지기술평가원 | KITECH 한국생산기술연구원 | 한국에너지기술연구원 KOREA INSTITUTE OF ENERGY RESEARCH | McScience | SG ENERGY | JKCORE | SR (주)SR에너지 | Inoelectric | B&P | (주)티엔이테크 | ZYX TECHNOLOGY | GRANDSUN

특별회원사

금강전기산업(주) | (주)이삭에너지 | (주)원광에스엔티 | DS SNB | (주)세진엔지니어링 | McScience | SCHAN SOLAR | GRANDSUN | (주)한화 건설부문 | SG ENERGY | B&P | HAEIN | KPEA 한국제품안전협회 | (주)더블유피 | 금정테크 KOREA | (주)남강솔라

한국태양에너지학회
THE KOREAN SOLAR ENERGY SOCIETY

세종특별자치시 한누리대로 249 에스제이타워 804호(나성동)
·전화: 044-864-1977 ·팩스: 044-864-1978 ·이메일: solar@kses.re.kr

“본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.”

CONTENTS

초대의 글 5

서문 6

축사 7

2026 한국태양에너지학회 추계학술대회 조직위원회 구성 8

2026 한국태양에너지학회 추계학술대회 프로그램위원회 구성 9

진행 일정 10

Special Session 11

Oral Session 15

- 건물에너지설비 Building Energy Systems (BES) 15
- 제로에너지건물 Zero Energy Buildings (ZEB) 16
- 건축환경 Building Environment Engineering (BEE) 17
- 태양광에너지 Photovoltaic Energy (PVE) 18
- 태양열융합 Solar Thermal Convergence (STC) 20
- 풍력에너지 Wind Energy Conversion (WEC) 21
- 신재생융합 Renewable Energy Convergence (REC) 22
- 자원량평가 Renewable Energy Resources (RER) 23
- 에너지저장 및 섹터커플링 Energy Storage System & Sector Coupling (ESS&SC) 25

Poster Session 26

참가 및 등록안내 302

주요 행사일정 및 장소 303

구두 및 포스터 발표 안내 306

좌장 및 발표자 숙지사항 307

발표장 안내도 308

보령 무창포 비체팰리스 오시는 길 309

초대의 글



존경하는 한국태양에너지학회 회원 여러분, 안녕하십니까?

다가오는 2026년 10월 14일(수)부터 16일(금)까지 보령 비체팰리스에서 개최되는 한국태양에너지학회 추계학술대회에 여러분을 정중히 초대합니다.

이번 학술대회는 태양광, 태양열, 건물에너지, 에너지저장, 시스템 융합 및 관련 정책·산업 분야에서 축적된 최신 연구 성과를 공유하고, 다양한 전문 분야 간 교류와 협력을 확대하는 뜻깊은 자리로 마련하고자 합니다. 학술발표는 물론 특별세션, 초청강연 및 산학연 교류를 통해 새로운 연구 아이디어를 발굴하고, 산업과 사회의 실질적인 변화로 이어질 수 있는 협력의 계기가 될 것입니다.

특히 이번 학술대회는 연구와 사업성과를 발표하는 학문적 교류뿐만 아니라 참석하시는 모든 회원 간 친목과 화합을 다지는 소중한 시간이 될 것입니다. 바쁘신 일정 속에서도 부디 참석하시어 학회의 발전과 태양에너지 산업의 미래를 함께 논의해 주시기를 부탁드립니다.

이번 학술대회가 우리나라 태양에너지 기술과 산업의 지속가능한 발전을 함께 만들어 가는 소중한 자리가 될 수 있도록 회원 여러분의 적극적인 참여와 성원을 기대하며, 아름다운 바다와 석양이 있는 무창포에서 여러분을 기다리겠습니다. 감사합니다.

2026. 10

2026년 한국태양에너지학회 추계학술발표대회

조직위원장 **김 창 헌** 올림

서 문





존경하는 한국태양에너지학회 회원 및 특별회원사 여러분께,

2026년 한국태양에너지학회 학술대회를 맞아 회원 여러분과 함께 뜻깊은 학술 교류의 자리를 마련하게 된 것을 매우 기쁘게 생각합니다.

오늘날 에너지 분야는 탄소중립이라는 시대적 과제와 함께 에너지안보, 산업경쟁력, 지속가능한 성장이라는 복합적인 요구에 직면하고 있습니다. 특히 재생에너지의 확대와 분산에너지 시스템의 활성화, 에너지저장 기술의 발전, 제로에너지건축물의 확산 등은 기존의 개별 기술 중심 접근에서 벗어나 에너지의 생산·저장·공급·소비 전 과정이 유기적으로 연계되는 새로운 에너지 시스템으로의 전환을 요구하고 있습니다.

이러한 변화 속에서 태양에너지는 단순한 재생에너지원의 하나를 넘어 건물과 도시, 산업, 수소, 전력망 및 다양한 에너지 수요 부문을 연결하는 핵심 기술로 그 역할이 더욱 확대되고 있습니다. 또한 인공지능과 데이터 기반 에너지관리, 섹터커플링, 에너지저장, 건물일체형 태양광 등 여러 분야와의 융합을 통해 새로운 기술적·산업적 가능성을 만들어가고 있습니다.

이번 학술대회에서는 태양광에너지, 태양열융합, 풍력에너지, 신재생융합, 자원량평가, 에너지저장 및 섹터커플링, 태양수소에너지, 건물에너지설비, 건축환경, 제로에너지건물 등 다양한 분야의 연구성과가 발표됩니다. 아울러 재생열 기술 및 정책, 차세대 태양광 기술 워크샵, 태양광 순환경제, 차세대 우주 태양전지 등 미래 에너지 산업의 주요 현안을 다루는 특별세션과 기술세미나도 함께 마련되어 더욱 폭넓은 논의가 이루어질 것으로 기대합니다.

무엇보다 이번 학술대회가 각 분야에서 축적된 연구성과를 공유하는 것에 그치지 않고, 학계와 산업계, 연구기관 및 정책 분야의 전문가들이 서로의 경험과 아이디어를 나누며 새로운 협력의 가능성을 모색하는 자리가 되기를 바랍니다. 서로 다른 전문 분야 간의 활발한 소통과 융합은 급변하는 에너지 환경에 대응하고 미래 기술의 방향을 제시하는 중요한 출발점이 될 것입니다. 특히 기후위기 대응과 탄소중립 실현을 위해서는 기술개발뿐 아니라 실증과 사업화, 정책 및 제도적 지원이 함께 이루어져야 합니다. 이번 학술대회에서 논의되는 다양한 연구와 기술들이 현장의 문제를 해결하고, 나아가 우리나라 재생에너지 산업의 경쟁력 강화와 지속가능한 에너지 사회 구현에 기여할 수 있기를 기대합니다.

본 학술대회의 성공적인 개최를 위해 많은 노력과 지원을 아끼지 않으신 학회 회장님과 조직위원장님을 비롯하여 조직위원회 및 프로그램위원회 위원 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한 알찬 학술 프로그램을 준비해 주신 각 분과위원장님과 위원님들, 학술대회 운영을 위해 애써주신 학회 사무국 관계자 여러분께도 진심으로 감사드립니다.

아울러 귀중한 연구성과를 발표해 주시는 발표자 여러분과 바쁜 일정에도 학술대회에 참석해 주신 회원 여러분, 특별회원사 및 후원기관 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다. 이번 학술대회가 새로운 지식과 기술을 공유하고 미래 에너지 분야의 발전 방향을 함께 고민하는 의미 있는 시간이 되기를 바랍니다. 또한 학문적 성과와 산업적 가치가 연결되고 새로운 연구 협력과 교류가 시작되는 뜻깊은 장이 되기를 기대합니다.

2026. 10

2026년 한국태양에너지학회 추계학술발표대회

프로그램위원장 **김 도 형, 최 영 진** 올림

축 사



존경하는 한국태양에너지학회 회원 여러분, 반갑습니다.

지난 춘계학술대회가 엊그제 같은데 어느덧 6개월이 흘러 다시 추계학술대회를 맞이하게 되었습니다. 시간이 참 빠르다는 생각과 함께, 이번에도 많은 회원 여러분과 뜻깊은 자리를 함께할 수 있어 기쁘게 생각합니다.

최근 정부는 2030년 재생에너지 100GW 보급을 목표로 재생에너지 확대와 전력망·에너지저장 분야의 혁신을 본격화하고 있습니다. 그만큼 태양에너지를 중심으로 다양한 에너지 기술을 연구해 온 우리 학회의 역할과 책임도 더욱 커지고 있습니다.

이러한 정책 변화와 맞물려, 이번 추계학술대회에서도 태양광과 태양열을 비롯하여 건물에너지, 에너지저장과 섹터커플링, 수소 등 다양한 분야의 연구성과가 발표됩니다. 서로의 연구성과와 경험을 나누며 새로운 연구와 협력의 가능성을 찾는 뜻깊은 자리가 되기를 기대합니다. 아울러 이번 학술대회에서 논문상을 수상하시는 분들께도 진심으로 축하의 말씀을 드립니다.

특히 우리 학회는 내년이면 창립 50주년이라는 뜻깊은 해를 맞이합니다. 지난 50년 동안 선배 회원들께서 쌓아 오신 학회의 역사와 전통을 소중히 이어가면서, 앞으로의 새로운 50년은 우리 회원 여러분과 함께 만들어 가야 한다고 생각합니다.

끝으로 이번 학술대회를 위해 애써 주신 김창헌 조직위원장님과 조직위원 여러분, 김도형·최영진 프로그램위원장님과 프로그램위원 여러분, 그리고 사무국 여러분께 깊이 감사드립니다.

모쪼록 이번 학술대회가 좋은 연구성과를 나누고, 오랜만에 만난 동료들과 따뜻한 정을 나누는 즐거운 시간이 되기를 바랍니다.

감사합니다.

2026. 10

사단법인 한국태양에너지학회

회장 **김 영 원** 올림

2026 한국태양에너지학회 추계학술대회 조직위원회 구성

분 과	이 름	소 속
조직위원장	김창헌	한국광기술원
1) 기획	임병주	한국기계연구원
2) 총무	김홍욱	에이블에너지
	곽영훈	서울시립대학교
	문선혜	서울시립대학교
3) 재무	박 인	에코다
	최영진	경기대학교
4) 전시/협찬	고석환	한국에너지기술연구원
	임동건	한국교통대학교
	이재우	한국태양광공사협회
5) 프로그램	김도형	충북대학교
	최영진	경기대학교
6) 강좌/워크숍	오원욱	고려대학교
7) 홍보/출판	박종성	경상국립대학교
	강동원	중앙대학교
8) 사무국	천성실	한국태양에너지학회

2026 한국태양에너지학회 추계학술대회 프로그램위원회 구성

분과	이름	소속	역할
1. 프로그램위원회	김도형	충북대학교	프로그램위원장
	최영진	경기대학교	프로그램위원장
1) 건물에너지설비 Building Energy Systems (BES)	문선혜	서울시립대학교	분과위원장
	조경주	한국건설기술연구원	분과위원
	강경모	대진대학교	분과위원
	임한솔	한밭대학교	분과위원
2) 제로에너지 건물 Zero Energy Buildings (ZEB)	최연희	강남대학교	분과위원장
	김주욱	조선대학교	분과위원
	임종연	강원대학교	분과위원
	윤성민	성균관대학교	분과위원
3) 건축환경 Building Environment Engineering (BEE)	곽영훈	서울시립대학교	분과위원장
	김동수	한밭대학교	분과위원
	신대욱	군산대학교	분과위원
	김민휘	한국에너지기술연구원	분과위원
4) 태양광에너지 Photovoltaic Energy (PVE)	배수현	한국에너지기술연구원	분과위원장
	신우균	한국에너지기술연구원	분과위원
	이용환	한국전자기술연구원	분과위원
	오원욱	고려대학교	분과위원
	이상희	한국에너지기술연구원	분과위원
5) 태양열융합 Solar Thermal Convergence (STC)	주홍진	한국에너지기술연구원	분과위원장
	이가람	한국기계연구원	분과위원
	김득원	한국에너지기술연구원	분과위원
	이도성	한국재생열에너지융합협회	분과위원
6) 풍력에너지 Wind Energy Conversion (WEC)	김용욱	고등기술연구원	분과위원장
	최정철	국립목포대학교	분과위원
	김진영	한국에너지기술연구원	분과위원
	이상길	젠텍이엔씨㈜	분과위원
7) 신재생융합 Renewable Energy Convergence (REC)	최휘웅	전남대학교	분과위원장
	김진희	공주대학교	분과위원
	김유진	한국건설기술연구원	분과위원
	김종현	한국폴리텍대학	분과위원
8) 자원량평가 Renewable Energy Resources (RER)	윤창열	한국에너지기술연구원	분과위원장
	최요순	세종대학교	분과위원
	허태민	서울대학교	분과위원
9) 에너지저장 및 섹터커플링 Energy Storage System & Sector Coupling (ESS)	손명우	한국광기술원	분과위원장
	김민우	한국광기술원	분과위원
10) 태양수소에너지 Solar to Hydrogen (S2H)	심욱	성균관대학교	분과위원장
	박양정	울산과학기술원	분과위원
	정성은	수원대학교	분과위원
	진경석	고려대학교	분과위원
	박승학	성균관대학교	분과위원

진행 일정

- 일 시 : 2026년 10월 14일(수)~16일(금)
- 장 소 : 보령 무창포 비체팰리스

10월 14일 (수요일)

Time	소요시간	그랜드볼룸	엘로우	핑크	실버	골드	레드	로비
12:00~13:00	60"	학술대회 접수 및 등록						기업체 전시
13:00~14:30	90"	특별세션 (한국생산기술연구원) 2026 연구개발특구 지역혁신 실증프로젝트 기획회의 I	에너지저장 및 섹터커플링 (ESS)	특별세션 (한국재생열에너지 융합협회 & 태양열 융합전문 위원회) 재생열 기술 및 정책	특별세션 (한국에너지기술연구원) KIER N-Lab: 차세대 태양광 기술 워크샵	특별세션 (경상국립대학교) 페로브/실리콘 탠덤 재활용	득별강좌 BIPV·영농형 태양광 A to Z	
14:30~14:40	10"	휴식						
14:40~15:30	50"	개회식 및 기조강연(그랜드볼룸) 기조강연 : 산업분야 탄소중립과 히트펌프(한국기계연구원 박창대 책임연구원/한국태양에너지학회 28대 명예회장)						
15:30~15:40	10"	휴식						
15:40~17:00	80"	Poster Session I (태양광)		특별세션 (한국재생열에너지 융합협회 & 태양열 융합전문 위원회) 재생열 기술 및 정책	풍력에너지 (WEC)		특별세션 (태양광자원순환 전문위원회) 태양광 순환경제	
17:00~18:00	60"	이사회(엘로우)						
18:00~20:00	120"	석식						

10월 15일 (목요일)

Time	소요시간	그랜드볼룸	엘로우	핑크	실버	골드	레드	로비
09:00~10:20	80"	특별세션 (한국생산기술연구원) 2026 연구개발특구 지역혁신 실증프로젝트 기획회의 II	건물에너지 (BES)	태양열융합 (STC)	자원량평가 (RER)-1	제로에너지건물 (ZEB)	태양광에너지 (PVE)-1	기업체 전시
10:20~10:40	20"	휴식						
10:40~12:00	80"		건축환경 (BEE)-1	신재생융합 (REC)-1	자원량평가 (RER)-2	50주년 기념행사 조직위원회	태양광에너지 (PVE)-2	
12:00~13:30	90"	중식						
13:30~14:50	80"	에너지최적화 디자인 공모전	건축환경 (BEE)-2	신재생융합 (REC)-2	자원량평가 (RER)-3	특별세션 (해상풍력 전문위원회) 해상풍력기술과 해양 FPV 시스템 I	태양광에너지 (PVE)-3	
14:50~15:10	20"	휴식						
15:10~16:30	80"	특별세션 (한국에너지기술연구원) AI기반 전력변환장치 전주기 운영관리	특별세션 (경상국립대학교) 차세대 우주 태양전지	특별세션 (한국생산기술연구원) PVT-HP AI 연계 냉난방 시스템	자원량평가 (RER)-4	특별세션 (해상풍력 전문위원회) 해상풍력기술과 해양 FPV 시스템 II	태양광에너지 (PVE)-4	
16:30~16:40	10"	휴식						
16:40~18:00	80"	Poster Session II (태양광 외)	전시기업 기술발표	특별세션 (한국에너지기술연구원) AI기반 O&M 플랫폼 개발				
18:00~20:00	120"	만찬 및 시상식(그랜드볼룸)						
20:00~20:30	30"	폐회식(그랜드볼룸)						

10월 16일 (금요일)

Time	소요시간	그랜드볼룸	엘로우	핑크	실버	골드	레드	로비
09:00~11:00	120"		한국태양에너지학회 전문위원회 회의 및 토론					기업체 전시

목차

Special Session

일시 : 2026년 10월 14일(수)~15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(그랜드볼룸, 옐로우, 핑크, 실버, 골드, 레드)

10월 14일(수)

2026 연구개발특구 지역혁신 실증프로젝트 기획회의 I 보령 무창포 비체팰리스(그랜드볼룸) 13:00~14:30 좌장 : 윤 성 민(한국생산기술연구원)

13:00~14:30 2026 연구개발특구 지역혁신실증프로젝트 기획회의 I

재생열 기술 및 정책 보령 무창포 비체팰리스(핑크) 13:00~14:30 좌장 : 주 홍 진(한국에너지기술연구원)

RHE-I-1 13:00~13:30 재생열 지원사업 및 추진방향 ····· 35
이강훈(한국에너지공단)

RHE-O-1 13:30~14:00 진천 친환경에너지타운 내 재생에너지 융복합시스템의 장기운영성능 분석 ····· 36
김득원†, 김민휘, 이동원, 허재혁, 김종규(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실)

RHE-O-2 14:00~14:30 온실 적용 소용량 태양열 계간축열조의 장기간 열저장 성능 및 열이용 특성 분석 ····· 37
안영섭, 주홍진, 이왕제(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실),
한광우(한국에너지기술연구원 에너지ICT연구단), 이경호(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실)†

재생열 기술 및 정책 보령 무창포 비체팰리스(핑크) 15:40~17:00 좌장 : 주 홍 진(한국에너지기술연구원)

15:40~17:00 한국재생열에너지융합협회 총회
이도성(한국재생열에너지융합협회)

KIER N-Lab: 차세대 태양광 기술 워크샵 보령 무창포 비체팰리스(실버) 13:00~14:30 좌장 : 어 영 주(한국에너지기술연구원)

NPV-O-1 13:00~13:12 저탄소 순환 경제를 위한 친환경 태양광모듈 제조 기술 개발 ····· 41
어영주, 배수현, 김경수, 신성호, 이진석, 강기환†(한국에너지기술연구원)

NPV-O-2 13:12~13:25 저탄소 태양광 모듈을 위한 저투습도 접착소재 기반 투명 백시트 개발 ····· 42
권다영, 류준, 박예랑, 한재익, 백하늘, 김재현, 이용환†(한국전자기술연구원, 신재생에너지연구센터)

NPV-O-3 13:25~13:38 HPBC 태양광 미니모듈의 가속 내구성 평가: HAST와 기존 Damp Heat 시험 간 상관관계 분석 ····· 43
전기석, 김건우, 정채환†(한국생산기술연구원)

NPV-O-4 13:38~13:51 폴리부타디이엔 기반 저투습 모서리 실란트 소재 개발 ····· 44
정인환†(한양대학교 유기나노공학과)

NPV-O-5 13:51~14:04 양면 유리(GtoG) 태양광모듈 재활용을 위한 유도가열식 분리 장치 개발 및 자원 회수율 평가 ····· 45
신연배†(충북테크노파크), 김태현(교통대학교), 남우준, 조용현(충북테크노파크)

NPV-O-6 14:04~14:17 폐 태양광 폐기물로부터 고순도 은·구리 회수를 위한 순차적 습식제련-전기화학 공정 ····· 46
김수환, 박종성†(경상국립대학교 미래융복합기술연구소)

NPV-O-7 14:17~14:30	태양광 폐패널 재활용을 위한 저탄소 기술 기반 유가금속 회수 공정 개발 ····· 47 노청민†, 이상헌, 이준성, 서광민, 김연주((주)원광에스앤티)

폐로브/실리콘 탠덤 재활용 보령 무창포 비체팰리스(골드) 13:00~14:30 좌장 : 이 용 환(한국전자기술연구원)

PST-O-1 13:00~13:15	아민 중공사 기반 아이오딘 회수 플랫폼 개발 ····· 51 조은, 정영균, 윤수진(한국과학기술연구원 기후환경연구소 물자원순환연구단), 최재우†(한국과학기술연구원 기후환경연구소 물자원순환연구단, 서울대학교 화학생물공학부)
PST-O-2 13:15~13:30	유도가열 기반 고속 태양전지 및 모듈 재활용 기술 ····· 52 권다영, 박예랑, 류준, 한재익, 백하늘, 김재현, 박노창, 이용환†(한국전자기술연구원, 신재생에너지연구센터)
PST-O-3 13:30~13:45	페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양광 폐모듈의 납 회수 공정 경제성 분석 ····· 53 황성호†(고려대학교)
PST-O-4 13:45~14:00	무기 흡착소재를 이용한 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지의 수계 기반 납 회수 ····· 54 김희정, 정현석†(성균관대학교)
PST-O-5 14:00~14:15	폐 페로브스카이트 태양전지로부터 전극 조건에 따른 Ag 선택 회수 및 Ag-Pb 순차 회수 공정 최적화 ····· 55 조세연, 김수환, 박종성†(경상국립대학교)
PST-O-6 14:15~14:30	페로브스카이트/탠덤 태양전지의 파쇄거동 분석 ····· 56 노청민†, 이상헌, 이준성, 서광민, 김연주((주)원광에스앤티)

태양광 순환경제 보령 무창포 비체팰리스(레드) 15:40~17:00 좌장 : 이 진 석(한국에너지기술연구원)

PCE-O-1 15:40~15:58	이동식 태양광 재활용 전처리 설비의 운영과 방향성 ····· 59 이상헌†, 이준성, 노청민, 서광민, 김연주((주)원광에스앤티)
PCE-O-2 15:58~16:10	양면유리형 태양광 폐모듈의 유리분리 기술: 글로벌 기술 현황 및 저비용·친환경 기술개발 동향 ····· 60 이진석†(한국에너지기술연구원), 손주희(한국에너지기술연구원), 신우균(한국에너지기술연구원), 고석환(한국에너지기술연구원), 강기환(한국에너지기술연구원)
PCE-O-3 16:10~16:22	폐태양광 패널 자원순환을 위한 EVA 필름 제거 및 선택적 은 회수 기술 개발 ····· 61 정영균(한국과학기술연구원), 이윤(한국과학기술연구원, 고려대학교), 이경석(한국과학기술연구원, 서울대학교), 최재우†(한국과학기술연구원, 과학기술연합대학원대학교)
PCE-O-4 16:22~16:34	폐 태양광 모듈 파쇄물로부터 구리 리본 및 실리콘의 순차적 건식 선별 회수 ····· 62 김수환, 박종성†(경상국립대학교 미래융복합기술연구소)
PCE-O-5 16:34~16:46	폐태양광 실리콘 재활용 분말을 활용한 고부가가치 소재 제조 기술 ····· 63 위상욱†, 한민우((주)미코)
PCE-O-6 16:46~16:58	이동식 태양광 폐패널 재활용 설비(SolreBorn)의 소음·진동 운전환경 분석평가 ····· 64 최광일, 이재영, 이재춘†((재)전라남도환경산업진흥원)
PCE-O-7 16:58~17:10	고정식 및 이동식 태양광 재활용 공정의 전과정평가(LCA) 평가 방법론에 대한 연구 ····· 65 문은진†, 이채미, 박철(한국건설생활환경시험연구원)

10월 15일(목)

2026 연구개발특구 지역혁신 실증프로젝트 기획회의 II — 보령 무창포 비체팰리스(그랜드볼룸) 09:00~10:20 — 좌장 : 윤 성 민(한국생산기술연구원)

09:00~10:20 — 2026 연구개발특구 지역혁신실증프로젝트 기획회의 II

해상풍력기술과 해양 FPV시스템 I — 보령 무창포 비체팰리스(골드) 13:30~14:50 — 좌장 : 이 상 길(젠텍이엔씨)

FPV-O-1 13:30~13:50
동남아 해양 FPV 경제성 확보를 위한 설계 최적화 및 산업화 전략 연구 ····· 69
이상길†, 이동환((주)젠텍이엔씨), 김문옥((주)스펙엔지니어링 와이엔피), 김성웅(세아제강), 윤상준(고등기술연구원)

FPV-O-2 13:50~14:10
다중 배열 부유식 태양광 시스템의 설계·해석을 위한 자동화 프로세스 연구 ····· 70
이상길, 이주연†, 이동환(젠텍이엔씨), 이승재(한국해양대학교), 이민준(칭화대학교)

FPV-O-3 14:10~14:30
컨테이너 운송을 고려한 해상 부유식 태양광 플랫폼의 표준화·모듈화 전략 ····· 71
이규석((주)스펙엔지니어링와이엔피), 김문옥†((주)스펙엔지니어링와이엔피), 김범식((주)스펙엔지니어링와이엔피), 정용일((주)스펙엔지니어링와이엔피)

FPV-O-4 14:30~14:50
강재 해상 부유식 태양광 구조물의 단면최적화 시스템 개발 및 검증 ····· 72
김범식((주)스펙엔지니어링와이엔피 기술연구소), 김정수(한국건설기술연구원), 김문옥†, 이규석, 정용일((주)스펙엔지니어링와이엔피 기술연구소)

AI기반 전력변환장치 전주기 운영관리 — 보령 무창포 비체팰리스(그랜드볼룸) 15:10~16:30 — 좌장 : 고 석 환(한국에너지기술연구원)

15:10~16:30 — AI기반 전력변환장치 전주기 운영관리

차세대 우주 태양전지 — 보령 무창포 비체팰리스(옐로우) 15:10~16:30 — 좌장 : 박 종 성(경상국립대학교)

NSS-O-1 15:10~15:20
레이저 어블레이션 마스크 기반 간섭리소그래피 마이크로 나노 계층적 구조 제작 ····· 79
황준식†(경상국립대학교)

NSS-O-2 15:20~15:30
고선택적 암모니아 전기합성을 위한 수소 발생 반응 비활성 질화붕소 지지체와 산소공공이 풍부한 몰레브덴 산화물 ····· 80
박재현†(경상국립대학교)

NSS-O-3 15:30~15:40
실용적 리튬-황 전지의 폴리설파이드 전환을 위한 결함이 풍부한 열적 결합 1T/2H $MoSe_2$ 다기능 전기촉매 ····· 81
이재원(경상국립대학교 에너지시스템공학과), 정현영†(경상국립대학교 에너지시스템공학과, 경상국립대학교 에너지공학과)

NSS-O-4 15:40~15:50
계면 제어를 통한 우주용 페로브스카이트 태양전지 개발 ····· 82
양석주†(경상국립대학교 화학공학과)

NSS-O-5 15:50~16:00
우주 페로브스카이트 태양전지의 성능 열화 예측 및 효율 향상을 위한 인공지능 ····· 83
강동한, 박종성†(경상국립대학교), 이다슬(경상국립대학교 경남항공우주방위산업연구원)

NSS-O-6 16:00~16:10
우주 태양전지 활용을 위한 와이드 밴드갭 페로브스카이트 태양전지의 정공수송층 분자 구조에 따른 양성자 조사 열화 거동 ····· 84
장수성(경상국립대학교 에너지시스템공학과), 이다슬(경상국립대학교 경남우주항공방산과학기술원), 김수환(경상국립대학교 미래융복합기술연구소), 박종성†(경상국립대학교 에너지시스템공학과, 경상국립대학교 미래융복합기술연구소)

NSS-O-7 16:10~16:20
우주태양광용 전고체 이차전지를 위한 LLZTO 고체전해질의 초고속 고온 소결 ····· 85
윤기혁, 이재연(동국대학교 에너지신소재공학과), 안건형†(동국대학교 에너지신소재공학과, 동국대학교 에너지화공신소재공학과)

PVT-HP AI 연계 냉난방 시스템 보령 무창포 비체팰리스(핑크) 15:10~16:30 좌장 : 육 세 진(한양대학교)

PVT-HP-O-1 15:10~15:30	히트파이프 적용 및 유로 구성에 따른 LED 조명의 냉각 성능 평가 ····· 89 정재철, 남학호, 육세진†(한양대학교)
PVT-HP-O-2 15:30~15:45	원통형 핀-핀 상단부에 나선형 구조 적용에 따른 힛싱크 자연대류 냉각 성능 향상 ····· 90 남학호, 정재철, 육세진†(한양대학교)
PVT-HP-O-3 15:45~16:00	벌집 형상 유로를 적용한 수냉식 PVT 모듈의 전산유체해석 및 AI 기반 최적 설계 ····· 91 최관용(한국생산기술연구원 에너지나노그룹, 한양대학교), 김영원†(한국생산기술연구원 에너지나노그룹)
PVT-HP-O-4 16:00~16:15	20kWth급 PVT - 공기열원 히트펌프 연계 냉난방 시스템 설계 ····· 92 표세준†, 서성준, 정수창((주)세진엔지니어링)
PVT-HP-O-5 16:15~16:30	인공지능 기반 태양광·태양열 보조 공기열 히트펌프 시스템 최적 운전 기술 개발 ····· 93 박형민, 박지호, 김현식, 윤정원†(광주과학기술원)

해상풍력기술과 해양 FPV시스템 II 보령 무창포 비체팰리스(골드) 15:10~16:30 좌장 : 김 용 욱(고등기술연구원)

FPV-I-1 15:10~15:30	AI기반 풍력단지 바람장 예측 ····· 73 이상봉†(한국과학기술원)
FPV-O-5 15:30~15:50	해상 부유식 태양광 발전시스템의 경제성 및 발전단가 분석 ····· 74 박미호†, 장민서, 윤상준(고등기술연구원)
FPV-O-6 15:50~16:10	해양재생에너지의 경제성 향상을 위한 해상풍력 허브의 사업모델 ····· 75 이현주, 윤상준, 임동명, 박미호, 안중은, 김용욱†
FPV-O-7 16:10~16:30	국내 해역환경을 고려한 TLP형 부유식 에너지 허브 단위 모듈의 개념설계 및 동적응답 해석 연구 ····· 76 이찬희, 이상길†, 이동환(젠텍이엔씨)

AI기반 O&M플랫폼개발 보령 무창포 비체팰리스(핑크) 16:40~18:00 좌장 : 고 석 환(한국에너지기술연구원)

AIO-O-1 16:40~17:00	드론 열화상과 I-V 측정을 이용한 태양광발전소 오염(Soiling) 손실 교차검증 ····· 97 최훈주†, 박지환, 이채한, 김민욱((주)에스테코 기술연구소)
AIO-O-2 17:00~17:15	대규모 재생에너지 사업운영을 위한 사업관리시스템에 관한 연구 ····· 98 정준영†, 허수진, 이동기, 이동규, 박채영(한국남동발전)
AIO-O-3 17:15~17:30	AI 학습기반 태양광 발전소 디지털O&M 플랫폼 개발 ····· 99 김창준†, 권영서((주)제이케이코어)
AIO-O-4 17:30~17:45	측정 및 추론 성능지표를 이용한 태양광발전시스템의 비지도학습 기반 이상탐지 ····· 100 고석환†, 신우균, 전병기, 황혜미, 주영철, 이진석(한국에너지기술연구원)
AIO-O-5 17:45~18:00	광학 분석 기반 태양전지 표면 오염 및 성능 저하 정량 평가 ····· 101 임종철†(충남대학교)

Oral Session 건물에너지설비 Building Energy Systems (BES)

일시 : 2026년 10월 15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(옐로우)

10월 15일(목)		
BES Session	보령 무창포 비체팰리스(옐로우) 09:00~10:20	좌장 : 곽 영 훈(서울시립대학교)
BES-O-1 9:00~09:13	디지털 트윈 기반 공동주택 공기열 히트펌프의 AI 예측제어 프레임 워크 ····· 105 신예빈, 이헌민, 최원종(한국에너지기술연구원, 한양대학교 / 건축공학과), 안영섭, 전병기(한국에너지기술연구원), 정재원(한양대학교 / 건축공학과), 김민휘†(한국에너지기술연구원)	
BES-O-2 9:13~09:26	MPC 및 RL 기반 제어기법의 평가에서 에너지 절감 효과가 명확히 제시되지 않는 이유는 무엇인가? ····· 106 타립아부, 조재완†(인하대학교 스마트시티공학과)	
BES-O-3 9:26~09:39	주거용 열회수 환기장치 시험 챔버 압력조건 도출을 위한 고층 공동주택 연간 압력모델 개발 ····· 107 조경주†, 김시현(한국건설기술연구원 건축에너지연구본부)	
BES-O-4 9:39~09:52	AHU 덕트 내 정적 공기 혼합장치의 혼합 성능에 대한 실측 기반 CFD 해석 모델 검증 ····· 108 이준우, 정한웅(대진대학교 건축공학과), 정민재(대진대학교 스마트시티건설융합공학과), 강경모†(대진대학교 건축공학과), 김용엽(에이스 공조(주))	
BES-O-5 9:52~10:05	기후변화에 따른 그린리모델링 기술조합의 최적화 및 성능 분석 ····· 109 김은아, 문선혜†, 송현근, 임서진(서울시립대학교 건축학부), 김내경, 김지원(서울시립대학교 건축공학과)	
BES-O-6 10:05~10:18	과거 실측 건물 에너지 부하 데이터의 현재화를 위한 부하 보정모델 개발 ····· 110 정장엽, 윤영직†(국립한밭대학교)	

Oral Session 제로에너지건물 Zero Energy Buildings (ZEB)

일시 : 2026년 10월 15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(골드)

10월 15일(목)		
ZEB Session	보령 무창포 비체팰리스(골드) 09:00~10:20	좌장 : 최 연 희(강남대학교)
BES-O-7 09:00~09:13	District Building Energy Modeling 구축을 위한 입력 자료 요구 수준 ····· 113 임지수, 임현우†(건국대학교 건축대학 건축학부)	
ZEB-O-1 09:13~09:26	외피내장 히트펌프의 최적 운영을 위한 HILS 기반 실증 방법론 ····· 114 서정훈, 강희석(인하대학교 스마트시티공학과), 조재완†(인하대학교 건축공학과), 정영선(한국건설기술연구원 건축에너지연구본부)	
ZEB-O-2 09:26~09:39	고층형 ZEB 3등급 공동주택 운영단계 성능진단 관측요소 사례조사 ····· 115 이주현†(조선대학교)	
ZEB-O-3 09:39~09:52	신축 제로에너지 공동주택 에너지 성능 M&V 방법론의 문헌 고찰과 적용성 검토 ····· 116 이성주, 박시현†(한국토지주택공사 토지주택연구원)	
BEE-O-1 09:52~10:05	노후 임대주택 고령가구의 냉방 대응 행태에 따른 폭염기 실내 온열 환경 특성 분석 ····· 117 구자빈, 김난화, 강동화†(서울시립대학교 건축공학과)	
ZEB-O-5 10:05~10:18	기후 및 건물 조건에 따른 태양열 기반 액체식 제습 외조기 시스템의 집열기 면적 산정 프로그램 개발 ····· 118 박광훈, 문선우, 임한솔†(건축설비시스템공학과)	

Oral Session 건축환경 Building Environment Engineering (BEE)

일시 : 2026년 10월 15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(옐로우)

10월 15일(목)		
BEE Session 1	보령 무창포 비체팰리스(옐로우) 10:40~12:00	좌장 : 김 동 수(한밭대학교)
BEE-O-2 10:40~10:53	강화학습 기반 다중 에이전트를 활용한 열 부하공유 시스템 구축 ····· 121 김지영, 이현수, 김인애(건국대학교 건축대학 건축학부), 심지수(성균관대학교 탄소중립에너지복지 연구센터), 임현우†(건국대학교 건축대학 건축학부)	
BEE-O-3 10:53~11:06	주거 건물에서의 공기식 BIPVT 시스템 적용에 따른 연간 효과에 관한 연구 ····· 122 오수호, 최영진†(경기대학교, 건축공학과)	
BEE-O-4 11:06~11:19	하계 바닥 표면 열환경 보정을 위한 동시 냉난방 시스템의 냉동사이클 TRNSYS Type 개발 ····· 123 이건희, 이유진, 신대욱†(국립군산대학교)	
BEE-O-5 11:19~11:32	Low-E 코팅 구성에 따른 복합 진공 복층창의 유리면 온도 분포 및 연간 실내 유입 열량 분석 ····· 124 이준영, 김민우, 김동수, 윤종호†(국립한밭대학교 건축공학과)	
BEE-O-6 11:32~11:45	태양광 모듈의 구조 및 유리 조건에 따른 화재거동 특성에 관한 실험적 연구 ····· 125 고종환, 이지향†(국립소방연구원)	
BEE-O-7 11:45~11:58	5세대 열네트워크 시스템의 예측제어 기반 재계획 주기에 따른 운전비용 및 연산성능 분석 ····· 126 최원종, 신예빈, 이헌민(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, 한양대학교 건축공학과), 이왕제, 안영섭(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실), 정재원(한양대학교 건축공학과), 김민휘†(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실)	
BEE Session 2	보령 무창포 비체팰리스(옐로우) 13:30~14:50	좌장 : 신 대 욱(국립군산대학교)
BEE-O-8 13:30~13:43	열화상 이미지 해상도에 따른 열괘적성 예측성능 분석 및 개선방안 ····· 127 송현근, 정서희(서울시립대학교 건축학부), 김지원, 홍장호(서울시립대학교 건축공학과), 곽영훈, 문선혜†(서울시립대학교 건축학부)	
BEE-O-9 13:43~13:56	다중 에너지원 기준 수요 스케줄 산정을 위한 아파트 단지 필요 계측 세대 수 분석 ····· 128 김인섭, 임현우†(건국대학교 건축대학 건축학과)	
BEE-O-10 13:56~14:09	웨어러블 센서 신호를 활용한 심박변이도 특성 분석 및 건강 모니터링 프로그램 검증 ····· 129 배지원, 임재한†(이화여자대학교 건축도시시스템공학과)	
BEE-O-11 14:09~14:22	창호의 평가 경계에 따른 태양열취득률 차이: 창세트와 유리 단위 SHGC의 실험적 비교 ····· 130 윤태균, 이승준, 신현철, 이상문†((재)한국건설생활환경시험연구원)	
BEE-O-12 14:22~14:35	저소득층 주거의 계절별 비대칭적 반등효과 ····· 131 최연희†(강남대학교 부동산건설학부)	
ZEB-O-4 14:35~14:48	실내 루버형 집광채광장치의 월간 조명에너지 절감 효과 평가를 위한 표준 분석 방법 ····· 132 임재한†(이화여자대학교), 심소희(패시브제로에너지건축연구소), 신미수((주)선포탈)	

Oral Session 태양광에너지 Photovoltaic Energy (PVE)

일시 : 2026년 10월 15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(레드)

10월 15일(목)

PVE Session 1 보령 무창포 비체팰리스(레드) 09:00~10:20 좌장 : 신 우 균(한국에너지기술연구원)

PVE-I-1 09:00~09:20
페로브스카이트/결정질 실리콘 탠덤 태양광 소자의 국내외 표준 동향 및 개발 현황 ····· 135
임종록†, 김형진, 정태희, 김필규, 김성원(한국산업기술시험원)

PVE-O-1 09:20~09:35
차량 일체형 태양광 모듈(VIPV)의 발전 특성 분석 ····· 136
김태현, 고재우, 정태호, 이병홍†(현대자동차)

PVE-O-2 09:35~09:50
차량 통합형 태양광(VIPV) 적용을 위한 페로브스카이트 태양전지의 조도 및 환경별 발전 성능 평가 ····· 137
주소연, 강리라, 김주애, 이병홍†(현대자동차)

PVE-O-3 09:50~10:05
광전자 특성 분석 기반 페로브스카이트 결정화 거동 규명 ····· 138
한혜지, 임종철†(충남대학교)

PVE-O-4 10:05~10:20
KPFM을 이용한 페로브스카이트/실리콘 탠덤셀의 국소 표면전위 및 옥외 열화 거동 분석 ····· 139
채승현, 김도형†(충북대학교), Wei Li(우한공과대학교), 윤재성(서리대학교), 조윤애, 김경수(한국에너지기술연구원), 박연우, 윤재호(한국에너지공과대학교)

PVE-O-5 10:20~10:35
표면 패시베이션을 통한 우주용 페로브스카이트 태양전지의 알파입자 유도 트랩 형성 억제 ····· 140
이다슬, 서형원(경상국립대 에너지공학과), 한혜지(충남대 에너지과학기술학과), 김수환, 장수성, 강상원(경상국립대 에너지공학과), 조성원(중앙대 에너지시스템공학부), 채승현(충북대 신소재공학과), 강동원(중앙대 에너지시스템공학부), 김도형(충북대 신소재공학과), 임종철(충남대 에너지과학기술학과), 김동석(한국원자력연구원), 박종성†(경상국립대 에너지공학과)

PVE Session 2 보령 무창포 비체팰리스(레드) 10:40~12:00 좌장 : 이 용 환(한국전자기술연구원)

PVE-I-2 10:40~11:00
분광 엘립소메트리를 이용한 혼합 페로브스카이트 $MA_xFA_{1-x}Pb(I_3)y(Br_3)_{1-y}$ 박막의 정밀 복소 광학 상수 및 진성 밴드갭 규명 ····· 141
김수민†(한국세라믹기술원), 제용훈, 이태규, 남동인(부산대학교, 한국세라믹기술원), 김태현(한국세라믹기술원), 김준영(부산대학교, 한국세라믹기술원)

PVE-O-6 11:00~11:15
초저조도 전방향 광검출을 위한 투명 광기전성 물-반도체 계면 ····· 142
산 보 티, 모레 비벡 모한, 말케시쿠마 파텔, 소라브 호세인, 엠디 아리퍼 라만 바르노, 김준동†(인천대학교 전기공학과)

PVE-O-7 11:15~11:30
ZBB 태양전지 Ribbon 및 Finger 전극의 결합에 따른 등가회로 모델 개발 ····· 143
백종길, 송형준†(서울과학기술대학교 안전공학과)

PVE-O-8 11:30~11:45
열·습도 환경에서 산화알루미늄 나노입자로 제어한 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지 계면의 나노스케일 분석 ····· 144
Michael S. A. Kamel(Chungbuk National University, Minia University), Minkyu Kim, Jongchul Lim (Chungnam National University), Jae Sung Yun(University of Surrey), Wei Li(Wuhan University of Technology), Dohyung Kim(Chungbuk National University†

PVE-O-9 11:45~12:00
산소 함량 제어를 통한 NiO/WO_3 이종접합 기반 투명 자가구동 UV 광검출기 ····· 145
조예빈, 전서준, 산 보 티, 김준동†(인천대학교 전기공학과)

10월 15일(목)

PVE Session 3 보령 무창포 비체팰리스(레드) 13:30~14:50 좌장 : 오 원 욱(고려대학교)

PVE-I-3 13:30~13:50	은저감 전도성 접착제를 적용한 쉉글드 태양광 모듈의 장기 신뢰성 평가 ····· 146 전기석, 김건우, 정채환†(한국생산기술연구원)
PVE-O-10 13:50~14:05	태양광 모듈 열화상 음영 패턴 합성을 위한 국소 복원 기반 잔차 생성 모델 개발 ····· 147 문정민, 김창헌†(한국광기술원)
PVE-O-11 14:05~14:20	TCN-Attention을 이용한 태양광 패널 3상태 이상 분류 ····· 148 권희재, 이수천, 우태걸, 박강문†(국립한국교통대학교 전자공학과)
PVE-O-12 14:20~14:35	태양광, ESS 및 히트펌프를 활용한 공동주택 온실가스 감축량 산정방법 및 경제성 분석 연구 ····· 149 조성대(한국기계전기전자시험연구원 국제개발사업센터), 이동헌†(한국공학대학교 융합기술에너지대학원)
PVE-O-13 14:35~14:50	독립계통 태양광 DC-DC 직접연계 기반 그린수소 생산 효율 향상 연구 ····· 150 이지은†, 양동건, 조현식, 이성현(K-water 연구원)
PVE-O-14 14:50~15:05	진동형 히트파이프를 적용한 태양광 모듈의 하계 옥외 냉각 성능 및 발전량 개선 실증 ····· 151 김준회, 박지환, 홍주혁, 윤영직†(국립한밭대학교)

PVE Session 4 보령 무창포 비체팰리스(레드) 15:10~16:30 좌장 : 이 상 희(한국에너지기술연구원)

PVE-I-4 15:10~15:30	페로브스카이트 태양전지의 지속가능성 향상을 위한 친환경 제조 및 재활용 공정 ····· 152 김희정†(성균관대학교)
PVE-I-5 15:30~15:45	Phenethylammonium Iodide를 이용한 삼중 양이온 페로브스카이트 태양전지의 결함 패시베이션 ····· 153 김미정(국립군산대학교 물리학과, 국립군산대학교 기초과학연구소), 강하나(국립군산대학교 물리학과), 양정엽†(국립군산대학교 물리학과, 국립군산대학교 기초과학연구소)
PVE-O-15 15:45~16:00	페로브스카이트 태양광 소자의 안정성 향상을 위한 저온 봉지 기술 ····· 154 김문회(군산대학교 물리학과), 김미정(군산대학교 기초과학연구소), 김기성(군산대학교 물리학과, 한국핵융합에너지연구원 플라즈마산업기술연구팀), 강하나(군산대학교 물리학과), 송재진(군산대학교 에너지과학공학과), 양정엽†(군산대학교 물리학과, 군산대학교 기초과학연구소, 군산대학교 에너지과학공학과)
PVE-O-16 16:00~16:15	하이브리드 투명 전도체 기반 유연 투명 히터 ····· 155 정목현, 조승희, 고성진, 조예빈, 전서준, 김준동†(인천대학교 전기공학)
PVE-O-17 16:15~16:30	수층 적용을 통한 투명 광대역 광검출기의 성능 향상 ····· 156 전서준, 조승희, 고성진, 조예빈, 정목현, 김준동†(인천대학교 전기공학과)

Oral Session 태양열융합 Solar Thermal Convergence (STC)

일시 : 2026년 10월 15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(핑크)

10월 15일(목)		
STC Session	보령 무창포 비체팰리스(핑크) 09:00~10:20	좌장 : 전 병 기(한국에너지기술연구원)
STC-O-1 09:00~09:20	태양열 히트펌프의 실증 분석과 설계 민감도 해석 ····· 159 권시은(과학기술연합대학원대학교, 한국기계연구원), 임병주, 이가람(한국기계연구원), 박창대†(과학기술연합대학원대학교, 한국기계연구원)	
STC-O-2 09:20~09:40	PVT 회귀분석 기반 산업단지 재생에너지 시뮬레이션 개발 ····· 160 이헌민, 최원종, 신예빈(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, 한양대학교 건축공학과), 전병기, 김종규(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실), 정재원(한양대학교 건축공학과), 김민휘†(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실)	
STC-O-3 09:40~10:00	QUBO 기반 양자영감 최적화를 활용한 PVT-ESS-TES 통합시스템의 최적운영 ····· 161 전병기†, 주홍진(한국에너지기술연구원)	

Oral Session 풍력에너지 Wind Energy Conversion (WEC)

일시 : 2026년 10월 14일(수)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(실버)

10월 14일(수)		
WEC Session	보령 무창포 비체팰리스(실버) 15:40~17:00	좌장 : 김 용 욱(고등기술연구원)
WEC-I-1 15:40~16:00	탈석탄 보령, 해상풍력으로 지역 재활력 프로젝트 추진 ····· 165 문혜경(보령시청 에너지과 그린에너지팀)	
WEC-O-1 16:00~16:20	해상풍력자원지도 편의 보정을 통한 풍력잠재량 산정 ····· 166 김진영†, 윤창열, 김현구, 김창기, 오동건(한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실), 곽지혜(한국에너지기술연구원 태양광연구단)	
WEC-O-2 16:20~16:40	다양한 풍력발전기 등급에서 IEA 22MW Reference Wind Turbine의 적용방안 제시 ····· 167 최정철†, 임소진, 최정우, 박윤주(국립목포대학교)	
WEC-O-3 16:40~17:00	25MW급 부유식 해상풍력용 강-콘크리트 하이브리드 부유체의 구조설계 및 설계성과 ····· 168 김문옥†, 이규석((주)스펙엔지니어링와이엔피)	

Oral Session 신재생융합 Renewable Energy Convergence (REC)

일시 : 2026년 10월 15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(핑크)

10월 15일(목)		
REC Session 1	보령 무창포 비체팰리스(핑크) 10:40~12:00	좌장 : 최 휘 웅(전남대학교)
REC-I-1 10:40~11:00	PVT·데시컨트·히트펌프 기반 재생열 탈탄소 냉난방 ····· 171 홍희기†(경희대학교 기계공학과)	
REC-O-1 11:00~11:20	PVT-Desiccant-Heat pump 복합 냉방 시스템의 하계 운전 특성 분석 ····· 172 이준용, 김윤수, 윤용수(경희대학교 기계공학과), 홍희기, 송재만†(경희대학교 기계공학과 교수)	
REC-O-2 11:20~11:40	공기 유량 분배를 고려한 단일 패스 이중 유동 공기식 PVT 시스템의 에너지 성능 분석 ····· 173 안건용, 정현석, 안태용(전남대학교 냉동공조공학과 대학원), 최광환(부경대학교 냉동공조공학과), 문광암, 최휘웅†(전남대학교 냉동공조공학과)	
REC-O-3 11:40~12:00	고팽창비 ORC 축류터빈의 초음속 부분유입 설계론 ····· 174 박자운, 김영원†(한국생산기술연구원 에너지나노그룹)	
REC Session 2	보령 무창포 비체팰리스(핑크) 13:30~14:50	좌장 : 김 유 진(한국건설기술연구원)
REC-O-4 13:30~13:50	무차원 상사성 결정층을 이용한 이중 열원 히트펌프 시스템 Solver Free Model Predictive Control ····· 175 김유진, 배상무, 배민정, 최현중†(한국건설기술연구원)	
REC-O-5 13:50~14:10	공정열 공급을 위한 Low GWP 냉매 적용 캐스케이드 히트펌프의 동절기 동적 성능 분석 ····· 176 안태용, 정현석, 안건용(전남대학교 냉동공조공학과 대학원), 최휘웅†(전남대학교 냉동공조공학과, 전남대학교 지능형국방우주소재부품연구소)	
REC-O-6 14:10~14:30	대공간 스포츠시설의 열존 및 공간 높이에 따른 1차에너지소요량 분석 ····· 177 유한서(과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과, 한국건설기술연구원 에너지연구본부), 최경석†, 임지연, 이우창(한국건설기술연구원 에너지연구본부)	
REC-O-7 14:30~14:50	방위 가변에 따른 수직 양면형 PV 루버 시스템의 발전성능 비교 · 분석 ····· 178 장준원(국립공주대학교 에너지시스템공학과), 유휘준, 박승주, 이규영(국립공주대학교 그린스마트건축공학과), 김진희(국립공주대학교 그린에너지기술연구소), 김준태†(국립공주대학교 그린스마트건축공학과/에너지시스템공학과(대학원))	

Oral Session 자원량평가 Renewable Energy Resources (RER)

일시 : 2026년 10월 15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(실버)

10월 15일(목)		
RER Session 1	보령 무창포 비체팰리스(실버) 09:00~10:20	좌장 : 허 태 민(서울대학교)
RER-O-1 09:00~09:16	한반도 주변 해역의 겨울철 풍력자원 변동과 북극진동의 연계성: 장기 재분석자료와 국가 해상풍력자원지도(2026년판) 분석 ····· 181 이민규, 오동건†, 김진영, 김창기, 김현구(한국에너지기술연구원, 신재생빅데이터연구실)	
RER-O-2 09:16~09:32	달 표면 태양 위치 계산의 데이터 기반 잔차 보정 유효성 분석 ····· 182 최민태, 최요순†(세종대학교 에너지자원공학과)	
RER-O-3 09:32~09:48	Spectral Splitting 기반 PV - Linear Fresnel Reflector 하이브리드 시스템의 국내 적용성 평가 연구 ····· 183 김창기†, 김현구, 오명찬(한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실), Yu Xie(National Laboratory of the Rockies)	
RER-O-4 09:48~10:04	SAM Copilot: 자연어 기반 태양광 시스템 설계·분석 및 의사결정 자동화 ····· 184 김태헌, 최요순†(세종대학교 에너지자원공학과)	
RER-O-5 10:04~10:20	계통접속용량 유지형 태양광 리파워링의 잠재량 평가 ····· 185 김현구, 오명찬, 윤창열, 김창기†(한국에너지기술연구원)	
RER Session 2	보령 무창포 비체팰리스(실버) 10:40~12:00	좌장 : 최 요 순(세종대학교)
RER-I-1 10:40~11:00	브라질 지상형·옥상형 태양광 자원 잠재량 비교 평가 ····· 186 Paula C. S. Borba(프린스턴 대학교), 문준†(홍익대학교)	
RER-O-6 11:00~11:15	K-HELM: 한국 시군구·시간대·용도별 전력수요 데이터, 2004 - 2050 ····· 187 최현태†(한국과학기술원)	
RER-O-7 11:15~11:30	PyPSA와 GenX/Macro 계열 모델의 재생에너지 자원량 평가 방법론 비교와 국내 적용 시사점 ····· 188 이지현(홍익대학교 건설환경공학과), 허태민†(서울대학교 첨단융합학부, 서울대학교 건설환경도시공학부)	
RER-O-8 11:30~11:45	제주 풍력단지 실측 비교를 통한 PyPSA-Earth 기반 시간별 풍력 이용률 추정의 국내 적용성 평가 ····· 189 박준형(홍익대학교 건설환경공학과), 허태민†(서울대학교 첨단융합학부, 서울대학교 건설환경도시공학부)	
RER-O-9 11:45~12:00	도시 구조 특성을 고려한 기후변화 시나리오 기반 전력 수요 민감도 분석 ····· 190 유승철, 김창기†(한국에너지기술연구원)	
RER Session 3	보령 무창포 비체팰리스(실버) 13:30~14:50	좌장 : 윤 창 열(한국에너지기술연구원)
RER-O-10 13:30~13:50	수열에너지원 자원지도 및 잠재량 분석 플랫폼 개발 ····· 191 박영석, 오명찬, 김보영, 강민구, 윤창열†(한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실)	
RER-O-11 13:50~14:05	수열에너지 자원지도 및 잠재량 분석을 위한 수열원 공급방식의 다변화 ····· 192 이용구, 최윤창, 안수황, 조용, 최종웅†(K-water)	
RER-O-12 14:05~14:20	수열원별 균등화열생산비용(LCOH) 산정을 위한 프로세스 기반 기술비용 DB 구축 방안 설계: 상수·하수·하천수·지하수 열원의 LCOH 예비 산정 결과를 중심으로 ····· 193 조상민†, 김종익(한국공학대학교)	

RER-O-13 14:20~14:35	수열에너지 기반 건물에너지 절감을 통한 탄소중립 및 RE 100 달성방안 ····· 194 윤수철, 김시헌†(안양대학교)
RER-O-14 14:35~14:50	Landsat 지표면온도와 지상관측자료를 활용한 전국 단위 고해상도 하천수온 예측을 위한 통계 분석 ····· 195 김준교(서울대학교 에너지시스템공학부), 오명찬, 윤창열(한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실), 박형동†(서울대학교 에너지자원공학과, 서울대학교 에너지자원신기술연구소)
RER Session 4	보령 무창포 비체팰리스(실버) 15:10~16:30 좌장 : 김 창 기(한국에너지기술연구원)
RER-I-2 15:10~15:30	재생e 보급전망의 전기본 반영 현황 ····· 196 김준한(전력거래소)
RER-O-15 15:30~15:45	기후전망 앙상블 기반 일별 신뢰도 급전을 이용한 재생에너지 중심 전력계통 공급적정성 스트레스 테스트 ···· 197 석의찬(서울대학교 건설환경도시공학부), 변지은(임페리얼 칼리지 런던 건설환경공학부), 송준호†(서울대학교 건설환경도시공학부)
RER-O-16 15:45~16:00	수열에너지 잠재량 산정을 위한 전국 표층수온 예측 및 지도화 기초 연구 ····· 198 오명찬†, 김보영, 강민구, 박영석, 윤창열(한국에너지기술연구원)
RER-O-17 16:00~16:15	공공데이터 기반 하천수열 에너지 전국 자원지도 구축 및 잠재량 평가 ····· 199 김보영†, 윤창열, 오명찬, 박영석, 강민구, 김창기(한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실)
RER-O-18 16:15~16:30	서울 상수도 수열자원의 격자 분석과 행정구역별 통계분석 및 시각화 ····· 200 박영석, 강민구, 오명찬, 김보영, 윤창열†(한국에너지기술연구원)

Oral Session 에너지저장 및 섹터커플링 Energy Storage System & Sector Coupling (ESS&SC)

일시 : 2026년 10월 14일(수)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(옐로우)

10월 14일(수)		
ESS&SC Session	보령 무창포 비체팰리스(옐로우) 13:00~14:30	좌장 : 손 명 우(한국광기술원)
ESS&SC-O-1 13:00~13:15	20 Ah $LiFePO_4$ 파우치 셀의 냉각수 유동 중단 대응을 위한 대향면 CPCM-액체 냉각 하이브리드 열관리 시스템의 수치적 연구 ····· 203 무하마드 다일, 김영원†(한국생산기술연구원)	
ESS&SC-O-2 13:15~13:40	계절별 운전상태를 고려한 집합 히트펌프의 주파수응답 가용용량 산정 및 계통 동특성 평가 ····· 204 최우영†(한국전기연구원), 김고은(한국전기연구원, 전북대학교 전기공학과), 이태승(한국전기연구원)	
ESS&SC-O-3 13:40~14:05	MILP-Based Dispatch Optimization and Techno-Economic Evaluation of a Power-to-Heat Building Energy System with Demand Response ····· 205 파룩(과학기술연합대학원대학교, 한국기계연구원 탄소중립기계연구소), 임병주, 조성훈, 이가람(한국기계연구원 탄소중립기계연구소), 권시은, 박창대†(과학기술연합대학원대학교, 한국기계연구원 탄소중립기계연구소)	
ESS&SC-O-4 14:05~14:30	히트펌프-TES 연계 건물군 열네트워크 실증시스템 구축 및 운전 최적화 ····· 206 최원철†, 조장현(선다코리아)	

Poster Session

일시 : 2026년 10월 14일(수)~15일(목)
장소 : 보령 무창포 비체팰리스(그랜드볼룸)

태양광에너지 Photovoltaic Energy (PVE)

좌장 : 배수현(한국에너지기술연구원)

PVE-P-1 태양광 모듈의 전과정평가를 위한 데이터 분류 및 정의에 대한 연구 ····· 209
송다혜, 문정민, 김창헌†(한국광기술원, AI에너지연구센터)

PVE-P-2 태양전지 선별 기준이 태양광 모듈 출력 편차에 미치는 영향 ····· 210
배수현†(한국에너지기술연구원)

PVE-P-3 태양광 모듈 전주기 이력관리를 위한 고장 유형 분류체계 연구 ····· 211
송다혜, 문정민, 김창헌†(한국광기술원, AI에너지연구센터)

PVE-P-4 열화 가속 모델을 이용한 태양광 모듈 수명주기 시뮬레이션 연구 ····· 212
김창헌†(한국광기술원), 김주희((주)동서기공), 문정민(한국광기술원)

PVE-P-5 우주용 태양광 모듈을 위한 필름 기반 초경량 모듈 소재 및 공정 ····· 213
류준, 박예랑, 권다영, 한재익, 백하늘, 김재현, 박노창, 이용환†(한국전자기술연구원, 신재생에너지연구센터)

PVE-P-6 클래스 불균형을 고려한 태양광 모듈 전계발광 영상의 다중 클래스 결함 분할 모델 개발 ····· 214
문정민, 김창헌†(한국광기술원)

PVE-P-7 양이온 교환과 공정 중 황 증착을 통한 100℃ 저온 공정 기반 $AgBiS_2$ p-i-n 태양전지 ····· 215
최민호, 권나영, 나누리(경상국립대학교 에너지시스템공학과), 김수환(경상국립대학교 미래융복합기술연구소),
박종성†(경상국립대학교 에너지시스템공학과, 경상국립대학교 미래융복합기술연구소)

PVE-P-8 박막 태양전지를 위한 순차 스퍼터링 및 후속 황화 처리를 통한 $AgBiS_2$ 박막의 화학양론적 조성 제어 ····· 216
권나영, 나누리, 김수환, 박종성†(경상국립대학교 에너지시스템공학과)

PVE-P-9 재사용 태양광 모듈 이력관리를 위한 접착형 RFID 태그의 옥외환경 신뢰성 평가 ····· 217
류승환†, 정회경, 정득영((주)에이치에스쏠라에너지), 최진호, 남우준(충북테크노파크 차세대에너지센터 태양광산업팀)

PVE-P-10 공동 스퍼터링으로 제작된 $AgBiS_2$ 박막 태양전지의 성능 최적화 ····· 218
나누리, 권나영(경상국립대학교 에너지시스템공학과), 김수환(경상국립대학교 미래융복합기술연구소),
박종성†(경상국립대학교 에너지시스템공학과, 경상국립대학교 미래융복합기술연구소)

PVE-P-11 실물모형 화재시험 데이터 기반 외벽 BIPV 시스템의 화재 거동 특성 분석 ····· 219
최민호, 김규진, 이상문, 이승준†(한국건설생활환경시험연구원)

PVE-P-12 내해면 태양광모듈용 기반 POE 봉지재의 물리적 특성 및 접착 성능 개선 ····· 220
윤성민†, 박민준, 이칠형(한국생산기술연구원)

PVE-P-13 사용후 태양광 모듈을 활용한 저탄소 재활용 공정 및 그린 수소 생산 기술 ····· 221
박예랑, 류준, 권다영, 한재익, 백하늘, 김재현, 이용환†(한국전자기술연구원, 신재생에너지연구센터)

PVE-P-14 사례기반추론을 활용한 베리오그램 선택 기반 크리깅 기상 보간 및 태양광 발전량 예측 ····· 222
김민준†(숭실대학교)

PVE-P-15 우주 태양전지용 초광대역 밴드갭 페로브스카이트 태양전지의 양성자 내방사선 향상을 위한 페시베이션 연구 ····· 223
강상원(경상국립대학교 에너지시스템공학과), 이다슬(경상국립대학교 경남우주항공방산과학기술원),
이민우, 윤재성(호주 뉴사우스웨일스주 시드니 2052, 뉴사우스웨일스대학교 태양광 및 재생에너지공학부, 호주 첨단
태양광 연구센터(ACAP)), 박종성†(경상국립대학교 에너지시스템공학과, 경상국립대학교 경남우주항공방산과학기술원)

PVE-P-16 탠덤용 페로브스카이트 상부셀 적용을 위한 ALD-SnO2 최적화 연구 ····· 224
서형원(경상국립대학교 에너지시스템 공학과), 이다슬, 김수환(경상국립대학교 경남항공우주방산과학기술원), 박종성†(경상국립대학교 에너지시스템 공학과, 경상국립대학교 경남항공우주방산과학기술원)

PVE-P-17 머신러닝 기반 베리오그램 분류 예측기를 결합한 사례기반 크리깅 기상데이터 공간보간 및 태양광 발전량 예측 ····· 225
김미림†(숭실대학교)

PVE-P-18 전 진공 공정 기반 실리콘/페로브스카이트 일체형 태양전지 ····· 226
김기륜, 박지혜, 정민지, 임종철, 장효식†(충남대학교 에너지과학기술대학원)

PVE-P-19 부유식 변전소 적용에 따른 수상태양광시스템 송전효율 및 LCOE 비교 ····· 227
최소담, 이지은†, 이성현, 양동건, 조현식, 최면귀(한국수자원공사 연구원)

PVE-P-20 페로브스카이트 태양전지의 결함 페시베이션 및 성능 향상을 위한 2-PEAI 농도 최적화 연구 ····· 228
강하나(국립군산대학교 물리학과), 양정엽†(국립군산대학교 물리학과, 국립군산대학교 기초과학연구소, 국립군산대학교 이차전지에너지학부), 김미정(국립군산대학교 기초과학연구소), 김문회(국립군산대학교 물리학과), 송재진(국립군산대학교 이차전지에너지학부)

PVE-P-21 분자 동역학 기반, 준-2D/3D 이중층 할라이드 페로브스카이트의 수분 침투 및 열화 메커니즘 연구 ····· 229
최원규, 안영기, 정재성†(한국전자기술연구원)

PVE-P-22 진공증착법을 이용한 와이드 밴드갭 $CsPbI_3$ 기반 무기 페로브스카이트의 조성 제어 ····· 230
박지혜, 정민지, 김기륜, 임종철, 장효식†(충남대학교)

PVE-P-23 테오필린 기반 결함 패시베이션을 통한 페로브스카이트 태양전지의 광전 성능 향상 ····· 231
송재진(군산대학교 에너지학과), 강하나(군산대학교 물리학과), 김미정(군산대학교 물리학과, 군산대학교 기초과학연구소), 김문회(군산대학교 물리학과), 양정엽†(군산대학교 물리학과, 군산대학교 기초과학연구소, 군산대학교 이차전지에너지학부)

PVE-P-24 페로브스카이트 태양광 모듈의 출력평가 전 광 노출에 따른 출력 및 MPPT 특성 연구 ····· 232
김형진, 임종록†, 한성민(한국산업기술시험원)

PVE-P-25 Degradation of Perovskite/Crystalline Silicon Tandem Photovoltaic Modules under Current Injection at Constant Temperature ····· 233
강승모†(한국산업기술시험원)

PVE-P-26 태양광 구조물 변형에 따른 모듈 휨 현상이 I-V 출력 특성에 미치는 영향 ····· 234
오수정†, 김종민, 조성구, 강해권, 장주희(한국전기안전공사 전기안전연구원)

PVE-P-27 우주환경 열화 WBG 페로브스카이트의 표면 형상 특성과 SPV 열화 간 상관관계 분석: KPFM 기반 연구 ····· 235
이수민, 김도형†, 채승현(충북대학교), 박종성, 장수성(경상국립대학)

PVE-P-28 양면형 태양광 발전설비의 이종모듈 사용에 따른 안전성 분석 ····· 236
장주희†, 김종민, 조성구, 오수정, 강해권(한국전기안전공사 전기안전연구원)

PVE-P-29 폐태양전지 실리콘 알칼리 반응 및 수소 발생 거동 ····· 237
손주희(한국에너지기술연구원 신재생 시스템 연구실, 한양대학교 일반대학원 신소재공학과), 강기환(한국에너지기술연구원 태양광 연구단), 임원빈(한양대학교 일반대학원 신소재공학과), 이진석†(한국에너지기술연구원 신재생 시스템 연구실)

PVE-P-30 산 보조 습식 식각을 통한 실리콘 이종접합 태양전지 표면 개질 ····· 238
김형우†, 김용진, 김언수, 조윤애, 이상희, 유진수, 정경택, 송희은(한국에너지기술연구원)

PVE-P-31 태양광 전기추진선의 모듈식 전력계통 시스템 ····· 239
조범기, 권정민†(국립한밭대학교)

PVE-P-32 A Study on Environmental Impacts of End-of-Life Photovoltaic Panels in South Korea by LCA ····· 240
셀라 안젤리나 헐린타마(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실), 조해인, 이청희(충남대학교 환경IT융합공학과), 장용철†(충남대학교 환경공학과), 이진석(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실)

PVE-P-33 고출력 은 저감 제로버스바(ZBB) 태양광 모듈을 위한 태양전지 전극 디자인 설계 ····· 241
김언수†(한국에너지기술연구원 태양광연구단)

PVE-P-34 수소화 실리콘질화막 물성이 태양전지 성능에 미치는 종합적 영향 분석 ····· 242
김문세(한국에너지기술연구원 태양광 연구단), 이진영(충북대학교 물리학과),
심서우, 김도회, 김용진, 임규현, 민관홍, 송희은, 조윤애, 김언수, 정경택(한국에너지기술연구원 태양광 연구단),
이해석(고려대학교 에너지환경대학원), 이상희†(한국에너지기술연구원 태양광 연구단), 김가현(충북대학교 물리학과)

PVE-P-35 200kW급 루프탑-영농형 태양광 하부 작물(감자)의 생육 및 수량 특성 분석 ····· 243
김근호†, 임광현, 박성민(재단법인 녹색에너지연구원)

PVE-P-36 M12 n type 태양전지를 이용한 대면적 양면형 태양광 모듈 개발 및 옥외 성능 평가 ····· 244
안서연, 김근호†(재단법인 녹색에너지연구원)

PVE-P-37 양면형 태양광 방음벽(PVNB)의 발전량-눈부심 위험성 통합 평가: 서울시 내부순환로 적용 사례 ····· 245
이민용, 송형준†, 김동원, 백종길(서울과학기술대학교 안전공학과)

PVE-P-38 고정식 루프탑형 영농형 태양광 시스템의 철거 실증: 기초형식에 따른 기초 철거 특성 분석 ····· 246
임광현, 박성민, 안서연, 김근호†(녹색에너지연구원)

PVE-P-39 삼중접합 올-페로브스카이트 태양전지의 손실 완화를 위한 저밴드갭 페로브스카이트 박막의 하부계면 제어 ····· 247
윤영훈†(한국전자기술연구원)

PVE-P-40 일사량 예측 모델 개발을 위한 Solargis 데이터 분석 ····· 248
신우균, 이진석, 주영철, 전병기, 황혜미, 고석환†(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실)

PVE-P-41 수면 차광 모의를 통한 수상태양광의 조류 저감 가능성 검토 ····· 249
이승재(한국수자원공사), 박종윤†(한국환경연구원)

PVE-P-42 SiNx:H 증착 온도에 따른 TOPCon 태양전지 소성 공정 중 수소 재분포가 Blister 형성과 계면 패시베이션에 미치는 영향 ····· 250
임규현, 김문세(고려대학교 에너지환경대학원, 한국에너지기술연구원 태양광연구단),
김용진, 이상희, 정경택, 송희은, 조윤애†(한국에너지기술연구원 태양광연구단), 이해석(고려대학교 에너지환경대학원),
김가현(충북대학교 물리학과)

PVE-P-43 음영 손실 최소화를 위한 직렬 접합형 가로등용 태양광 모듈 제조 ····· 251
윤성민, 박민준†(한국생산기술연구원)

PVE-P-44 소면적 고전압 태양전지의 제조 및 전기적 특성 분석 ····· 252
윤성민, 박민준†(한국생산기술연구원)

PVE-P-45 SnS 소스의 황 사전 처리를 통한 VTD-SnS의 심층 준위 결함 제어 ····· 253
박현우, Rahul Kumar Yadav, 김용태, 허재영†(전남대학교)

PVE-P-46 단계적 이중 버퍼층 전략을 통한 고효율 수열합성 Sb2Se3 박막 태양전지 개발 ····· 254
송준성, Parag Patil, 김용태, 허재영†(전남대학교)

PVE-P-47 PECVD SiNx의 조성비에 따른 패시베이션, 광학 응답 및 결정질 실리콘 태양전지 금속화 신뢰성의 상호 연계 ····· 255
김문세(한국에너지기술연구원 태양광연구단, 고려대학교 에너지환경대학원),
송희은, 김용진, 조윤애, 김언수, 김형우, 정경택(한국에너지기술연구원 태양광연구단),
이해석(고려대학교 에너지환경대학원), 이상희(한국에너지기술연구원 태양광연구단), 김가현†(충북대학교 물리학과)

PVE-P-48 TOPCon 태양전지의 Ag - Al 전극 접촉 형성 및 성능 향상을 위한 소성 조건 최적화 ····· 256
조윤애†, 김문세, 김용진, 이상희, 정경택, 송희은(한국에너지기술연구원, 태양광연구단)

건물에너지설비 Building Energy Systems (BES)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

BES-P-1 구이 조리 연기의 효과적인 흡입을 위한 식당용 국소 배기 후드의 형상 개발 및 최적화 ····· 257
육세진†, 남학호, 정재철(한양대학교)

BES-P-2 발광다이오드 조명 장치의 방열 성능 개선을 위한 강제대류 냉각의 실험적 평가 ····· 258
남학호, 정재철, 육세진†(한양대학교)

BES-P-3 압력손실 저감을 위한 파이프 곡관부 내벽 형상 개발 ····· 259
정경진, 정재철, 남학호, 육세진†(한양대학교)

BES-P-4 설계 요구 조건을 활용한 LLM 기반 건물에너지 모델의 입력오류 수정 평가 ····· 260
이준영, 김동수†, 이루다, 황익하, 송민준, 이정은(국립한밭대학교 건축공학과)

제로에너지 건물 Zero Energy Buildings (ZEB)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

ZEB-P-1 지자체 건물에너지 정책지원을 위한 데이터 플랫폼 활용 시나리오 개발 ····· 261
김은환, 조가영†, 이기용(서울연구원 지속가능연구실)

ZEB-P-2 Carbon-Aware Optimal Operation of Data Centers Considering Renewable Energy Forecast Uncertainty and Batch Workload Flexibility ····· 262
김현중†(국립한밭대학교 전기공학과)

ZEB-P-3 식물공장 컨테이너의 공기순환 배관 설계 및 열유동 특성에 관한 수치해석 연구 ····· 263
최관용(한국생산기술연구원 에너지나노그룹, 한양대학교), 윤찬솔, 김영원†(한국생산기술연구원 에너지나노그룹)

ZEB-P-4 도심형 건물 에너지 자율운전을 위한 에너지 공급 및 사용 데이터 분석 ····· 264
김창헌†, 송다혜(한국광기술원)

건축환경 Building Environment Engineering (BEE)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

BEE-P-1 일본 주택성능표시제도의 평가방법을 적용한 국내 중고층 목조건축물의 결로방지성능 검토 ····· 265
배상무, 김유진(한국건설기술연구원 건축에너지연구본부), 김영탁((주)디알이앤지),
최현중†(한국건설기술연구원 건축에너지연구본부)

BEE-P-2 서울시 저층주거지의 도시 회복력 향상을 위한 환경 특성 분석 ····· 266
이기용, 조가영†(서울연구원)

BEE-P-3 창호 유리 사양 별 냉·난방부하 영향 분석: 건물 유형 및 기후조건 중심 ····· 267
김예은, 이준영, 김민우, 이소예, 김동수, 윤종호†(국립한밭대학교 건축공학과)

BEE-P-4 지역환경·건물·건강·소득 요인을 반영한 에너지 취약가구의 폭염 리스크 지수 산정 ····· 268
조가영†(서울연구원)

태양열융합 Solar Thermal Convergence (STC)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

STC-P-1 선형 프레넬 렌즈 및 진공관형 집열기 기반 추적 집광형 태양열 시스템 열 성능 분석 ····· 269
천승현(국립순천대학교 스마트농업공학과), 문병은†(국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과)

STC-P-2 디지털 트윈 기반 온실 실내환경 및 열원설비 운영관리 모니터링 시스템 개발 ····· 270
김일권, 임희원(다이슨스피어 주식회사), 이왕제, 안영섭, 이경호†(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실),
신우철(대전대학교 건축공학과)

STC-P-3 태양열 기반 전력생산 기술 현황과 Dish-Stirling 시스템의 기술성·경제성 평가 ····· 271
서태범†(인하대학교 기계공학과), 김철숙(인하앤니즈랩), 조병헌(코흐맴브레인 코리아)

STC-P-4 에너지자립형 온실 구현을 위한 실내 태양열 집열기와 얕은 지중열교환기 연계 유체순환운전의 실험적 성능 평가 ·· 272
이왕제, 안영섭, 이경호†(한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실)

신재생융합 Renewable Energy Convergence (REC)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

REC-P-1 난류촉진체 적용 간접 증발 냉각기 연계 방식에 따른 냉방 시스템 성능 향상에 관한 연구 ····· 273
정현석, 안건용, 안태용(전남대학교 냉동공조공학과 대학원), 최휘웅†(전남대학교 냉동공조공학과)

REC-P-2 효율적인 음이온 교환막 수전해를 위한 Ru-Co_3O_4/Mo_2CT_x 헤테로구조 내 갈륨 조절 계면 전자 재구성 ····· 274
최지원, 코말파틸, Yujin Jo, 권수진, 최다임, 박종성†(경상국립대학교 에너지공학과, 광정에너지변환실험실)

REC-P-3 양면형 태양광 시스템의 건물에너지 성능평가를 위한 일사량 산정방법 비교 ····· 275
장예은†(강남대학교 부동산건설학부)

REC-P-4 태양광 연계 배전망의 전압 관리를 위한 온라인 피드백 최적화 기반 데이터센터 부하 제어 ····· 276
김민수†(국립 한밭대학교 전기공학과)

REC-P-5 태양광 및 풍력 통합 예측오차를 고려한 등각 예측 기반 ESS 예비력 산정 및 운영 ····· 277
김민수†(국립 한밭대학교 전기공학과)

REC-P-6 ORC 시스템 운전 자동화를 위한 PLC 기반 통합 제어 프로그램 개발 ····· 278
이승호, 김영원†(한국생산기술연구원)

REC-P-7 가축분뇨 자원화 및 재생에너지 생산을 위한 SOFC 연계형 통합 가스화-활성화 공정 개발 ····· 279
박성민, 박현선, 김근호†(재단법인 녹색에너지연구원)

REC-P-8 태양열 활용 열분해를 위한 우분의 물리화학적 특성 분석 ····· 280
박현선, 박성민, 김근호†(재단법인 녹색에너지연구원)

자원량평가 Renewable Energy Resources (RER)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

RER-P-1 하수 수열에너지 잠재량 분석 및 시각화: 남원시 사례 ····· 281
강민구, 박영석, 오명찬, 김보영, 윤창열†(한국에너지기술연구원)

에너지저장 및 섹터커플링 Energy Storage System & Sector Coupling (ESS&SC)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

ESS&SC-P-1 PMU 접속환경 모의를 위한 HILS 기반 마이크로그리드 모델 개발 ····· 282
조승진, 김민국†(한국광기술원)

ESS&SC-P-2 건물 에너지 생산·소비 예측을 위한 AI 기반 예측모델 설계 ····· 283
오민재, 송다혜, 김용현, 김창헌†(한국광기술원 AI에너지연구센터)

ESS&SC-P-3 장거리 열수송을 위한 센티미터 스케일 다층 열저장 캡슐 ····· 284
조은(한국과학기술연구원 기후환경연구소 물자원순환연구단, 서울대학교 화학생물공학부),
정영균, 윤수진(한국과학기술연구원 기후환경연구소 물자원순환연구단), 최재우†(한국과학기술연구원 기후환경연구소 물자원순환연구단, 과학기술연합대학원대학교 KIST 스쿨 에너지·환경융합 전공)

ESS&SC-P-4 건물 이종에너지 예측 AI 모델 개발을 위한 데이터 선별 및 특징 선정 연구 ····· 285
오민재, 양혜정, 손명우†(한국광기술원 AI에너지연구센터)

ESS&SC-P-5 지역난방 수요측 공기열 히트펌프와 상변화 축열조 연계 실증 ····· 286
박태룡†, 한준규, 김한국(GS파워)

ESS&SC-P-6 열원분리형 히트펌프 기반 열공급 사업의 법적 규제 쟁점 분석 및 실증 기반 제도 개선 방안 ····· 287
김재화†, 김인수(가천대학교산학협력단)

ESS&SC-P-7 실시간 전력요금(RTP) 기반 P2H-TES 시스템운전 최적화 및 계통유연성 평가 ····· 288
김재화†, 김인수(가천대학교산학협력단)

ESS&SC-P-8 가상 실증데이터 기반 열·전기 저장시스템의 운영전략별 수요관리 성과 평가 ····· 289
정대영†(베리워즈)

ESS&SC-P-9 식품공장의 수요반응 자원화를 위한 전력 데이터 전처리 및 부하 특성 분석 ····· 290
양혜정, 김민국†(한국광기술원)

ESS&SC-P-10 태양광 발전량 예측모델의 정확도-정산금 역전 및 발생 조건 분석 ····· 291
박영아, 김용현†, 양혜정, 김민국(한국광기술원 AI에너지연구센터)

태양수소에너지 Solar to Hydrogen (S2H)

좌장 : 김홍욱(에이블에너지)

S2H-P-1 2-MIM 유도 Co 구조체를 활용한 NiCoMo 기반 비귀금속 산소발생반응 촉매 개발 ····· 292
손민서(중앙대학교 에너지시스템공학과), 조유진, 최다임, 권수진(경상국립대학교 에너지시스템공학과),
파티코말(경상국립대학교 미래융합기술연구소), 박종성(경상국립대학교 에너지시스템공학과),
강동원†(중앙대학교 에너지시스템공학과)

S2H-P-2 AEM 수전해를 위한 Fe-doped NiMo 고효율, 고내구성 촉매 연구 ····· 293
최다임(경상국립대학교 미래융복합기술연구소), 박종성†(경상국립대학교 에너지시스템 공학과, 경상국립대학교 미래융복합기술연구소), 코말 파틸(경상국립대학교 미래융복합기술연구소)

S2H-P-3 Delaminated Mo_2CT_x MXene-Coupled NiCo-LDH Nanosheets as Efficient Non-Precious Metal Anodes for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis ····· 294
권수진, 박종성†(경상국립대학교 에너지시스템공학과), 파틸코말(경상국립대학교 미래융복합기술연구소)

S2H-P-4 Highly Crystalline $Ti3C_2Tx$ MXene for Enhanced Interfacial Charge Transfer in NiCoFe/α-Fe2O3 Oxygen Evolution Electrodes for AEM Water Electrolysis ····· 295
조유진, 코말파틸(경상국립대학교 에너지시스템공학과), 조대현(경상국립대학교 메카트로닉스공학과),
박종성†(경상국립대학교 에너지시스템공학과)

S2H-P-5 조성 제어 기반 마이크로큐브형 니켈-코발트 산화물 전극의 물질전달 향상을 통한 고효율 전기화학적 질산염-암모니아 전환 ····· 296
박성현, 임효정(성균관대학교), 최진욱(한국에너지공과대학), 안태용, 심욱†(성균관대학교)

S2H-P-6 그린 수소 생산을 위한 선택적 전기화학적 질산염-암모니아 전환용 망간 산화물 상 리튬 부화 니켈-철 나노 합금의 데이터 주도형 기계학습 유도 설계 ····· 297
심준호, 박성현, 안태용, 심욱†(성균관대학교)

S2H-P-7 Bifunctional MoSSe Electrocatalyst for Nitrate-to-Ammonia Conversion and Oxygen Evolution in a Zero-Gap System ····· 298
임효정(성균관대학교), 최진욱(한국에너지공과대학), 안태용, 심욱†(성균관대학교)

S2H-P-8 Multimetallic CoNiCuRu/MWCNT Electrocatalysts for Efficient Nitrate-to-Ammonia Conversion under Ambient Conditions ····· 299
최진욱(한국에너지공과대학), 임효정, 안태용, 심욱†(성균관대학교)

S2H-P-9 Hydration-Mediated Electronic Coupling Enables Tunable Narrow-Band Emission from Zeolite-Confined Lead Halide Quantum Dots ····· 300
안태용, 심욱†(성균관대학교)

S2H-P-10 Mo 매개 계면 전자구조 조절을 통한 고성능 알칼라인 AEM 수전해용 $Ni_3S_2/FeNi_2S_4$ ····· 301
코말 파틸(경상국립대학교), 박종성†(경상국립대학교)



Special Session

재생열 기술 및 정책

RHE-I-1

재생열 지원사업 및 추진방향

Renewable Heat Support Programe and Policy Direction

이강훈*
Kanghoon Yi*†
*한국에너지공단 열에너지기술처

Abstract : 정부는 기후변화 대응을 촉진하기 위하여, '열에너지 탈탄소화를 위한 히트펌프 보급 활성화 방안'을 수립하여 지난해 12월 발표하였다. 이에 따라 2026년 처음 추진되고 있는 '민간사회복지시설 난방 전기화 사업'의 지원대상 및 지원규모, 추진절차 및 선정 결과 등을 살펴보고, 2027년 지원사업의 변경 사항 등 추진방향을 알아보며, 이와 함께 재생열 활용을 위한 설비인 지열 및 공기열 히트펌프 표준화 진행 동향도 함께 소개한다.

Key Words : 난방 전기화(Electrification of Heating), 재생열(Renewable Heat), 히트펌프(Heat-Pump)

† Corresponding author, E-mail: inelec94@energy.or.kr

후 기

본 자료는 국내 재생열에너지 보급정책 자료입니다.

RHE-O-1

진천 친환경에너지타운 내 재생에너지 융복합시스템의 장기운영성능 분석

Long-Term Operational Performance Analysis of an Integrated Renewable Energy System in the Jincheon Eco-friendly Energy Town

김득원*†, 김민휘*, 이동원*, 허재혁*, 김종규*
Deuk-Won Kim*†, Min-Hwi Kim, Dongwon Lee*, Jaehyeok Heo*, Jongkyu Kim*
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실

Abstract : 기후변화 대응과 에너지안보의 중요성이 증대됨에 따라 탄소배출량이 적은 재생에너지 시스템의 확대 보급은 국제사회에서 중요한 과제로 대두되고 있다. 유럽을 중심으로 재생에너지를 활용한 전력 및 열에너지 시스템에 대한 연구와 보급이 지속적으로 이루어지고 있으며, 국내에서도 다양한 분야에 재생에너지 시스템을 적용하여 탄소 배출량을 감축하기 위한 노력이 진행되고 있다. 국내의 대표적인 재생에너지 융복합시스템 실증단지인 진천 친환경에너지타운은 2017년부터 단지 내 공공건물을 대상으로 재생에너지 기반의 전력 및 열에너지 공급시스템을 운영하고 있다. 열에너지의 경우 단지 내 공공건물의 열에너지 자립을 달성하였으며, 전력의 경우 연간 소비전력량 대비 약 1.3배의 전력을 생산하여 판매하고 있다. 친환경에너지타운에는 태양광 발전시스템뿐만 아니라 태양열, 지열, 하수열 및 축열시스템 등 다양한 열에너지 설비가 융복합되어 있으며, 통합 자동제어시스템을 통해 단지 내 에너지 생산/저장/공급 설비를 효율적으로 운영하고 있다. 본 연구에서는 진천 친환경에너지타운에 구축된 재생에너지 기반 전력 및 열에너지 시스템의 장기 운영 데이터를 기반으로 에너지 생산 및 소비 특성을 분석하고, 주요 설비별 운전 특성과 에너지 성능을 평가하고자 한다. 특히 장기간 축적된 실증 운전 데이터를 활용하여 시스템의 에너지 공급 특성과 주요 재생에너지 설비의 성능 변화를 분석함으로써 장기 운영에 따른 시스템의 안정성과 신뢰성을 평가한다. 이를 통해 재생에너지 융복합시스템의 장기 운영에 대한 실증적 기초자료를 제공하고, 향후 유사한 재생에너지 융복합시스템의 설계 및 운영 최적화와 보급 활성화에 기여하고자 한다.

Key Words : 태양열 집열기(Solar thermal collector), 히트펌프(Heat pump), 축열조(Thermal energy storage), 지역 열공급 시스템(Block heating system), 태양광 발전(Photovoltaic)

†Corresponding author, E-mail: dwkim15@kier.re.kr

후 기
본 연구는 한국환경산업기술원(KEITI)의 지원을 받아 수행 하였습니다. (과제번호 : 2480001354)

RHE-O-2

온실 적용 소용량 태양열 계간축열조의 장기간 열저장 성능 및 열이용 특성 분석

Long-Term Thermal Storage Performance and Heat Utilization Characteristics of a Small-Scale Solar Seasonal Thermal Energy Storage for Greenhouse Heating

안영섭*, 주홍진*, 이왕제*, 한광우**, 이경호*†
Youngsub An*, Hong-Jin Joo, Wang-Je Lee, Kwangwoo Han, Kyoung-ho Lee*†
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, **한국에너지기술연구원 에너지ICT연구단

Abstract : 본 연구에서는 온실 난방에 태양열을 효과적으로 활용하기 위하여 구축한 350 m³ 규모의 소용량 계간축열조를 대상으로 3년간 실증운전을 수행하고 장기간 열저장 및 열이용 특성을 분석하였다. 계간축열조는 비난방기에 태양열집열기에서 생산된 열을 저장하고 난방기에 고온의 축열된 온수를 직접 난방에 이용하거나, 온도가 낮아진 잔열을 히트펌프의 열원으로 활용하도록 구성하였다. 3년간 실증 결과, 계간축열조 상부의 최고 수온은 1차년도 74.2℃, 2차년도 80.5℃, 3차년도 84.9℃로 나타났다. 실증기간 동안 계간축열조에 저장된 총 열량은 215.68 MWh였으며, 이 중 58.95 MWh가 난방 및 히트펌프 열원 등으로 이용되었다. 전체 실증기간의 계간축열조 평균 열저장효율은 55.1%로 분석되었다. 또한 계간축열조의 고온 열은 버퍼조를 통해 온실 난방에 직접 공급하고, 직접 난방에 활용하기 어려운 10~35℃의 저온 잔열은 다중열원 히트펌프의 열원으로 활용하였다. 계간축열조를 열원으로 이용한 히트펌프의 열생산량은 23.89 MWh, 평균 COP는 4.1이었으며, 열원수 온도가 상승함에 따라 COP가 증가하는 특성을 확인하였다. 이를 통해 소용량 계간축열조에서도 단열 및 배관 열손실 저감과 온도성층 유지, 그리고 저온 잔열의 히트펌프 연계 이용을 통해 온실에서 태양열의 장기간 저장 및 단계적 활용이 가능함을 확인하였다.

Key Words : Seasonal thermal energy storage(계간축열), Solar thermal energy(태양열), Thermal storage efficiency(축열효율), Heat pump(히트펌프), Greenhouse heating(온실난방)

† Corresponding author, E-mail: khlee@kier.re.kr

후 기

본 연구는 농림축산식품부의 지원으로 농림식품기획평가원의 농업에너지자립형산업모델기술개발사업 (120093-3)의 지원과, 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(RS-2025-02314149)



Special Session

KIER N-Lab: 차세대 태양광 기술 워크샵

NPV-O-1

저탄소 순환 경제를 위한 친환경 태양광모듈 제조 기술 개발

Development of Sustainable Photovoltaic Module Manufacturing Technologies for a Low-Carbon Circular Economy

어영주*, 배수현*, 김경수*, 신성호*, 이진석**, 강기환*†
Young Joo Eo*, Soohyun Bae*, Kyung-Soo Kim*, Sungho Shin*, Jin-Seok Lee**, Gi-Hwan Kang**
*한국에너지기술연구원 태양광연구단, **한국에너지연구원 신재생시스템연구실

Abstract : To mitigate climate change and to obtain global carbon neutrality, the expansion of renewable energy sources is of paramount importance. PV modules are widely regarded as one of the most promising technologies to lead the transformation towards decarbonized energy systems. However, the manufacturing of PV modules is associated with initial greenhouse gas emissions linked to the procurement of PV components. Therefore, this study focuses on minimizing initial emissions to improve the overall environmental performance of PV systems as well as its recycling process. In this study, it is shown that PV module manufacturing with low CO2 emisson is feasible. And also, the module efficiency, energy requirements, silicon consumption and electricity mix used at the production location are significant factors for the reduction of environmental impacts. Future research will focus on realizing strong mechanical properties without compromising the resistance to weathering-induced degradation. Moreover, extensive testing methods, which are typically applied for PV module testing (e.g. damp heat tests and thermo cycling), should be conducted to ultimately determine the performance of those modules.

Key Words : Renewable energy, Carbon neutrality, PV Module

† Corresponding author, E-mail: yjeo@kier.re.kr

후 기

This work was also partly supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (grant no. RS-2023-00303745)

NPV-O-2

저탄소 태양광 모듈을 위한 저투습도 접착소재 기반 투명 백시트 개발

Low-Permeability Adhesive-Based Transparent Backsheet for Low-Carbon Photovoltaic Modules

권다영*, 류준*, 박예랑*, 한재익*, 백하늘*, 김재현*, 이용환*†
Da Young Kwon*, Jun Ryu*, Yerang Park*, Jae-ik Han*, Ha Neul Baek*, Jaehyeon Kim*, Yonghwan Lee*†
*한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터

Abstract : 본 연구에서는 저탄소 태양광 모듈 적용을 위한 불소 비함유 투명 백시트를 개발하였다. Polyethylene terephthalate (PET) 필름에 perhydropolysilazane (PHPS)을 딥코팅한 후, 이를 SiO_xN_y 기반 무기 코팅층으로 전환하여 투명성과 수분 차단 성능을 갖는 백시트를 제조하였다. 푸리에 변환 적외선 분광법(FT-IR) 분석에서 Si-O, Si-N 및 Si-OH 결합이 관찰되어 PHPS 유래 무기 코팅층의 형성을 확인하였다. 자외선-가시광선 분광법(UV-Vis) 분석 결과, 코팅된 필름은 88% 이상의 높은 광투과율을 나타내어 투명 백시트로서의 광학적 적합성을 확인하였다. 또한, 수증기투과율(WVTR)은 2 $g \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ 미만으로 감소하여 무코팅 PET 필름 대비 향상된 수분 차단 성능을 보였다. 접착력 평가에서는 SiO_xN_y 코팅 PET 필름과 태양광 모듈 봉지재 사이의 우수한 계면 접착력을 확인하였다. 고온·고습 가압시험(Pressure Cooker Test, PCT) 및 자외선 노출을 통한 가속열화 시험 후에도 높은 투명성과 낮은 수증기투과율을 유지하여 시험 조건에서의 환경 내구성을 확인하였다. 이러한 결과는 PHPS 유래 SiO_xN_y 코팅 PET 필름이 광학적 투명성, 수분 차단 성능 및 계면 접착력을 갖춘 소재로서, 기존 불소계 백시트를 대체하고 저탄소 태양광 모듈용 투명 백시트에 적용될 수 있음을 시사한다.

Key Words : 저탄소 소재(low-carbon material), 태양광 모듈(photovoltaic module), 비불소계(fluorine-free), 투명 백시트(transparent backsheet)

† Corresponding author, E-mail: ylee@keti.re.kr

후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Climate, Energy & Environment(MCEE) of the Republic of Korea (RS-2023-00303745).

NPV-O-3

HPBC 태양광 미니모듈의 가속 내구성 평가: HAST와 기존 Damp Heat 시험 간 상관관계 분석

Accelerated Durability Evaluation of HPBC Photovoltaic Mini-Modules: Correlation between HAST and Conventional Damp Heat Testing

전기석*, 김건우*, 정채환*†
Ki-seok Jeon*, Geonu Kim*, Chaehwan Jeong*†
*한국생산기술연구원 에너지나노그룹

Abstract : The rapid expansion of photovoltaic (PV) applications has increased the demand for highly reliable PV modules, particularly for emerging applications such as building-integrated photovoltaics (BIPV) and mobility-integrated photovoltaics (MIPV), where long-term durability and product reliability are critical. Damp heat (DH) testing is widely used to evaluate the durability of PV modules under high-temperature and high-humidity conditions. However, conventional DH testing generally requires 1,000–3,000 h, resulting in long evaluation periods and delayed feedback during module development. This study explores a highly accelerated reliability assessment method for photovoltaic mini-modules based on hybrid passivated back contact (HPBC) solar cells using a Highly Accelerated Stress Test (HAST). The mini-modules were exposed to HAST conditions with higher temperature and humidity stress than the conventional DH condition of 85 °C/85% RH. The degradation behavior induced by HAST was compared with that observed after 1,000 h of conventional DH testing. In particular, the relationship between 200 h of HAST exposure and 1,000 h of DH exposure was investigated to determine whether HAST can reproduce accelerated degradation behavior within a substantially shorter test period. The results provide a basis for evaluating the applicability of HAST as a rapid reliability assessment method for HPBC photovoltaic modules and for reducing the time required for conventional durability testing.

Key Words : Photovoltaic Module; HPBC solar cell; Highly Accelerated Stress Test (HAST); Damp Heat (DH); Reliability

† Corresponding author, E-mail: chjeong@kitech.re.kr

후 기

This work was also supported by the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) under Grant No. EH-26-0003, “Development of Core Technologies for AI-Based Self-Power Generation and Charging for Next-Generation Mobility”and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) through a grant funded by the Korean government (MOTIE) (RS-202300303745, titled “Development of photovoltaic module materials and process technology with low carbon emissions and easy recycling.”

NPV-O-4

폴리부타다이엔 기반 저투습 모서리 실란트 소재 개발

Development of Polybutadiene-Based Edge Sealant with Low Water Vapor Permeability

정인환*†
In Hwan Jung*†
*한양대학교 유기나노공학과

Abstract : As climate change has become a major global issue, many studies have focused on reducing carbon emissions in various industries. In solar panel manufacturing, there is also a need to develop low-cost edge sealants with low water vapor permeability to support efforts to reduce carbon emissions. In this study, we aim to develop polyurethane edge sealants based on polybutadiene prepolymers to improve the moisture-barrier properties and long-term durability of solar panels while reducing material costs.
For this purpose, we will design and synthesize polybutadiene-based polyurethanes as alternatives to conventional silicone-based edge sealants, with the goal of achieving low water vapor permeability, strong adhesion, and high mechanical durability. The hydrophobic structure of polybutadiene will be used to reduce moisture penetration. In addition, the molecular structure and crosslinking density of the polyurethane will be controlled to improve adhesion to panel components and stability under different environmental conditions. These edge sealants are expected to reduce moisture-induced performance degradation and extend the lifetime of solar panels, thereby helping reduce resource consumption and carbon emissions associated with maintenance and replacement.

Key Words : 탄소발자국(Carbon footprint), 저탄소모듈소재(Low carbon PV modules material), 엣지 실란트(Edge sealant), 폴리부타다이엔 프리폴리머(Polybutadiene prepolymer), 폴리우레탄(polyurethane)

† Corresponding author, E-mail: inhjung@hanyang.ac.kr

후 기
본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 에너지기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2023-0030374).

NPV-O-5

양면 유리(GtoG) 태양광모듈 재활용을 위한 유도가열식 분리 장치 개발 및 자원 회수율 평가

Development of an Induction-Heated Delamination System for Glass-to-Glass Photovoltaic Module Recycling and Evaluation of Resource Recovery Rate

신연배*†, 김태현**, 남우준*
Yeonbae Shin*†, Taehyeon Kim**, Woojun Nam*
*충북테크노파크 차세대에너지센터, **국립한국교통대학교 나노화학소재공학과

Abstract : 태양광 모듈의 평균 수명(약 30년) 종료 시점 도래로 향후 막대한 양의 폐태양광 패널 배출이 예견되고 있다. 국내 폐패널 배출 추정량은 2023년 9,665톤에서 2033년 58,369톤으로 급증할 것으로 전망되며, 2023년부터 시행된 생산자책임재활용제도(EPR)에 따라 재활용률 80% 이상 유지가 목표화되는 등 자원순환 체계 구축의 필요성이 대두되고 있다. 태양광 패널 재활용의 핵심은 전면 유리와 실리콘 셀을 결합하는 에틸렌 비닐 아세테이트(EVA) 접착층을 분리하는 것이다. 가열된 칼날로 EVA층을 연화시켜 전면 유리를 판유리 형태로 원형 회수하는 핫나이프(Hot Knife) 공법은 자원순환 실현에 유망한 기술로 평가받으나, 최근 급증하는 양면 유리(Glass to Glass, GtoG) 모듈에 기존 핫나이프 공법을 적용하기 위해서는 모듈 구조를 고려한 분리 조건 및 장치 구성에 대한 검토가 필요하다. 이에 본 연구에서는 양면 유리 모듈의 구조적 특성을 고려한 G to G 태양광모듈 분리 시제품 장치를 설계·개발하였으며, 유도가열(Induction Heating) 방식을 적용하여 기존 대비 전력 소모량 절감을 통한 탄소배출 저감 효과를 얻고자 하였다. 400×400 mm 규격의 G to G 모듈을 대상으로 분리 실험을 수행하여 온도 조건에 따른 재활용 수율 및 자원 회수율 변화를 검증하였다. 또한 시제품과 기존 재활용 라인 장비의 전력 소모량을 비교함으로써 유도가열 방식 적용 장치의 탄소배출 저감 기여도를 확인하였다.

Key Words : 폐태양광 패널 재활용(Photovoltaic Module Recycling), 양면 유리 모듈(Glass to Galss module), 유도가열(Induction Heating), 핫나이프 공법(Hot Knife Process), 탄소배출 저감(Carbon Emission Reducion)

†Corresponding author, E-mail: ybshin@cbtp.or.kr

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 재원으로 신재생에너지핵심기술개발(R&D)사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2023-00303745).

NPV-O-6

폐 태양광 폐기물로부터 고순도 은·구리 회수를 위한 순차적 습식제련-전기화학 공정

Sequential Hydrometallurgical-Electrochemical Process for High-Purity Ag and Cu Recovery from PV Waste

김수환*, 박종성*†
Suhwan Kim*, Jongsung Park*†
*경상국립대학교 미래융복합기술연구소, 에너지공학과

Abstract : 헤테로접합(HJT) 태양전지를 비롯한 멀티버스바(MBB) 모듈의 확산으로 은-코팅 구리 배선이 널리 채택되면서, 폐태양광(EoL PV) 모듈로부터 은(Ag)과 구리(Cu)를 선택적으로 회수하는 기술의 중요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 폐 HJT 태양전지의 단일 질산(HNO3) 침출액으로부터 Ag과 Cu를 순차적으로 전해채취하는 통합 습식제련-전기화학 공정을 제안하였다. 먼저 10배 희석한 질산 침출액에서 희생 구리 양극 대신 불활성 SUS 양극을 도입하여 Ag를 선택적으로 전착시킨 결과, 2 V·1시간 조건에서 순도 99.6 wt% 이상의 Ag가 99.7%의 회수율로 얻어졌으며, SUS 유래 오염(Fe, Cr, Ni)은 검출되지 않았다. Ag 회수 후 잔류한 Cu(NO3)2 용액에 황산을 첨가하여 CuSO4-H2SO4 전해질로 전환하고, IrO2-Ta 기반 불용성 양극(DSA)을 사용해 Cu를 전착한 결과, 1.62 M H2SO4 조건에서 최적의 물질전달 및 전하이동 거동이 확인되었으며, 8 V·24시간 전착 시 Cu 회수율 99.79%를 달성하였다. 순환전압전류법(CV), 임피던스 분광법(EIS), 크로노암페로메트리(CA) 분석을 통해 황산 첨가가 이온전도도를 약 65% 향상시키고 질산이온의 경쟁 환원을 억제함을 확인하였다. 기존 AgCl 침전-하이드라진 환원 공정(시나리오 1)과 비교한 기술경제성 및 전과정평가(LCA) 결과, 제안 공정(시나리오 2)은 유해 환원제 하이드라진 사용을 배제하면서도 영업이익을 약 4.7%(USD 707.37/ton) 향상시키고, 지구온난화지수(GWP)를 26.4%(397.4 kg CO2eq/ton) 저감하는 것으로 나타났다. 본 연구는 화학 사용과 공정 단계를 최소화하면서 차세대 태양전지 폐기물로부터 고순도 유가금속을 회수할 수 있는 실용적이고 친환경적인 재활용 경로를 제시한다.

Key Words : 태양광 재활용(PV recycling), 헤테로접합 태양전지(HJT solar cell), 은 전해채취(Silver electrowinning), 구리 전해채취(Copper electrowinning), 순차적 전해채취(Sequential electrowinning)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)이 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 지원한 사업(RS-2023-0030745)의 지원을 받아 수행되었습니다.

NPV-O-7

태양광 폐패널 재활용을 위한 저탄소 기술 기반 유가금속 회수 공정 개발

Development of a Low-Carbon Technology-Based Silver and Copper Recovery Process for Recycling End-of-Life Photovoltaic Modules

노청민*†, 이상헌*, 이준성*, 서광민*, 김연주*
Cheongmin Noh*†, Sanghun Lee*, Joonsung Lee*, Kwangmin Seo*, Yeonju Kim*
*(주)원광에스앤티

Abstract : 수명 연한이 도래한 태양광 모듈과 자연재해로 인해 조기 파손된 태양광 폐모듈의 발생량이 증가하면서, 이를 재활용하기 위한 공정기술의 필요성이 높아지고 있다. 특히 태양전지와 전극 소재에 포함된 은과 구리를 회수하여 재자원화할 수 있다면 자원순환과 재활용 공정의 경제성 향상에 기여할 수 있으며, 회수 과정에서 사용되는 에너지와 자원의 투입을 줄이기 위한 기술 개발도 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 기존 은 전해회수 공정에 후속 구리 전해분해(Electrowinning) 공정을 연계하여 저탄소 기술 기반의 유가금속 회수설비를 구축하였다. 본 공정은 은 회수가 완료된 후 발생하는 여액을 별도의 구리 전해회수 설비로 이송하여, 여액에 잔존하는 구리를 추가로 회수하는 방식으로 구성하였다. 구축한 구리 전해분해 설비의 회수 성능을 확인하기 위해 전해시간에 따른 잔류 구리 농도를 ICP-OES로 분석하였다. 초기 구리 농도는 4,388 mg/L였으며, 전해시간이 증가함에 따라 잔류 농도가 지속적으로 감소하는 것을 확인하였다. 전해 180분 후 구리 농도는 256 mg/L로 감소하여 초기 농도 대비 94.17%의 회수율을 나타냈으며, 240분과 300분에는 각각 12.3 mg/L와 0.97 mg/L로 감소하여 99.72%와 99.98%의 회수율을 확인하였다. 이를 통해 은 회수 후 여액에 잔존하는 구리의 추가 회수 가능성을 확인하였으며, 태양광 폐패널 내 은과 구리를 단계적으로 회수할 수 있는 공정 기반을 마련하였다. 향후 회수율과 전력소모를 함께 고려한 적정 운전조건을 도출하여, 저탄소 지향형 유가금속 회수 공정의 활용성을 높이고자 한다.

Key Words : 태양광 모듈(Photovoltaic Module), 재활용(Recycling), 실리콘(Silicon), 유가금속(Valuable Metal), 저탄소재활용 공정(Low Carbon PV Module's Recycling Process)

†Corresponding author, E-mail: ncm1565@wksnt.com

후 기
이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00303745)



Special Session

페로브/실리콘 탠덤 재활용

PST-O-1

아민 중공사 기반 아이오딘 회수 플랫폼 개발

Aminated Polymeric Straws as a Iodine Recovery Platform

조은*,**, 정영균*, 윤수진*, 최재우*,***†
Eun Cho*,**, Youngkyun Jung*, Su-Jin Yoon*, Jae-Woo Choi*,***†
*한국과학기술연구원 기후 · 환경연구소 물자원순환연구단, **서울대학교 화학생물공학부,
***과학기술연합대학원대학교(UST) KIST 스쿨 에너지-환경융합 전공

Abstract : 반도체, 의료용 조영제 및 방사성 아이오딘 처리 등 관련 산업의 성장에 따라 산업폐수 내 아이오딘 배출량도 증가하고 있다. 그러나 국내 아이오딘 자원은 대부분 수입에 의존하고 있으며, 폐수로부터 아이오딘을 선택적으로 회수/재자원화하는 기술은 아직 초기 단계에 머물러 있다. 기존 나노-마이크로 스케일 흡착제는 높은 흡착 성능에도 불구하고 미세 분말 형태로 인해 컬럼 충진, 고액 분리, 회수 및 반복 사용 등 실공정 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 아크릴 고분자 섬유를 마이크로미터 스케일 직경의 중공 섬유로 재구성하고 표면과 내부 채널에 아민기를 고밀도로 도입함으로써, 센티미터 단위로 손쉽게 취급 및 회수할 수 있으면서도 높은 흡착 성능과 재사용성을 갖는 매크로 스케일 아민 기능성 섬유를 개발하였다. 수중에서 양성자화된 아민기는 음이온성 아이오딘 종과 정전기적 인력을 형성한다. 일반적인 아민계 흡착제가 주로 산성 조건에서 높은 흡착 성능을 나타내는 것과 달리, 본 소재는 아민 사슬 길이와 도입 밀도를 최적화하여 아이오딘 종과 효과적으로 상호작용할 수 있는 채널형 결합 환경을 형성함으로써 pH 2-8의 넓은 범위에서 우수한 선택적 흡착 성능을 유지하였다. 또한 중공 구조 도입을 통해 섬유 내부 활성점까지의 물질전달 거리를 단축하여 비중공 섬유 대비 흡착 평형 도달 시간을 약 27배 단축하였다. 다양한 공존 음이온이 존재하는 조건에서도 고밀도 아민 기반 결합 공간과 아이오딘 종 간의 상호작용을 통해 높은 선택성을 유지하였다. 개발된 섬유의 최대 아이오딘 흡착량은 약 5,840 mg/g로, 기존 분말형 흡착제에서 보고된 수백-수천 mg/g 수준과 비교하여 동등하거나 우수한 성능을 나타냈다. 특히 매크로 스케일 흡착제에서 일반적으로 발생하는 비표면적 감소와 물질전달 저항 증가를 중공 채널 기반 물질전달 촉진과 고밀도 아민 활성점 설계를 통해 효과적으로 상쇄하였다. 나아가 흡-탈착을 통해 회수한 아이오딘을 Pb와 반응시켜 태양전지용 전구체인 PbI_2로 정량적 전환을 유도함으로써, 산업폐수 유래 아이오딘을 기능성 무기 소재의 원료로 직접 자원화할 수 있는 가능성을 확인하였다. 본 연구는 고기능성 섬유의 설계, 산업폐수 내 아이오딘의 선택적 회수, 회수된 자원의 PbI_2 업사이클링을 하나의 연속 공정으로 통합하여, 폐기물과 폐수에서 유래한 자원을 고부가가치 기능성 소재로 전환하는 closed-loop형 자원순환 플랫폼의 가능성을 제시하였다.

Key Words : 아이오딘 회수, 중공 아민 기능성 섬유, 선택적 음이온 흡착, PbI_2 업사이클링, Closed-loop 자원순환 플랫폼

†Corresponding author, E-mail: plead36@kist.re.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-25450823).

PST-O-2

유도가열 기반 고속 태양전지 및 모듈 재활용 기술

Induction Heating-Based Rapid Recycling of Solar Cells and Photovoltaic Modules

권다영*, 박예랑*, 류준*, 한재익*, 백하늘*, 김재현*, 박노창*, 이용환*†
Da Young Kwon*, Yerang Park*, Jun Ryu*, Jae-ik Han*, Ha Neul Baek*, Jaehyeon Kim*, Nochang Park*, Yonghwan Lee*†
*한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터

Abstract : 태양광 발전 시스템의 보급 확대에 따라 수명이 종료된 폐태양광 모듈의 발생량이 증가할 것으로 예상되며, 이를 효율적으로 처리하기 위한 재활용 기술의 중요성이 커지고 있다. 특히, 고분자 봉지재와 결정질 실리콘 태양전지 사이의 강한 접착력은 태양전지 회수 과정에서 파손과 잔류물에 의한 오염을 유발하고, 분리 공정을 복잡하게 만드는 주요 요인이다. 본 연구에서는 태양전지와 ethylene-vinyl acetate(EVA) 봉지재 사이의 계면 접착력을 선택적으로 저하시키는 비접촉식 유도가열 공정을 개발하였다. 전자기 유도를 통해 태양전지의 전도성 구조를 약 30 °C/s의 속도로 가열함으로써, 벌크 봉지재의 대부분을 유지하면서 계면 부근의 EVA를 국부적으로 분해하였다. 이를 통해 용매를 사용하지 않고 수십 초 이내에 태양전지를 파손 없이 분리하였으며, 회수된 태양전지 표면의 봉지재 잔류물을 최소화하였다. 또한, 구성 소재의 회수율을 높이기 위해 재활용을 고려한 유리-유리형 모듈 구조를 도입하였다. 해당 모듈 구조와 유도가열 기반 분리 공정을 결합하여 유리, 태양전지, 봉지재 등 구성 소재의 총질량 기준 99% 이상의 회수율을 달성하였다. 본 연구는 봉지재 잔류물을 최소화한 태양전지 회수와 폐태양광 모듈 구성 소재의 높은 회수율을 동시에 구현할 수 있는 고속 재활용 기술을 제시하며, 향후 대규모 재활용 공정으로의 확장 가능성을 보여준다.

Key Words : 폐태양광 모듈(end-of-life photovoltaic module); 유도가열(inductive heating); 봉지재 박리(encapsulant delamination); 태양전지 회수(solar-cell recovery); 태양광 모듈 재활용(photovoltaic module recycling)

† Corresponding author, E-mail: ylee@keti.re.kr

후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Climate, Energy & Environment(MCEE) of the Republic of Korea (NO.RS-2025-25450823).

PST-O-3

페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양광 폐모듈의 납 회수 공정 경제성 분석

Techno-economic Analysis of Lead Recovery Processes from End-of-Life Perovskite/Silicon Tandem PV Modules

황성호*†
Sungho Hwang*†
*Korea University

Abstract : Lead (Pb) leakage from end-of-life perovskite/silicon tandem photovoltaic (PV) modules is a well-recognized barrier to commercialization, yet the cost of recovering that lead has rarely been quantified on a consistent basis. This work presents a bottom-up operating-cost model for two wet-chemical Pb recovery routes under development at Gyeongsang National University, assembled from unit-cost data collected during site visits. A 10 cm × 10 cm crushed module coupon (100 cm^2, 0.01 m^2) was adopted as the functional unit and every cost item was scaled to a 1 m^2 basis for comparison with published values. Route 1 combines HNO_3 leaching with sequential electrowinning of Pb and Ag; Route 2 uses acetic-acid leaching followed by Pb electrowinning. Operating cost was taken as the sum of leaching chemicals, electrode wear, electrowinning electricity and hazardous liquid-waste treatment, with capital items and analytical costs excluded, five reuses assumed for the leaching acid and 2,000 cycles for the electrodes. The resulting costs are 17,425 KRW/m^2 (about USD 12.3/m^2) for Route 1 and 15,025 KRW/m^2 (about USD 10.6/m^2) for Route 2 at 1,418 KRW/USD, with processing times of 104.8 min and 94.8 min per coupon. Leaching chemicals dominate the cost structure (68.9 % for Route 1), followed by liquid-waste treatment (23.0 %) and electrode wear (8.2 %), whereas electrowinning electricity is negligible. Benchmarked against reported recycling costs of 1,914–6,012 KRW/m^2 (Chen et al., 2021) and 15,173 KRW/m^2 (McCalmont et al., 2023), Route 2 is already of the same order as the latter; the residual gap reflects the fixed-cost penalty of a small laboratory coupon and differences in recovery method. Reducing acid consumption and raising the acid reuse count are identified as the highest-leverage levers for further cost reduction.

Key Words : Perovskite/silicon tandem(페로브스카이트/실리콘 탠덤), Lead recovery(납 회수), Techno-economic analysis(경제성 분석), Electrowinning(전해채취), Recycling(재활용)

† Corresponding author, E-mail: sungho_hwang@korea.ac.kr

PST-O-4

무기 흡착소재를 이용한 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지의 수계 기반 납 회수

Inorganic Adsorbent-Assisted Aqueous Recovery of Lead from Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells

김희정*, 정현석*†
Hee Jung Kim*, Hyun Suk Jung*†
*성균관대학교 신소재공학부

Abstract : Perovskite/silicon tandem solar cells provide high power conversion efficiencies, but their end-of-life treatment requires the safe recovery of toxic lead (Pb) and valuable halide components. Conventional recycling processes often rely on hazardous organic solvents and generate secondary waste, limiting their environmental benefits. An environmentally benign recycling process is developed based on aqueous separation and inorganic adsorbent-assisted Pb recovery. The perovskite layer is removed from the silicon bottom cell through a water-based treatment, transferring Pb and iodide species into the aqueous phase. Hydroxyapatite (HAp) is then applied as an inorganic adsorbent to capture dissolved Pb ions. HAp enables the effective and selective recovery of Pb from the aqueous phase. In addition, iodine can be recovered as a valuable resource through a subsequent recycling process. This sequential process enables the individual recovery of Pb and iodine while reducing the use of hazardous solvents and minimizing secondary waste generation. The recovered silicon bottom cell can also be retained as a valuable component for subsequent device refabrication. These results provide a practical strategy for the environmentally sustainable and resource-efficient recycling of perovskite/silicon tandem solar cells.

Key Words : 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지(Perovskite/silicon tandem solar cells), 수계 재활용(Aqueous recycling), 무기 흡착소재(Inorganic adsorbent), 납 및 요오드 회수(Lead and iodine recovery)

† Corresponding author, E-mail: hsjung1@skku.edu

후 기

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025-25450823).

PST-O-5

폐 페로브스카이트 태양전지로부터 전극 조건에 따른 Ag 선택 회수 및 Ag-Pb 순차 회수 공정 최적화

Optimization of Electrode-Depoendent Ag Recovery and Sequential Ag-Pb Reccovery from Waste Peroveskite Solar Cells

조세연*, 김수환**, 박종성***†
Seyeon Cho*, Suhwan Kim**, Jongsung Park***†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 미래융복합기술연구소,
***경상국립대학교 에너지공학과

Abstract : As the deployment of perovskite photovoltaics increases, recycling processes for recovering valuable and hazardous metals from end-of-life devices are becoming increasingly important. In this study, sequential recovery of silver (Ag) and lead (Pb) from waste perovskite solar cells was investigated using nitric acid (HNO_3) leaching followed by electrochemical recovery. Ag was first recovered from the leachate using a dimensionally stable anode (DSA) with different cathodes, including a SUS bowl, Ti bowl, and Ti plate. Ag recovery varied with cathode type and electrolysis conditions. The SUS bowl achieved a 70.0% Ag recovery yield, but Fe contamination suggested possible electrode corrosion. The Ti bowl achieved an 84.46% recovery yield after 2 h. Further optimization with a Ti plate at a constant current of 0.02 A yielded the highest Ag recovery of 97.05% and a removal efficiency of 98.68% after 8 h. Extending the electrolysis time to 10 h decreased the recovery yield to 77.51%. After Ag recovery, Pb was recovered from the remaining electrolyte after adjusting the pH to 4. Suspended precipitates formed during this step, causing Pb to distribute between the cathodic deposit and precipitated phases. These results show that cathode selection and electrolysis time are key factors for selective Ag recovery, while controlling pH-induced precipitation is important for improving subsequent Pb recovery. This study provides a basis for sequential recovery of valuable metals from waste perovskite solar cells.

Key Words : 폐 페로브스카이트 태양전지(Waste perovskite solar cells), 은 회수(Silver recovery), 납 회수(Lead recovery), 질산 침출(Nitric acid leaching), 전해재취(Electrowinning), 순차 회수(Sequential recovery)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

후 기

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE) (RS-2025-25450823)

PST-O-6

페로브스카이트/탠덤 태양전지의 파쇄거동 분석

Analysis of Crushing Behavior in Perovskite/Tandem Solar Cells

노청민*†, 이상헌*, 이준성*, 서광민*, 김연주*
Cheongmin Noh*†, Sanghun Lee*, Joonsung Lee*, Kwangmin Seo*, Yeonju Kim*
*(주)원광에스앤티

Abstract : 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지는 태양전지의 이론적 효율 한계를 극복하기 위하여 개발되고 있으며, 다양한 국가에서 고효율과 새로운 한계를 타도하기 위한 신시장 개척을 진행하고 있음. 현재의 경우 시장에서 아주 작은 점유율을 가지고 있지만, 이론적 한계를 극복하는 만큼 향후 기대가 큰 시장이며, 기술적인 완성도가 낮은 만큼 수명을 다한 탠덤 태양광 모듈이 조기에 배출 될 가능성이 큼. 하지만, 연구개발의 현황이 지속되는것에 비해 수명이 다한 탠덤 태양전지에 대한 재활용 연구는 매우 초기 단계이며, 본 연구에서는 페로브스카이트/탠덤 태양전지의 재활용 공정을 위한 초기 처리 단계의 Pre-Treatment를 진행하고자 함. 태양전지의 파쇄 및 분쇄에 대한 거동을 분석하고, 이를 후속 공정에 연결하여 재활용의 가능성을 확보할 수 있도록 기반 연구를 진행하였음.

Key Words : 페로스브카이트/실리콘 탠덤태양전지(Perovskite/silicon tandem solar cells), 이동식 재활용 기술(Mobile recycling technology), 태양광 재활용(PV recycling), 친환경(Eco-friendly) 파쇄 공정(Crushing process)

†Corresponding author, E-mail: ncm1565@wksnt.com

후 기

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 신재생에너지핵심기술개발(R&D) 사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (RS-2025-25450823)



Special Session

태양광 순환경제

PCE-O-1

이동식 태양광 재활용 전처리 설비의 운영과 방향성

Operation and Direction of Mobile Solar Panel Recycling Pre-treatment Facilities

이상헌*†, 노청민*, 이준성*, 서광민*, 김연주*
Sanghun Lee*†, Cheongmin Noh*, Joonsung Lee*, Kwangmin Seo*, Yeonju Kim*
*(주)원광에스앤티

Abstract : 기후.변화문제 해결을 위한 재생에너지 수요 확대는 곧 폐패널의 발생과 연관되어 있으며, 이를 통해 태양광 폐패널의 발생량이 증가 될 예정이기 때문에, 태양광 폐패널d,; 효육적 관리를 위한 재활용 기술이 개발되어야 함. 국내의 경우, 태양광 재활용 기술이 상용화 되었으며 파쇄법, 열분해법, Hot blade 등의 기술이 다루어지고 있음. 이 기술들은 태양광 폐패널의 발생된 후의 수거 및 회수, 재생, 재활용 등의 방향성을 가지고 있으며, 태양광 폐패널이 발생하기 이전의 선제 대응이 가능한 기술이 아님. 본 내용은 태양광 폐패널의 재활용 기술 및 설비를 이동식으로 적용하여 태양광 폐패널의 재활용과 선제적 대응에 관한 운영과 방향성에 논의를 다루고자함.

Key Words : 태양광 폐패널(Eol Photovoltaic panels), 이동식 재활용 기술(Mobile recycling technology), 자원화 기술(Resource Recovery Technology), 실증 운영(pilot operation)

†Corresponding author, E-mail: lsh4085@wksnt.com

후 기
본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 태양광 패널 재활용 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (RS-2025-02223005)

PCE-O-2

양면유리형 태양광 폐모듈의 유리분리 기술: 글로벌 기술 현황 및 저비용·친환경 기술개발 동향

Glass Separation Technologies for End-of-Life Glass-to-Glass Photovoltaic Modules: Global Status and Development Trends toward Low-Cost and Environmentally Friendly Recycling

이진석*†, 손주희*, 신우균*, 고석환*, 강기환**
Jin-Seok Lee*†, Juhee Son*, Woo-Gyun Shin*, Suk-Whan Ko*, Gi-Hwan Kang**
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, **한국에너지기술연구원 태양광연구단

Abstract : 최근 태양광 모듈의 고출력화 및 장기 신뢰성 확보를 위해 양면유리형(Glass-to-Glass, G2G) 모듈의 시장 비중이 빠르게 증가하고 있으며, 향후 발생하는 태양광 폐패널에서도 G2G 모듈이 주요 비중을 차지할 것으로 예상된다. 일부 G2G 폐패널은 이미 발생하고 있으나, 기존의 재활용 기술은 주로 단면유리형(Glass-to-Backsheet) 모듈을 대상으로 개발되어 G2G 구조를 효과적으로 분리하는 데 한계가 있다. 특히 G2G 모듈은 양면의 유리를 분리해야 하는 구조적 특성으로 인해 기존 공정 대비 처리공정의 복잡성과 에너지 소비 및 처리비용이 증가할 수 있어, 재활용 기술의 경제적 경쟁력을 확보하기 위한 저비용·저에너지 유리분리 기술의 개발이 요구된다. 본 발표에서는 G2G 폐태양광 모듈의 구조적 특성과 재활용 과정에서 발생하는 기술적 문제를 분석하고, 기계적 분리, 열적 처리, 레이저 및 광 기반 계면 분리 등 최근 글로벌 차원에서 연구·개발되고 있는 G2G 유리분리 기술의 원리, 특징 및 기술적 한계를 비교·분석한다. 또한 기술별 처리속도, 에너지 소비, 유리 회수성 및 공정 확장성 등 향후 상용화를 위한 주요 기술지표와 개발 방향을 논의한다. 이와 함께 한국에너지기술연구원에서 개발 중인 G2G 폐모듈 대상 저비용·친환경 물리적 유리분리 기술의 개념과 주요 특징을 소개하고, 향후 증가하는 G2G 폐모듈에 대응하기 위한 경제성 및 현장 적용성이 높은 재활용 기술의 개발 방향을 제시하고자 한다.

Key Words : 양면유리형 태양광 모듈(Glass-to-Glass photovoltaic module), 폐태양광 모듈(End-of-life photovoltaic module), 유리분리(Glass separation), 박리(Delamination), 재활용(Recycling)

† Corresponding author, E-mail: jslee@kier.re.kr

후 기

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 태양광 패널 재활용 기술개발사업(RS-2025-02223005)과 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업(RS-2025-02213132)의 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단의 지원을 받아 연구되었습니다.

PCE-O-3

폐태양광 패널 자원순환을 위한 EVA 필름 제거 및 선택적 은 회수 기술 개발

Development of EVA Film Removal and Selective Silver Recovery Technology for Resource Recycling of End-of-Life Photovoltaic Panels

정영균*, 이윤*,**, 이경석*,***, 최재우*,****†
Youngkyun Jung*, Yun Lee*,**, Kyung-Seok Lee*,***, Jae-Woo Choi*,****†
*한국과학기술연구원 기후·환경연구소 물자원순환연구단, **고려대학교 화공생명공학과,
***서울대학교 화학생물공학부, ****과학기술연합대학원대학교 KIST스쿨 에너지-환경융합과

Abstract : 국제적인 기후변화 대응과 재생에너지 보급 확대에 따라 폐태양광 패널의 발생량이 지속적으로 증가하면서, 구성요소의 효율적 분리와 유가자원 회수를 위한 자원순환 기술의 중요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 폐태양광 패널의 친환경적 자원순환을 위해 구성요소 분리 및 유가금속 회수 기술을 개발하였다. 먼저, 열경화성 EVA(ethylene-vinyl acetate) 필름은 유리 표면에 잔존하여 구성요소의 분리와 후속 재활용을 저해하며, 기존 유기용매 및 고온 열처리 공정을 통한 제거는 독성 및 높은 에너지 소비의 문제점이 있다. 이에 감귤박 유래 친환경 바이오 용매인 limonene을 활용하여 EVA 필름의 팽윤 및 탈착을 유도하는 제거 공정을 개발하였다. 이미지 분석을 통해 EVA 제거율을 정량적으로 평가하고 최적 조건을 도출하였으며, 실제 폐태양광 패널에 대한 적용 가능성을 확인하였다. 또한 태양광 패널의 전극 소재인 은(Ag)의 선택적 회수를 위해 강산성 환경에서도 높은 성능을 유지할 수 있도록 기능기를 최적화한 섬유 기반 흡착제를 개발하였다. 개발 소재는 약 503 mg/g의 최대 흡착 성능과 5 ppm 이하에서 95% 이상의 Ag 회수율을 나타냈으며, 실제 폐태양광 패널 용출액에서도 약 99%의 Ag을 선택적으로 회수하였다. 본 연구는 친환경 limonene 기반 EVA 제거와 강산성 조건에서 작동하는 섬유형 Ag 회수 소재를 통해 폐태양광 패널의 구성요소 분리 및 유가자원 회수를 위한 자원순환 기술의 고도화 가능성을 제시하였다.

Key Words : 폐태양광 패널, EVA, 은, 자원회수, 친환경

† Corresponding author, E-mail: plead36@kist.re.kr

후 기
본 연구는 대한민국 환경부의 환경기술개발사업 '태양광 패널 해외 현장 맞춤형 이동식 재활용 기술 및 글로벌 실증(과제번호 : RS-2025-02223005)'을 기반으로 진행된 연구입니다.

PCE-O-4

폐 태양광 모듈 파쇄물로부터 구리 리본 및 실리콘의 순차적 건식 선별 회수

Sequential Dry Separation for Recovering Copper Ribbon and Silicon from Crushed Waste Photovoltaic Module Sandwich Panels

김수환*, 박종성*†
Suhwan Kim*†, Jongsung Park*†
*경상국립대학교 미래융복합기술연구소, 에너지공학과

Abstract : 폐 태양광 모듈의 발생량 증가에 따라 습식 화학처리에 의존하지 않는 건식 재활용 기술의 필요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 전면 유리와 실링재를 제거한 폐 태양광 모듈 샌드위치 패널을 파쇄하여 실리콘 태양전지 셀 조각, 구리 리본 및 에틸렌-비닐아세테이트(EVA)가 혼재된 파쇄물을 형성하고, 이에 대하여 와전류 선별과 정전식 선별을 순차적으로 적용하는 건식 회수 공정을 제안하였다. 파쇄물은 체분급을 통해 1~3 mm의 입도로 조정하였으며, 마그네틱 로터를 3,500 rpm(약 5,500 Gauss)으로 구동하는 와전류 선별에서 도전성 구리 리본을 선행 분리하였다. 이때 컨베이어 벨트로의 분산 공급과 분리판 높이 조절을 적용한 결과, 투입 구리 리본 89.0 g에 대하여 89.4 g의 금속 농축 분획이 회수되었고 확인된 비금속 혼입량은 약 0.41 g에 그쳤다. 구리 리본을 선행 제거하지 않은 경우에는 10~20 kV 인가 구간에서 잔류 구리 리본에 의한 아크 방전이 반복되어 정전식 선별기의 정상 운전이 불가능하였던 반면, 구리 저감 잔류 혼합물을 투입한 경우에는 인가전압 20 kV 및 드럼 회전속도 66.8 rpm 조건에서 안정적인 연속 선별이 가능하였다. 열중량분석 결과 실리콘 함량은 선별 전 약 89%에서 선별 후 약 96.4%로 약 7.4%p 향상되었으며, 정전식 선별을 3회 반복함에 따라 실리콘 누적 회수율은 74.5%, 87.5%, 91.3%로 증가하였다. 이상의 결과는 와전류 선별이 구리 회수 공정인 동시에 후속 정전식 선별의 아크 방전을 억제하는 전처리 기능을 수행함을 보여주며, 산·알칼리 침출이나 유기용매 처리 없이 구리와 실리콘을 순차적으로 회수할 수 있는 저환경부담 건식 재활용 공정의 가능성을 제시한다.

Key Words : 태양광 모듈 재활용(PV module recycling), 건식 선별(Dry separation), 와전류 선별(Eddy current separation), 정전식 선별(Electrostatic separation), 실리콘 회수(Silicon recovery)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

후 기

본 연구는 기후·에너지·환경부(MCEE)의 지원을 받아 한국환경산업기술원(KEITI)이 수행한 태양광 패널 재활용 R&D 과제(RS-2025-02223005)의 지원을 받아 수행되었습니다.

PCE-O-5

폐태양광 실리콘 재활용 분말을 활용한 고부가가치 소재 제조 기술

Development of High Value-Added Materials Utilizing Recycled Silicon Powder from Waste Photovoltaic Panels

위상욱*†, 한민우**
Sangwook Ui*†, Minwoo Han**
*(주)MiCo 기술연구소

Abstract : 본 연구에서는 폐태양광 모듈에서 회수한 실리콘(Si) 재활용 분말(Recycle Powder)을 고부가가치 비산화물 세라믹 소재(질화규소 등)로 재자원화하기 위한 정제 및 합성 공정 기술을 고찰하였다. 급증하는 폐태양광 모듈 처리 문제는 환경적·경제적 이슈로 부각되고 있으며, 특히 고순도 실리콘 자원의 순환 이용은 탄소중립 및 공급망 안정화 관점에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 폐태양광 실리콘 웨이퍼 및 슬러지로부터 물리·화학적 정제 공정을 통해 불순물을 제어하고, 고순도 Si 분말을 확보하였다. 확보된 재활용 Si 분말의 직접질화 반응 제어 및 고온 합성 특성을 분석하여 기존 원료 대비 결정구조, 입도 분포, 순도 및 방열·기계적 특성 차이를 비교 평가하였다. 연구 결과, 적정 정제 및 질화 공정 조건을 통해 기존 고순도 신재 원료에 상응하는 비산화물 세라믹 분말 및 구조 부품용 소재 합성이 가능함을 확인하였다. 이는 폐태양광 자원의 고부가가치 자원순환 네트워크 구축에 기여할 것으로 기대된다.

Key Words : 폐태양광 재활용(Recycled PV modules), 실리콘 분말(Silicon powder), 자원순환(Resource recycling), 질화규소(Silicon nitride), 비산화물 세라믹(Non-oxide ceramics)

† Corresponding author, E-mail: sangwook.ui@mico.kr

후 기

본 연구는 2025년 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 태양광 패널 재활용 기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025-02223005).

PCE-O-6

이동식 태양광 폐패널 재활용 설비(SolreBorn)의 소음·진동 운전환경 분석평가

Noise and Vibration Operating Environment Analysis of Mobile Solar Waste Panel Recycling Facility (SolreBorn)

Choi Kwang-il*, Lee Jae-young*, Lee Jae-choon*†
*JeollaNam-do Environmental Industries Promotion Institute

Abstract : Efforts by the international community to address climate change are leading to renewable energy deployment policies aimed at carbon neutrality. As solar power generation capacity surges due to the expanding demand for renewable energy, the disposal of end-of-life solar panels is emerging as a major issue. With solar power generation on the rise not only domestically but globally, and the volume of discarded solar panels expected to continue increasing, companies worldwide are attempting to engage in recycling businesses. Therefore, to secure global competitiveness, it is essential to develop technology for globally customized mobile pre-processing facilities capable of drastically reducing transportation costs, which account for the largest portion of recycling expenses. Wonkwang S&T Co., Ltd. intended to recycle waste solar panels at the point of origin using its mobile waste solar panel recycling facility (SolreBorn), which was developed as part of the solar panel recycling technology development project. To this end, the company applied for and received a regulatory exemption for the demonstration of a new circular economy technology and service regarding the 'on-site recycling processing service for waste solar panels.' As additional conditions for the regulatory exemption required the removal of hazardous factors that could affect the surrounding environment (such as fugitive dust, odors, air pollutants, noise, vibration, leachate, and hazardous substances under Article 13-2 of the Waste Management Act), the protection of the living environment, and the specific preparation of related countermeasures, this study analyzed and evaluated the operating environment regarding noise and vibration, which are hazardous factors that could affect the surrounding environment, prior to the domestic on-site demonstration of the mobile waste solar panel recycling facility (SolreBorn).

Key Words : Mobile solar waste panel recycling facility, Waste Management Act, Driving environment analysis

† Corresponding author, E-mail: jakichun@jeipi.or.kr

Acknowledgments

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through R&D project for recycling solar panel, funded by Ministry of Climate, Energy, Environment(MCEE)(RS-2025-02223005)

PCE-O-7

고정식 및 이동식 태양광 재활용 공정의 전과정평가(LCA) 평가 방법론에 대한 연구

A Study on the Life Cycle Assessment (LCA) Methodology for Fixed and Mobile Solar Panel Recycling Processes

문은진*†, 이채미*, 박철*
Eunjin Moon*†, Chaemi Lee, Cheol Park*
*한국건설생활환경시험연구원 보건환경본부 LCA평가반

Abstract : 태양광 발전 시스템의 누적 설치 용량이 지속적으로 증가함에 따라 수명이 다한 태양광 모듈의 발생량도 함께 증가할 것으로 전망되며, 이에 따라 재활용 공정의 환경적 성과를 정량적으로 평가할 수 있는 전과정평가(LCA) 방법론 마련의 필요성이 대두되고 있다. 기존의 재활용 방식은 폐패널을 파쇄·분리 시설로 운반하여 처리하는 고정식 공정 위주로 이루어져 있어 상당한 운반 비용과 이에 따른 탄소 배출을 유발하며, 이를 개선하기 위해 현장에서 이동식 장비를 활용해 패널 프레임을 해체하고 유리를 분리함으로써 알루미늄과 유리를 즉시 회수하는 이동식 재활용 공정이 대안으로 제시되고 있다. 그러나 두 공정 간 환경적 성과를 일관된 기준으로 비교·평가할 수 있는 방법론은 아직 충분히 정립되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 고정식 및 이동식 태양광 재활용 공정을 대상으로 전과정 탄소 배출량을 정량적으로 비교·분석할 수 있는 LCA 평가 방법론을 제안하였다. 구체적으로, 회수 자원(알루미늄, 유리, 구리, 금속 실리콘 분말, 은 등)의 신재 대체에 따른 회피효과(avoided burden)를 반영하여 순배출량(net emission)을 산정하는 프레임워크를 구축하였으며, 운반 거리 및 방식 등 다양한 운반 시나리오가 탄소 배출량에 미치는 영향을 평가하기 위한 민감도 분석 방법을 함께 제시하였다. 본 연구에서 제안한 방법론은 재활용 공정 유형에 따른 환경적 성과를 체계적이고 일관되게 평가할 수 있는 근거를 제공하며, 향후 태양광 폐패널 재활용 분야의 기술 발전 및 정책 수립을 위한 평가 기준으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA), 태양광 폐패널(End-of-life Photovoltaic Module), 이동식 재활용 공정(Mobile Recycling Process), 회피효과(Avoided Burden), 운송시나리오(Transportation Scenario)

† Corresponding author, E-mail: ejmoon@kcl.re.kr

후 기
본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 태양광 패널 재활용 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2025-02223005).



Special Session

해상풍력기술과 해양 FPV시스템

FPV-O-1

동남아 해양 FPV 경제성 확보를 위한 설계 최적화 및 산업화 전략 연구

Design Optimization and Industrialization Strategies for Economically Viable Offshore FPV in Southeast Asia

이상길*†, 이동환*, 김문옥**, 김성웅***, 윤상준****
Sanggil Lee*†, Donghwan Lee*, Moonok Kim**,
Sung-Woong Kim***, Sangjoon Yoon****
*젠텍이엔씨, **스펙엔지니어링, ***세아제강, ****고등기술연구원

Abstract : 최근 해양 부유식 태양광(Floating Photovoltaic, FPV) 시스템은 대규모 재생에너지 발전원 확보를 위한 유망 기술로 주목받고 있으나, 실제 상용화를 위해서는 대상 해역에 적합한 설계와 제작·운송·설치 및 운영 전 과정의 비용 경쟁력 확보가 요구된다. 특히 동남아시아 지역은 높은 일사량과 풍부한 수역을 보유하고 있으나, 지역별 해양환경과 인프라 및 시공 여건의 차이가 커 지역 특성을 반영한 최적화 설계와 산업화 전략이 필요하다. 본 한-스 국제공동연구에서는 동남아 해역 적용을 목표로 해양 FPV 시스템의 경제성 확보를 위한 설계 최적화 및 산업화 기술개발을 수행하고 있다. 설계 측면에서는 대상 해역의 환경조건과 시스템 요구조건을 반영한 자동화·최적화 설계 절차를 구축하고, 지역별 요구조건에 적합한 설계모델을 도출하고자 한다. 또한 설치성과 운영·유지관리성을 설계단계부터 고려하여 제작부터 설치·운영까지의 비용을 반영하는 설계체계를 구축한다. 산업화 측면에서는 부재의 모듈화·표준화, 컨테이너 운송, 현장 용접을 최소화한 조립형 연결방식과 제작공정의 표준화를 통해 제작·물류·설치 효율성 및 현지 공급망 활용성을 향상시키고자 한다. 이러한 설계 최적화와 산업화 전략을 통합하여 해양 FPV 시스템의 전 생애주기 비용과 균등화발전비용(Levelized Cost of Energy, LCOE)을 저감하고, 궁극적으로 동남아 시장에서의 경제성과 상업적 적용 가능성을 확보하는 것을 목표로 한다. 본 발표에서는 전체 연구의 추진 배경과 기술개발 방향 및 주요 연구축 간의 연계성을 소개하고, 이후 세부 연구주제의 기술적 배경과 연구 프레임워크를 제시한다.

Key Words : 해양 부유식 태양광(Offshore Floating Photovoltaic (Offshore FPV)), 설계 최적화 (Design Optimization), 산업화 (Industrialization), 균등화발전비용 (Levelized Cost of Energy, LCOE), 동남아시아 (Southeast Asia)

†Corresponding author, E-mail: afluid@zentechenc.com

후 기

본 연구는 2024년도 한국산업기술진흥원의 재원으로 산업기술국제협력 국제공동기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : P0027945).

FPV-O-2

다중 배열 부유식 태양광 시스템의 설계·해석을 위한 자동화 프로세스 연구

A Study on an Automated Design and Analysis Process for Multi-Array Floating Photovoltaic Systems

이상길*, 이주연*†, 이동환*, 이승재**, 이민준***
Sanggil Lee*, Juyeon Lee*†, Donghwan Lee*, Seungjae Lee**, Minjun Lee***
*젠텍이엔씨, **한국해양대학교, ***Tsinghua University

Abstract : 최근 해양 부유식 태양광(Floating Photovoltaic, FPV) 시스템은 발전용량 확대와 경제성 확보를 위해 시스템의 대규모화가 요구되고 있으며, 이를 위한 방안으로 다수의 부유체를 연계한 다중 배열 시스템의 적용이 확대되고 있다. 이러한 다중 배열 시스템에서는 부유체 간 연결과 공유 계류시스템의 적용에 따라 설계요소가 증가하고, 배열 구성 및 계류조건에 따른 반복적인 모델링과 설계 검토에 많은 리소스가 요구된다. 따라서 다중 배열 FPV 시스템의 효율적인 설계를 위해서는 모델 생성, 해석 수행 및 결과 후처리로 이어지는 반복 업무를 효율화할 수 있는 설계 자동화 프로세스의 구축이 필요하다. 본 연구에서는 상용 해양동역학 해석 프로그램인 OrcaFlex의 API를 기반으로 다중 배열 FPV 시스템의 설계 및 해석을 위한 자동화 프로세스를 구축하였다. 부유체 배열, 부유체 간 연결 및 공유 계류시스템의 주요 설계변수를 파라미터화하고, 입력된 설계조건에 따라 다수의 FPV 부유체와 연결·계류시스템으로 구성된 해석 모델이 자동으로 생성되도록 구성하였다. 또한 생성된 모델에 대해 다양한 환경조건에서의 반복 해석과 주요 응답의 후처리가 자동으로 수행되도록 일련의 해석 절차를 구축하였다. 구축된 프로세스를 활용하여 다중 배열 FPV 모델을 생성하고, 극한한계상태(Ultimate Limit State, ULS) 조건에서 부유체의 운동응답과 공유 계류시스템의 장력 특성을 검토하였다. 아울러 다중 배열에서의 부유체 간 상호작용이 운동 및 계류응답에 미치는 영향을 비교함으로써 자동화 해석 과정에서 다물체 상호작용을 고려하기 위한 적용 방법을 검토하였다. 이를 통해 다중 배열 FPV 시스템의 반복적인 설계 검토 과정에서 모델 생성부터 해석 및 결과 후처리에 이르는 일련의 작업을 자동화하고, 배열 및 공유 계류조건에 대한 효율적인 비교·검토 과정 전반을 소개 하고자한다.

Key Words : 부유식 태양광(Floating photovoltaic (FPV)), 다중 부유식 태양광 시스템(Multi-FPV system), 다물체 상호 작용(Multibody interaction), 자동화 모델링(Modeling Automation), 설계 자동화(Design Automation)

† Corresponding author, E-mail: wndus77@zentechenc.com

후 기
본 연구는 2024년도 한국산업기술진흥원의 재원으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : P0027945).

FPV-O-3

컨테이너 운송을 고려한 해상 부유식 태양광 플랫폼의 표준화·모듈화 전략

Standardization and Modularization Strategy for Offshore Floating Photovoltaic Platforms Considering Containerized Transportation

이규석*, 정용일*, 김범식*, 김문옥*†
Kyu suk Lee*, Yong il Jung*, Beom sik Kim*, Moon ok Kim*†
*(주)스펙엔지니어링와이엔피 기술연구소

Abstract : 해상 부유식 태양광 발전은 육상 태양광의 부지 제약을 보완하고 넓은 해양 공간을 활용할 수 있는 재생에너지 발전방식으로 주목받고 있다. 그러나 대규모 해상 부유식 태양광 플랫폼은 구조물의 규모와 중량으로 인해 제작 후 운송 및 현장 조립 과정에서 상당한 물류 제약이 발생할 수 있다. 특히 해외 및 도서 지역에 적용할 경우 장거리 운송을 위한 별도의 운송수단 확보, 현장 제작설비 및 숙련인력의 필요성 등이 사업비와 시공성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 이러한 운송 및 시공 제약을 개선하기 위하여 0.5 MW급 해상 부유식 태양광 플랫폼을 대상으로 컨테이너 운송을 고려한 표준화·모듈화 전략을 제안하였다. 연구 대상은 스페인의 BlueNewables에서 개발한 PV-bos 모델을 기본 구조로 하였으며, 플랫폼을 구성하는 주요 구조부재를 Pontoon, Node, Horizontal Brace 및 Diagonal Brace로 구분하여 반복 제작이 가능한 표준 모듈 형태로 재구성하였다. 각 구조부재는 국제 물류에 일반적으로 활용되는 40 HC 및 45 HC 컨테이너에 적재할 수 있도록 부재 길이와 분할 위치를 설정하였다. 또한 분할된 부재의 현장 조립성을 확보하기 위해 주요 접합부에 볼트 플랜지 접합방식을 적용함으로써 현장 용접작업을 최소화하고 조립 공정을 단순화하였다. 이를 통해 대형 구조물을 일체형으로 운송하는 방식에서 발생하는 운송 제약을 완화하고, 표준화된 부재의 반복 제작 및 조립이 가능하도록 하였다. 제안된 표준화·모듈화 전략은 일반 컨테이너 기반의 운송체계를 활용함으로써 해상 부유식 태양광 플랫폼의 물류 효율을 향상시킬 수 있으며, 현장 제작 및 용접작업에 대한 의존도를 낮춰 설치지역의 시공 여건에 따른 영향을 줄일 수 있다. 또한 동일 규격 부재의 반복 생산과 교체가 가능하여 향후 대량 제작 및 유지관리 측면에서도 활용성이 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 해상 부유식 태양광 플랫폼의 제작, 운송 및 현장 조립 과정을 고려한 구조 표준화·모듈화 방향을 제시한다.

Key Words : 해상 부유식 태양광(Offshore Floating Photovoltaics), 표준화(Standardization), 모듈화(Modularization), 컨테이너 운송(Containerized Transportation), 현장 조립(On-Site Assembly)

† Corresponding author, E-mail: hihioho@speceng.co.kr

후 기
본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 산업기술국제협력 국제공동기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : P0027945).

FPV-O-4

강재 해상 부유식 태양광 구조물의 단면최적화 시스템 개발 및 검증

Development and Verification of a Cross-Section Optimization System for Steel Offshore Floating PV Structures

김범식*, 김정수**, 김문옥*†, 이규석*, 정용일*
Beomsik Kim*, Jeongsoo Kim**, Moonok Kim*†,Kyusuk Lee*, Yongil Jung*
*(주)스펙엔지니어링와이엔피 기술연구소, **한국건설기술연구원

Abstract : 본 연구에서는 보 요소 기반의 강재 해상 부유식 태양광(Offshore Floating Photovoltaic, OFPV) 구조물을 대상으로 구조해석 및 단면 최적화를 자동으로 수행하는 FE4OPT를 개발하였다. FE4OPT는 유한요소해석, 설계기준 기반의 사용률(Unity Check, UC) 평가, 그리고 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 순차최소제곱계획법(Sequential Least Squares Programming, SLSQP)을 이용한 혼합 최적화 기법을 통합하여 구성하였다. 적용 대상은 0.5 MW급 쌍동형 강재 OFPV 구조물로 하였으며, 유체동역학 해석에서 선정된 대표 구조하중을 최적화 과정에 적용하였다. FE4OPT에서 산정된 부재력을 Abaqus 결과와 비교한 결과, 총 345개 부재의 2,070개 비교 결과 중 95.07%와 99.66%가 각각 절대상대오차 1% 및 5% 이내로 나타났다. 최소 부재두께를 6 mm로 설정한 경우 구조질량은 189.2 t에서 124.1 t으로 감소하여 34.4%의 질량 감소율을 나타냈으며, 모든 설계그룹에서 두께 하한조건이 최종 단면을 지배하였다. 추가적으로 두께 하한을 2 mm로 설정하여 최적화를 수행한 결과, 최적점 부근에서 쉘좌굴 및 기둥좌굴 제약조건이 활성화되어 FE4OPT의 제약조건 처리 거동을 확인하였다. 또한 6 mm 조건의 최적설계안을 Abaqus로 재해석한 결과, 모든 검토항목에서 평균절대 UC 차이가 0.020 이하로 나타났다. 이상의 결과를 통해 FE4OPT가 보 요소 기반 강재 OFPV 구조물의 자동화된 단면 최적화에 적용 가능함을 확인하였다. 다만 최종 설계 적용을 위해서는 최적화된 구조특성을 반영한 유체동역학 재해석이 필요하다.

Key Words : 해상 부유식 태양광(Offshore floating photovoltaic), 단면최적화(Cross-section optimization), 유한요소해석(Finite element analysis), 사용률(Unity check)

† Corresponding author, E-mail: hihioho@speceng.co.kr

후 기

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 산업기술국제협력 국제공동기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : P0027945).

FPV-I-1

AI기반 풍력단지 바람장 예측

AI Based Wind farm Flow Prediction

이상봉*†
*KAIST 항공우주공학과

Abstract : 본 연구는 대규모 풍력단지에서 발생하는 3차원 비정상 후류를 장시간 예측하기 위한 딥러닝 기반 대리모델을 제안한다. 기존 Large-eddy Simulation(LES)는 높은 정확도를 제공하지만 반복 계산에 막대한 계산비용이 요구되는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 3D Swin Transformer와 U-Net 구조를 결합하여 복잡한 다중 터빈 후류 상호작용을 학습하였다. 모델 학습에는 30개 풍력터빈에 대한 고정밀 LES 데이터와 서로 다른 터빈 틸트 조건을 활용하였다. 제안 모델은 순간적인 3차원 유동장과 주요 후류 구조를 장시간에 걸쳐 높은 정확도로 재현하였다. 또한 속도 결손 분포, 후류 중심선 궤적 및 터빈 유입속도와 같은 주요 물리적 특성을 효과적으로 예측하였다. 학습에 포함되지 않은 틸트 조건에서도 3차원 후류 편향과 다중 터빈 간 상호작용을 성공적으로 재현하였다. 따라서 제안 모델은 LES 대비 계산비용을 크게 절감하면서 핵심 후류 동역학을 예측할 수 있는 효율적인 대리모델로 활용될 수 있다.

Key Words : 풍력단지 후류(Wind farm wake), 대규모 와류 모사(LES), 딥러닝 대리모델(Deep learning surrogate model), 3D Swin Transformer, 터빈 틸트 제어 (turbine tilt control)

† Corresponding author, E-mail: slee1@kaist.ac.kr

후 기

본 연구는 2026년도 과학기술정보통신부의 재원으로 InnoCORE 인력양성사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (과제번호 : N10250155).

FPV-O-5

해상 부유식 태양광 발전시스템의 경제성 및 발전단가 분석

Economic Assessment and Levelized Cost of Electricity Analysis of Offshore Floating Photovoltaic System

박미호*†, 장민서*, 윤상준*
Miho Park*†, Minseo Jang, Sangjoon Yoon*
*고등기술연구원 그린시스템융합센터

Abstract : 본 연구는 육상 태양광의 입지 제약을 완화하기 위한 대안으로 주목받는 해상 부유식 태양광 발전 시스템의 경제성을 분석하였습니다. 특히, 표준화 및 모듈화 설계가 적용된 0.5 MW급 PV-BOS 플랫폼을 대상으로, 운송·조립 방식의 개선과 사업 규모 및 운영기간 변화가 초기투자비(CAPEX)와 균등화발전단가(LCOE)에 미치는 영향을 평가하였습니다. 이를 위해 구성요소별 투자비와 운영유지비, 발전성능 저하 및 재무조건을 반영한 확정론적 분석과 몬테카를로 기반 확률론적 분석을 수행하였습니다. 분석 결과, 스페인 비고-발렌시아 운송 경로에서 모듈형 컨테이너 운송 방식은 예인 방식 대비 운송 및 항만 조립 비용을 약 58.7% 절감하는 것으로 나타났습니다. 다만, 해당 절감률은 비교 대상 경로와 비용 항목에 한정됩니다. 설계수명 30년의 장기 시나리오에서 최적화 조건을 적용한 확정론적 LCOE는 85.56 USD/MWh로 산정되었으며, 입력변수의 불확실성을 반영한 10만 회의 몬테카를로 분석에서는 평균 119.42 USD/MWh, 중앙값 117.11 USD/MWh로 평가되었습니다. 민감도 분석에서는 설비이용률과 초기투자비가 발전단가를 좌우하는 주요 인자로 확인되었습니다. 이러한 결과는 표준화·모듈화 설계와 물류 개선이 해상 부유식 태양광의 비용 경쟁력 향상에 기여할 수 있음을 보여줍니다. 향후 대상 해역의 발전량, 해양환경, 가동률 및 유지관리 조건에 대한 실증을 통해 경제성 평가의 신뢰도를 높일 필요가 있습니다.

Key Words : 해상 부유식 태양광 (Offshore Floating PV), 표준화 및 모듈화 (Standardization and Modularization), 균등화발전단가 (LCOE)

† Corresponding author, E-mail: mihopark@iae.re.kr

후 기

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT) 산업기술국제협력사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호 : P0027945)

FPV-O-6

해양재생에너지의 경제성 향상을 위한 해상풍력 허브의 사업모델

Business Model of Offshore Wind Hub to Enhance the Economy of Offshore Renewable Energy

김용욱*†, 안중은*, 박미호*, 임동명*, 윤상준*, 이현주**
Yong-Yook Kim*†, Jungeun An*, Miho Park*, Dongmyung Im*, Sangjoon Yoon*, Hyunjoo Lee**
*고등기술연구원 그린시스템인텔리전스센터, **ORE Catapult

Abstract : 원해 대규모 해상풍력의 사업성 확보를 위해서는 장거리 송전 및 유지보수 비용 절감과 함께 해상 인프라의 공동 활용과 전력 수요 연계를 통한 수익원 다변화가 필요하다. 본 연구에서는 부유식 및 고정식 해상풍력 단지와 연계 가능한 부유식 에너지 아일랜드 허브를 대상으로, 전력 집전·송전, 유지보수·물류, 데이터센터 및 그린수소 생산을 결합한 사업모델과 경제성 평가 방향을 제안한다. 기본 모델은 다수 풍력단지의 HVDC 공동접속과 해상 유지보수 거점 운영으로 구성하며, 발전사업자와 허브·송전설비 운영자 간 투자비 분담, 설비 이용 대가, 접안·창고 임대 및 정비·물류 서비스 수익을 검토한다. 확장 모델로는 재생에너지 전력을 활용하는 AI·클라우드 데이터센터와 수전해 기반 그린수소 생산을 고려한다. 데이터센터는 허브 탑재형과 허브 전력에 연계한 연안 입지형으로 구분하고, 장기 전력공급 계약, 공간·설비 임대 및 냉각 인프라 제공 등 사업 범위에 따른 수익구조를 검토한다. 특히 해수 냉각의 활용 가능성과 함께 전력공급 연속성, 통신망 확보, 해상 유지관리 및 추가 설비 비용을 주요 사업성 검토 조건으로 설정한다. 경제성 평가는 기능 조합별 투자비·운영비와 수익을 바탕으로, 풍력단지의 균등화발전원가(LCOE) 절감 효과와 허브 사업자의 재무적 타당성을 구분하여 검토하는 체계로 구성한다. 또한 개발·운영 주체, 비용·수익 배분 및 장기 수요 확보를 고려한 단계적 사업화 방안을 제시하고자 한다. 본 발표에서는 이러한 사업모델의 구성과 성립 조건을 중심으로 초기 검토 내용을 소개하고, 부유식 에너지 아일랜드 허브가 해상 에너지 고속도로와 연계된 전력·산업 복합 거점으로 확장될 가능성을 논의한다.

Key Words : Floating Offshore Wind (부유식 해상풍력), Energy Island (에너지 아일랜드), HVDC Joint Connection (HVDC 공동접속), Economic Feasibility (경제성 평가), Operation and Maintenance Optimization (유지보수 효율화), Feasibility Study (타당성 검토)

†Corresponding author, E-mail: yongy.kim350@iae.re.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 신재생에너지핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025-02473000)

FPV-O-7

국내 해역환경을 고려한 TLP형 부유식 에너지 허브 단위 모듈의 개념설계 및 동적응답 해석 연구

A Study on Concept Design and Dynamic Analysis of a TLP-Type Floating Energy Hub Module under Korean Metocean Conditions

이상길*†, 이찬희**, 이동환**
Sang-Gil Lee*†, Chan-hee Lee**, Dong-hwan Lee**
*(주)젠텍이엔씨, **(주)젠텍이엔씨, **(주)젠텍이엔씨

Abstract : 대규모 해상풍력 개발이 확대됨에 따라 발전 전력을 집적하고 장거리 송전을 수행하기 위한 해상 전력 인프라의 중요성이 증가하고 있다. 특히 대용량 해상풍력 전력의 장거리 송전을 위해 HVDC 기반 송전 시스템의 적용이 확대되고 있으며, 대용량 전력설비를 수용할 수 있는 부유식 에너지 허브 플랫폼의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 부유식 에너지 허브는 대형 상부구조물과 전력설비 탑재로 높은 수직하중과 큰 관성을 가지며, 해역조건에 따라 플랫폼과 텐던 시스템의 응답이 달라질 수 있다. 특히 TLP형 부유식 에너지 허브는 텐던의 높은 수직 강성으로 수직 운동이 제한되며, 환경하중에 따른 플랫폼 운동 및 텐던 장력 변동이 플랫폼 안정성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 극한 해양환경에서 TLP 플랫폼의 운동성능과 안정성 확보를 위한 동적 거동 검토가 요구된다. 본 연구에서는 해상풍력 전력 집적 및 HVDC 송전을 위한 단위 모듈을 대상으로, 대상 해역의 수심 및 설계 해양환경조건을 반영한 부유체의 주요치수 산정과 텐던 적용에 대한 기술적 타당을 개념 선별 수준으로 검토하였다. 이를 위해 초기장력 변화에 따른 다양한 텐던 종류에 대하여 ULS 파주파수 조건에서 최대장력과 Slack 발생여부를 검토하고 차주파수 조건에서 부유체의 횡방향 동요 에 대한 공진 영향, 합주파수 조건에서 수직방향에 대한 Springing 영향을 검토하였다. 추가로 각 텐던 후보의 VIV발생 가능성을 검토하여 초기 개념선별에 적용하였다.
본 연구에서 결정된 단위모듈 부유체에 대한 주요치수 선정 및 텐덴 개념 선별을 통해 개념설계의 기초자료를 제공하며, 향후 4개(2.5 GW), 6개(5 GW), 9개(10 GW) 모듈 연결로 확장된 부유식 에너지 허브 및 부유체 연결부 개념설계의 초석을 제시한다.

Key Words : 부유식 HVDC 에너지 허브(Floating HVDC energy hub), 모듈형 부유체(Module type floater), 인장각형 형식(TLP type)

† Corresponding author, E-mail: afluid@zentechenc.com

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 신재생에너지 핵심기술개발사업 '모듈 타입 확장형 10GW 스케일 부유식 해상풍력'허브 설계 및 타당성 검토'의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025-02473000).



Special Session

차세대 우주 태양전지

NSS-O-1

레이저 어블레이션 마스크 기반 간섭리소그래피 마이크로 나노 계층적 구조 제작

Laser-Ablated Mask-Based Interference Lithography for Micro Nano Hierarchical Structures

황준식*†
June Sik Hwang*†
*경상국립대학교 기계공학과

Abstract : 레이저 어블레이션으로 제작한 콘택트 마스크를 로이드 미러(Lloyd's mirror) 간섭리소그래피에 접목하여, 임의로 디자인 가능한 마이크로/나노 계층적 구조를 원스텝 공정으로 제작하는 방법을 제안하였다. 유기은(OMAg) 박막을 핫플레이트 베이킹으로 전면 은(Ag) 구조로 전환한 뒤, 레이저로 특정 영역만 선택적으로 어블레이션하여 마이크로 스케일 개구 패턴을 갖는 마스크를 제작한다. 이 마스크를 기판에 밀착시킨 상태로 간섭노광을 진행하면 개구 영역 내부에만 나노 주기 구조가 형성되어, 마이크로·나노 패턴이 동시에 정의된 계층적 구조를 얻는다. 콘택트 방식으로 회절에 의한 패턴 열화를 완화하였으며, 마스크는 별도 포토마스크 공정 없이 저비용·단시간에 제작 가능하다는 실용적 장점을 갖는다. 본 발표에서는 마스크 및 노광 조건에 따른 계층적 구조 형상 변화를 SEM으로 분석한 결과와, PDMS 역상 복제를 통한 응용 소자 확장 가능성을 논의한다.

Key Words : 간섭리소그래피(Interference lithography), 콘택트 마스크(Contact mask), 레이저 어블레이션(Laser ablation), 마이크로/나노 계층적 구조(Micro/nano hierarchical structure), 유기은(Organometallic silver)

† Corresponding author, E-mail: js.hwang@gnu.ac.kr

NSS-O-2

고선택적 암모니아 전기합성을 위한 수소 발생 반응 비활성 질화붕소 지지체와 산소공공이 풍부한 몰레브덴 산화물

HER-Inert Boron Nitride Support with Oxygen Vacancy-Rich Molybdenum Oxide for Highly Selective Ammonia Electrosynthesis

Jaehyun Park*†
*경상국립대학교 에너지공학과

Abstract : Green ammonia production via electrochemical nitrogen reduction has emerged as a promising approach, as it can be coupled directly to renewable electricity and operated under ambient conditions. Although it offers a path to distributed synthesis beyond centralized Haber-Bosch plants, practical deployment has been impeded by poor ammonia selectivity and efficiency. This is mainly due to the competitive hydrogen-evolution reaction, which is thermodynamically and kinetically favored on most metal catalysts. Here, we engineer such an architecture by integrating oxygen-vacancy-rich MoO3 nanoparticles on boron nitride nanosheets. This design targets a surface that is chemically inert towards HER yet electronically active for N2 activation through strong metal-support interactions. The resulting heterostructured electrocatalyst demonstrates how support material choice and defect engineering of the metal oxide catalyst can be co-optimized to advance a credible green-ammonia electrosynthesis.

Key Words : Electrocatalyst, Oxygen vacancy, Non-noble metal, Boron nitride, Ammonia

† Corresponding author, E-mail: jay.p@gnu.ac.kr

후 기

This work was supported by the Glocal University 30 Project Fund of Gyeongsang National University in 2026.

NSS-O-3

실용적 리튬-황 전지의 폴리설파이드 전환을 위한 결함이 풍부한 열적 결합 1T/2H $MoSe_2$ 다기능 전기촉매

Thermally Coupled Defect-Rich 1T/2H $MoSe_2$ as a Multifunctional Electrocatalyst for Polysulfide Conversion in Practical Li-S Batteries

이재원*, 정현영*,**†
Jaewon Lee*, Hyun Young Jung*,**†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 에너지공학과

Abstract : Lithium-sulfur (Li-S) batteries are regarded as promising next-generation energy-storage systems owing to their high theoretical energy density. However, their practical application is still hindered by persistent challenges such as polysulfide shuttling, sluggish sulfur redox kinetics, and rapid capacity fading. Overcoming these issues requires catalytic materials that can effectively confine soluble polysulfides while simultaneously accelerating their electrochemical conversion. Here, a defect-rich mixed-phase $MoSe_2$ consisting of metallic 1T and semiconducting 2H phases is thermally integrated with the sulfur cathode to enhance polysulfide regulation under practically relevant Li-S battery conditions. The abundant dislocation defects in $MoSe_2$ reinforce interactions with sulfur-containing intermediates, while the coexistence of the 1T and 2H phases offers complementary roles in polysulfide adsorption and catalytic conversion. These synergistic effects facilitate sulfur redox reactions and lower the kinetic barriers associated with electrochemical cycling. As a result, cells incorporating defective 1T/2H $MoSe_2$ show markedly reduced charge-transfer resistance and lower reaction activation energy. Under high sulfur loading and lean-electrolyte conditions, the activation energy is reduced by 54%. In addition, a sulfur utilization of 63% is achieved at an electrolyte to sulfur (E/S) ratio of 12 $\mu L\ mg^{-1}$. Furthermore, the cell delivers a specific capacity of 810 mAh g^{-1} after 100 cycles at 0.2 C while maintaining a Coulombic efficiency of 96.5%, indicating highly reversible and stable sulfur redox behavior. These findings demonstrate the effectiveness of defect-rich 1T/2H $MoSe_2$ as a multifunctional electrocatalyst for regulating polysulfide chemistry and provide a practical materials-design approach for the development of high-energy Li-S batteries.

Key Words : Li-S batteries, $MoSe_2$, Mixed-phase, Multifunctional electrocatalyst, Polysulfide regulation

† Corresponding author, E-mail: hyjung@gnu.ac.kr

후 기

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (RS-2024-00352398).

NSS-O-4

계면 제어를 통한 우주용 페로브스카이트 태양전지 개발

Development of Perovskite Solar Cells for Space Applications through Interface Engineering

양석주*†
Seok Joo Yang*†
*경상국립대학교 화학공학과

Abstract : 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성의 활용이 확대됨에 따라 높은 비출력과 경량성을 갖는 차세대 우주 태양전지에 대한 관심이 증가하고 있다. 할라이드 페로브스카이트 태양전지는 높은 광흡수계수, 박막 소자 구조 및 저온 공정 가능성을 바탕으로 우주용 광전변환 소자로 주목받고 있다. 그러나 우주 환경에서는 고진공, 방사선 및 반복적인 극한 온도 변화로 인해 페로브스카이트 박막과 전하수송층 사이의 계면에서 결함 형성, 비방사성 재결합 및 기계적 열화가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 페로브스카이트 태양전지의 계면 특성을 제어하여 결함을 억제하고 전하 추출 및 계면 안정성을 향상시키고자 한다. 특히 계면 처리에 따른 박막의 구조적 변화와 광전기적 특성을 분석하고, 극한 온도 변화 환경에서의 소자 안정성을 평가함으로써 우주환경에 적합한 계면 설계 전략을 제시하고자 한다.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar cells), 우주 태양전지(Space solar cells), 계면 제어(Interface engineering), 저궤도(Low Earth orbit), 열 안정성(Thermal stability)

† Corresponding author, E-mail: sjyang@gnu.ac.kr

NSS-O-5

우주 페로브스카이트 태양전지의 성능 열화 예측 및 효율 향상을 위한 인공지능

Artificial Intelligence for Predicting Performance Degradation and Enhancing Efficiency of Perovskite Solar Cells for Space Applications

강동한*, 이다슬**,박종성*†
Donghan Kang*, Daseul Lee**, Jongsung Park*†
*경상국립대학교 에너지공학과, **경상국립대학교 경남항공우주방위산업연구원,

Abstract : 뉴스페이스 시대의 위성 발사 급증에 따라 기존 III_V족 다중접합 태양전지를 대체할 저비용·고효율 우주용 태양전지에 대한 수요가 증가하고 있다. 양성자 방사선은 궤도 상 열화의 지배적 요인(우주 방사선 환경의 약 85~89%)이며, 신소재 및 신구조 검증을 위해서는 비용과 시간이 많이 소요되는 양성자 조사 시험이 필요해 연구개발의 심각한 병목이 되고 있다. 페로브스카이트 태양전지(PSC)의 양성자 조사 거동은 실험적으로 연구되어 왔으나, 특히 불확실성이 정량화된 열화의 머신러닝(ML) 예측은 거의 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 p-i-n 구조 PSC에 대해 AM1.5G 조건에서 초기 Voc, Jsc, FF, PCE를 특성 평가하고, 6가지 에너지 조건으로 6회의 조사 캠페인에 걸쳐 140개 소자에 양성자를 조사하여 성능 잔존율을 확보하였다. 변위손상선량은 실제 소자 스택에 층별로 적용한 자체 SRIM/TRIM 몬테 카를로 파이프라인을 통해 계산되었으며, 표준 SRIM Full-Cascade 결과의 잘 알려진 vacancy 과대계산 문제를 해결하기 위해 Lin et al.(Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., 2023)의 방법에 따라 damage-energy 정의를 보정하였다. 캠페인 단위 교차검증 결과, 현재 모델의 일반화 성능은 모델이나 피처 선택보다는 독립적인 (에너지, 플루언스) 조건의 수가 적고 캠페인 간 반복이 고르지 않다는 점에서 주로 제한되는 것으로 나타났다. 이에 따라, 향후 연구는 불확실성이 정량화된 예측 모델 개발에 앞서 기존 조건을 추가 캠페인에서 반복 조사하고 교락된, (에너지, 플루언스) 조합을 보완하는 등 양성자 조사 시험을 체계적으로 확장하는 데 우선순위를 두고 있다.

Key Words : 페로브스카이트(Perovskite), 인공지능(Artificial Intelligence), 태양전지(Solar cells), 기계학습(Machine Learning), 예측(Prediction)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

후 기
본 연구는 2023년도 한국연구재단의 재원으로 해외우수연구기관 공통연구의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호: RS-2023-00257494).

NSS-O-6

우주 태양전지 활용을 위한 와이드 밴드갭 페로브스카이트 태양전지의 정공수송층 분자 구조에 따른 양성자 조사 열화 거동

Impact of the Hole-Transport Layer Molecular Structure on Proton Irradiation Degradation in Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells for Space application

장수성*, 이다슬**, 김수환***, 박종성*,***†
Suseong Jang*, Da Seul Lee**, Suhwan Kim***, Jongsung Park*,***†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 경남우주항공방산과학기술원,
***경상국립대학교 미래융복합기술연구소

Abstract : The rapid expansion of satellite constellations and commercial space activities has intensified interest in photovoltaic technologies for space applications. Despite substantial advances in power conversion efficiency (PCE), the deployment of perovskite solar cells (PSCs) in space remains limited by their durability under harsh environmental conditions. Here, we investigate proton-induced degradation in inverted wide-bandgap (WBG) PSCs employing Me-4PACz and 4PADCB as hole-transport layers (HTLs). Devices were exposed to 70 keV proton irradiation at a fluence of 1×10^{14} protons cm^{-2}. Following irradiation, the Me-4PACz- and 4PADCB-based devices exhibited relative PCE losses of 30% and 22%, respectively. The greater performance degradation in ther Me-4PACz device stems from substantial interfacial defect accumulation and electrical non-uniformity, which impede charge extraction. In contrast, the 4PADCB contact effectively suppressed radiation-induced trap formation and preserved interfaicial potential distribution under the same irradiation condition. HTLs-dependent differences in irradiation-induced defect characteristics were also observed. These findings suggest that the hole-selective contact influences defect formation and the associated photovoltaic degradation, highlighting its importance in developing radiation-tolerant PSCs for space applications.

Key Words : Proton Irradiation, Wide-Bandgap, Perovskite solar cells, Me-4PACz, 4PADCB

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

NSS-O-7

우주태양광용 전고체 이차전지를 위한 LLZTO 고체전해질의 초고속 고온 소결

Fabrication of LLZTO Solid Electrolytes via Ultrafast High-Temperature Sintering for Rechargeable Batteries in Space-Based Solar Power Applications

윤기혁*, 이재연*, 안건형*,**†
Kihyuk Yun*, Jaeyeon Lee*, Geon-hyoung An*,**†
*동국대학교 에너지신소재공학과, **동국대학교 에너지화공신소재공학과

Abstract : 우주태양광을 활용한 안정적인 에너지 공급을 위해서는 생산된 전력을 저장하고 필요에 따라 공급할 수 있는 고신뢰성 이차전지의 개발이 요구된다. 특히 우주 환경에서의 활용을 위해 안전성과 장기적인 작동 안정성을 고려한 전지 소재 및 제조공정 연구가 필요하다. 산화물계 고체전해질은 비가연성과 높은 열적 안정성을 지니며 액체 전해질의 누액 및 휘발 문제를 줄일 수 있어서 우주용 이차전지의 안전성 확보를 위한 소재로 주목받고 있다. 그중 LLZTO (Tantalum-doped Lithium Lanthanum Zirconium Oxide)는 리튬 이온 전도성과 리튬 금속에 대한 화학적 안정성을 갖춘 가넷형 고체전해질이다. 그러나 기존의 장시간 고온 소결 공정은 리튬 손실과 미세구조 변화에 따른 특성 저하가 발생할 수 있어 제조공정의 개선이 필요하다. 이에 본 연구에서는 우주태양광용 전고체 이차전지에 적용하기 위한 LLZTO 고체전해질 제조에 초고속 고온 소결(Ultrafast High-Temperature Sintering, UHS)을 도입하였다. 짧은 시간 동안 고온의 열에너지를 공급하여 소결 시간을 단축하고 리튬 손실이 최소화된 고체전해질을 확보하고자 하였다. 제조된 고체전해질의 구조적 특성과 전기화학적 특성을 평가하고 소결 공정이 고체전해질의 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 위의 내용은 2026년도 추계 한국태양에너지학회에서 더 자세히 논의될 것이다.

Key Words : LLZTO, Ultrafast high-temperature sintering, Solid electrolyte, All-solid-state battery, Space energy storage

† Corresponding author, E-mail: high@dongguk.edu



Special Session

PVT-HP AI 연계 냉난방 시스템

PVT-HP-O-1

히트파이프 적용 및 유로 구성에 따른 LED 조명의 냉각 성능 평가

Cooling Performance of LED Lighting fixtures with Heat Pipe and flow Path Configurations

정재철*, 남학호*, 육세진*†
Jae-Cheol Jeong*, Hak-Ho Nam*, Se-Jin Yook*†
*한양대학교 기계공학부

Abstract : LED 조명의 발생열은 실내 공간의 온도와 냉방 부하를 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 LED 조명의 온도 저감을 위해 히트파이프와 외부 순환수를 이용한 냉각 시스템을 제안하였다. 기존 상용 조명의 구조를 유지하고, LED 모듈과 스위칭 전원공급장치의 열을 구리 히트파이프를 통해 외부 순환수에 전달하여 유체와 전기 부품의 직접 접촉을 방지하였다. LED 조명 12개로 실험 장치를 구축하고, 히트파이프 설치 위치와 직렬·병렬 유로를 조합한 5개 구성을 비교하였다. 실내 온도는 22°C로 유지하고, 입구 수온을 5, 10, 15°C, 레이놀즈수를 1,080~6,520으로 변화시키며 방열판의 평균·최대 표면온도와 열저항을 평가하였다. 열저항은 평균 표면온도와 실내 온도의 차이를 조명 입력전력으로 나누어 산정하였다. 모든 구성에서 히트파이프와 외부 순환수 냉각을 적용하지 않은 기준 조건보다 낮은 표면온도와 열저항을 보였으며, 양단 히트파이프와 병렬 유로를 적용한 구성의 성능이 가장 우수하였다. 해당 구성의 평균 표면온도는 입구 수온 5, 10, 15 °C에서 기준 조건보다 각각 10.7, 9.7, 8.6°C 낮았으며, 최대 표면온도도 감소하였다. 평균 열저항은 기준값 대비 최대 약 51% 감소하였다. 입구 수온이 낮고 레이놀즈수가 높을수록 표면온도와 열저항은 감소하였으나, 레이놀즈수보다 히트파이프 배치와 유로 구성의 영향이 더 큰 것으로 파악되었다. 병렬 유로는 순환수를 조명 양측으로 분배하여 직렬 유로의 점진적인 수온 상승을 완화하고 각 냉각 구간의 수온을 낮게 유지하였다. 이를 통해 히트파이프 배치와 유로 개선에 따른 LED 조명의 온도 및 열저항 감소 효과를 확인하였다.

Key Words : 식물공장(Plant factory), LED 조명(LED lighting), 히트파이프(Heat pipe)

† Corresponding author, E-mail: ysjnuri@hanyang.ac.kr

후 기

This work was supported by Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through R&D Program for Fluorinated Greenhouse Gas Mitigation Technologies in Response to International Agreement Project, funded by Korea Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (RS-2026-25501408).

PVT-HP-O-2

원통형 핀-핀 상단부에 나선형 구조 적용에 따른 힛싱크 자연대류 냉각 성능 향상

Enhanced Natural Convection Cooling of a Cylindrical pin-fin Heatsink with Helical Upper Sections

남학호*, 정재철*, 육세진*†
Hak-Ho Nam*, Jae-Cheol Jeong*, Se-Jin Yook*†
*한양대학교 기계공학부

Abstract : 전자기기 및 전력 변환 시스템의 고밀도화에 대응하기 위해, 무전원 방식이면서도 경량성과 방열 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 자연대류 열전달 성능을 향상하기 위한 연구가 지속되고 있다. 본 연구는 전형적인 원통형 핀 배열을 갖는 힛싱크의 방열 성능을 개선하기 위해, 핀의 상부 영역에 나선형 구조를 접목한 힛싱크를 새롭게 고안하고 자연대류 조건에서의 냉각 특성을 수치해석 및 실험으로 검증하였다. 설계 유효성을 체계적으로 탐색하기 위해 나선형 구조의 코일 지름, 높이, 피치를 핵심 기하학 변수로 설정하고, 전산유체역학(CFD) 데이터 기반의 반응표면분석법(RSM)을 통해 다변수 최적화를 진행하였다. 매개변수 영향도 분석 결과, 전체 전열 경로에서 발생하는 열저항을 저감하는 데 있어 나선형 구조의 높이가 가장 지배적인 기여를 하는 것으로 규명되었다. 지름을 포함한 최적 설계 영역에서 본 형상은 핀 상부의 불필요한 열경계층 발달을 억제하고 부력에 의한 상승 기류 유입을 촉진하여 냉각 효율을 극대화하였다. 이러한 결과는 핀 구조물의 상단부 형상 제어가 자연대류 힛싱크의 중량 감소와 열관리 성능 개선을 동시에 달성할 수 있는 실용적인 설계 전략임을 보여준다.

Key Words : 발광다이오드(LED), 자연대류(Natural convection), 최적화(Optimization)

† Corresponding author, E-mail: ysjnuri@hanyang.ac.kr

후 기

This study has been performed for 'Development Project for One-stop Platform Technology of Atmospheric Environmental Monitoring UAV System' (SN: RS-2025-02213909) funded by the ROKG.

PVT-HP-O-3

벌집 형상 유로를 적용한 수냉식 PVT 모듈의 전산유체해석 및 AI 기반 최적 설계

Computational Fluid Dynamics Analysis and AI-Based Optimal Design of a Water-Cooled PVT Module with Honeycomb flow Channels

최관용*,**, 김영원*†
Gwan Yong Choi*,**, Young Won Kim*†
*한국생산기술연구원 에너지나노그룹, **한양대학교 융합기계공학과

Abstract : 수냉식 PVT(Photovoltaic-Thermal) 시스템은 태양광 발전 과정에서 발생하는 열을 냉각수를 통해 회수함으로써 태양에너지의 활용도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 벌집 형상 유로를 적용한 수냉식 PVT 모듈을 대상으로 전산유체해석(CFD)을 수행하고, 해석 결과를 기반으로 AI 예측모델을 구축하여 최적 운전조건을 탐색하였다. 선정된 유로 형상에 대해 일사량, 유로별 질량유량 및 입구온도를 변화시켜 총 125개의 CFD 데이터를 구축하였으며, 열효율은 약 38.76~57.98% 범위로 나타났다. 구축된 데이터를 이용하여 출구온도와 열효율을 예측하는 AI 모델을 개발하였으며, 5-Fold Cross Validation에서 열효율 예측모델은 \(R^2=0.9785\)의 높은 예측성능을 나타냈다. 또한 학습에 포함되지 않은 6개의 추가 CFD 조건을 이용한 독립 검증에서도 \(R^2=0.936\)을 확인하였다. 검증된 모델을 이용하여 운전조건 공간을 탐색한 결과, 최대 예측 열효율은 약 57.88%로 나타났으며, 높은 일사량과 질량유량 및 낮은 입구온도 조건에서 고효율 운전영역이 형성되는 것을 확인하였다. 이를 통해 CFD와 AI를 연계한 수냉식 PVT 모듈의 효율적인 성능예측 및 최적 운전조건 탐색 가능성을 확인하였다.

Key Words : 태양광·열 복합 시스템(PVT), 수냉식 PVT, 벌집 형상 유로(Honeycomb Flow Channel), 전산유체해석(CFD), 인공지능(AI), 열효율(Thermal Efficiency)

† Corresponding author, E-mail: ywkim@kitech.re.kr

후 기

본 연구는 KOREA INNOVATION FOUNDATION의 지원을 받아「20kWh급 PVT-공기열 고효율 히트펌프 AI 연계 냉난방 시스템 상용화 기술 개발」과제의 일환으로 수행되었음(과제번호: RS-2026-25534635).

PVT-HP-O-4

20kWth급 PVT-공기열원 히트펌프 연계 냉난방 시스템 설계

Design of a 20kWth Heating and Cooling System Integrating PVT and an Air-Source Heat Pump

표세준*†, 서성준*, 정수창*
Sejun Pyo*†, Seongjun Seo*, Suchang Jeong*
*㈜세진엔지니어링

Abstract : 본 연구에서는 태양광·태양열 복합모듈(PVT)의 회수열을 공기열원 히트펌프와 연계하여 건축물 냉난방에 활용하기 위한 시스템 설계안을 제시한다. 설계 대상은 목표 난방출력 20kWth의 공기열원 히트펌프, 1,200L급 전용 축열탱크, PVT 및 순환·제어설비로 구성되며, 연구 범위는 주요 구성기기의 연계 구조, 축열탱크의 열교환 회로 및 열원 활용을 위한 운전 개념으로 설정하였다.
축열탱크는 건축물 부하, PVT 및 히트펌프의 열교환 회로를 구분하는 3코일 구조로 구성하였다. 상단에는 건축물 부하용, 중단에는 PVT 회수열용, 하단에는 히트펌프용 열교환 코일을 배치하여 축열탱크를 중심으로 각 회로를 연계하는 방식을 제안하였다. 운전 개념은 PVT 회수열을 저장하는 축열 운전과 저외기 조건에서 히트펌프의 열원을 보조하는 운전으로 구분하였다. 평상시에는 PVT 회수열을 축열탱크에 공급하고, 외기온도 −5℃ 이하를 보조열원 운전의 설계 조건으로 설정하여 PVT 회수열을 히트펌프의 열원 보조에 활용하도록 구성하였다.
현장 적용 대상은 남구반다비체육센터로 설정하고, 설치공간과 기존 냉난방설비의 연계조건을 고려한 주요 장비 배치, 순환배관 및 계측·제어 구성안을 다루었다. 제안한 설계안의 특징은 별도의 보조예열 열원을 추가하지 않고 PVT 회수열을 축열과 저외기 시 히트펌프 열원 보조에 활용하도록 구성한 점이다. 본 연구는 이러한 열원 연계 구조와 운전 개념을 제시하는 설계 연구이며, 시스템의 정량적인 성능 검증과는 구분된다.

Key Words : 태양광·태양열 복합모듈(Photovoltaic-thermal module), 공기열원 히트펌프(Air-source heat pump), 축열탱크(Thermal storage tank), 열원 연계(Heat source integration), 냉난방 시스템(Heating and cooling system)

†Corresponding author, E-mail: londu@naver.com

후 기

본 연구는 KOREA INNOVATION FOUNDATION의 지원을 받아「20kWh급 PVT-공기열 고효율 히트펌프 AI 연계 냉난방 시스템 상용화 기술 개발」과제의 일환으로 수행되었음(과제번호: RS-2026-25534635).

PVT-HP-O-5

인공지능 기반 태양광·태양열 보조 공기열 히트펌프 시스템 최적 운전 기술 개발

Development of AI-based Optimal Operation Strategy of a PVT-Assisted Air Source Heat Pump System

박형민*, 박지호*, 김현식*, 윤정원*†
Hyungmin Park*, Jiho Park*, Hyunsik Kim*, Jungwon Yoon*†
*광주과학기술원 인공지능학과

Abstract : Photovoltaic/thermal (PVT) systems can simultaneously generate electricity and useful heat from solar energy. When coupled with an air source heat pump (ASHP), the recovered thermal energy can be used as an auxiliary heat source to mitigate the deterioration in heating performance and coefficient of performance (COP) under low outdoor temperature conditions. However, the optimal operation of a PVT assisted ASHP system is difficult to determine using conventional rule-based control because PVT heat production, outdoor temperature, building load, thermal storage conditions, and compressor part load characteristics vary over time. In this study, a dynamic simulator was developed for a 20 kWth PVT assisted ASHP system, together with a hierarchical optimal operation algorithm that combines model predictive control for day ahead operation scheduling and reinforcement learning for real time compressor capacity modulation. The proposed control strategy was evaluated using weather conditions representative of Gwangju, Korea. Delivered heating and cooling energy and supply temperature were maintained at the same levels across the compared cases to provide a consistent basis for performance evaluation. Simulation results showed that the PVT integrated system with AI based optimal operation reduced heat pump unit electricity consumption by 15.6% relative to the predefined baseline case without PVT integration. In addition, AI based control achieved a further reduction of 2.9 percentage points compared with PVT integrated rule-based control. These results demonstrate the potential of AI based optimal operation to improve the energy performance of PVT assisted ASHP systems under varying weather and load conditions.

Key Words : 태양광열 시스템(Photovoltaic thermal system), 공기열원 히트펌프(Air source heat pump), 모델예측제어(Model predictive control), 강화학습(Reinforcement learning), 최적운전(Optimal operation)

† Corresponding author, E-mail: jyoon@gist.ac.kr

후 기

본 연구는 2026년도 연구개발특구진흥재단의 재원으로 광주특구육성사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25534635).



Special Session

AI기반 O&M플랫폼개발

AIO-O-1

드론 열화상과 I-V 측정을 이용한 태양광발전소 오염(Soiling) 손실 교차검증

Cross-validation of Soiling Losses in a PV Plant Using Drone IR Thermography and I-V Curves

최훈주*†, 박지환*, 이채한*, 김민욱*
Hoonjoo Choi*†, Jihwan Park*, Chaehan Lee*, Minwook Kim*
*(주)에스테코 기술연구소

Abstract : 태양광 모듈 표면 오염(Soiling)은 발전량 저하의 주요 요인이나, 단일 진단 기법만으로는 손실 규모를 신뢰성 있게 정량화하기 어렵다. 본 연구에서는 인접 축사의 영향으로 오염이 의심되는 경기 지역 870 kW급 지상형 태양광발전소를 대상으로 드론 열화상(IR) 검사, 모듈 I-V 특성 측정, 운영데이터 분석을 병행하여 오염 손실을 교차 검증하였다. 드론 IR 검사는 IEC TS 62446-3을 준용하여 발전소 전체 어레이를 검사하고 AI 영상 분석으로 이상유형과 모듈별 오염 손실을 추정하였으며, 같은 날 동일 어레이의 세척 모듈 3매(파손 모듈 제외)와 미세척 모듈 3매에 대해 자연광 조건(798~851 W/m^2)에서 I-V 곡선을 3회씩 측정하였다. 또한 동일 지역·동일 설치형태의 비교 발전소와 유효 918일간 일사량 보정 발전지수를 비교하고, 가동연수 차이에 따른 보증 열화율 차이를 보정하였다. 드론 IR 검사 결과 안전 관련 결함은 없었으며, 검사 시점의 운전 정지로 확인된 인버터 1대 분(17직렬×14병렬)의 개방회로 238매를 제외하면 셀 핫스팟 모듈은 18매(0.9%)였다. 영상 기반 오염 손실은 모듈 평균 3.6%로 추정되었다. 반면 I-V 측정에서 미세척군의 최대출력(Pmax)은 세척군 대비 8.0%(실측값 기준) 낮았고, Isc/G(-4.0%)와 함께 Voc(-1.3%) 및 FF(-1.8%p)도 저하되어 불균일 오염의 영향이 시사되었다. 운영데이터 비교에서는 발전량 격차 10.0% 중 보증 열화율 차이 0.57%p를 제외한 약 9.5%p가 오염 등 비열화 요인에 의한 초과 손실로 산정되었다. 영상 기반 추정치가 I-V 실측 및 운영데이터 기반 손실보다 낮게 나타난 것은 불균일 오염에 의한 전기적 손실의 미반영 가능성과 함께 측정 표본 및 비교 대상의 차이가 복합적으로 작용한 결과로 판단되며, 오염 손실 평가 시 다중 기법의 교차 검증이 필요함을 확인하였다. 본 결과는 Soiling 반영 발전량 예측 및 청소 시점 의사결정 모델의 검증자료로 활용할 예정이다.

Key Words : 드론 열화상(Drone IR thermography), 오염 손실(Soiling loss), I-V 곡선(I-V curve), 운영데이터(Operational data), 교차검증(Cross-validation)

† Corresponding author, E-mail: hj.choi@s-teco.co.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25529146, 과제명 : AI 학습기반 태양광 발전량 예측 고도화 O&M 플랫폼 기술개발 및 실증)

AIO-O-2

대규모 재생에너지 사업운영을 위한 사업관리시스템에 관한 연구

A Study on Renewalbe Energy Project Management System

정준영*†, 허수진*, 이동기*, 이동규*, 박채영*
Jun-young Jeong*†, Su-jin Heo*, Dong-ki Lee*,
Dong-kyu Lee*, Chae-young Park*
*한국남동발전

Abstract : 전 세계적으로 재생에너지로 에너지 패러다임이 변화하고 있으며, 특히 국내의 경우 발전공기업을 중심으로 공공 주도형 대규모 재생에너지 사업을 추진하고 있다. 이러한 대규모 재생에너지 사업은 입지선정, 인허가, 설계·시공, 운영·유지보수 등 복잡하고 장기적인 개발과정을 수반하며, 이에 따라 사업 일정 지연과 비용 초과 빈번히 발생한다. 본 연구는 인공지능(AI) 기술을 활용하여 재생에너지 사업 전주기(Full Life-Cycle)를 체계적으로 관리할 수 있는 재생에너지 사업관리시스템 개발사례를 소개하고자 한다. 본 시스템은 ▲ 사업 개발 단계별 의사결정 지원, ▲ 프로젝트 일정 및 리스크 예측, ▲ 운영 데이터 기반의 성과 분석 기능을 포함한다. 특히 주요 인허가, 정부 유관부처 협의 등의 업무가 계획 대비 지연되었을 경우 연이은 후속 업무 일정에 어떠한 영향을 미치는지 선행사업 실적을 바탕으로 AI 분석 정보를 제공해준다. 재생에너지 사업담당자 등 시스템 사용자는 제공받은 AI 분석 정보를 의사결정에 활용할 수 있다. 개발 결과, 제안된 시스템은 재생에너지 사업의 효율성, 안정성, 경제성을 높이는 데 기여할 수 있으며, 향후 대규모 재생에너지 프로젝트의 성공적 추진을 위한 핵심 관리 도구로 활용될 수 있을 것이다.

Key Words : Renewable energy (재생에너지), Artificial Intelligence (인공지능), Project management system (사업관리시스템), Risk Prediction (리스크 예측)

† Corresponding author, E-mail: jeong@koenergy.kr

AIO-O-3

AI 학습기반 태양광 발전소 디지털O&M 플랫폼 개발

Development of an AI Learning-based Digital O&M Platform for Photovoltaic Power Plants

김창준*†, 권영서**
Changjoon Kim*†, Youngseo Kwon**
*(주)제이케이코어

Abstract : 태양광 설치 형태가 다변화되면서 고소작업과 장비 투입이 필요한 설비가 늘어나, 현장 방문 중심O&M의 비용과 한계가 커지고 있다. 본 연구에서는「AI 학습기반 태양광 발전량 예측 고도화O&M 플랫폼 기술개발 및 실증」과제의 주관기관인(주)제이케이코어가 개발 중인AI 기반 디지털O&M 플랫폼의 구성과 적용 사례를 소개한다. 플랫폼은IoT 보안인증RTU를 통해 인버터·스트링 및 환경센서 데이터를 수집하고, 통합 관제 데이터베이스에서IEC 61724-1 기반KPI를 산출한다. 고장진단 모델은 일사량·모듈온도로부터MPPT 동작점을 산출하는 물리모델과 기계학습 회귀모델을 결합하여DC 전압·전류를 추론하고, 실측값과 추론값의 편차를KNN으로 분류하여 퓨즈 고장, 오염, 음영, 바이패스 다이오드 단락, PID 등7종의 고장을 판정한다. DC 전압·전류 추론 정확도는 각각95%, 98% 이상, 고장 판정 정확도는93% 이상이었다. 1.5 MW급 공장지붕형 발전소에서는 인버터9대 중6대의 전류 감소형 고장을 진단하였다. 현장에서 확인된 퓨즈 용단, 커넥터 파손, 단선을 조치한 후 측정/추론 발전량 비가0.628에서1.039로 회복되어, 약39.5%의 성능 향상을 확인하였다. 향후 진단 결과와 주기별 보고서를 학습한 거대언어모델(LLM) 기반 대화형O&M 기능을 연계하고, 다양한 유형의 실증 발전소에서 설비 이용률 개선 효과를 검증할 계획이다.

Key Words : 디지털O&M(Digital O&M), 태양광 발전소(Photovoltaic power plant), 고장진단(Fault diagnosis), 성능지표(Key performance indicator), 거대언어모델(Large language model)

† Corresponding author, E-mail: shuttle9@jkcore.com

후 기

본 연구는2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호: RS-2026-25529146).

AIO-O-4

측정 및 추론 성능지표를 이용한 태양광발전시스템의 비지도학습 기반 이상탐지

Unsupervised Anomaly Detection of Photovoltaic Systems Using Measured and Inferred Performance Indicators

고석환*†, 신우균*, 전병기*, 황혜미*, 주영철*, 이진석*
Sukwhan Ko*†, Woogyun Shin*, Byungki Jeon*, Hyemi Hwang*, Youngchul Ju*, Jinseok Lee*
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실

Abstract : 본 연구에서는 별도의 고장 라벨 없이 태양광발전시스템의 성능지표(Key Performance Indicator, KPI)를 이용하여 운전상태의 이상을 탐지할 수 있는 비지도학습 기반 이상탐지 방법을 제안하였다. 분석에는 88.2 kWp급 태양광발전시스템에서 약 4년 5개월 동안 수집된 인버터 및 기상 모니터링 데이터를 활용하였다. 일사량과 모듈 온도 등의 환경조건을 기반으로 정상 운전 시의 전압, 전류 및 AC 출력을 추론하고, 측정값과 추론값으로부터 각각 이용률(Capacity Factor, CF)과 성능비(Performance Ratio, PR)를 산출하였다. 이를 통해 측정 CF, 측정 PR, 추론 CF 및 추론 PR로 구성된 다차원 성능지표를 생성하고, Isolation Forest를 적용하여 정상 운전 패턴으로부터 벗어나는 이상구간을 탐지하였다. 또한 K-means와 Gaussian Mixture Model을 이용한 군집분석을 수행하여 성능지표의 분포 특성과 이상 운전상태를 비교·분석하였다. 분석 결과, CF만으로는 명확하게 구분하기 어려운 성능 이상이 PR 및 측정·추론 성능지표의 관계에서는 뚜렷하게 나타났으며, 장기간 운전데이터에서 정상 운전영역과 성능 저하 및 계측 이상이 의심되는 영역을 구분할 수 있었다. 특히 발전량과 CF의 변화가 상대적으로 크지 않은 조건에서도 PR이 비정상적으로 감소하는 구간이 확인되어, 발전설비의 성능 저하뿐만 아니라 일사량 계측 이상과 같은 모니터링 데이터의 이상 가능성도 탐지할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 별도의 고장 라벨이나 고해상도 계측장비 없이 기존 태양광발전소에서 수집되는 모니터링 데이터를 활용할 수 있다는 장점이 있다.

Key Words : 태양광발전시스템(PV system), 성능지표(Key Perforemance Index), 이용률(Capacity Factor), 성능비(Performance Ratio), 비지도학습, 이상탐지(Anomaly Detection)

†Corresponding author, E-mail: korea19@kier.re.kr

후 기
본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 한국에너지기술평가원(KETEP) 신재생에너지핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25529146).

AIO-O-5

광학 분석 기반 태양전지 표면 오염 및 성능 저하 정량 평가

Optoelectronic Quantitative Assessment of Surface Contamination and Performance Degradation in Photovoltaics

임종철*†
Jongchul Lim*†
*충남대학교 에너지과학기술대학원

Abstract : Surface contamination caused by dust and various airborne pollutants can significantly alter the optical properties of photovoltaic (PV) modules and consequently reduce their power-generation performance during long-term operation. In this study, we aim to establish an optical-based diagnostic framework for quantitatively evaluating PV performance degradation associated with surface contamination. Contaminants generated under different installation environments are classified according to particle size, morphology, concentration, and physicochemical properties, and their effects on absorptance, transmittance, and reflectance (ATR) are systematically investigated. Reflection and scattering characteristics of contaminated PV surfaces are further analyzed over a wide wavelength range, and the optical responses associated with contaminant size and morphology are quantitatively described through mathematical modelling. Based on these analyses, correlations between optical losses and reductions in PV power output are established, enabling the identification of dominant contamination parameters responsible for performance degradation. In addition, a comprehensive database integrating absorptance, transmittance, reflectance, scattering characteristics, and power-loss rates is constructed to provide a quantitative basis for evaluating contamination severity. Using this database, an ATR-based diagnostic model is proposed to identify contaminant type and quantify the degree of surface contamination from measured optical changes. The proposed approach provides a systematic framework for understanding the relationship between contamination-induced optical losses and PV performance degradation and may serve as a basis for real-time contamination monitoring, optimisation of module cleaning schedules, and improved maintenance strategies for long-term PV operation.

Key Words : 광전자분광학(Optoelectronics), 오염도(contamination), 발전량(PV power output), 모델링(Modelling)

† Corresponding author, E-mail: jclim@cnu.ac.kr



Oral Session

건물에너지설비
Building Energy Systems (BES) Session

BES-O-1

디지털 트윈 기반 공동주택 공기열 히트펌프의 AI 예측제어 프레임 워크

An AI-Based Predictive Control Framework for Air-Source Heat Pumps in Multi-Family Housing Using Digital Twins

신예빈*,**, 최원종*,**, 이헌민*,**, 안영섭*, 전병기*, 정재원**, 김민휘*†
Ye-Bin Shin*,**, Won-Jong Choi*,**, Heon-Min Lee*,**, Youngsub An*, ByungKi Jeon*, Jae-Weon Jeong**, Min-Hwi Kim*†
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, **한양대학교 건축공학과

Abstract : 전 세계적으로 탄소중립 달성을 위해 건물부문의 탈탄소화가 중요해지고 있으며, 특히 난방부문의 탈탄소화에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 난방에서 공기열 히트펌프는 겨울철 낮은 외기온도로 인해 성능이 저하될 수 있으며, 이에 건물일체형 태양광시스템(Building-Integrated Photovoltaic, BIPV)와 연계하여 낮시간 잉여전력을 난방에 활용하는 방안이 주목받고 있다. 그러나, 기존 연구는 주로 히트펌프의 이론적 성능 제어에 초점을 두고 있으며, 실증 데이터와 BIPV 발전량 예측을 기반으로 최적 운전 스케줄 생성까지 연계한 통합적인 AI 기반 예측제어에 대한 연구는 제한적이다. 실증실험은 2026년 2월 9일부터 4월 1일까지 한국에너지기술연구원 내 게스트하우스에서 수행하였으며, 평균 외기온도는 1.8 °C에서 7.4 °C 이다. 건물 열거동은 외기온도, 실내온도, 일사 및 히트펌프 공급열량에 따른 실내온도 변화를 반영한 1R1C 기반 물리 모델로 구현하였으며, 히트펌프 모델은 1R1C로 설명되지 않는 실측 데이터의 오차는 AI 예측모델로 보정하여, 실내온도, 히트펌프 생산열량, 소비전력 및 BIPV 발전량을 예측하도록 구성하였다. Mixed Integer Linear Programming (MILP)와 Reinforcement Learning (RL) 기반 최적화를 통해 최적 난방 제어 스케줄을 생성하여, 기존 Rule Based Control (RBC) 제어를 기준으로 세 제어 전략의 비용 절감 효과를 확인했다. 본 연구는 향후 겨울철 난방 실증 실험을 통해, 공동주택의 난방 운전비용 및 BIPV 활용 예측제어로 확장할 것이다.

Key Words : MILP(Mixed Integer Linear Programming), RL(Reinforcement Learning), RBC(Rule Based Control)

† Corresponding author, E-mail: mhkim001@kier.re.kr

후 기

본 연구는 에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업과 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 국토교통부 재원 도시건축연구사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2023-00236325, RS-2025-02316198).

BES-O-2

MPC 및 RL 기반 제어기법의 평가에서 에너지 절감 효과가 명확히 제시되지 않는 이유는 무엇인가?

Why MPC and RL Approaches are Evaluated without Clear Energy Saving Attributes?

타립아부*, 조재완*†
Abu Talib*, Jaewan Joe*†
*인하대학교 스마트시티공학과

Abstract : Model predictive control (MPC) and reinforcement learning (RL) have demonstrated substantial potential for improving building energy and cost performance. However, two important limitations remain insufficiently addressed: the overestimation of control benefits when compared against inappropriate or suboptimal baseline controllers, and the limited interpretability of the resulting control decisions. This study critically examines these issues and provides a reference simulation framework for obtaining interpretable control solutions. Two representative cases were considered: a commercial building and the BESTEST-Air test case implemented within the Building Optimization Testing Framework. For the commercial building, average electricity cost and energy savings of 32% and 6%, respectively, were achieved, together with a 37.13% reduction in peak demand. For the BESTEST-Air case, average cost savings of 6% and a peak-demand reduction of 12.41% were obtained.

Key Words : 모델 예측 제어 (Model predictive control) 강화학습 (Reinforcement learning), 에너지절약 (Energy saving), HVAC system, Baseline control

† Corresponding author, E-mail: jjoe@inha.ac.kr

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No.RS-2024-00397794).

BES-O-3

주거용 열회수 환기장치 시험 챔버 압력조건 도출을 위한 고층 공동주택 연간 압력모델 개발

Development of an Annual Pressure Model for High-rise Apartment Buildings to Derive Test Chamber Pressure Conditions for Residential Heat Recovery Ventilators

조경주*†, 김시현**
Kyungjoo Cho*†, Siheon Kim**
*한국건설기술연구원 건축에너지연구본부

Abstract : Residential heat recovery ventilators (HRVs) are commissioned under nominal balanced conditions, whereas high-rise apartment buildings continuously expose supply and exhaust fans to wind- and stack-induced pressures. This study developed and verified a reduced-order multizone CONTAM model that quantifies the facade-to-apartment pressure difference (Δ Pext) acting on HRV terminals after internal pressure redistribution through entrance doors and the building core. Using Seoul annual weather data, a seasonal indoor temperature schedule, and field-measured airtightness of Korean apartments, 20, 30, 40, and 50story buildings were directly simulated for exposed and shielded layouts. The annual 95th-percentile | Δ Pext| increased almost linearly with building height (0.62–0.63 Pa/floor, $R^2 > 0.9999$), reaching approximately 25.6 Pa with an annual maximum of 69 Pa for the 40-story reference case, and up to 85 Pa across airtightness sensitivity cases. Coupling hourly Δ Pext with fan performance curves showed that the building-level P95 imbalance exceeded 5% at approximately 32–41 stories depending on the ventilation rate, while the worst-case unit exceeded 5% for hundreds of hours per year even at 20 stories. The results define the required pressure-compensation range of ±70 to ±90 Pa for constant-flow control and provide quantitative test conditions for a pressure-simulation chamber under development to verify a fan-sensor-based smart airflow control system.

Key Words : High-rise apartment building, Heat recovery ventilator, Stack effect, Wind pressure, Airflow imbalance, Constant-flow control

† Corresponding author, E-mail:kyungjoocho@kict.re.kr

후 기

Research for this paper was conducted under the KICT Strategic Research Program(SRP)(project no. 20260240-001) funded by the Ministry of Science and ICT.

BES-O-4

AHU 덕트 내 정적 공기 혼합장치의 혼합 성능에 대한 실측 기반 CFD 해석 모델 검증

Measurement-Based Validation of a CFD Model for Airmixing Performance of Static Airmixers in an AHU Duct

이준우*, 정한웅*, 정민재**, 강경모*†, 김용엽***
Junwoo Lee*, Hanung Jeong*, Minjae Jeong**, Kyungmo Kang*†, Yongyoup Kim**
*대진대학교 건축공학과, **대진대학교 스마트시티건설융합공학과, ***에이스 공조(주)

Abstract : 공기조화기(AHU)에서 외기(OA)와 환류 공기(RA)의 불완전 혼합은 덕트 단면 내 온도 불균일을 유발하여 코일 빙결, 제어 헌팅 및 에너지 손실의 원인이 된다. 본 연구에서는 실규모 덕트 조건에서 정적 공기 혼합장치의 혼합 성능을 평가하고, 동일 조건에 대한 CFD 해석을 수행하여 해석 결과가 실측 결과를 재현할 수 있는지를 검토하였다. 실험은 실제 AHU 단면에 해당하는 1m × 1m 사각 덕트에서 상·하부로 분리 공급된 Warm air와 Cold air를 유속 2.2m/s로 혼합시켜 수행하였으며, 대상 장치는 Baseline louver mixer와 Orthogonal pattern louver mixer 2종으로 두 조건 모두 전단에 Straightener를 설치해 선행 혼합을 억제하였다. 혼합거리 0.75~2.0 Dh의 4개 단면에서 각 16개 지점의 온도를 측정하여 통계 기반 혼합 효율과 압력손실을 산정하였다. 실험 결과 Baseline louver mixer는 0.75Dh에서 85.3%의 혼합 효율을 확보하여 혼합거리 증가에 따른 변화가 작았던 반면(2.0 Dh에서 86.8%), Orthogonal pattern louver mixer는 52.8%에서 67.9%로 혼합거리에 의존하는 경향을 보였다. 압력손실은 각각 14.69 Pa, 34.54 Pa로 나타났다. CFD 해석 결과는 각 혼합거리 단면 64개 지점 기준 Baseline louver mixer에서 RMSE 0.60℃, Orthogonal pattern louver mixer에서 RMSE 0.91℃로 실측과 유사한 온도 분포를 나타냈다. 이는 입구 온도차 대비 각각 8.5%, 11.7% 수준이며, 열전대 계측 불확도 및 실험 중 입구 온도의 변동폭(±2.1℃) 이내의 값이다. 해석값으로 계산한 혼합 효율은 실측 대비 최대 3.7%p 이내의 차이를 보였고, 압력손실 또한 실측과 유사한 수준으로 예측되었다. 이는 본 해석 조건이 혼합장치 형상 차이에 따른 혼합 성능 및 압력손실 변화를 재현할 수 있음을 의미한다.

Key Words : 혼합 효율(Mixing effectiveness), 혼합 거리(Mixing length), 압력 손실(Pressure drop), 전산유체역학(Computational fluid dynamics), 공조 덕트 시스템(HVAC duct system)

† Corresponding author, E-mail: kyungmo@daejin.ac.kr

후 기

본 연구는 경기도 기술개발사업의 사업비 지원(D2601007)에 의해 수행되었습니다.

BES-O-5

기후변화에 따른 그린리모델링 기술조합의 최적화 및 성능 분석

Optimization and Performance Analysis of Green Remodeling Technology Combinations under Climate Change

김은아*, 송현근*, 임서진*, 김내경**, 김지원**, 문선혜*†
Euna Kim*, Hyeongeun Song*, Seojin Lim*, Naekyung Kim**,
Jiwon Kim**, Sunhye Mun*†
*서울시립대학교 건축학부, **서울시립대학교 건축공학과

Abstract : 건물부문의 탄소중립을 위해서는 신축 건축물의 고효율화와 함께 기존 건축물의 에너지수요와 운영단계 탄소배출을 지속적으로 저감하는 것이 중요하다. 그린리모델링은 기존 건축물의 장기적인 탄소감축을 위한 주요 수단이지만, 외피 및 설비 개선효과가 장기간 지속되는 동안 기후조건의 변화에 따라 냉·난방수요가 변화할 수 있다. 이에 본 연구는 현재 및 미래기후 조건에서 그린리모델링 기술의 상대적 영향과 최적 기술조합의 변화를 비교·평가하는 것을 목적으로 한다. 서울의 공공 어린이집을 대상으로 에너지 예측모델을 구축하고, 실제 운영특성과 에너지사용량을 반영하여 모델을 검증하였다. 외피 및 냉·난방설비와 관련된 6개 기술변수를 대상으로 총 46,656개의 기술조합을 구성하고, 현재기후에는 2011–2025년 자료 기반의 TMYx를, 미래기후에는 SSP2-4.5 기반 2050년대 기후조건을 적용하였다. XGBoost 대리모델과 SHAP 분석을 활용하여 기술조합별 탄소배출량과 각 기술변수의 상대적 영향도를 분석하였다. 분석 결과, 미래기후에서의 난방수요 감소와 냉방수요 증가는 주요 기술변수의 상대적 영향도와 상위 기술조합의 구성을 변화시켰으며, 특히 냉방설비 효율의 중요도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 유사한 기술 적용 수준에서도 조합에 따라 탄소배출량에 차이가 나타나, 개별 기술의 효과가 기후조건에 따른 냉·난방수요의 변화와 기술 간 상호작용에 의해 달라질 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 기후조건 변화에 따른 그린리모델링 기술의 상대적 영향과 최적 기술조합의 변화를 체계적으로 비교·평가하는 분석 프레임워크를 제시하며, 미래기후를 고려한 장기적인 그린리모델링 기술선정의 방법론적 기반을 제공한다.

Key Words : 그린리모델링 (Green Remodeling), 미래기후 (Future Climate), 기술조합 (Technology Combinations), 건물에너지 시뮬레이션 (Building Energy Simulation), 탄소배출량 (Carbon Emissions)

† Corresponding author, E-mail: msh@uos.ac.kr

후 기

본 연구는 정부(국토교통부)의 재원으로 국토안전관리원 공공건축물 그린리모델링 사업의 지원을 받아 수행됨.

BES-O-6

과거 실측 건물 에너지 부하 데이터의 현재화를 위한 부하 보정모델 개발

Development of an Adjustment Model for Historical Building Load Data

정장엽*, 윤영직*†
Jangyeop Jeong*, Youngjik Youn*†
*국립한밭대학교 건축설비시스템공학과

Abstract : 한국에서는 일정 규모 이상의 신축이나 증축 건물에 대해서 건축물 에너지 효율 및 제로에너지 건축물 인증에서 ECO2를 이용하여 단위 면적당 1차 에너지 소요량을 산정하여 등급 산정이 의무화 되어 있다. 이 인증을 만족시키기 위해 많은 입력 요소와 시간이 들어 전문인력의 평가와 반복적인 검토가 요구되며 여기서 큰 비용이 발생한다. 본연구에서는 인증평가 전에 건물의 부하량을 건물 운영 특성을 유지하며 변화하는 변수인 외피 성능 및 외기온을 보정 하여 간편하게 검토하는 사전 평가 방법을 제안한다. 과거 1996년 업무용 빌딩의 실측 부하 데이터를 외기온 및 일사에 대해 회귀분석을 해 각 변수에 대한 부하 민감도를 산정하였다. 외피 및 창호의 성능 변화가 미치는 영향을 반영하기 위해, 기존 과거 건물 대비 목표건물의 외피 및 창호 성능비를 보정계수로 산정하고 성능변화에 영향을 받는 부하성분에 적용하였다. 회귀분석 후 회귀모델에서 설명되지 않는 인체 발열, 조명 발열, 환기 부하 등을 잔차 부하로 유지하여 건물의 운영 특성을 반영하고 외피 및 창호 성능에 대한 부하를 보정 하였다. 선행연구와의 비교를 위해 운영시간을 설정하고 목표 기상 및 외피·창호 성능을 반영하여 부하를 보정 하였다. 분석 결과, 연간 누적 부하는 기존 실측 부하 데이터 대비 연간 누적 부하가 51.77% 감소하였다. 또한 선행연구의 TRNSYS의 월별 부하와 비교한 결과, 두 자료 간 선형회귀 결정계수 R^2는 0.797, RMSE는 1.394 kWh/m^2를 보여주어 부하의 변화가 유사하여 본 연구에서 제안한 보정 모델을 사전검토 도구로서 활용 가능성을 보여주었다. 본연구의 방법은 과거 실측 데이터를 기준으로 적은 변수만으로 부하량 보정을 제안하고 사전검토 과정에서 활용 가능성을 확인하였다.

Key Words : 과거 실측 부하데이터(Historical Measured Load Data), 냉난방부하(Heating and Cooling Load), 회귀분석 (Regression Analysis), 간이 보정모델 (Simplified Correction Model)

† Corresponding author, E-mail: yjyoun@hanbat.ac.kr



Oral Session

제로에너지건물
Zero Energy Buildings (ZEB) Session

BES-O-7

District Building Energy Modeling 구축을 위한 입력 자료 요구 수준

Required Input Data Levels for District Building Energy Modeling

임지수*, 임현우**†
Jisoo Lim*, Hyunwoo Lim**†
*건국대학교 건축대학 건축학부, **건국대학교 건축대학 건축학부

Abstract : 부하 공유는 단지 내 건물 간에 냉난방 열 또는 전력을 교환하는 개념으로, 건물마다 최대 부하가 발생하는 시각이 다른 점을 이용하여 단지 전체의 최대 부하와 설비 용량을 저감하는 방안이다. 이를 검토하려면 건물별 시간 단위 부하 변동을 확인할 수 있어야 한다. 본 연구는 단지 내 건물을 개별 모델로 구성하여 건물별 시간 단위 부하를 산출하는 방식을 District Building Energy Modeling (DBEM)이라 정의한다. DBEM을 구성하려면 개별 건물의 입력 자료가 필요하지만, 자료를 어느 수준까지 수집해야 하는지 기준을 세워야 한다. 범주별 요구 수준을 확인하기 위해 입력 자료 수준을 세 단계(기존 정보, 공개 자료, 현장 취득 자료)로 구성하고, 시뮬레이션의 입력 변수를 건물 형상, 창면적비, 내부 부하, 스케줄, 열원설비의 다섯으로 범주화하였다. 1단계는 기본 정보 단계로, 건물 형상에 지리정보시스템 원자료를, 나머지 변수에 Department of Energy Commercial Prototype Building Models 원형을 적용하였다. 2단계는 공개 자료 단계로, 건물 형상과 내부 부하에 건축물대장, 창면적비에 로드뷰 영상, 스케줄에 학사일정, 열원설비에 에너지진단 보고서의 열원 유형을 적용하였다. 3단계는 현장 취득 자료 단계로, 건물 형상과 창면적비에 무인항공기 촬영, 내부 부하에 층별 안내도, 열원설비에 측정 성적계수를 적용한 뒤, 스케줄에 시간별 실측 전력에서 역산한 프로파일을, 내부 부하에 실측 연평균과 정합하는 밀도 배율을 적용하였다. 단계별 모델은 EnergyPlus 23.2로 구축하여 시간별 전력 사용량을 산출하였고, 시간별 실측 전력과 비교하여 ASHRAE Guideline 14의 시간별 허용 기준을 준용한 Normalized Mean Bias Error (NMBE) ±10%로 검토하였다. NMBE 절대값 평균은 1단계 91.55%, 2단계 84.63%로 변화가 작았고, 3단계에서 실측 전력으로 스케줄·내부 부하를 보정하지 않은 경우 81.24%였으나 동일 실측 전력으로 스케줄·내부 부하를 보정한 결과 3.40%로 오차가 감소하였다. 다섯 범주 중 건물 형상과 창면적비, 열원설비는 실측에 가까운 자료를 적용해도 정확도에 미치는 영향이 적었다. 반면 실측 전력 기반 스케줄·내부 부하 입력은 정확도를 가장 크게 개선하는 것을 확인하였다. 본 연구는 DBEM 구축 시 모든 입력 자료를 동일한 수준으로 상세화하기보다 범주별 영향에 따라 자료 수집과 가공의 우선순위를 설정할 수 있는 근거를 제시한다.

Key Words : 단지 건물 에너지 모델링(District Building Energy Modeling), 시간별 전력 계측(Hourly electricity metering), 입력 자료 수준(Input data Level), 자료 가공(Data processing), 에너지 시뮬레이션(Energy simulation)

†Corresponding author, E-mail: hyunwoolim@konkuk.ac.kr

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00342048).

ZEB-O-1

외피내장 히트펌프의 최적 운영을 위한 HILS 기반 실증 방법론

A HILS-based Experimental Methodology for Optimal Operation of Building Envelope-integrated Heat Pumps

서정훈*, 강희석*, 조재완**†, 정영선***
Jeonghun Seo*, Heeseok Kang*, Jaewan Joe**†, Youngsun Jeong***
*인하대학교 스마트시티공학과, **인하대학교 건축공학과,
***한국건설기술연구원 건축에너지연구본부

Abstract : 건물 에너지 사용량에서 외피를 통한 열손실 및 열취득이 차지하는 비중이 크므로, 외피 부하를 저감하기 위한 시스템 개발이 요구된다. 그 방안 중 하나로 히트펌프를 외피에 통합한 외피내장 히트펌프가 주목받고 있다. 다만 실질적인 제로에너지건축물(ZEB)을 달성하기 위해서는 외피의 패시브 성능 향상과 함께 최신 제어 기술 등 액티브 요소가 융합되어야 한다. 이에 본 연구는 외피내장 히트펌프의 최적 제어 기술 확보를 최종 목적으로 한다. 그러나 최신 외피 기술을 실제 건물에 적용하여 실험적으로 검증하는 것은 비용 및 시간상 제약이 크다. 따라서 본 연구에서는 1~2 m 규모의 소형 외피내장 히트펌프 모듈을 제작하고, 이를 Hardware-in-the-Loop Simulation(HILS) 환경과 연계하는 방안을 제안한다. 단일 모듈의 실측 데이터를 가상 건물 모델과 결합하여 실 전체 외피로 확장 가정함으로써, 실규모 적용 시의 에너지 성능과 최적 운영 효과를 실증적으로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 시스템 구성 방안, HILS 연계 구조 및 최적 운영 실증 계획을 제시한다.

Key Words : 외피내장 히트펌프(Envelope-integrated heat pump), 하드웨어 인 더 루프 시뮬레이션(Hardware-in-the-loop simulation), 최적 제어(Optimal control), 제로에너지건축물(Zero energy building), 능동형 외피(Active façade)

† Corresponding author, E-mail: jjoe@inha.ac.kr

후 기
본 연구과제는 과학기술정보통신부의 한국건설기술연구원 전략연구사업으로 수행되었습니다. (과제번호 20260240-001)

ZEB-O-2

고층형 ZEB 3등급 공동주택 운영단계 성능진단 관측요소 사례조사

A Case Survey of Observation Parameters for Operational-Stage Diagnosis of High-Rise Grade 3 ZEB Apartments

이주현*, 이여은*, 김주욱*†
Ju-hyeon Lee*, Yeo-Eun Lee*, Joowook Kim*†
*조선대학교 건축공학과

Abstract : 제로에너지건축물(ZEB) 인증 의무화가 공동주택으로 확대되고 있으나 운영단계 공동주택의 에너지관리는 원격검침에 머물러 있고 세대 간 소비 편차가 커 실질적 성능진단 논리가 부재한 상황이다. 공동주택은 세대 간 소비 편차와 세대 간 열 이전이 존재하여 상업건물 대상의 진단·커미셔닝 방식을 그대로 적용하기 어렵다. 본 연구는 고층형 ZEB 3등급 공동주택을 대상으로 세대·동·단지 규모로 확장 가능한 운영단계 성능진단 논리 개발에 앞서 국내외 관련 문헌을 고찰하고, 진단 수행에 필요한 최소계측셋(MMS, Minimum Measurement Set)의 구성을 정의하는 것을 목적으로 한다. 문헌은 공동주택 대상 여부, 운영단계 포함 여부, 모니터링·진단·커미셔닝 활동의 수행 여부, 세대·동·단지 규모 기준으로 선별하였으며 선별된 사례는 활동유형과 규모로 구조화하였다. 구조화 결과 모니터링 범주에서는 세대·동·단지 규모의 사례가 고르게 분포한 반면 커미셔닝 범주는 세대 규모에서 사례가 희소한 것으로 확인되었다. 또한 세대 간 열 이전이 존재하는 범위에서는 세대 단위 계측만으로 진단 신뢰성 확보가 어렵다는 사례를 반영하여 세대·기계실 병행 계측 구조로 MMS를 설계하였다. 이러한 공백은 후속 진단 논리 개발의 필요성을 뒷받침할 수 있고 도출된 MMS는 확장형 진단 논리의 설계 근거 및 자료로 활용할 수 있다.

Key Words : 공동주택(Apartment complex), 제로에너지건축물(Zero energy building), 최소계측셋(Minimum measurement set), 운영단계 성능진단(Operational-stage performance diagnosis)

†Corresponding author, E-mail: jwkim515@chosun.ac.kr

후 기
이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: RS-2025-02309164)

ZEB-O-3

신축 제로에너지 공동주택 에너지 성능 M&V 방법론의 문헌 고찰과 적용성 검토

A Literature Review and Applicability Assessment of Energy Performance M&V Methodology for New Zero Energy Multi-Family Housing

이성주*, 박시현*†
Seongju Lee*, Sihyun Park*†
*한국토지주택공사 토지주택연구원

Abstract : 국내에서 공동주택에 대한 제로에너지건축물(ZEB) 인증이 의무화됨에 따라, 준공 후 실제 운영단계 에너지성능을 확인하는 측정 및 검증(Mesurement and Verification, M&V)의 필요성이 커질 것으로 예상된다. 본 연구는 국내외 문헌 조사를 통해 공동주택 ZEB M&V 방법론의 적용 현황과 한계점 등을 파악하기 위해 선행연구를 고찰하였다. 고찰 결과, 국내 연구는 기밀성능, 환기 등 개별 요소기술의 현장 실측에 주로 집중되어 있으며, 건물 전체 단위의 설계 예측값과 실측값 간 비교·검증 연구는 최근에야 이루어지기 시작한 것으로 나타났다. 반면, 국외에서는 건물 전체 및 단지 단위의 통합적 성능 검증 연구가 보다 폭넓게 수행되고 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 신축 제로에너지 공동주택의 운영단계 성능 검증을 목적으로 하는 M&V의 방법론을 고찰하고, 당초 ZEB 5등급으로 계획되었다가 3등급으로 상향된 군포의 공동주택 실증사업을 대상으로 국제성능측정 및 검증 프로토콜인 IPMVP(International Performance Measurement and Verification) Option D·C의 개념을 목표등급과 당초계획등급이라는 두 개의 설계값을 각각 실측값과 비교하는 "설계-실측 성능검증" 체계로 재구성하고, 세대별 계측 데이터를 다루는 프라이버시 대응 방안을 함께 제시함으로써 향후 ZEB 공동주택 M&V 설계 적용성을 검토하였다.

Key Words : 제로에너지건축물(Zero Energy Building), 공동주택(Multi-family Housing), 측정 및 검증(Measurement and Verification), 성능격차(Performance Gap)

† Corresponding author, E-mail: sihyun.park@lh.or.kr

후 기
본 연구는 2026년도 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS2025-02309164)

BEE-O-1

노후 임대주택 고령가구의 냉방 대응 행태에 따른 폭염기 실내 온열 환경 특성 분석

Indoor Thermal Environment Characteristics during Heatwaves by cooling response behavior in Elderly Households Living in aged Public Rental Housing

구자빈*, 김난화*, 강동화*†
Jabin Goo*, Nanhwa Kim*, Dong Hwa Kang*†
*서울시립대학교 건축공학과

Abstract : 기후변화에 따른 폭염의 빈도와 강도 증가는 주거 공간의 실내 온열 환경을 악화시키며, 특히 고령자와 같은 기후취약계층의 온열 취약성을 심화시키고 있다. 극한 기상 조건에서 주거 공간은 단순히 외부 환경을 차단하는 공간을 넘어, 외부 환경의 교란에도 실내 온열 환경의 성능 저하를 최소화하고 재실자를 보호하는 역할을 수행할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 노후 임대주택에 거주하는 고령가구를 대상으로 폭염기 실내 온열 환경을 측정하고, 재실자의 냉방 대응 행태에 따른 온열 환경 특성을 분석하였다. 서울시 중랑구 소재 SH 임대주택을 대상으로 에어컨 미보유 및 보유 고령가구의 실내 온·습도와 CO2를 측정하였으며, 현장 조사를 통해 폭염 대응 행태를 파악하였다. 이를 바탕으로 실제 냉방 대응 특성에 따라 세대를 구분하고 실내 온도 분포 및 고온 노출 특성을 비교하였다. 또한 무더위쉼터의 온열 환경을 주거 공간과 비교하여 폭염 대응 공간으로서의 활용 특성을 함께 검토하였다. 측정 결과, 세대별 냉방 대응 방식에 따라 폭염 기간의 실내온도 수준과 고온 노출 양상이 차이를 보였다. 특히 상시·제한 냉방군의 평균 실내온도는 약 27.8 ℃로, 간헐·냉방 미보유군의 약 30.3 ℃보다 약 2.5 ℃ 낮았으며, 냉방설비를 보유한 세대에서도 실제 사용시간과 운전 방식에 따라 실내 온열환경에 차이가 나타났다. 본 연구 결과는 노후 임대주택 고령가구의 폭염기 온열 취약성 평가와 냉방 대응 행태를 고려한 폭염 대응 전략 마련을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

Key Words : 노후 임대주택(Aged public rental housing), 고령가구(Elderly households), 폭염(Heatwave), 냉방 대응 행태(Cooling Response behavior), 실내 온열환경(Indoor thermal environment)

† Corresponding author, E-mail: dhkang@uos.ac.kr

후 기

본 연구는 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(박사과정생연구장려금지원사업)임 (과제번호 : RS-2025-25415899). 본 연구는 2026년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2026-25520385).

ZEB-O-5

기후 및 건물 조건에 따른 태양열 기반 액체식 제습 외조기 시스템의 집열기 면적 산정 프로그램 개발

Development of a Solar Collector Sizing Program for a Solar-Assisted Liquid Desiccant Dedicated Outdoor Air System Considering Climatic and Building Conditions

박광훈*, 임한솔*†
Kwanghoon Park*, Hansol Lim**†
*국립한밭대학교 설비공학과, **국립한밭대학교 건축설비시스템공학과

Abstract : 본 연구에서는 기후 및 건물 조건에 따른 태양열 기반 액체식 제습 외조기 시스템의 집열기 면적을 산정하는 웹 기반 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 표준기상년(Typical Meteorological Year, TMY)의 시간별 기상자료와 건물의 외기도입량, 운전시간 및 목표 급기 절대습도를 바탕으로 제습·재생 운전조건과 재생열 요구량을 계산한다. 제습부와 재생부는 LiCl 수용액을 이용한 실험식으로 모델링하고, 공용 완전혼합 용액탱크의 질량 및 에너지 수지를 연계하여 용액 농도의 시간적 변화를 반영하였다. 제습부는 요구 외기도입량을 유지하면서 액기비와 용액 공급온도를 조절하며, 재생부는 고정 액기비 조건에서 공기와 용액 유량을 연동하는 가변풍량 제어를 적용하였다. 분석 대상은 ASHRAE 기후구분 0A~5A의 대표 지역과 국내 주요 특별·광역시를 포함한 총 12개 지역으로 설정하고, DOE 자료 및 ASHRAE 62.1을 근거로 구성한 건물 용도·규모별 조건을 적용하였다. 연간 분석에서 운전시간은 매일 09:00~18:00로 설정하였으며, 진공관형과 평판형 집열기에 대해 축열계통의 공급·환수온도를 각각 60℃와 45℃로 유지하는 이상적 조건을 가정하였다. 태양열 커버율은 분석기간의 총 재생열 요구량 대비 태양열로 공급되는 재생열량의 비율로 정의하고, 목표 커버율 100%에 필요한 집열기 면적을 산정하도록 구성하였다. 개발 프로그램은 기후와 건물 조건에 따른 재생열 수요 및 태양열 공급을 연계하여 집열기 규모 산정과 시스템의 초기 설계를 지원한다.[신명조 10 point]

Key Words : 태양열(Solar thermal energy), 액체식 제습(Liquid desiccant dehumidification), 외조기(Dedicated outdoor air system), 집열기 면적 산정(Solar collector sizing), 기후 및 건물 조건(Climatic and building conditions), 웹 기반 설계 프로그램(Web-based design program)

†Corresponding author, E-mail: hansollim@hanbat.ac.kr

후 기
본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2025-02316198)



Oral Session

건축환경

Building Environment Engineering (BEE) Session

BEE-O-2

강화학습 기반 다중 에이전트를 활용한 열 부하공유 시스템 구축

Multi-Agent Reinforcement Learning-Based Thermal Load Sharing System Framework

김지영*, 이현수*, 김인애*, 심지수**, 임현우*†
Jiyoung Kim*, Hyeonsu Lee*, Inae Kim*, Jisoo Shim**, Hyunwoo Lim*†
*건국대학교 건축대학 건축학부, **성균관대학교 탄소중립에너지복지 연구센터

Abstract : 냉난방 수요가 집중되는 시간대에 다수의 건물이 동시에 전력을 사용하면 에너지 인프라에 순간적인 과부하가 발생한다. 이를 완화하기 위해 개별 건물 단위의 수요반응 제어가 적용되어 왔으나, 이는 부하의 발생 시점을 조정할 뿐 에너지 인프라에 대한 부담을 해소하지 못한다. 이에 본 연구에서는 건물별로 상이한 부하 발생 시점과 크기의 차이를 활용하여 열을 공유함으로써 커뮤니티 전체의 부하를 평탄화하는 열 부하공유 시스템을 제안하고, 복잡하게 변화하는 환경에서의 제어를 위해 강화학습을 적용하였다. 본 시스템은 미국 DOE Commercial Reference Building 기반의 주거・교육・업무시설을 대상으로 공기열원 히트펌프, 성층형 축열조, 공유배관 등을 열역학 수식 기반의 Python 스크립트로 구축하고, Multi-Agent Soft Actor-Critic (MASAC) 기반의 협조제어 프레임워크를 적용하였다. 이를 11월~12월을 학습 기간, 1~2월을 미학습 평가 기간으로 설정하여 난방기간 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 에이전트는 야간 사전 축열과 오전 피크 시간대 실시간 열공유 전략을 도출하였다. 또한, 교육 시설을 주요 열 흡수원으로, 업무 시설을 주요 열 공급원으로, 주거 시설은 재실 스케줄에 따라 공급원과 흡수원으로 전환하는 전략을 학습하였다. 전 기간 평가에서 극한 외기온 일(1월 25일)을 제외하고 부하 평탄화 지표가 최대 10.2% 개선되었으며, 공유배관의 순환펌프 추가 소비전력을 포함하고도 총 전력소비량이 0.8~2.5% 저감되었다. 본 연구는 건물별 부하 패턴의 차이를 커뮤니티 단위의 열 공유 기반으로 활용하여 부하 평탄화와 총 전력소비량 저감을 동시에 달성하였으며, 향후 다양한 용도의 건물군 및 냉방기・간절기로의 시스템 확장 가능성을 제시한다.

Key Words : 건물열부하공유(Building Thermal Load sharing), 다중 에이전트(Multi-agent), 강화학습(Reinforcement learning), 에너지 최적화(Energy optimization), 전력망 안정화 (Grid Stability)

† Corresponding author, E-mail: hyunwoolim@konkuk.ac.kr

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00342048).

BEE-O-3

주거 건물에서의 공기식 BIPVT 시스템 적용에 따른 연간 효과에 관한 연구

A Study on the Annual Effects of Applying an Air-Based BIPVT System in Residential Buildings

오수호*, 최영진*†
Suho Oh*†, Youngjin Choi*†
*경기대학교 건축공학과

Abstract : 최근 건물의 에너지 효율을 제고하고 탄소 배출을 줄이는 것이 필수적인 과제로 떠오르고 있는 만큼, 건축 분야에서는 기존의 화석 연료를 기반으로 하는 구조를 지양하고 친환경 및 신재생에너지를 적극적으로 도입하여 다양하게 활용할 수 있는 방안을 모색하고 있다. 그중 건물 일체형 태양광·열(Building-Integrated Photovoltaic Thermal: BIPVT) 시스템은 건축물의 외피를 대체하여 적용될 수 있고 전기 및 열에너지를 동시에 생산할 수 있기에 많은 주목을 받고 있다. 이러한 BIPVT 시스템의 성능을 분석하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 실험을 통하여 성능을 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 그렇기에 본 연구에 앞서, 공간 자체를 하나의 열 회수 장치로 활용할 수 있는 새로운 구조의 공기식 BIPVT 시스템 실험 모델을 제작한 후 우리나라 겨울철 기상 조건에서 실험을 진행해 BIPVT 시스템의 열적·전기적 성능을 평가하였다. 이는 공간 자체를 하나의 공조시스템으로 확장하기 위한 기초 연구로써 진행되었으나, 선행 연구를 통해 실제 구조물에 적용되었을 시 다양한 조건에서의 연간 성능을 검증하기에는 한계가 있다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 TRNSYS를 기반으로 한 시뮬레이션을 통해 선행 연구의 결과를 검증하고 다양한 조건에서의 연간 성능 변화를 평가하여 결과를 분석하였다.

Key Words : 건물일체형 태양광·열(BIPVT, Building-integrated photovoltaic thermal), 트랜시스(TRNSYS), 일사량(Solar radiation), 발전량(Power generation), 집열량(Solar thermal collection)

† Corresponding author, E-mail: yjchoi@kyonggi.ac.kr

후 기

본 연구는 2026년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25592987).

BEE-O-4

하계 바닥 표면 열환경 보정을 위한 동시 냉난방 시스템의 냉동사이클 TRNSYS Type 개발

Development of TRNSYS Refrigeration Cycle Types for Energy Performance Evaluation of a Simultaneous Heating and Cooling System for Floor Thermal Environment Conditioning

이건희*, 이유진*, 신대욱*†
Gunhui Lee*, Yujin Lee*, Dae Uk Shin*†
*국립군산대학교 건축공학과

Abstract : 국내 주거용 건물에서는 여름철에는 대류 냉방, 겨울철에는 바닥 복사 난방을 독립적으로 운전하는 경우가 대부분이다. 여름철 대류 냉방 시 재실자의 발 부위에 냉감을 유발할 수 있으며, 이때 국부적으로 바닥 난방을 운전시킬 경우 발바닥 표면에 닿는 온도가 노점온도보다 높아지고 상대습도가 낮아져 재실자의 쾌적도가 향상된다. 냉방 과정에서 응축기를 통해 외부로 방출되던 열을 회수하여 바닥 복사 난방의 열원으로 활용하면 보일러에서 별도로 공급해야 하는 에너지를 줄일 수 있다. 이를 위해 선행 연구에서는 바닥 표면 열환경 보정을 위한 동시 냉난방 시스템의 구성요소 및 개략도를 제안하였으며, 시스템에 따른 제어프로세스를 개발하였다. 시스템 모델링을 위해서는 에어컨 압축기에서 나온 냉매가 응축기로 가기 전 분기되어 일부는 바닥 난방을 수행하는 구조를 만들어야 한다. 시뮬레이션 도구로는 TRNSYS를 선정하였으나 TRNSYS의 기존 Packaged Terminal Air Condition(이하 Type 144)은 냉동사이클이 하나의 컴포넌트로 통합되어 있어, 냉매 배관을 분기시켜 냉매-물 열교환기를 연결할 수 없다는 한계가 존재했다. 따라서 본 연구는 제안된 시스템을 모델링하여 에너지 평가를 진행하기에 앞서, 대상 건물에서 사용하는 모델 데이터를 바탕으로 압축기, 응축기, 팽창밸브 및 증발기의 Type을 개발하였다. 압축기는 R410A 냉매를 사용하는 실제 압축기의 성능 데이터를 바탕으로 증발 및 응축 조건에 따른 냉매 질량유량, 소비전력, 토출온도 및 압력을 계산하도록 하였다. 응축기와 증발기는 냉매와 공기의 입구조건을 바탕으로 열전달량, 냉매 및 공기의 출구 상태를 계산한다. 마지막으로 팽창밸브는 응축기에서 나온 냉매가 증발압력까지 팽창하는 과정에서 출구온도의 냉매 상태를 계산한다. 개발된 Type들을 TRNSYS에서 연결하여 냉동사이클을 구성하였으며, 향후 연구에서는 개발된 Type들과 냉매-물 열교환기, 바닥 복사 시스템으로 구성된 동시 냉난방 시스템을 모델링하여 에너지 성능을 분석하고자 한다.

Key Words : 동시냉난방 시스템(Simultaneous heating and cooling system), 건물 에너지 시뮬레이션(Building energy simulation), 트랜시스(TRNSYS), 냉동사이클(Refrigeration cycle), 압축기(Compressor)

† Corresponding author, E-mail: daeuk.shin@kunsan.ac.kr

후 기

본 연구는 2025년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025- 16071789).

BEE-O-5

Low-E 코팅 구성에 따른 복합 진공 복층창의 유리면 온도 분포 및 연간 실내 유입 열량 분석

Effects of Low-E Coating Configuration on Glazing-Surface Temperature Distribution and Annual Inward Heat Gain in Composite Vacuum Glazing

이준영*, 김민우*, 김동수*, 윤종호*†
Junyoung Lee*, Minwoo Kim*, Dongsu Kim*, Jongho Yoon*†
*국립한밭대학교 건축공학과

Abstract : 창호의 열성능 평가에는 열관류율(U-value)과 태양열취득계수(Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)가 주로 사용되지만, 표준조건에서 산정된 종합 성능값만으로는 실제 기상조건에 따른 시간별 열유입과 창호 내부의 온도분포를 파악하기 어렵다. 특히 복합 진공 복층창(Composite Vacuum Glazing, CVG)의 Low-E 코팅 구성은 태양복사의 투과·흡수와 유리면 사이의 복사교환에 함께 영향을 미치므로, 이에 따른 열류 성분과 내부 온도분포의 변화를 함께 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구는 ISO 15099 기반의 준정상 열평형 모델을 이용하여, 연간 기상조건에서 Low-E 코팅 구성에 따른 CVG의 실내 유입 열류와 유리면 온도 및 중공층별 온도차를 정량적으로 분석하였다. 모델에는 진공층의 잔류기체 열전달, 지지 필라 전도 및 복사교환을 반영하였으며, 대전 기상조건에서 6개 유리면의 온도와 실내 유입 열류를 시간별로 계산하였다. WINDOW 표준조건의 36개 면온도와 비교한 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 0.30 K였다. 또한 2번면과 5번면에 Low-E 코팅을 적용한 창호(창호 A)를 대상으로, 대전 옥외 실험시설에서 216시간 동안 측정한 외측 및 실내측 표면온도와 계산값을 비교하였으며, RMSE는 각각 1.43 K와 2.02 K였다. 창호 A의 연간 누적 순 유입 열량은 277.2 kWh/m^{2}로, 5번면에만 코팅을 적용한 창호(창호 C)의 356.7 kWh/m^{2}보다 22.3% 작았다. 이 감소량의 77.9%는 태양투과 열량의 감소에서 발생하였다. 냉방기 낮시간에 계산된 실내측 표면온도는 창호 A가 창호 C보다 평균 0.59 K 낮았으며, 표면교환 열류는 4.7 W/m^2 작았다. 두 창호는 동일한 공기층과 진공층 구성을 갖지만, 겨울철 진공층의 평균 절대온도차는 창호 A와 C에서 각각 11.05 K와 12.28 K로 나타났다. 본 연구는 Low-E 코팅 구성에 따른 CVG의 열유입 차이를 태양투과와 표면교환 성분으로 구분하고, 이를 유리면 온도 및 중공층별 온도차 변화와 연결하여 정량적으로 제시하였다.

Key Words : 복합 진공 복층창(Composite Vacuum Glazing), Low-E 코팅(Low-E Coating), 유리면 온도(Face Temperature), 실내 유입 열류(Inward Heat Gain)

† Corresponding author, E-mail: jhyoon@hanbat.ac.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00266248), 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. RS-2022-NR069948).

BEE-O-6

태양광 모듈의 구조 및 유리 조건에 따른 화재거동 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Fire Behavior of Photovoltaic Modules with Different Structural Configurations and Glass Conditions

고종환*, 이지향**†
Jonghwan Ko*, Jihyang Lee**†
*국립소방연구원 안전정책연구과, **국립소방연구원 대응기술연구과

Abstract : 최근 건물 적용형 태양광발전 시스템의 확대에 따라 태양광 모듈의 화재안전성에 대한 검토가 중요해지고 있다. 본 연구에서는 태양광 모듈의 구조 및 유리 조건에 따른 화재거동 특성을 비교하기 위하여 G2B(Glass to Backsheet) 및 G2G(Glass to Glass) 모듈을 대상으로 화염전파(Spread of Flame), 불잉걸(Burning Brand), 콘칼로리미터 시험을 수행하였다. 화염전파 시험은 KS C IEC 61730-2에 따라 수행되었으며, G2B와 G2G 모듈의 화염전파 거리는 각각 65 cm와 44.5 cm로 나타나 G2G 모듈에서 상대적으로 짧은 화염전파 특성이 확인되었다. 불잉걸 시험에서는 두 구조 모두 착화 및 관통에 특이사항이 관찰되지 않았다. 또한 G2G 모듈을 대상으로 유리 두께와 강화 방식을 달리하여 KS F ISO 5660-1에 따른 콘칼로리미터 시험을 수행한 결과, 반강화유리 조건에서 강화유리에 비해 최대 열방출률과 총 열방출량이 상대적으로 높고 착화시간은 짧게 나타나는 경향을 보였다. 특히 10.9 mm 강화유리 조건은 평균 최대 열방출률이 가장 낮고 착화시간이 가장 길게 나타났으며, 반강화유리 일부 시험체에는 시험 중 유리 균열이 발생하였다. 이러한 결과는 태양광 모듈의 구조 및 유리 조건이 화재 시 화염전파와 열방출 거동에 영향을 미칠 수 있음을 보여주며, 향후 건물 적용 태양광 모듈의 화재안전 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

Key Words : 태양광 모듈(Photovoltaic Module), G2G(Glass-to-Glass), G2B(Glass-to-Backsheet), 화재안전(Fire Safety), 화염전파(Flame Spread), 열방출률(Heat Release Rate), 콘칼로리미터(Cone Calorimeter)

†Corresponding author, E-mail: ljh1028@korea.kr

후 기

본 연구는 소방청 소방현장 활동지원 기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다 (과제번호 : 2760000048).

BEE-O-7

5세대 열네트워크 시스템의 예측제어 기반 재계획 주기에 따른 운전비용 및 연산성능 분석

Analysis of Operating Costs and Computational Performance according to Replanning Intervals in Predictive Control of Fifth-generation Thermal Network Systems

최원종*,**, 신예빈*,**, 이헌민*,**, 이왕제*, 안영섭*, 정재원**, 김민휘*†,
Won-Jong Choi*,**, Ye-Bin Shin*,**, Heon-Min Lee*,**, Wangje Lee*,
Youngsub An*, Jae-Weon Jeong**, Min-Hwi Kim*†
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, **한양대학교 건축공학과

Abstract : 태양광 발전과 축열조가 연계된 5세대 지역냉난방 시스템(Fifth-generation district heating and cooling, 5GDHC)의 효율적인 운영을 위해서는 시간에 따라 변화하는 에너지 수요와 재생에너지 발전량을 고려한 운전 전략이 요구된다. 모델예측제어(Model predictive control, MPC)는 미래의 부하와 태양광 발전량을 예측하여 일정 기간의 최적운전 계획을 수립하고, 주기적으로 시스템 상태와 예측정보를 갱신하여 운전계획을 재수립하는 방법이다. 이때 최적화기간과 재계획주기의 설정에 따라 고려할 수 있는 미래 운전정보의 범위와 최적화 수행 횟수가 달라지므로, 대상 시스템의 운전 특성과 연산 부하를 함께 고려한 설정이 필요하다. 특히 축열조가 포함된 시스템에서는 최적화기간에 따라 향후 축, 방열 계획과 태양광 발전의 활용 시점이 달라질 수 있으며, 재계획주기는 변화하는 부하와 예측정보를 운전계획에 반영하는 빈도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 태양광 발전과 축열조가 연계된 5GDHC 시스템을 대상으로 혼합정수선형계획(Mixed integer linear programming, MILP) 기반 MPC 모델을 구축하고, 최적화기간과 재계획주기에 따른 운전 특성을 비교하고자 한다. 최적화기간은 24, 48, 72 및 96 h로 설정하고, 재계획주기는 15, 30 및 60 min으로 구분하여 각 조건에서의 운영 비용, 계통전력 사용량, 축열조 운전 및 연산시간을 분석한다.

Key Words : 5세대 지역냉난방(5th-generation district heating and cooling), MPC(Model predictive control), TES (Thermal energy storage), MILP(Mixed integer linear programming)

†Corresponding author, E-mail: mhkim001@kier.re.kr

후 기

본 연구는 2023년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(과제번호 : RS-2023-00236325)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

BEE-O-8

열화상 이미지 해상도에 따른 열쾌적성 예측성능 분석 및 개선방안

Effects of Thermal Image Resolution on Thermal Comfort Prediction and Performance Improvement

송현근*, 정서희*, 김지원**, 홍장호**, 곽영훈* 문선혜*†
Hyeongeun Song*, Seohee Jung*, Jiwon Kim**, Jangho Hong**,
Younghoon Kwak* Sunhye Mun*†
*서울시립대학교 건축학부, **서울시립대학교 건축공학과

Abstract : 실내에서 생활하는 시간이 증가함에 따라 열쾌적성은 실내환경의 질을 결정하는 중요한 요소로 대두되고 있다. 적외선 열화상은 재실자의 피부온도를 비접촉 방식으로 추정할 수 있어 열쾌적성 예측 시 활용될 수 있으나, 기존 연구의 대부분은 고해상도 조건을 전제로 수행되어 왔으며 촬영 거리가 증가하거나 저해상도 카메라를 사용할 때 발생하는 이미지 해상도 저하가 열쾌적성 예측 성능에 미치는 영향에 대해서는 충분히 검토되지 않았다. 본 연구에서는 안면 열화상 이미지의 해상도 저하가 딥러닝 기반 열쾌적성 예측 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 열화상 이미지는 대기 중 복사 및 감쇠의 영향을 배제하고 해상도 저하의 영향만을 분석하기 위해 다운스케일링하여 활용하였다. 다양한 해상도 조건 및 변수 조합으로 모델을 개발하였으며, 모델은 CNN, 멀티모달 CNN, CNN-Transformer를 활용하였다. 이미지 해상도에 따른 열쾌적성 예측 성능 분석 결과, CNN은 안면의 세부 영역이 구분되지 않는 저해상도 이미지로 학습 시 예측정확도가 급격히 감소하였으며, 멀티모달 CNN은 저해상도 이미지 학습 시에도 환경 정보와 학습 시 예측 정확도 감소가 상대적으로 적었다. CNN-Transformer 모델은 중간 수준의 예측 정확도를 나타냈다. 최종적으로, 1/50 스케일에서 CNN, 환경데이터 학습, Transformer 적용 모델은 각각 56%, 85%, 77%의 예측 정확도를 나타냈다. 이러한 결과는 열화상 이미지 기반 열쾌적성 예측에서 환경 정보를 함께 활용함으로써 이미지의 세부 정보 손실을 보완하고, 저해상도 조건에서의 예측 성능 저하를 완화할 수 있음을 시사한다.

Key Words : 적외선 열화상 이미지(Infrared thermal image), 이미지 해상도(Image resolution), 열쾌적성(Thermal comfort), 딥러닝(Deep learning) 합성곱신경망(Convolutional neural network))

† Corresponding author, E-mail: msh@uos.ac.kr

후 기
본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2026-25520385, RS-2025-23324202).

BEE-O-9

다중 에너지원 기준 수요 스케줄 산정을 위한 아파트 단지 필요 계측 세대 수 분석

Required Number of Metered Households for Multi-Energy Reference Demand Schedules in an Apartment Complex

김인섭*, 임현우*†
Inseop Kim*, Hyunwoo Lim*†
*건국대학교 건축대학 건축학과

Abstract : 도시 건물 에너지 모델링(UBEM)에서 주거 세대의 시간별 수요 스케줄은 국가 표준이나 소수 사례에서 도출된 고정적 값이 주로 사용되며, 실제 세대의 사용량 편차는 반영되지 않는 경우가 많다. 실측 기반 스케줄은 이를 보완할 수 있으나, 세대별 계측에는 비용이 따르는 반면 몇 세대를 계측해야 단지 평균 스케줄을 믿을 만하게 얻을 수 있는지에 대한 기준은 제시되지 않았다. 이에 본 연구는 계측 세대 수에 따라 기준 스케줄이 얼마나 정확해지는지를 정량화하여, 실측 기반 스케줄 구축에 필요한 계측 규모의 판단 근거를 제시하고자 한다. 분석에는 서울 소재 공공임대 아파트 697세대의 12개월(2025.07- 2026.06) 시간별 실측 데이터를 사용하였으며, 계측 세대 수에 따른 월별 대표 24시간 기준 스케줄(총 288개 시간대)의 95% 신뢰구간 폭을 에너지원별로 정량화하였다. 신뢰구간 폭은 세대 간 사용량 차이로부터 산정하되 단지 전체를 계측하면 0이 되도록 하였으며, 연간 평균 신뢰구간 폭이 평균 수요의 ±15%, ±10%, ±5% 이내가 되는 최소 계측 세대 수를 탐색하였다. 분석 결과, 총에너지(전기·열량·급탕 합산) 기준으로 각각 198(697세대의 28.4%), 328(47%), 544(78%)세대가 필요하였다. ±5% 기준 필요 세대 수는 전기 371(53%), 열량 616(88%), 급탕 667(96%)세대로 최대 1.8배 차이가 났으며, 급탕은 사실상 전수 계측에 해당하였다. 이 차이는 같은 시각의 세대 간 사용량 편차에서 비롯되며, 급탕은 세대마다 사용 시각이 다른 간헐적 특성으로 세대 간 상대 산포가 전기의 4배 이상으로 가장 많은 표본이 요구됐다. 본 연구는 동일한 세대 수를 계측하더라도 에너지원별 정밀도가 다름을 보여주며, 에너지원별 목표 정밀도를 차등 설정하는 모니터링 설계의 정량적 기준과 실측 기반 UBEM 입력 스케줄에 계측 세대 수에 따른 신뢰구간을 병기할 근거를 제시한다.

Key Words : 도시 건물 에너지 모델링(Urban Building Energy Modeling), 기준 수요 스케줄(Reference Demand Schedule), 계측 표본 규모(Metering Sample Size), 불확실성 밴드(Uncertainty Band), 다중 에너지원(Multi-Energy Source)

†Corresponding author, E-mail: hyunwoolim@konkuk.ac.kr

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00342048).

BEE-O-10

웨어러블 센서 신호를 활용한 심박변이도 특성 분석 및 건강 모니터링 프로그램 검증

Analysis of Heart Rate Variability Using Wearable Sensor Signals and Validation of a Health Monitoring Program

배지원*, 임재한*†
JiWon Bae*, JaeHan Lim*†
*이화여자대학교 건축도시시스템공학과

Abstract : 최근 웨어러블 디바이스의 보급과 센서 기술의 발전으로 피부온도, 심박수, ECG 및 활동량과 같은 생체신호를 일상환경에서 지속적으로 측정할 수 있게 되었다. 이러한 생체신호는 재실자의 온열 쾌적성 및 건강 상태를 평가하고 개인 맞춤형 실내환경 제어에 활용할 수 있는 주요 정보로 주목받고 있다. 특히 ECG로부터 추출되는 R-R interval은 심박수 및 심박변이도(Heart Rate Variability, HRV)를 산출하기 위한 기본 데이터로서 자율신경계 반응 및 생리적 상태를 평가하는 데 활용될 수 있다. 본 연구에서는 갤럭시 워치에서 측정된 ECG 데이터를 이용하여 R-peak를 자동으로 검출하고 R-R interval을 산출할 수 있는 분석 프로그램을 개발하였다. 측정된 ECG 신호에 전처리 및 피크 검출 알고리즘을 적용하여 각 심박주기의 R-peak 발생 시점을 추출하였으며, 연속된 R-peak 사이의 시간 간격을 이용하여 R-R interval을 계산하였다. 개발 프로그램의 분석 성능을 검증하기 위해 동일한 ECG 데이터를 대표적인 HRV 분석 프로그램인 Kubios HRV를 이용하여 분석하고, 두 프로그램에서 검출된 R-peak 및 R-R interval 결과를 비교하였다. 비교 평가에는 R-peak 검출 일치도, R-R interval의 평균 오차 및 상관성 등을 활용하였다. 본 연구를 통해 웨어러블 ECG 데이터로부터 심박 특성을 분석할 수 있는 자체 프로그램의 적용 가능성을 검토하였으며, 향후 심박수 및 HRV 지표와 실내 온열환경 데이터를 연계하여 재실자의 온열 쾌적성과 열 스트레스 및 건강 상태를 평가하는 연구에 활용하고자 한다.

Key Words : 웨어러블 센서(Wearable Sensor), 심전도(Electrocardiogram, ECG), R-peak 검출(R-Peak Detection), 심박변이도(Heart Rate Variability, HRV), 온열 쾌적(Thermal Comfort), 열 스트레스(Heat Stress)

† Corresponding author, E-mail: limit0@ewha.ac.kr

후 기
본 연구는 2026년도 한국연구재단의 재원으로 연구비 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25619495).

BEE-O-11

창호의 평가 경계에 따른 태양열취득률 차이: 창세트와 유리 단위 SHGC의 실험적 비교

Differences in Solar Heat Gain Coefficient by Window Evaluation Boundary: An Experimental Comparison of Whole-Window and Glazing-Level SHGC

윤태균*, 이승준*, 신현철*, 이상문*†
Tae-gyun Yun*, Seung-joon Lee*, Hyun-cheol Shin*, Sang-moon Lee*†
*(재)한국건설생활환경시험연구원

Abstract : Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) is an important parameter affecting the cooling load and energy performance of buildings. In Korea, KS L 9107 evaluates SHGC at the window-set level using a solar simulator, whereas KS L 2514 evaluates glazing-level SHGC based on the optical and thermal properties of glass. This study experimentally compared the SHGC values obtained from the two evaluation methods for aluminum- and PVC-framed windows. For the aluminum-framed window, the SHGC values were 0.14 for the window-set evaluation and 0.18 for the glazing-level evaluation, showing a difference of 0.04. In contrast, the PVC-framed window showed the same SHGC value of 0.29 for both methods. These results indicate that the difference between glazing-level and window-set SHGC may vary depending on frame and window system characteristics. Therefore, the evaluation boundary, including the effects of glazing and frame components, should be considered when assessing the solar heat gain performance of actual window systems. The results provide fundamental data for establishing appropriate SHGC evaluation methods for window energy performance.

Key Words : 태양열취득률(Solar heat gain coefficient), 창세트(Window set), 유리(Glazing), 평가경계(Evaluation boundary), 창호 성능(Fenestration performance)

† Corresponding author, E-mail: smkicm@kcl.re.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부 재원으로 한국에너지공단의 지원을 받아 수행한 연구중인 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25604190).

BEE-O-12

저소득층 주거의 계절별 비대칭적 반등효과

Seasonal Asymmetric Rebound Effect of Energy Vouchers in Low-Income Housing

최연희*†
Younhee Choi*†
*강남대학교 부동산건설학부

Abstract : 에너지바우처는 국내 저소득층을 대상으로 난방·냉방비 일부를 지원하는 대표적 에너지복지 정책이나, 에너지효율 개선이 오히려 소비 증가로 이어지는 반등효과(rebound effect)와 상충할 가능성이 지적되어 왔다. 본 연구는 동일한 공공임대단지(경기도, 1993년 준공 구관·2013년 준공 신관)를 대상으로 동절기와 하절기에 각각 수행된 실측조사 결과를 통합하여, 동일한 바우처 정책이 계절에 따라 어떤 상반된 영향을 미치는지 규명하였다. 동절기 실측 결과, 바우처 수급 가구의 평균 실내온도는 22.62°C에서 24.68°C로 상승했으나(+2.06°C, $p<0.0001$), 난방에너지 소비는 26.6~59.9% 증가했으며 신관에서는 평균 실내온도가 25°C를 초과하는 과다난방(overheating) 현상이 관찰되었다. 반면 하절기에는 바우처 수급 가구의 평균 실내온도가 28.78°C에서 26.77°C로 낮아지고(−2.01°C, $p<0.001$) 과열위험이 29.57%에서 1.48%로 약 95% 감소했음에도, 과냉방(overcooling)에 상응하는 과소비 반등은 거의 관찰되지 않았다. 본 연구는 이러한 계절 간 비대칭을 가스(개별계량)와 전기(통합계량)의 계량구조 차이로 해석하고, flypaper effect·mental accounting 개념으로 설명하였다. 이는 정책 목적을 명확히 라벨링하려는 시도가 오히려 목적에서 벗어난 소비를 유발할 수 있음을 시사하며, 지급기준의 정밀화와 구조적 대안 마련이 필요함을 제안한다.

Key Words : 에너지바우처(Energy Voucher), 반등효과(Rebound Effect), 에너지빈곤(Energy Poverty), 실내온열환경(Indoor Thermal Environment)

† Corresponding author, E-mail: yunichoi@kangnam.ac.kr

ZEB-O-4

실내 루버형 집광채광장치의 월간 조명에너지 절감 효과 평가를 위한 표준 분석 방법

Standard Methods for Monthly Lighting Energy Savings Evaluation of Indoor Louver-Type Daylight Redirecting Systems

임재한*†, 심소희**, 신미수***
JaeHan Lim*†, SoHee Shim**, MiSoo Shin***
*이화여자대학교 건축도시시스템공학과, **패시브제로에너지건축연구소, ***(주)선포탈

Abstract : This study aims to propose a quantitative method for evaluating lighting energy savings achieved through the application of an indoor louver-type daylight redirecting system and to establish a basis for incorporating its performance into building energy performance assessment frameworks. To achieve this objective, the current status of domestic regulations, policies, and certification schemes related to daylight redirecting systems was reviewed. In addition, the daylighting evaluation method based on Method 1 of EN 15193-1 was compared with the lighting energy assessment method specified in DIN V 18599-4. Based on this comparative analysis, a daylighting performance evaluation method was proposed to reflect the optical characteristics of indoor louver-type daylight redirecting systems. Furthermore, a monthly lighting energy savings evaluation method was developed by incorporating lighting control strategies associated with the daylighting system into the existing zero-energy building certification framework. The proposed approach is expected to provide a systematic basis for quantitatively assessing the lighting energy-saving performance of indoor louver-type daylight redirecting systems and for integrating their contribution into building energy performance evaluations.

Key Words : 집광채광장치(Daylight Redirecting System), 실내 루버(Indoor Louver), 조명에너지 절감(Lighting Energy Savings), 자연채광 성능평가(Daylighting Performance Evaluation), 제로에너지건축물인증(Zero-Energy Building Certification)

† Corresponding author, E-mail: limit0@ewha.ac.kr

후 기
이 연구는 2026년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. (과제번호:RS-2026-25619495)



Oral Session

태양광에너지
Photovoltaic Energy (PVE) Session

PVE-I-1

페로브스카이트/결정질 실리콘 탠덤 태양광 소자의 국내외 표준 동향 및 개발 현황

Current Status of Standards for Perovskite/c-Si Tandem PV Devices

임종록*†, 김형진*, 정태희*, 김필규*, 김성원*
Jongrok Lim*†, Hyungjin Kim*, Taehee Jung*, Pilkye Kim*, SeongWon Kim*
*한국산업기술시험원 신재생에너지기술센터

Abstract : 가격 경쟁력과 대량 양산이 가능한 결정질 태양광 발전은 여전히 전 세계 태양광 산업 발전의 중심이지만 최근 고효율/고출력 태양광에 대한 관심이 높아지면서 페로브스카이트/결정질 실리콘 탠덤 태양광은 빠른 발전을 이어가고 있다. 최근에는 높은 효율과 안정성, 확장성, 제조 공정 개선을 위한 노력이 확대되고 있으며, 실제 운전 조건에서의 성능 등을 평가하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 페로브스카이트 소자의 특성 때문에 출력 측정에 많은 어려움을 겪고 있으며, 이러한 점을 고려하여 IEC TC 82 WG2에서는 페로스스카이트 기반 태양광 소자의 출력 측정에 대한 표준화가 진행되고 있다. 본 논문에서는 페로브스카이트 기반 태양광 소자의 과거와 현재의 표준 동향을 소개하고, 현재 국내에서 개발되고 있는 페로스카이트/결정질 실리콘 탠덤 소자의 표준 개발 현황에 대해 소개를 하고자 한다.

Key Words : 페로브스카이트 소자(Perovskite/c-Si tandem device), 표준(Standards), 안정화(Settling), 측정(Measurement)

†Corresponding author, E-mail: jongrok@ktl.re.kr

PVE-O-1

차량 일체형 태양광 모듈(VIPV)의 발전 특성 분석

An Analysis on the Power Generation Characteristics of Vehicle-Integrated Photovoltaics

김태현*, 고재우*, 정태호*, 이병홍*†
Taehyun Kim*, Jaewoo Ko*, Taeho Jeong*, Byunghong Lee*†
*현대자동차 기초소재연구센터 탄소중립기술혁신팀

Abstract : Vehicle-integrated photovoltaics (VIPV) extends electric vehicle driving range, yet vehicular mobility introduces continuously varying azimuth orientations and dynamic shading conditions distinct from stationary systems. This study investigates power generation characteristics of a VIPV system built on the RG3 EV, incorporating silicon solar cells across eight body components. Static evaluations across eight azimuth orientations demonstrated total power output variation within 10%, attributed to complementary generation among multi-surface panels, yielding an estimated solar-assisted driving range of approximately 14.5 km over six hours. Urban driving evaluations quantified shading-induced losses at approximately 16%, and a VIPV-specific analytical framework is proposed that classifies dynamic shading into three distinct types: complete structural blockage, partial natural obstruction, and gradual irradiance fluctuation through concurrent monitoring of solar irradiance and power output.

Key Words : 차량 일체형 태양광 모듈(VIPV, Vehicle-Integrated Photovoltaics), 전기차(Electric Vehicle), 솔라카(Solar Car), 실차평가(Real-Vehicle Evaluation), 동적 음영(Dynamic Shading)

† Corresponding author, E-mail: redboho@hyundai.com

PVE-O-2

차량 통합형 태양광(VIPV) 적용을 위한 페로브스카이트 태양전지의 조도 및 환경별 발전 성능 평가

Performance Evaluation of Perovskite Solar Cells for Vehicle-Integrated Photovoltaics (VIPV) Under Diverse Illuminance and Environmental Conditions

주소연*, 강리라*, 김주애*, 이병홍*†
So-Yeon Ju*, Rira Kang*, Juae Kim*, Byunghong Lee*†
*현대자동차 탄소중립기술혁신팀

Abstract : Conventional silicon solar cells in vehicle-integrated photovoltaics (VIPV) exhibit critical limitations under low illuminance conditions, such as underground parking facilities. This study evaluates perovskite solar cells (PSCs) comprehensively across diverse illuminance levels and environmental conditions representative of real-world vehicle operations. PSCs with direct bandgap properties generated 5.26 Wh over 12 hours under 1000 lux indoor illumination, confirming their capability to power ultra-low-power sensors. Under harsh outdoor conditions with rain and snow, PSCs maintained a performance ratio (PR) of 1.0, revealing superior low-illuminance output stability compared to silicon (PR 0.7). This study confirms the exceptional environmental adaptability of PSCs and validates their potential as a next-generation mobility energy solution through curved pre-form module applications.

Key Words : 차량 통합형 태양전지(Vehicle-integrated photovoltaics), 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar cells), 저조도 성능 (Low-illuminance performance)

† Corresponding author, E-mail: redboho@hyundai.com

PVE-O-3

광전자 특성 분석 기반 페로브스카이트 결정화 거동 규명

Understanding the Perovskite Crystallization Kinetics via Optoelectronic Analysis

한혜지*†, 임종철**
Hyeji Han*†, Jongchul Lim*
*충남대학교 에너지과학기술학과, **충남대학교 에너지공학과

Abstract : Perovskite materials have attracted significant attention in photovoltaics owing to their outstanding optoelectronic properties. However, the fundamental chemistry governing perovskite precursor solutions remains insufficiently understood, the dynamic coupling between solubility, supersaturation, and kinetic regulation during perovskite formation has not been clearly resolved. Here, we investigate the dynamic crystallization behavior of perovskite precursor controlled thermal and compositional conditions using operando time-resolved characterization. Through operando light scattering measurements, we directly visualized the dissolution, nucleation, and crystal growth of PbI_2 and ABX_3 precursor systems in real time, revealing pronounced temperature-dependent behavior, concentration-driven stabilization effects, and strong kinetic regulation by A-site cations. In particular, A-site cation incorporation was shown to suppress uncontrolled dissolution–recrystallization, buffer supersaturation evolution, and enable slower, more controlled crystal growth pathways. Our study reveals that variations in precursor and nucleation dynamics, growth- dissolution, and kinetic stability during crystal formation. By elucidating the mechanistic origins of crystallization instability and irreproducibility, this work provides fundamental guidelines for precursor design and crystallization, offering a rational pathway toward reproducible fabrication of high-quality perovskite thin films and high-efficiency, stable perovskite solar cells.

Key Words : 페로브스카이트(Perovskite), 태양전지 (Solar cells), 결정화 (Crystallization), 과포화 (Supersaturation), 오페란도 광 산란 측정 (Operando light scattering)

† Corresponding author, E-mail: jclim@cnu.ac.kr

PVE-O-4

KPFM을 이용한 페로브스카이트/실리콘 탠덤셀의 국소 표면전위 및 옥외 열화 거동 분석

KPFM Investigation of Local Surface Potential and Outdoor Degradation in Perovskite/Si Tandem Cells

채승현*,**, Wei Li***, 윤재성****, 조윤애*****, 김경수*****, 박연우******, 윤재호******, 김도형*,**†

Seunghyeon Chae*,**, Wei Li***, Jae Sung Yun****, Yunae Cho*****, Kyung Soo Kim*****, Yeonwoo Park******, Jae Ho Yun******, Dohyung Kim*,**†,

*충북대학교 신소재공학과, **충북대학교 도시에너지환경공학과, ***Wuhan University of Technology, **** University of Surrey, Department of Electrical and Electronic Engineering, *****한국에너지기술연구원 태양광연구단, ******한국에너지공과대학교 에너지공학부

Abstract : 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지는 단일접합 태양전지의 이론적 효율 한계를 극복할 수 있는 차세대 광전변환 기술로 주목받고 있다. 그러나 실제 옥외 환경에서 발생하는 페로브스카이트 흡수층, 전하수송층 및 계면의 열화는 소자의 장기 안정성을 제한하는 주요 요인이다. 특히 기존의 거시적 전류-전압 측정만으로는 열화 과정에서 발생하는 국소적인 전위 불균일성과 미시적 전하 거동을 규명하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 Kelvin probe force microscopy(KPFM)를 이용하여 1.67 eV 와이드 밴드갭(wide-bandgap) 페로브스카이트 흡수층이 적용된 페로브스카이트/실리콘 탠덤셀의 나노스케일 표면전위와 옥외 열화 거동을 분석하였다. 시료는 외기 온도, 상대습도 및 일사량이 복합적으로 변화하는 실제 옥외 환경에 노출하였으며, 노출 전후의 표면 형상과 contact potential difference(CPD)를 암조건 및 광조사 조건에서 측정하였다. 또한 암조건과 광조사 조건의 CPD 차이로부터 surface photovoltage(SPV)를 도출하여 국소 광유도 전하 거동을 평가하였다. 이와 함께 X-ray diffraction(XRD) 측정을 통해 옥외 노출 전후의 결정상, 결정성 및 열화 관련 이차상의 형성 여부를 비교하였다. 옥외 노출 후 KPFM 분석 결과, CPD의 국소 불균일성이 심화되고 표면전위 변동이 뚜렷해졌으며, 평균 SPV가 감소하여 열화에 따른 광유도 전하 거동의 변화가 확인되었다. 이러한 표면전위 및 광기전 반응의 변화는 옥외 환경에 의한 재료 및 계면 열화가 탠덤 구조의 광생성 전하 분리와 수송 특성에 영향을 미쳤음을 시사한다. 특히 수분, 산소, 일사 및 온도 변화에 지속적으로 노출되는 실제 운용 환경에서는 외부 열화 인자의 침투를 억제할 수 있는 효과적인 봉지(encapsulation) 기술이 탠덤 태양전지의 장기 안정성 확보에 필수적임을 보여준다. 본 연구는 XRD와 KPFM 분석을 통해 옥외 노출에 따른 결정학적 변화와 국소 전기적 특성 변화를 종합적으로 평가하였으며, 향후 탠덤 태양전지의 봉지 전략과 장기 안정성 개선을 위한 분석적 근거를 제공한다.

Key Words : Perovskite/Si tandem half-cell, Kelvin probe force microscopy (KPFM), Surface photovoltage (SPV), Outdoor degradation, Local surface potential

† Corresponding author, E-mail: Dohyungkim@chungbuk.ac.kr

PVE-O-5

표면 패시베이션을 통한 우주용 페로브스카이트 태양전지의 알파입자 유도 트랩 형성 억제

Surface Passivation Suppresses α-Particle-Induced Trap Formation in Perovskite Solar Cells for Space Applications

이다슬*, 서형원*, 한혜지**, 김수환*, 장수성*, 강상원*, 조성원***, 채승현****, 강동원***, 김도형****, 임종철**, 김동석*****, 박종성*†

Da Seul Lee*, Hyeong Won Seo*, Hyeji Han**, Suwhan Kim*, Suseong Jang*, Sang Won Kang*, Sungwon Cho***, Seung Hyeon Chae****, Dong-Won Kang***, Dohyung Kim****, Jongchul Lim**, Dong-Seok Kim*****, Jongsung Park*†

*경상국립대 에너지공학과, **충남대 에너지과학기술학과, *** 중앙대 에너지시스템공학부, ****충북대 신소재공학과, *****한국원자력연구원

Abstract : α-particles represent the second most abundant ionic species in space radiation, yet their specific degradation mechanisms and mitigation strategies in perovskite solar cells (PSCs) remain unquantified. Here, we evaluate the degradation of PSCs under 2.5 MeV alpha-particle irradiation and investigate the protective role of a propane-1,3-diammonium iodide ($PDAI_2$)surface passivation. Following irradiation, $PDAI_2$-passivated target devices retain 80 % of the initial efficiency (20.22%), whereas control devices retain 60% (19.13%). Performance losses were dominated by fill factor degradation. X-raydiffraction, scanning electron microscopy, and Fourier-transform infrared spectroscopy indicate that while α-particle induces partial organic cation loss and morphological variations, the primary crystalline phase is preserved without secondary phase decomposition. Capacitance-voltage, impedance spectroscopy, and Kelvin probe force microscopy confirmed that performance losses originate predominantly from photoactive trap states generated at the perovskite surface and interface, which increase space-charge density and transport resistance. Diammonium cations coordinate under coordinated surface sites and crosslink organic cations, preventing radiation-generated point defects from stabilizing into transport-impeding traps. These findings establish surface defect chemistry control as a key strategy against high linear energy transfer (LET) ion radiation in space photovoltaics.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar Cells), 우주 태양전지(Space Solar Cells), 알파입자(α-particle), 방사선(Radiation)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

PVE-I-2

분광 엘립소메트리를 이용한 혼합 페로브스카이트 $MA_xFA_{1-x}Pb(I_3)_y(Br_3)_{1-y}$ 박막의 정밀 복소 광학 상수 및 진성 밴드갭 규명

Precise Determination of Complex Optical Constants and Intrinsic Bandgap in $MA_xFA_{1-x}Pb(I_3)_y(Br_3)_{1-y}$ Perovskite Thin Films via Spectroscopic Ellipsometry

제용훈*,**, 이태규*,**, 남동인*,**, 김태현**, 김준영*,**, 김수민**†
Yong Hun Je*,**, Tae Gyu Lee*,**, Dong-in Nam*,**,Tae Hyeon Kim**,
June Young Kim*,**, Soo Min Kim**†
*부산대학교 재료공학과, **한국세라믹기술원 AI융합연구단

Abstract : Accurate determination of complex optical constants and optical bandgap (E_g) in mixed-cation/halide perovskite thin films is essential for optimizing optical management in high-efficiency single-junction and tandem photovoltaic devices. Conventionally, optical bandgaps have been extracted using Tauc plots derived from UV-Vis spectrophotometry absorbance spectra. However, this approach inherently aggregates substrate reflections, internal interference fringes, and surface roughness scattering into apparent absorption, frequently leading to sub-bandgap artifact tails and extrapolated bandgap errors.In this work, we employ spectroscopic ellipsometry (SE) combined with a multilayer optical dispersion model incorporating an effective surface roughness layer to isolate intrinsic material absorption from parasitic optical losses. Wavelength-dependent dielectric functions and complex refractive indices of $MA_xFA_{1-x}Pb(I_3)_y(Br_3)_{1-y}$ thin films were extracted with high fidelity across the UV-Vis-NIR spectral range. From the decoupled extinction coefficient (k), the intrinsic absorption coefficient ($\alpha = 4\pi k/\lambda$) and corresponding direct-transition Tauc plots were constructed to deduce the genuine bandgap. A comparative study between conventional UV-Vis absorbance and SE-derived absorption spectra quantitatively elucidates the influence of non-idealities on the apparent band-edge profile and bandgap determination. The determined high-accuracy optical constant dataset provides fundamental inputs for realistic device-level electro-optical simulations.

Key Words : 분광 엘립소메트리 (Spectroscopic Ellipsometry), 페로브스카이트 박막 (Perovskite Thin Films), 복소 광학 상수 (Complex Optical Constants), 광학 밴드갭 (Optical Bandgap), 타우크 플롯 (Tauc Plot)

† Corresponding author, E-mail: smkim@kicet.re.kr

후 기
본 연구는 2026년도 한국에너지기술연구원의 재원으로 기본연구사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제(인공 신경망 구조를 이용한 양면수광형 탠덤 태양전지 시뮬레이션 연구)입니다.

PVE-O-6

초저조도 전방향 광검출을 위한 투명 광기전성 물-반도체 계면

Transparent and Photovoltaic Water-Semiconductor Interface for Ultra-Low-Light Omnidirectional Photodetection

Sanh Vo Thi*, More Vivek Mohan*, Malkeshkumar Patel*, Sourov Hossain*, Md Arifur Rahman Barno*, 김준동*†
Sanh Vo Thi*, More Vivek Mohan*, Malkeshkumar Patel*, Sourov Hossain*, Md Arifur Rahman Barno*, Joondong Kim*†
*인천대학교 전기공학과

Abstract : Sustainable energy efforts demand self-powered photodetectors (PDs) that operate without an external bias. Conventional PDs typically rely on solid-state Schottky or p/n junctions formed through complex growth techniques and fixed, rigid structures. Here, to develop a self-powered PDs, we present a novel approach that leverages a static water–ZnO interface to form a Schottky-like junction on a flexible substrate. Two device configurations are developed—a water droplet system and a continuous water system—which exhibit excellent photodetection performance. Under ultralow light intensities (down to 20 nW cm^{-2}), the devices generate photocurrents ranging from 2 to 115 μAcm^{-2} and deliver open-circuit voltages of up to 0.2 V. Moreover, the devices offer omnidirectional (360°) light detection and maintain stable photodetection performance after multiple bending cycles at a bending radius of 0.5cm. These results demonstrate that water–semiconductor interfaces provide a simple yet effective path towards flexible, transparent, photovoltaic and self-powered PDs with high sensitivity under ultralow light conditions.

Key Words : 고체-액체 계면(Solid-liquid interfaces), 자가 구동형 광검출기(Self-powered photodetector), 초저조도 광검출(Ultralow light detection), 물의 분극(Water polarization), 전기 이중층(Electric double layer)

† Corresponding author, E-mail: joonkim@inu.ac.kr

PVE-O-7

ZBB 태양전지 Ribbon 및 Finger 전극의 결합에 따른 등가회로 모델 개발

Development of a Equivalent Circuit Model for Zero busbar Solar Cell

백종길*, 송형준*†
JongGil Baek*, HyungJun Song*†
*서울과학기술대학교 안전공학과

Abstract : 기후 변화 대응을 위한 세계적인 탄소 중립 정책 환상과 에너지 소비량이 증가와 태양전지의 전극의 은 사용량의 증가로 인한 태양광 에너지 발전단가(LCOE) 부담이 증가하게 되면서 Busbarless 구조 도입으로 Busbar를 생략하고 Finger 전극에 리본을 직접 연결하여 은 사용량을 획기적으로 저감하는 Zeor busbar (ZBB) 기술이 개발되었다. 기존 태양전지 구조와 달리 Busbarless 기술은 Finger 전극과 Ribbon 간의 접합 안정성이 핵심이 되면서 결합 불량 시 직렬 저항(Series Resistance)가 증가하고, 발전량 저하 및 전류 불균일로 인해 장기 신뢰성이 감소한다. 하지만, 결합 정도를 고려한 등가회로 모델이 제시되지 않아서, Ribbon 과 Busbar의 결합 불량이 태양전지의 발전량의 얼마나 영향을 주는지 정량화 되어 있지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 임이의 결합 조건의 설정을 바탕으로 EL과 I-V Curve 특성 데이터를 확보하고, 태양전지를 등가회로 병렬 유닛으로 등가회로 모델을 분할 모사하여 결합 정도를 직렬 저항 성분으로 치환하여 모델링을 제안하였다. Finger 전극과 ribbon의 개별 결합을 작은 단위의 태양전지로 구성하고, 결합이 되지 않은 영역의 직렬 저항을 조절하여 실험값과 오차가 5% 미만이 모델을 구축하였다. 본 연구는 은 사용량을 저감한 태양전지의 개발로 인해 전극간의 접합성 장기 신뢰성을 강화하고 발전량을 예측하기 위한 산업적 필요성이 증대되고 있기에 , 향후 ZBB 태양전지 및 이로 구성된 모듈의 시스템 안정성을 강화하고, 제조 공정의 한계치 제시 등에 대한 정량적 도구로 활용될 것으로 보인다.

Key Words : ZBB 태양전지 (Zero-busbar Photovoltaic cell), 핑거전극 (Finger Electrode), 리본 (Ribbon), 등가회로 (Equivalent circuit model)

† Corresponding author, E-mail: hj.song@seoultech.ac.kr

후 기
본 연구는 2026년도 한국에너지기술평가원의 재원으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호 : 2026-0077).

PVE-O-8

열·습도 환경에서 산화알루미늄 나노입자로 제어한 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지 계면의 나노스케일 분석

Nanoscale Insights into Aluminum Oxide Nanoparticle-Engineered Interfaces in Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells under Thermal and Moisture Stress

Michael S. A. Kamel*,**, Minkyu Kim***, Jongchul Lim***, Jae Sung Yun****, Wei Li*****, Dohyung Kim*†

*Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea,

**Physics Department, Faculty of Science, Minia University, P.O. Box 61519, Minia, Egypt,

***Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea,

****School of Computer Science and Engineering, Advanced Technology Institute (ATI), University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, United Kingdom,

*****State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China

Abstract : Perovskite/silicon (PVK/Si) tandem solar cells (TSCs) offer a pathway to surpass the practical efficiency limits of single-junction silicon photovoltaics, with certified efficiencies approaching 35%. Nevertheless, electrical and optical losses associated with the interface between the top and bottom subcells remain important limitations to overall device performance. Herein, we systematically investigate the incorporation of atomic-layer-deposited aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles (NPs) at the Si/PVK interfacial layers and their effects on the optoelectronic and structural properties of the device stack under thermal and moisture stresses. Kelvin probe force microscopy (KPFM) revealed a substantial enhancement in the surface photovoltage, from ~ -180 mV for the control to ~ -800 mV for the Al_2O_3 NP-containing samples, at room temperature. The incorporation of Al_2O_3 NPs also improved the thermal and moisture stability of the investigated structures. Furthermore, Al_2O_3 NPs enhanced the crystallinity of the overlying perovskite layer, with almost 3-fold increase in crystallite size (from ~ 280 Å to ~ 840 Å), as evidenced by X-ray diffraction. Time-resolved photoluminescence measurements revealed prolonged carrier lifetimes in both pristine and thermally aged samples containing Al_2O_3 NPs compared with the Al2O3-free counterparts. Collectively, these results demonstrate the potential of Al2O3 nanoparticle-based interfacial engineering to mitigate interfacial losses and improve the stability of PVK/Si TSCs.

Key Words : Silicon–perovskite tandem solar cells, Kelvin probe force microscopy (KPFM), Interfacial passivation, Surface photovoltage, Device degradation

† Corresponding author, E-mail: dohyungkim@chungbuk.ac.kr

PVE-O-9

산소 함량 제어를 통한 NiO/WO_3 이종접합 기반 투명 자가구동 UV 광검출기

Self-powered Transparent UV Photodetector Based on NiO/WO_3 Heterojunction with Tunable Oxygen Content

조예빈*, 전서준*, 산 보 티*, 김준동*†
Yebean Cho*, Seojun Jeon*, Sanh Vo Thi*, Joondong Kim*†
*인천대학교 전기공학과

Abstract : In this work, transparent self-powered ultraviolet (UV) photodetectors based on a NiO/WO_3 heterojunction were fabricated, and the O_2 flow rate during WO_3 deposition was systematically controlled to improve the photodetection characteristics. The device consisted of wide-bandgap p-type NiO and n-type WO_3, while maintaining an optical transmittance of over 60% in the visible wavelength region. At the NiO/WO_3 heterojunction interface, the built-in electric field promoted the separation of photogenerated charge carriers, allowing the device to operate without an external bias. The carrier transport properties of the WO_3 layer were tuned by adjusting the O_2 flow rate during reactive sputtering. Among the different deposition conditions examined, the device prepared at an O_2 flow rate of 5.5 sccm showed the best performance under 365 nm illumination. It exhibited favorable photovoltaic characteristics, including an open-circuit voltage of 259 mV and a short-circuit current density of 1.26×10^{-5} A cm^{-2}. In addition, the transparent photodetector achieved a responsivity of 10.98 mA W^{-1} and a detectivity of 7.04×10^{10} Jones, demonstrating excellent photodetection capability. These findings suggest that the NiO/WO_3 heterojunction is a promising structure for transparent self-powered UV photodetectors and highlight the importance of controlling the O_2 flow rate during WO_3 deposition for improving charge transport and overall photodetection performance.

Key Words : 투명 광검출기(Transparent photodetector), 자가구동 광검출(Self-powered photodetection), NiO/WO_3 이종접합(NiO/WO_3 heterojunction), 반응성 스퍼터링(Reactive sputtering), 산소 함량(Oxygen content)

† Corresponding author, E-mail: joonkim@inu.ac.kr

PVE-I-3

은저감 전도성 접착제를 적용한 쉉글드 태양광 모듈의 장기 신뢰성 평가

Long-Term Reliability Evaluation of Shingled Photovoltaic Modules Using Silver-Reduced Electrically Conductive Adhesives

전기석*, 김건우*, 정채환*†
Ki-seok Jeon*, Geonu Kim*, Chaehwan Jeong*†
*한국생산기술연구원 에너지나노그룹

Abstract : Cost-effective interconnection materials are critical for next-generation photovoltaic (PV) modules. In this study, a binder-optimized, low-silver electrically conductive adhesive (ECA #2-1, 65 wt% Ag) was developed and evaluated in shingled PV modules in comparison with a commercial high-silver reference adhesive (80 wt% Ag). The fabricated 500 mm × 500 mm modules exhibited comparable or slightly improved initial electrical performance, with maximum power (Pmax) exceeding 30 W and stable fill factor (FF) and series resistance (Rs), indicating that the reduced silver content did not compromise conductive network formation. Under extended damp heat (DH, 85 °C/85% RH) conditions up to 2000 h, the optimized ECA-based modules demonstrated stable long-term performance, whereas the commercial reference suffered severe degradation, particularly in the glass-to-backsheet (GtB) configuration. WVTR analysis indicated that the improved DH stability was not simply attributable to a stronger bulk moisture-barrier effect, but rather to moisture-tolerant interconnection behavior that suppressed moisture-induced interfacial degradation and conductive-network disruption. Similarly, extended thermal cycling (TC, −40 to 85 °C, 400 cycles) resulted in minimal performance variation for the optimized modules, confirming high resistance to thermomechanical stress. PET-supported DMA analysis further supported this stress-tolerant response, indicating that the binder-optimized ECA composite film can better accommodate stress during temperature changes. Ultimately, these results demonstrate that binder-level optimization can enable significantly reduced silver content while maintaining stable electrical performance and long-term reliability, providing a viable strategy for cost-effective interconnection in advanced PV modules.

Key Words : Shingled Photovoltaic Module; Electrically Conductive Adhesive (ECA); Silver-Reduced ECA; Damp Heat (DH); Thermal Cycling (TC)

† Corresponding author, E-mail: chjeong@kitech.re.kr

후 기

This work was also supported by the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) under Grant No. EH-26-0003, “Development of Core Technologies for AI-Based Self-Power Generation and Charging for Next-Generation Mobility.”

PVE-O-10

태양광 모듈 열화상 음영 패턴 합성을 위한 국소 복원 기반 잔차 생성 모델 개발

Development of a Local Restoration-Based Residual Generative Model for Shadow Pattern Synthesis in Photovoltaic Thermal Images

문정민*, 김창헌*†
Jungmin Moon*, Changheon Kim*†
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract : 태양광 모듈의 열화상 영상은 핫스팟, 셀 이상 및 음영 등 다양한 이상 상태를 비접촉 방식으로 확인할 수 있어 자동 진단을 위한 주요 데이터로 활용된다. 그러나 실제 현장에서 이상 열화상 데이터 확보에는 한계가 있으며, 기존 영상 생성 기법은 음영 및 프레임이 모듈 영역과 중첩될 경우 배경 구조 왜곡, 경계 불연속 및 색상 변화가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 원본 열화상 특성과 모듈 구조를 보존하면서 다양한 음영 패턴을 생성하기 위해 국소 복원 모델과 잔차 기반 생성적 적대 신경망을 결합한 2단계 열화상 생성 모델을 개발하였다. 먼저 수동으로 구축한 음영 마스크와 Gated Convolution 기반 Local Inpainting Generator를 이용하여 음영 영역의 정상 배경을 복원하고, 재구성·다중 스케일·경계·색상 손실을 적용하여 셀 구조와 열적 특성을 유지하였다. 이후 원본 영상과 복원 영상의 차이에서 음영 잔차를 추출하여 모듈 내 유효 영역에 재배치하였다. 최종 생성 모델은 U-Net 기반 생성기와 Patch Discriminator로 구성하였으며, color-lock 구조와 anchor, direction, background 및 seam loss를 적용하여 음영 색상 특성을 유지하고 배경 변형과 경계 불연속을 최소화하였다. 총 566장의 이상 열화상 영상을 활용한 실험에서 국소 복원 모델의 검증 지표는 0.0711에서 최저 0.0240까지 감소하였다. 또한 500장의 생성 영상 평가 결과 FID 34.28, KID 0.0203, 색상 반전 비율 0.209%, anchor MAE 0.00339를 나타냈으며, seam MAE는 1.50×10^{-6} 수준으로 확인되었다. 이를 통해 제안 모델이 원본 열화상 구조와 음영 특성을 유지하면서 다양한 합성 영상을 생성할 수 있음을 확인하였으며, 향후 태양광 모듈 이상진단을 위한 학습 데이터 증강에 활용 가능할 것으로 기대된다.

Key Words : 태양광 모듈 (Photovoltaic Module), 열화상 영상 (Thermal Image), 생성적 적대 신경망 (Generative Adversarial Network), 잔차 생성 (Residual Generation), 음영 합성 (Shadow Synthesis), 데이터 증강 (Data Augmentation)

† Corresponding author, E-mail: chkim@kopti.re.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2024-00358809).

PVE-O-11

TCN-Attention을 이용한 태양광 패널 3상태 이상 분류

Three-State Anomaly Classification of Photovoltaic Panels Using TCN-Attention

권희재*, 이수천*, 우태걸*, 박강문*†
Hee-jae Kwon*, Su-cheon Lee*, Tae-geol Woo*, Kang-moon Park*†
*한국교통대학교 전자공학과

Abstract : 태양광 발전이 확대됨에 따라 발전 손실을 줄이고 유지관리 효율을 높이기 위한 패널 이상 조기 탐지의 중요성이 커지고 있다. 그러나 패널의 출력과 온도는 일사량, 계절 및 운전 조건에 따라 변동하므로, 고정 임계값이나 단일 시점 관측만으로는 이상을 일관되게 판정하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 이웃 패널 대비 상대 편차와 시간적 지속성을 기반으로 이상을 정의하고, TCN-Attention을 기본 TCN 및 기계학습 기법과 동일한 조건에서 비교하였다. 이를 위해 국내 태양광 발전소 349개 패널에서 수집한 15분 단위 데이터 8,036,162행을 사용하였다. 이상 상태는 Normal, LowPower, Thermal Anomaly의 세 클래스로 구분하였으며, 동일 스트링에 속한 이웃 패널의 동시각 중위값 대비 편차가 2표본 이상 지속될 경우 이상으로 판정하였다. 이때 Thermal Anomaly는 열화상으로 확인된 셀 수준 핫스팟이 아니라 이웃 패널 대비 상대적 과온을 의미한다. 또한 학습과 시험 간 동일 패널이 중복되지 않도록 패널 단위로 3개 fold를 구성하고, 각 fold를 3개 시드로 평가하였다. 실험 결과, TCN-Attention은 Macro-F1 0.9793으로 기본 TCN의 0.9702와 기계학습 기법의 0.7762~0.9420보다 높은 성능을 보였다. 또한 fold 간 성능 편차는 0.0119로 비교 모델 중 가장 작았으며, XGBoost의 0.1080과 비교해 약 1/9 수준이었다. 시험 윈도우 210,820개에서 오경보는 97개로 0.047%, 미탐지는 55개로 1.12%였으며, 두 오류를 모두 낮게 유지한 모델은 TCN-Attention이 유일하였다. 한편, Self-Attention, 위치별 FFN 및 Attention pooling을 제거한 절제 실험에서는 각 구조 변경에 따른 성능 차이가 모두 시드 간 산포 범위에 머물렀다. 이는 본 과제의 성능이 세부 구조의 차이보다 입력 표현과 평가 분할 방식에 더 크게 영향을 받을 수 있음을 시사한다. 다만 본 결과는 현장에서 확인된 실제 고장에 대한 진단 정확도가 아니라 미관측 패널에 대한 약라벨 기준의 재현성과 일관성을 나타낸다. 따라서 향후에는 열화상 측정 등 독립적인 근거를 활용한 검증이 필요하다.

Key Words : 태양광 모듈(Photovoltaic module), 이상 탐지(Anomaly detection), 시계열 분류(Time-series classification), 약라벨링(Weak labeling), 시간 합성곱 신경망(Temporal convolutional network)

† Corresponding author, E-mail: kmpark@ut.ac.kr

후 기

본 연구는 2026년 한국교통대학교의 지원을 받아 수행하였음.

PVE-O-12

태양광, ESS 및 히트펌프를 활용한 공동주택 온실가스 감축량 산정방법 및 경제성 분석 연구

A Comprehensive Study on GHG Reduction Metodology and Economic Assessment of Integrated PV-ESS-Heat Pump Systems in Apartment Complexes

조성대*†, 이동헌**
Cho Sung-Dae*†, Lee Dong-Hun**
*한국기계전기전자시험연구원 국제개발사업센터, **한국공학대학교 융합기술에너지대학원

Abstract : 본 연구는 공동주택의 탄소중립 실현을 위해 태양광 발전, 에너지저장장치(ESS) 및 공기열 히트펌프를 통합한 온실가스 감축량 산정방법론을 개발하고 경제성을 분석하였다. 국내외 온실가스 감축 방법론과 공동주택의 에너지 사용 특성을 검토하여 사업경계, 베이스라인 배출량, 사업 배출량, 누출량 및 모니터링 기준을 설정하였다. 개발된 방법론은 2024~2025년 에너지 사용자료를 확보한 광주광역시 소재 117세대 공동주택에 적용하였다. 분석 결과, 기존 도시가스 난방·급탕과 전력 사용을 기준으로 한 베이스라인 배출량은 연간 347.8 tCO_2-eq로 산정되었으며, 태양광·ESS에 따른 계통전력 대체와 히트펌프 전환을 반영한 사업 배출량은 246.3 tCO_2-eq로 나타났다. 이에 따른 순 온실가스 감축량은 연간 101.5 tCO_2-eq, 베이스라인 대비 감축률은 29.2%였으며, 10년 크레딧 기간의 누적 감축량은 1,015 tCO_2-eq로 분석되었다. 경제성 분석에서는 배출권 가격보다 초기 투자비와 전기요금의 영향이 크게 나타났고, 기준 배출권 가격 20,000원/tCO_2-eq에서 초기 투자비 약 70% 절감 시 손익분기점에 도달하였다. 본 연구는 공동주택형 태양광-ESS-히트펌프 통합시스템의 온실가스 감축효과를 정량화하고, 향후 관련 사업의 보급 확대와 정책·제도 설계를 위한 기초자료를 제시한다.

Key Words : 온실가스감축(GHG Reduction), 공동주택(Apartment Complexes), 태양광 발전(Photovoltaics), 에너지저장장치(Energy Storage System), 히트펌프(Heat Pump)

†Corresponding author, E-mail: ydonghun@tukorea.ac.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호: RS-2025-02633213).

PVE-O-13

독립계통 태양광 DC-DC 직접연계 기반 그린수소 생산 효율 향상 연구

Improving Green Hydrogen Production Efficiency through Direct PV DC-DC Coupling in an off-Grid system

이지은*†, 양동건*, 조현식*, 이성현*
Jieun Lee*†, Donggeon Yang*, Hyunsik Jo*, Sunghyun Lee*
*K-water연구원

Abstract : 지구온난화와 기후위기에 대응하기 위한 재생에너지 보급 확대에 따라 에너지 전환이 가속화되고 있다. 그러나 태양광 및 풍력과 같은 분산형 재생에너지원의 급격한 증가와 발전량의 변동성은 전력계통의 불안정성을 증가시키고 있으며, 특정 시간대에 발전량이 전력수요를 초과하면서 잉여전력이 발생하고 이에 따른 출력제한(Curtailment)이 불가피한 상황이다. 국내의 대표적인 사례로 제주도 전력계통을 들 수 있다. 제주도에서는 2015년부터 재생에너지 발전량이 전력수요를 초과함에 따라 풍력발전 출력제어가 처음 시행되었으며, 이후 재생에너지 설비 확대에 따라 출력제한이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 2022년에는 최대 132회의 출력제어가 시행되어 약 28.9 GWh의 전력이 제한되었다. 이러한 잉여전력을 효과적으로 저장·활용하기 위한 방안 중 하나로, 전기에너지를 수소로 변환하여 장주기 저장이 가능한 P2H(Power-to-Hydrogen) 기술이 주목받고 있다. 본 연구에서는 태양광 발전시스템이 전력계통에 연계되지 않은 독립계통(Off-grid) 환경을 가정하고, 태양광에서 생산된 DC 전력을 DC-DC 컨버터를 통해 수전해 시스템에 직접 연계함으로써 그린수소 생산 효율을 향상시키는 방안을 연구하였다. 실증 시스템은 165 kW급 태양광 발전설비, 333 kW급 ESS, 100 kW급 PEM 수전해 장치 및 DC-DC 컨버터로 구성하였다. 태양광 발전의 간헐적인 출력 특성이 수전해 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해, 수전해 입력전원의 부하변동에 따른 성능변화에 관한 선행연구를 검토하고 실제 태양광 발전설비의 일일 출력 패턴을 실측하여 발전 변동 특성을 분석하였다. 이를 기반으로 태양광 출력 조건에 따른 수전해 입력전력과 수소 생산량을 예측하였다. 또한, 독립계통 내에서 태양광 DC 전력을 수전해 장치에 직접 연계할 경우, 태양광 발전량과 ESS의 충·방전 상태를 고려하여 수전해 입력전력을 결정할 수 있는 운영 알고리즘을 제안하였다. 이를 통해 변동성이 큰 태양광 전력을 보다 안정적으로 활용하고, 독립계통 기반 그린수소 생산의 효율성과 활용성을 향상시키고자 하였다.

Key Words : 수상태양광(Floating Photovoltaic), 그린수소(Green Hydrogen), 독립계통(Off grid system), 수전해(Electrolyser), DC-DC 연계(DC-DC connection)

† Corresponding author, E-mail: jelee@kwater.or.kr

후 기
이 논문은 한국수자원공사의 재원을 지원받아 수행된 연구임(No. G250149).

PVE-O-14

진동형 히트파이프를 적용한 태양광 모듈의 하계 옥외 냉각 성능 및 발전량 개선 실증

Outdoor Experimental Assessment of Oscillating Heat Pipe Integration for Photovoltaic Thermal Regulation and Power Output Enhancement

김준회*, 박지환*, 홍주혁*, 윤영직*†
Junhoe Kim*, Jihwan Park*, Juhyuk Hong*, Youngjik Youn*†
*국립한밭대학교 건축설비시스템공학과

Abstract : 태양광 모듈은 하계 표면 과열로 발전 효율이 저하되며, 이를 억제하기 위한 능동 냉각 방식은 구동 전력을 소비한다는 한계를 갖는다. 본 연구는 무동력 열수송 장치인 진동형 히트파이프(OHP)를 모듈 후면에 적용하여 하계 옥외 조건에서 냉각 성능과 발전량 개선 효과를 실증하였다. 동일 사양의 태양광 패널 2대를 정남향으로 나란히 설치하고 한 대에만 OHP 냉각을 적용하여, 같은 일사 및 외기 조건에서 표면온도와 출력을 동시에 계측하였다. 표면온도는 K형 열전대와 FLIR 열화상카메라로 측정하였고, 발전량은 가변저항 부하 스윕과 아두이노와 INA226 센서 등을 이용해 P–V 곡선을 취득하여 최대전력점(MPP)으로 평가하였다. 측정 결과 냉각 적용 모듈의 최고온도는 60.8 ℃에서 43.9 ℃로, 평균온도는 54.6 ℃에서 38.6 ℃로 저감되었으며, 면내 온도편차는 17.6 ℃에서 7.6 ℃로 감소하여 국소 고온부가 해소되었다. 최대전력점은 67.51 W에서 72.08 W로 6.8 % 향상되었다. 발전 피크 시간대부터 정남향을 벗어나는 시간대인 11:40부터 15:00까지 3시간 20분 연속 관측에서는 평균 26.8 ℃의 온도차와 5.1 W(8.0 %)의 출력 향상이 전 구간에 걸쳐 유지되어, 일시적 효과가 아닌 지속적 성능임을 확인하였다. 본 결과는 무동력 열수송만으로 하계 발전 손실을 실질적으로 회수할 수 있음을 보여 준다.

Key Words : 진동형 히트파이프(Oscillating heat pipe), 태양광 모듈 냉각(PV module cooling), 옥외 실증(Outdoor experimental assessment), 발전효율(Power generation efficiency)

† Corresponding author, E-mail: yjyoun@hanbat.ac.kr

PVE-I-4

페로브스카이트 태양전지의 지속가능성 향상을 위한 친환경 제조 및 재활용 공정

Green Manufacturing and Recycling Processes for Sustainable Perovskite Solar Cells

김희정*†
Hee Jung Kim*†
*성균관대학교 신소재공학부

Abstract : Perovskite solar cells (PSCs) have achieved high power conversion efficiencies, but their commercialization requires environmentally sustainable materials and manufacturing processes. Conventional PSC fabrication relies on hazardous solvents and toxic lead (Pb), which raise environmental and health concerns during large-scale production and end-of-life treatment. Green processing strategies are therefore required throughout the fabrication, operation, and recycling stages of PSCs. Safer solvent systems can reduce the use of hazardous chemicals while maintaining sufficient precursor solubility, solution stability, film quality, and device performance. Environmentally benign fabrication processes can also reduce material consumption, energy demand, and waste generation. In addition, selective separation and recovery technologies enable valuable materials to be recovered from discarded PSCs. The recovered components can be reused in subsequent device fabrication, reducing hazardous waste and the consumption of virgin raw materials. Life cycle assessment can support the comparison of process options and identify major environmental contributions from solvents, energy use, and material recovery. The integration of green processing and recycling technologies provides practical pathways toward high-performance and environmentally sustainable perovskite photovoltaics.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar cells), 친환경 용매(Green solvents), 납 재활용(Lead recycling), 전과정평가(Life cycle assessment)

† Corresponding author, E-mail: gmlwjd0415@skku.edu

PVE-I-5

Phenethylammonium Iodide를 이용한 삼중 양이온 페로브스카이트 태양전지의 결함 패시베이션

Defect Passivation in Triple-Cation Perovskite Solar Cells with Phenethylammonium Iodide

김미정*,**, 강하나*, 양정엽*,**,***†
Mijoung Kim*,**, Hana Kang*, JungYup Yang*,**,***†
*국립군산대학교 물리학과, **국립군산대학교 기초과학연구소,
***국립군산대학교 이차전지에너지학부

Abstract : Phenethylammonium iodide (PEAI) is used for defect passivation in perovskite solar cells, but its role changes with concentration. PEAI was added to $Cs_{0.175}FA_{0.750}MA_{0.075}Pb(I_{0.880}Br_{0.120})_3$ precursor solutions at 0, 0.25, 0.50, and 0.75 wt%. X-ray diffraction (XRD) showed no detectable diffraction features related to low-dimensional phases up to 0.75 wt%, while low-angle features appeared at 1.00 wt% and above. At 0.50 wt%, the perovskite film showed a larger average grain size and changes in the local chemical environment. The average carrier lifetime increased from 94.53 to 206.46 ns, while the electron-trap density decreased from 1.68×10^{16} to 1.12×10^{16} cm^{-3}. The recombination resistance was 1.81 MΩ at 0.50 wt% PEAI, compared with 0.17 MΩ for the control. The champion power conversion efficiency (PCE) was 20.98% at 0.50 wt% PEAI, compared with 18.33% for the control device. After 1000 h at 85 °C and 85% relative humidity, the 0.50 wt% device retained 56.91% of its initial PCE. Among the tested concentrations, 0.50 wt% PEAI showed the strongest suppression of defect-related carrier loss while maintaining the predominantly three-dimensional (3D) perovskite structure.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar cells), 페닐에틸암모늄 아이오다이드(Phenylethylammonium iodide, PEAI), 선택적 결함 패시베이션(Selective defect passivation), 트랩 보조 재결합(Trap-assisted recombination)

† Corresponding author, E-mail: jungyup.yang@kunsan.ac.kr

후 기
본 연구성과는 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (과제번호 : RS-2024-00451918).

PVE-O-15

페로브스카이트 태양광 소자의 안정성 향상을 위한 저온 봉지 기술

Low-Temperature Encapsulation Technology for Improving the Stability of Perovskite Photovoltaic Device

김문회*, 김미정**, 김기성*.***, 강하나*, 송재진****, 양정엽*.**.****†
Moonhoe Kim*, Mijoung Kim***, Gisung Kim*.***, Hana Kang*, JaeJin Song****, JungYup Yang*.**.****†
*Department of Physics, Kunsan National University,
**The Institute of Basic Science, Kunsan National University,
***Plasma Industry Technology Research Team, Korea Institute of Fusion Energy,
****Department of Energy Science and Engineering, Kunsan National University

Abstract : 페로브스카이트 태양전지는 높은 광흡수계수, 우수한 전하수송 특성 및 저온 용액공정 가능성을 바탕으로 차세대 태양광 기술로 주목받았다. 최근 단위 소자 수준에서는 높은 광전변환효율이 지속적으로 보고되고 있으나, 실제 상용화를 위해서는 소자의 대면적화와 함께 장기 안정성을 확보할 수 있는 모듈화 기술이 필수적이다. 특히 페로브스카이트 소재는 열, 수분, 산소 및 계면 반응에 민감하여 기존 실리콘 태양광 모듈에 적용되는 고온 라미네이션 공정을 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 소자의 열적 손상을 최소화하면서 외부 환경으로부터 효과적으로 보호할 수 있는 저온 봉지재, 고성능 엣지 실링 소재 및 안정적인 전극 배출 구조의 확보가 중요하다. 본 연구에서는 대면적 페로브스카이트 태양광 모듈의 안정적인 저온 봉지 공정을 구현하기 위해 봉지재, 엣지 실링 소재 및 전극 배출용 전도성 테이프를 종합적으로 평가하고, 이를 단위 소자와 monolithic 서브 모듈에 적용하였다. 저온 EVA와 TPO는 낮은 라미네이션 온도에서도 우수한 접착 및 수분 차단 특성을 나타냈으며, butyl rubber 기반 PVS-101은 높은 유리 접착력과 낮은 수분투과율을 보였다. 전도성 테이프는 소재에 따라 접촉저항과 ITO 접착 특성에 차이를 나타냈으며 안정적인 전극 배출 적용 가능성을 확인하였다. 저온 봉지 공정을 적용한 monolithic 서브 모듈은 라미네이션 후에도 초기 효율의 99% 이상을 유지하였으며, 6개 서브 모듈로 구성된 최종 모듈은 초기 출력의 약 86%를 유지하였다. 이를 통해 저온 봉지 소재와 엣지 실링, 전극 배출 구조를 결합한 통합 봉지 기술이 대면적 페로브스카이트 태양광 모듈 구현에 적용 가능함을 확인하였다.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지(Perovskite Solar Cell), 모듈화 공정(Modulation process), 저온 밀봉재(Low-Temperature Encapsulat), 모서리 밀봉(Edge Sealing), 모노리틱 서브-모듈(Monolithic Sub-Module)

† Corresponding author, E-mail: jungyup.yang@kunsan.ac.kr

PVE-O-16

하이브리드 투명 전도체 기반 유연 투명 히터

Flexible Transparent Heater Based on Hybrid Transparent Conductors

정목현*, 조승희*, 고성진*, 조예빈*, 전서준* 김준동*†
Mokhyeon Jeong*, Seunghee Cho, Seongjin Ko*, Yebean Cho*, Seojun Jeon*, Joondong Kim*†
*인천대학교 전기공학과

Abstract : Silver nanowires (AgNWs) are promising transparent electrode materials because of their high electrical conductivity, visible-light transmittance, and compatibility with flexible substrates. However, insufficient electrical contact between adjacent nanowires can increase junction resistance, while surface roughness and oxidation may limit long-term stability. To address these limitations, we fabricated an AZO/AgNWs/Ag(O)/AZO hybrid transparent electrode on both rigid glass and flexible PET substrates. The ultrathin Ag(O) interlayer was deposited over the AgNW network to reinforce electrical pathways at nanowire junctions, while the upper and lower AZO layers encapsulated the network to improve its mechanical and chemical stability. The Ag(O) deposition time was varied to optimize the balance between optical transmittance and electrical conductivity. At an optimal deposition time of 10 s, the hybrid electrode exhibited a visible-light transmittance of approximately 70% and a sheet resistance of 14.2 Ω/sq, corresponding to a Haacke figure of merit of 1.39×10^{-3} Ω^{-1} and a $\sigma DC/\sigma Opt$ ratio of 68.0. A transparent heater fabricated using the optimized electrode reached a maximum temperature above 260 °C at an applied voltage of 9 V and maintained reproducible heating behavior during repeated voltage cycling. These results demonstrate that the AZO/AgNWs/Ag(O)/AZO architecture improves inter-nanowire electrical contact and electrode stability while maintaining the optical, electrical, and mechanical characteristics required for flexible transparent heaters. The proposed hybrid electrode is therefore promising for flexible transparent heating applications in smart windows and automotive, architectural, and greenhouse glazing, where it can suppress condensation and remove water droplets while maintaining optical transmission.

Key Words : 은 나노와이어(Ag nanowires), 알루미늄 도핑 산화 아연(Aluminum-doped zinc oxide), 하이브리드 투명 전극(Hybrid transparent electrode), 투명 히터(transparent heater), 유연 투명 히터 (Flexible transparent heater)

† Corresponding author, E-mail: joonkim@inu.ac.kr

PVE-O-17

수층 적용을 통한 투명 광대역 광검출기의 성능 향상

Water-enhanced Performance of Transparent Broadband Photodetectors

전서준*, 조승희*, 고성진*, 조예빈*, 정목현* 김준동*†
Seojun Jeon*, Seunghee Cho, Seongjin Ko*, Yebean Cho*, Mokhyeon Jeong*, Joondong Kim*†
*인천대학교 전기공학과

Abstract : Transparent broadband photodetectors operating across the ultraviolet (UV), visible, and near-infrared (NIR) regions are promising for image sensing, optical communication, environmental monitoring, and bioelectronics. While their performance is commonly improved through structural design, junction engineering, and optical modulation, introducing water as an interfacial medium offers a simple strategy to modify both optical coupling and interfacial electrical properties. Here, we demonstrate water-assisted performance enhancement in a transparent broadband photodetector with a glass/fluorine-doped tin oxide (FTO)/ZnO/SnS/NiO/Ag nanowires (AgNWs)/ZnO architecture. The device combines an n-ZnO/p-NiO heterojunction with a thin light-absorbing SnS layer, enabling self-powered photodetection over 365–940 nm. Compared with operation in air, the water-covered device exhibited reduced dark current, increased open-circuit voltage, and enhanced photocurrent across the UV-to-NIR range. Accordingly, the maximum responsivity, detectivity, and incident photon-to-current conversion efficiency (IPCE) increased by 22.6%, 58.3%, and 22.6%, respectively. The enhancement is attributed to the combined optical and electrical effects of the water layer. Refractive-index matching reduces reflection losses and improves optical coupling, while electric double layer (EDL) formation at the electrode/water interface modifies the interfacial electric field and promotes photogenerated carrier separation. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and Mott–Schottky measurements further confirmed water-induced changes in the interfacial electrical environment. These results demonstrate a simple interfacial strategy for improving self-powered transparent broadband photodetectors and water-interfaced optoelectronic sensing systems.

Key Words : 투명 광검출기(Transparent photodetector), 광대역 광검출(Broadband photodetection), 물 계면(Water interface), ZnO/SnS/NiO 접합구조(ZnO/SnS/NiO heterojunction)

† Corresponding author, E-mail: joonkim@inu.ac.kr



Oral Session

태양열융합
Solar Thermal Convergence (STC) Session

STC-O-1

태양열 히트펌프의 실증 분석과 설계 민감도 해석

Field-Data Analysis and Design Sensitivity of an Industrial Solar Heat Pump

권시은*,**, 임병주**, 이가람**, 박창대*,**†
Si-Eun Kwon*,**, Byung-Ju Lim**, Ga-Ram Lee**, Chang-Dae Park*,**†
*과학기술연합대학원대학교(UST) 융합기계시스템학과, **한국기계연구원(KIMM)

Abstract : 태양열 히트펌프 시스템은 산업공정열의 탄소 배출 저감 수단으로 주목받고 있지만, 국내 연구는 아직 시뮬레이션 분석에 머물러 있다. 시뮬레이션은 설치 전에 가정한 부하와 운전 조건을 바탕으로 분석되기 때문에, 설치 후 실제 운전 특성을 확인하는 연구가 필요하다. 본 연구는 식품 가공 공장에 설치된 산업공정 온수 공급용 태양열 히트펌프 시스템의 5개월간 실증 운전 데이터를 분석하여 열원 이용, 히트펌프 운전 및 에너지 소비 특성을 평가하였다. 또한 실측 자료를 기반으로 하는 물리 모델을 사용하여 집열면적, 축열조 및 히트펌프의 용량 변화에 따른 열 공급 성능 변화를 검토하고, 실증 시스템의 탄소배출량을 LPG 보일러 단독 공급 방식과 비교하였다. 연구 결과, 시스템은 공정 열수요를 모두 충족하였으나 히트펌프가 짧게 자주 가동되었으며, 가을로 갈수록 태양에너지 기여율이 낮아졌다. 민감도 해석에서는 설비 용량 조합에 따라 태양에너지 기여율과 히트펌프 운전 특성이 달라짐을 확인하여, 산업공정용 태양열 히트펌프의 설비 용량 설계를 위한 기초 자료를 마련하였다.

Key Words : 태양열(Solar thermal), 히트펌프(Heat pump), 산업공정(Industrial process), 실증분석(Field data analysis), 민감도 해석(Sensitivity analysis)

† Corresponding author, E-mail: parkcdae@kimm.re.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이며(과제번호 : RS-2024-00419184), 산업자원통상부의 재원으로 에너지기술개발사업 및 소재부품기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호 : RS-2024-00419184, RS-2024-00432726).

STC-O-2

PVT 회귀분석 기반 산업단지 재생에너지 시뮬레이션 개발

Development of a Simulation Model for Renewable Energy in Industrial Complexex Based on PVT Regression Analysis

이헌민*,**, 최원종*,**, 신예빈*,**, 전병기*, 김종규*, 정재원**, 김민휘*†
Heon-Min Lee*,**, Won-Jong Choi*,**, Ye-Bin Shin*,**, ByungKi Jeon*,
Jongkyu Kim*, Jae-Weon Jeong**, Min-Hwi Kim*†
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, **한양대학교 건축공학과

Abstract : 산업단지의 탄소중립 이행과 RE100 달성의 필요성이 커짐에 따라, 한국에너지기술연구원은 산업단지 통합 에너지 시뮬레이션 플랫폼인 RenerGIS를 개발하고 있으며, 현재 열수요 공급 모듈 중 하나인 PVT 모듈 개발이 필요한 단계이다. 이에 한국에너지기술연구원의 KePSH-1 실증 주택에 설치된 유창형 PVT 13장의 3년간의 실측 데이터를 기반으로 발전량 및 집열량 회귀분석을 진행하여 시뮬레이션 플랫폼에 연계할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 발전량 및 집열량은 TRNSYS Type 50 집열기 모델의 에너지수지식을 기반으로 하며, 셀온도에 따라 발전량은 선형 온도계수식으로, 집열량은 열손실계수 기반 열수지식으로 계산된다. 셀온도는 NOCT 모델 기반식에서 회귀변수로 입수온도, 유량, 외기온도, 일사량을 사용해 1차 보정항을 더하는 방식으로 15가지의 조합으로 산정하였으며, 각 조합에 대해 1시간 및 월별 CV-RMSE, R^2, NMBE를 비교해 최적 조합을 선정하였다. 집열량은 회귀된 셀온도 기준 온도차와 변수별 1시간 열용량 지연을 반영해 산정하였으며, 발전량과 동일하게 위 4개 변수의 1차 보정항을 더하는 방식으로 15가지 조합 중 최적 조합을 선정하였다. 그 결과 발전량은 시간별 CV-RMSE=22%, R2=0.89, NMBE=0.2%, 월별 CV-RMSE=4.2%, R2=0.96, NMBE=0.2%를 달성하였고, 집열량은 시간별 CV-RMSE=10.6%, R2=0.81, NMBE=-0.1%, 월별 CV-RMSE=3.4%, R2=0.99, NMBE=-0.1%를 달성하였다. 이는 ASHRAE Guideline 14 기준 시간별 CV-RMSE≤30%, NMBE≤10%, 월별 CV-RMSE≤15%, NMBE≤5%를 모두 충족하였다. 이는 본 회귀모델이 실증 데이터에 기반한 충분한 정확도와 신뢰성을 확보하였음을 의미하며, RenerGIS 열공급 모듈에 적용할 수 있는 수준이다.

Key Words : 탄소중립(Carbon neutrality), 산업단지 에너지 시뮬레이션(Industrial complex energy simulation), 유창형 태양광열시스템(Glazed photovoltiac thermal systems), 회귀분석(Regression analysis), 모델 검증(Model validation)

† Corresponding author, E-mail: mhkim001@kier.re.kr

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업 (C6-2410-32) 재원과 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 : RS-2025-02316198)의 지원으로 수행되었음

STC-O-3

QUBO 기반 양자영감 최적화를 활용한 PVT-ESS-TES 통합시스템의 최적운영

Quantum-Inspired QUBO Optimization for Coordinated Operation of a PVT-ESS-TES Integrated Energy System

전병기*†, 주홍진*
ByungKi Jeon*†, HongJin Joo*
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실

Abstract : 본 연구에서는 태양광·열 복합시스템(PVT), 전기에너지저장시스템(ESS) 및 열에너지저장시스템(TES)의 연계 운전을 위한 양자영감 최적화 프레임워크를 제안한다. 제안된 프레임워크는 시간에 따라 변화하는 건물의 전기·열 부하, 에너지요금, 저장장치 용량 및 운전 제약조건을 고려하여 PVT에서 생산되는 전기와 열에너지의 흐름을 동시에 최적화한다. 이를 위해 ESS와 TES의 충·방전 상태 및 PVT 생산에너지의 배분을 이진 의사결정변수로 표현하고, 통합시스템의 운전 문제를 QUBO(Quadratic Unconstrained Binary Optimization) 형태로 정식화하였다. 목적함수는 계통 전력구매 비용과 최대수요전력을 최소화하고 PVT 전기 및 열에너지의 자가소비율을 극대화하도록 구성하였다. 제안된 방법은 계절별 전기·열 부하 데이터를 바탕으로 다양한 ESS 및 TES 용량 조건에서 평가하며, 규칙 기반 운전 및 혼합정수선형계획법과 비교한다. 평가 지표로는 에너지비용, 최대수요전력, PVT 자가소비율, 해의 품질 및 계산시간을 사용한다. 또한 저장장치 용량과 QUBO 페널티 계수에 따른 민감도 분석을 수행한다. 본 연구는 PVT 기반 건물에너지시스템의 전기·열 통합 운영에 QUBO 기반 양자영감 최적화를 적용할 수 있는 방법론적 기반을 제시한다.

Key Words : 태양광·열 복합시스템(PVT), 전기에너지저장시스템(ESS), 열에너지저장시스템(TES), 양자영감 최적화(Quantum-Inspired Optimization), 이차 비제약 이진 최적화(QUBO)

†Corresponding author, E-mail: bgjeon@kier.re.kr

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업으로 수행한 결과입니다. (과제번호 : C6-2403-74)



Oral Session

풍력에너지
Wind Energy Conversion (WEC) Session

WEC-I-1

탈석탄 보령, 해상풍력으로 지역 재활력 프로젝트 추진

문혜경*†
*보령시 에너지과 그린에너지팀

Abstract : 2020년 12월, 보령화력 1,2호기가 조기 폐지되었다. 탄소중립, 에너지전환이라는 국내외 에너지 정책 급변으로, 석탄화력발전산업 중심의 보령시에 엄청난 지역 위기에 봉착했다. 하지만, 위기를 기회로, 탄소중립·에너지전환 선도도시로의 변모를 위해 적극적으로 그린에너지산업을 발굴·육성 추진한 결과, 보령은 2020년 9월 산업통상자원부 주관『공공주도 대규모 해상풍력 단지개발 지원사업』에 선정되어, 보령화력 1,2호기에 상응하는 1GW급 해상풍력단지 개발하였고, 민관 협업으로 추진된 녹도해상풍력을 포함 1.3GW 규모 집적화단지로 지정받은 바 있다. 보령시는 '에너지그린도시'를 시정 목표로 선정하고 대규모 공공주도 태양광 발전단지 개발에도 적극적인 지자체로 향후 미래 에너지산업과 RE100 산업 생태계 육성을 준비중이다. 기존 폐지된 송전선로 계통 여유용량과 함께 보령화력 및 연관 기업 등 발전 전문인력을 활용하여 지역 내 친환경 재생에너지 발전시설 구축을 통해 산업, 경제, 고용부문에 재활력을 불어넣고, 지역을 다시 살리는 핵심프로젝트로 해상풍력 사업에 더욱 적극적이다. 특히 보령시는 '지역과 상생하고 수산업과 공존하는 보령해상풍력'을 목표로 2021년 2월 기초 지차체 최초 '민관협의회' 구성·운영과 관련한 조례를 신설하고, 민관협의회 소통을 우선적으로 하여 관련 강력 집회 등 반대 민원을 사전에 조율하면서 추진하고 있다. 40여년간 이뤄진 석탄화력발전소 운영과정 속 가장 불만이 많았던 최초의 일시보상에 그치는 구조에서 지역과 지속가능한 이익공유모델을 초기부터 논의하여 주민, 어민과의 불만, 불안요인 해소에 기여하고 있으며, 향후 해상풍력 사업을 통한 에너지 복지, 보령형 바람연금을 실현하면서 에너지를 통한 지역에 희망을 바람을 불어넣고 있는 것이다. 또한, 사전환경성검토, 어업피해영향조사 용역 등 주민, 어민들이 관심을 갖고 민감해 하는 분야의 용역 추진 시 상호 신뢰와 소통을 우선으로 사전에 과업지시서 작성단계부터 관련 내용 공유함으로써 추진과정, 조사결과 등을 투명하게 공개하여 향후 발생할 용역 결과 및 사업 추진에 대한 불만, 불협화음을 사전에 예방하는 데 노력을 기울이고 있다. 보령시는 내년 보령해상풍력 집적화단지 발전사업허가, 사업자 공모를 통해 본격적인 사업화를 속도감있게 추진해 갈 계획이며, 앞으로도 지역과 상생하고 수산업과 공존하는 전국 모범 해상풍력 단지로 거듭날 수 있도록 최선을 다할 것이다. 보령이 해상풍력, 태양광 등 재생에너지를 통해 탄소중심도시에서 탄소중립 선도도시로 거듭날 수 있도록 앞으로도 많은 관심과 정부의 지원을 당부드린다.

Key Words : 해상풍력(Offshore Wind Power), 에너지전환(Energy Transition), 지역상생(Local Community Coexistence), 민관협의회(Public-Private Consultative Council), 보령시(Boryeong City)

† Corresponding author, E-mail: public07@korea.kr

WEC-O-1

해상풍력자원지도 편의 보정을 통한 풍력잠재량 산정

Wind Energy Potential Assessment using Bias-Correction Wind Resource Maps

김진영*†, 윤창열*, 김현구*, 김창기*, 오동건*, 곽지혜**
Jin-Young Kim*†, Changyeol Yun*, Hyun-Goo Kim*, Chang Ki Kim*,
Donggun Oh*, Jihye Gwak**
*한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실, **한국에너지기술연구원 태양광연구단

Abstract : 본 연구에서는 해상풍력자원지도의 편의보정을 통한 신뢰도를 향상을 통해 우리나라의 풍력에너지 잠재량을 분석하였다. 풍력잠재량은 풍력자원지도와 가용면적, 설비밀도, 경제성 및 공간적 입지제약 등을 통합하여 이론적, 기술적 및 시장잠재량으로 산정된다. 풍력자원지도의 신뢰도 향상을 위해 다지점 관측자료를 활용한 편의보정을 적용하였으며, 계절변동과 지형 및 지표 특성 등에 따른 수치모델과 관측 간의 체계적인 차이를 고려하였다. 검증 결과, 편의보정을 통해 풍속의 체계적 오차가 감소하고 풍력밀도 및 설비이용률의 재현성이 개선되는 것을 확인하였다. 편의보정된 풍황장을 잠재량 평가체계에 적용하여 근해역의 풍력자원 변화가 기술적·시장잠재량에 미치는 영향을 검토하였다. 편의보정 전·후 풍력잠재량의 공간적·정량적 변화는 학술대회에서 제시할 예정이다. 본 연구는 풍력자원지도의 불확실성과 입지제약을 함께 고려함으로써 잠재량 평가의 신뢰도를 향상하는 데 기여할 수 있다.

Key Words : 풍력자원지도(Wind Resource Map), 편의보정(Bias Correction), 풍력잠재량(Wind Energy Potential), 공간적 입지제약(Spatial Constraints), 시장잠재량(Market Potential)

†Corresponding author, E-mail: jinyoung.kim@kier.re.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업의 지원을 받아, 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단이 수행한 결과물입니다. (RS-2025-02213126)

WEC-O-2

다양한 풍력발전기 등급에서 IEA 22MW Reference Wind Turbine의 적용방안 제시

Application Strategies for the IEA 22 MW Reference Wind Turbine across Various Wind Turbine Classes

최정철*†, 임소진**, 최정우**, 박윤주**
*국립목포대학교 기계조선해양공학부, **국립목포대학교 기계공학과

Abstract : 육상풍력 시장에서는 다양한 정격출력과 로터 직경을 갖는 여러 모델이 공급되는 반면, 해상풍력은 소수의 주력모델을 중심으로 시장이 형성되어 있다. 실제로 Vestas는 V236-15.0 MW 단일 모델을, Siemens Gamesa는 SG 14-222 DD와 SG 14-236 DD 두 모델을, GE Vernova는 Haliade-X 12 MW·13 MW·14 MW로 라인업을 구성하고 있다. 특히 Haliade-X는 12 MW가 Class IB, 13 MW와 14 MW가 Class IC로 구분되는데, 난류강도가 낮아 피로하중이 상대적으로 적게 누적되는 IC 등급에서는 동일한 구조에 대해 더 높은 정격출력을 허용할 수 있다. 이는 블레이드·타워·베어링 등 주요 부품을 공유한 채 발전기 용량만을 달리하여 지역별 풍황에 최적화된 모델을 공급할 수 있음을 보여주는 대표적 사례이다. 한편 IEA Wind에서 공개한 22 MW Reference Wind Turbine(RWT)은 상세 사양이 공개된 개방형 모델로, 풍력발전기 등급은 Class IB로 설계되어 있다. Haliade-X의 전략을 적용하면, IEA 22 MW RWT를 IB 이외의 지역에 설치할 때에도 블레이드와 타워 등 주요 구조부는 동일하게 유지하고 발전기 용량만을 조정할 수 있다. 즉 난류강도가 더 낮은 IC 지역에서는 정격출력을 22 MW보다 높게, 반대로 IA 지역에서는 낮게 설정하는 것이 가능하다. 어떤 풍속 등급에 설치되더라도 설계수명 동안 누적되는 피로하중은 동일하게 유지되어야 한다. 본 발표에서는 이러한 관점에서 다양한 풍속 지역에 대해 IEA 22 MW RWT의 주요 부품은 그대로 두고 발전기 용량만을 변화시켜 지역별 최적 모델을 도출하는 방법을 다룬다.

Key Words : IEA 22MW RWT, 풍력발전기 등급 (Wind Turbine Class), 피로하중 (Fatigue load)

†Corresponding author, E-mail: jungchul.choi@mnu.ac.kr

후 기
본 발표는 2026년 국립목포대학교 글로컬대학 지원에 의하여 연구되었음

WEC-O-3

25MW급 부유식 해상풍력용 강-콘크리트 하이브리드 부유체의 구조설계 및 설계성과

Structural Design and Development Outcomes of a Steel-Concrete Hybrid Floater for a 25 MW Floating Offshore Wind Turbine

김문옥*†, 이규석*
Moon ok Kim*†, Kyu suk Lee*
*(주)스펙엔지니어링와이엔피 기술연구소

Abstract : 25MW급 초대형 부유식 해상풍력시스템의 개발을 위해서는 대형 터빈의 중량과 환경하중을 안정적으로 지지하면서도 제작성, 운송성 및 경제성을 고려한 부유체 설계가 요구된다. 본 연구에서는 한-스페인 국제공동연구를 통해 개발된 25MW급 강-콘크리트 하이브리드 부유체를 대상으로 구조설계 및 구조안전성 검토를 수행하였다. 대상 부유체는 상부 강재 Hull과 하부 Concrete Counterweight를 3개의 Steel Legs로 연결한 형식으로, 운송 시에는 얕은 흘수를 확보하고 설치 후 Ballasting을 통해 Deep-draft 운전형상으로 전환되는 구조이다. 본 연구에서는 스페인 측에서 제시한 부유체 사이징 결과를 기반으로 설계조건 및 구조형상을 검토하고, Steel Hull, Steel Leg 및 Concrete Counterweight를 대상으로 개념설계, 기본설계 및 최적설계를 단계적으로 수행하였다. 특히 3차원 유한요소해석을 이용하여 주요 부재의 응력과 하중전달 특성을 검토하고, 해석결과를 기반으로 구조단면을 상세화하였다. 또한 강재량, 콘크리트량 및 철근량을 산정하여 제작원가와 공사비를 검토하였다. 연구결과, 25MW급 하이브리드 부유체의 주요 구조부에 대한 구조안전성 검증과 구조단면 설계자료를 확보하였으며, 구조도면, 3차원 철근배근 검토자료 및 제작원가 산정자료를 구축하였다. 이러한 결과를 통해 강-콘크리트 하이브리드 부유체의 구조설계 기술을 실무 설계 수준으로 구체화하였으며, AIP 인증을 위한 설계자료와 연계하여 향후 상세설계 및 제작·실증 단계로 확장할 수 있는 설계기반을 확보하였다.

Key Words : 부유식 해상풍력(Floating Offshore Wind Turbine), 강-콘크리트 하이브리드 부유체(Steel-Concrete Hybrid Floater), 구조설계(Structural Design), 유한요소해석(Finite Element Analysis)

† Corresponding author, E-mail: hihioho@speceng.co.kr

후 기

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : 20228520020020)



Oral Session

신재생융합

Renewable Energy Convergence (REC) Session

REC-I-1

PVT · 데시컨트 · 히트펌프 기반 재생열 탈탄소 냉난방

Renewable-Heat-Based Decarbonized Heating and Cooling Using PVT, Desiccant, and Heat Pump

홍희기*†
Hiki Hong*†
*경희대학교 기계공학과

Abstract : 최근 재생열 확대와 히트펌프 보급이 국가 열에너지 탈탄소 전략의 핵심 과제로 부상하였으나, 정책과 기술의 관심은 동절기 난방의 전기화에 집중되어 왔다. 열에너지는 국내 최종에너지 소비의 약 절반과 온실가스 배출의 약 3분의 1을 차지하는 탈탄소의 관건임에도, 하절기 측면은 상대적으로 소외되어 있다. 그러나 기후의 아열대화가 진행되면서 실질적인 에너지·탄소 병목은 하절기 냉방과 잠열(제습) 부하로 이동하고 있다. 본 강연에서는 태양광열(PVT)·히트펌프·데시컨트 제습을 결합하여 냉방과 난방을 하나의 재생열 기반 체계로 통합하는 접근을 제시한다. 동절기에는 혹한기에 성능계수(COP)가 급격히 저하되는 공기열 히트펌프의 약점을 태양열이 보완하여 난방 효율과 열원 안정성을 높이고, 하절기에는 태양열의 잉여집열과 히트펌프 응축부에서 버려지는 미활용열을 데시컨트 로터의 재생열원으로 전환하여 잠열을 현열과 분리해 독립적으로 처리한다. 이는 여름철에 최대가 되는 태양에너지 가용량과 새롭게 부각되는 여름철 잠열부하가 시간적으로 정합한다는 점에서, 화석연료 재생 열원에 의존해 온 기존 제습·냉방의 한계를 넘어선다. 시뮬레이션과 실증을 통해 연간 에너지 성능과 탄소저감 효과를 정량적으로 제시하며, 이러한 태양·미활용열 기반의 제습냉방·난방 통합 기술이 아열대화하는 국내는 물론 고온다습한 해외 기후대의 탄소중립에도 적합한 확장형 해법임을 논의한다.

Key Words : 태양광열(PVT), 데시컨트 제습냉방(Desiccant cooling), 히트펌프(Heat pump), 미활용열·잠열부하(Unused heat/Latent load), 탄소중립·아열대기후(Carbon neutrality/Subtropical climate)

† Corresponding author, E-mail: hhong@khu.ac.kr

REC-O-1

PVT-Desiccant-Heat pump 복합 냉방 시스템의 하계 운전 특성 분석

Analysis of Summer Operating Characteristics of a PVT-Desiccant-Heat Pump Hybrid Cooling System

이준용*, 김윤수*, 윤용수*, 홍희기*, 송재만*†
Junyong Lee*, Yunsu Kim*, Yongsu Yoon*, Hiki Hong* Jaeman Song*†
*경희대학교 기계공학과

Abstract : ZEB는 고단열 및 고기밀 성능으로 인해 외부 열 유입(현열)은 크게 감소하나, 실내에서 발생하는 수분은 외부로 배출되지 못해 전체 냉방 부하 중 잠열 부하의 비중이 높아지는 특징을 가진다. 기존의 히트펌프(EHP) 단독 냉방 방식은 이러한 고습 환경에서 잠열을 처리하기 위해 설정 온도 이하로 과도한 냉각을 유발하며, 이는 시스템 효율(COP)의 급감과 실내 쾌적성 악화로 이어진다 본 연구의 PDH(PVT-Desiccant-Heat pump) 복합 냉방 시스템은 잠열과 현열을 분리하여, 잠열은 태양열로 재생하는 데시컨트 로터가, 현열은 EHP가 담당하는 구성이다. PVT 집열기가 전력과 재생열을 동시에 공급하고 축열조가 재생열을 저장하며, 실내 배기는 급기의 흡착열을 회수한 뒤 로터 재생에 사용된다. 제습이 로터에서 이루어지므로 EHP는 28 ℃의 높은 설정온도에서 현열만 처리하여 소비전력이 줄고, 실내 상대습도는 40 % 부근에서 유지된다. 급기는 외기와 실내 재순환 공기를 혼합하여 로터에 통과시키는 혼합형과, 재순환 없이 외기만을 환기 필요량으로 처리하여 공급하는 전외기형의 두 방식으로 운전할 수 있으며, 실내 습도 조건에 따라 자동 절환된다. 본 연구에서는 ZEB 외피를 적용한 경희대학교 6층 연구실크기의 건물을 대상으로 TRNSYS18을 통하여 해석을 수행하고, 전열교환기와 EHP(26 ℃)로 구성된 일반 시스템과 하계 대표일의 운전 특성을 비교하였다. 폭염 대표일에 PDH시스템은 28℃의 설정 온도에도 불구하고 실내 상대습도 40 %(일반 시스템 26℃, 53 %)를 유지하며 기존 시스템과 동등한 쾌적도를 유지하였으며, 안정적인 온습도 제어와 함께 획기적인 에너지 절감을 동시에 달성하였다

Key Words : 태양열 재생(Solar regeneration), PVT 시스템(Photovoltaic-thermal system), 현열·잠열 분리 냉방(Separate sensible and latent cooling), 급기 방식 절환 제어(Supply-air mode switching control)

† Corresponding author, E-mail: jaemansong@khu.ac.kr

REC-O-2

공기 유량 분배를 고려한 단일 패스 이중 유동 공기식 PVT 시스템의 에너지 성능 분석

Energy Performance Analysis of a Single-pass Double-flow Air-based PVT System Considering Airflow Distribution

안건용*, 정현석*, 안태용*, 최광환**, 문광암***, 최휘웅***†
Geonyong An*, Hyeonseok Jeong*, Taeyong Ahn*, Kwanghwan Choi**,
Kwangam Moon***, Hwiung Choi***†
*전남대학교 냉동공조공학과 대학원, **부경대학교 냉동공조공학과, ***전남대학교 냉동공조공학과

Abstract : 태양광/열(Photovoltaic-Thermal, PVT) 시스템은 태양에너지로부터 전력과 열에너지를 동시에 생산할 수 있는 기술이며, 공기식 PVT 시스템에서는 공기 채널의 유동 및 열전달 특성이 시스템 성능에 중요한 영향을 미친다. 다양한 공기 유로 형상 중 단일 패스 이중 유로(Single-pass double-flow, SPDF) 구조는 우수한 종합 성능을 보이는 구조로 보고되어 왔다. 그러나 SPDF 구조에서는 상부 및 하부 공기 채널의 형상과 유동저항의 차이에 의해 채널별 유량이 불균일하게 분배되며, 이러한 유량 분배를 정량적으로 예측하고 시스템 성능과 연계하여 분석한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 핀과 터뷸레이터가 적용된 SPDF 공기식 PVT 시스템을 대상으로 수력학적 저항 네트워크 기반 정상상태 수치모델을 개발하여 상부 및 하부 공기 채널의 질량유량 분배를 정량적으로 예측하였다. 또한 개발된 모델을 이용하여 여러 형상 및 운전 조건에서 시스템 성능의 변화를 분석하였다. 이를 통해 각 인자가 열적 및 전기적 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이를 종합한 순에너지 효율을 평가하였다. 본 연구에서 개발된 모델은 향후 SPDF 공기식 PVT 시스템의 성능 분석과 설계, 타 시스템과 연계에 따른 유용성 검증 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 태양광/열 시스템(Photovoltaic/Thermal system), 단일 패스 이중 유동(Single-pass double-flow), 공기 유량 분배(Airflow distribution), 수치모델(Numerical model), 에너지 성능(Energy performance)

† Corresponding author, E-mail: choihu@jnu.ac.kr

후 기

본 논문은 2026년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다. 또한 저자들은 본 과제를 위한 한울냉건(주)의 지원에 감사드리는 바입니다. (2026-ANCHOR-14-007)

REC-O-3

고팽창비 ORC 축류터빈의 초음속 부분유입 설계론

Design Methodology of Supersonic Partial-Admission Axial Turbines for High-Expansion-Ratio ORC Systems

박자운*, 김영원*†
Ja Woon Park*, Young Won Kim*†
*한국생산기술연구원 에너지나노그룹

Abstract : 산업 폐열 및 저·중온 열원의 효율적인 전력 회수를 위한 소형 유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)은 제한된 질량유량에서 높은 팽창비를 처리해야 하며, 이에 수반되는 초음속 팽창과 유로 축소, 상대 간극 증가 및 부분유입에 따른 비균일 유동은 터빈의 효율과 출력밀도를 제한하는 주요 공력학적 요인으로 작용한다. 특히 이러한 유동특성을 적절히 수용하지 못할 경우 팽창기 성능 저하가 사이클의 순출력과 열효율에 직접적인 영향을 미쳐 소형 ORC 시스템의 실질적인 적용성을 제한한다. 본 연구에서는 이러한 설계 제약을 해결하기 위해 초음속 팽창, 부분유입 및 고속 축류 임펄스 구조를 통합적으로 연계하는 ORC 터빈 설계 방법론을 개발하였다. 제안된 방법론은 고정밀 열물성 모델을 기반으로 초음속 노즐-로터 공력설계, 부분유입 구조, 주요 손실 메커니즘 및 운전특성을 상호 연계하고, 초음속 팽창특성과 노즐-로터 유동 정합, 부분유입률 및 고속 회전조건을 상호 종속적인 설계변수로 취급함으로써 열역학적 요구조건에서 터빈 형상과 성능을 일관되게 도출하도록 구성하였다. 개발된 설계법은 R1233zd(E)를 작동유체로 하는 10 kW급 초음속 부분유입 단일단 축류 임펄스 터빈에 적용하였으며, 도출된 터빈에 대해 CFD 해석을 수행하여 초음속 팽창, shock–rotor interaction, 로터 입사특성, 부분유입에 따른 비균일 유동 및 주요 손실기구를 분석하고 설계예측 결과와 비교하였다. 이를 통해 초음속 팽창과 부분유입에 의해 지배되는 소형 고팽창비 ORC 터빈의 주요 공력특성을 설계단계에서 통합적으로 반영하고, 이를 실제 10 kW급 고속 축류 임펄스 터빈 설계로 연계할 수 있는 방법론을 정립하였다.

Key Words : Organic Rankine Cycle, Supersonic turbine, Partial admission, Axial impulse turbine

† Corresponding author, E-mail: ywkim@kitech.re.kr

후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korean government (MOTIE) (20222020800130, Development and demonstration of hybrid power system using ORC (Organic Rankine Cycle) and TEG (Thermoelectric Generator) for low and medium temperature industrial waste heat recovery).

REC-O-4

무차원 상사성 결정층을 이용한 이중 열원 히트펌프 시스템 Solver Free Model Predictive Control

Solver-Free Model Predictive Control of a Dual-Source Heat Pump System with a Dimensionless Similarity-Based Decision Layer

김유진*, 배상무*, 배민정*, 최현중*†
Yu Jin Kim*, Sangmu Bae*, Min-Jung Bae*, Hyun-Jung Choi*†
*한국건설기술연구원

Abstract : 모델 예측 제어(MPC)는 건물 히트펌프 시스템의 효율적인 운전에 활용되어 왔다. 그러나 매 제어 주기마다 수행하는 솔버 기반 혼합정수 비선형 최적화는 연산시간의 불확실성과 수렴 실패에 따른 대체 제어 전환을 수반하여, 연산 자원이 제한된 건물 자동화 하드웨어에 적용하는 데 제약이 된다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 축열조(TES)가 연계된 신재생에너지 이중열원 히트펌프 시스템을 대상으로, 열적 잠재량과 부분부하 상사성에 기반한 솔버 없는 예측 제어 기법을 제안하였다. 제안 기법은 외란 예측, 예측구간의 열적 잠재량 계산, 수요 조정 등 기존 MPC의 예측 과정을 그대로 유지하되, 솔버가 수행하던 제어입력 결정을 무차원 결정 맵으로 대체한다. 두 좌표는 냉난방 요구량과 TES 충전 요구량을 예측된 히트펌프 최대 가용량으로 각각 무차원화하여, 제어입력을 결정하도록 하였다. 제안 기법과 최적화 기반 MPC의 비교에는 동일한 예측 구조와 과거 관측자료 기반 예측 입력을 사용하고, 제약조건, 예측구간 및 제어입력 이산화도 동일하게 적용하였다. 그 결과, 제안 기법은 규칙 기반 제어 대비 연간 순전력 소비량을 51.4% 절감하여 MPC의 절감률인 50.8%와 유사한 성능을 보였다. 계절별 실내온도 RMSE도 0.8–0.9 °C 이내로 유지하여 MPC와 유사한 온도 제어 성능을 확보하였다. 또한 MPC 대비 약 1,000–2,500배 빠른 연산속도를 보였다. MPC에서는 시험한 모든 구성에서 솔버 문제로 인한 대체 제어 전환이 발생하였으나, 제안 기법에서는 이러한 전환이 발생하지 않았다. 제안 기법은 제어입력 결정 과정만을 열적 잠재량 기반 부분부하 상사성 매핑으로 대체함으로써, MPC 수준의 에너지 절감 및 온도 제어 성능을 유지하면서 정해진 시간 내에 제어입력을 산출할 수 있음을 보여준다.

Key Words : 모델 예측 제어(Model predictive control), 솔버 없는 예측 제어(Solver-free predictive control), 열적 잠재량(Thermal potential), 부분부하 상사성(Part-load similarity), 이중열원 히트펌프(Dual-source heat pump), 축열 시스템(Thermal energy storage)

† Corresponding author, E-mail: mingineu@kict.re.kr

후 기

본 연구과제는 과학기술정보통신부의 한국건설기술연구원 전략연구사업으로 수행되었습니다. (과제번호 20260240-001, 에너지 자립률 100% 넷제로 건축물 구현 기반(핵심) 기술 개발)

REC-O-5

공정열 공급을 위한 Low GWP 냉매 적용 캐스케이드 히트펌프의 동절기 동적 성능 분석

Analysis of Dynamic Performance of Cascade Heat Pumps with Low GWP Refrigerants in Winter for Process Heat Supply

안태용*, 정현석*, 안건용*, 최휘웅**,***†
Taeyong Ahn*, Hyeonseok Jeong*, Geonyong An*, Hwiung Choi**,***†
*전남대학교 냉동공조공학과 대학원, **전남대학교 냉동공조공학과,
***전남대학교 지능형국방우주소재부품연구소

Abstract : 산업 공정의 스팀 생산은 주로 화석연료 보일러에 의존하고 있어, 열원 설비의 전기화가 탄소중립 달성의 핵심 과제이다. 이와 함께 EU F-gas 규제와 키갈리 개정의정서에 따른 기존 냉매의 단계적 감축 의무화로, Low GWP 냉매의 도입이 필수적이다. 한편, 기존 공기열원 캐스케이드 시스템은 동절기 외기온도 하락 시 증발 온도가 급락하여 저단 압축비 상승과 시스템 효율 저하를 초래하는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 산업용 스팀을 안정적으로 공급하기 위해, Low GWP 친환경 냉매를 적용한 태양열-공기열 하이브리드 캐스케이드 히트펌프 시스템을 제안하고, 기상 조건이 불리한 동절기에 동적 시뮬레이션을 수행하여 시스템 거동 특성을 파악하였다. 본 연구 결과는 향후 산업 공정의 탄소중립 및 고온 히트펌프 설계를 위한 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 캐스케이드 히트펌프(Cascade heat pump), Low GWP 냉매(Low GWP refrigerant), 태양열-공기열 하이브리드(Solar-air hybrid), 산업용 스팀(Industrial steam), 동적 시뮬레이션(Dynamic simulation)

† Corresponding author, E-mail: choihu@jnu.ac.kr

REC-O-6

대공간 스포츠시설의 열존 및 공간 높이에 따른 1차에너지소요량 분석

Analysis of Primary Energy Consumption According to Thermal Zoning and Space Height in Large-Space Sports Facilities

유한서*, 이우창**, 임지연**, 최경석**†
Hanseo Yu*, Woochang Lee**, Jiyoun Lim**, Gyeongseok Choi**†
*과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과, **한국건설기술연구원 건축에너지연구본부

Abstract : 대공간 스포츠시설은 높은 공간높이와 대규모 실내체적을 가지며, 비재실공간, 관중석 및 그라운드 등 서로 다른 공간적 특성을 포함한다. 본 연구에서는 ECO2 (version 2020)를 이용하여 대공간 스포츠시설의 열존 구획과 공간높이 설정에 따른 1차에너지소요량의 차이를 분석하였다. 약 25,000 ㎡ 규모의 부분모델을 대상으로 전체 공간을 하나의 열존으로 구성한 1-Zone, 비재실공간과 관중석 및 그라운드 영역을 구분한 2-Zone, 비재실공간, 관중석 및 그라운드를 각각 구분한 3-Zone을 설정하였다. 공간높이는 10 m부터 60 m까지 10 m 간격의 여섯 조건으로 설정하여 총 18개 조건을 비교하였다. 분석 결과, 모든 모델에서 공간높이가 증가함에 따라 1차에너지소요량이 증가하였으나 증가폭은 모델별로 다르게 나타났다. 1-Zone의 1차에너지소요량은 공간높이 10 m에서 327.3 kWh/(㎡·yr), 60 m에서 576.6 kWh/(㎡·yr)로 산정되어 249.3 kWh/(㎡·yr), 76.2% 증가하였다. 2-Zone은 400.0 kWh/(㎡·yr)에서 550.8 kWh/(㎡·yr)로 증가하여 37.7%의 증가율을 보였으며, 3-Zone은 401.6 kWh/(㎡·yr)에서 461.5 kWh/(㎡·yr)로 증가하여 14.9%의 증가율을 나타냈다. 동일한 공간높이에서 세 모델의 산정값을 비교한 결과, 모델 간 차이는 높이에 따라 다르게 나타났으며, 60 m에서 1-Zone과 3-Zone 사이에 115.1 kWh/(㎡·yr)의 가장 큰 차이가 확인되었다. 다만 1-Zone에서는 전체 공간의 높이가 변화하고, 2-Zone에서는 비재실공간을 제외한 관중석 및 그라운드 영역, 3-Zone에서는 그라운드에만 높이 변화가 적용되므로 모델별 증가폭의 차이를 열존 세분화만의 영향으로 해석할 수 없다. 이러한 결과는 열존 구획과 높이 변화가 적용되는 공간범위가 결합되어 1차에너지소요량 산정결과에 차이를 발생시킬 수 있음을 보여준다. 따라서 대공간 스포츠시설의 ECO2 평가에서는 공간의 기능과 형상을 고려하여 열존 구획 및 대표높이의 설정근거를 명확히 제시할 필요가 있으며, 특히 산정결과가 에너지성능 등급 경계 부근에 위치하는 경우 모델링 조건에 따른 산정값의 차이를 함께 검토할 필요가 있다.

Key Words : 대공간 스포츠시설(Large-space sports facility), 열존 구획(Thermal zoning), 공간높이(Space height), 1차에너지소요량(Primary energy consumption), 건물에너지성능평가(Building energy performance assessment)

†Corresponding author, E-mail: bear717@kict.re.kr

후 기
본 연구는 2026년도 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25506237).

REC-O-7

방위 가변에 따른 수직 양면형 PV 루버 시스템의 발전성능 비교 · 분석

Comparative Analysis of the Power Generation Performance of a Vertical Bifacial PV Louver System under Varying Azimuth Angles

장준원*, 유휘준**, 박승주**, 이규영**, 김진희***, 김준태****†
Junwon Jang*, Hyijun Yu**, Seungju Park**, Kyuyoung Lee**,
Jinhee Kim***, Juntae Kim****†
*국립공주대학교 에너지시스템공학과, **국립 공주대학교 그린스마트건축공학과,
***국립공주대학교 그린에너지기술연구소,
****국립공주대학교 그린스마트건축공학과/에너지시스템공학과(대학원)

Abstract : 제로에너지건축물에 대한 수요가 증가함에 따라, 옥상 면적이 제한적인 중、고층 건축물에서의 건물 입면 활용을 통한 태양광(PV) 발전이 점차 중요해지고 있다. 수직형 PV 루버 시스템은 태양광 모듈을 설치할 수 있는 입면 면적을 확대하는 동시에 일사 차폐, 눈부심 저감 및 입면 디자인과 같은 건축적 기능을 제공할 수 있다. 동、서향 입면에 설치되는 수직형 PV 루버는 일사 입사 조건이 상대적으로 불리하여 기존의 남향 PV 시스템에 비해 발전성능이 낮게 나타날 수 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 태양 위치에 따른 루버의 방위각 조절을 통해 수직 양면형 PV 시스템의 발전성능을 향상시키는 방안을 고려할 수 있다. 또한, 양면형 PV 모듈은 전면과 후면에 입사하는 일사를 모두 활용할 수 있어 수직으로 설치되는 PV 시스템의 발전성능을 향상시킬 가능성이 있다. 그러나 실제 건물 입면 조건에서 PV 모듈이 적용된 루버의 방위각 변화를 고려한 실험적 연구는 여전히 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 동향 입면에 설치된 수직 양면형 PV 루버 시스템을 대상으로 루버 방위각의 가변성이 발전성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 이를 위해 동일한 기상조건에서 고정형 루버와 가변형 루버를 비교하는 실규모 옥외실험을 수행하였다. 고정형 루버는 동향 입면에 수직으로 설치하고 실험기간 동안 일정한 방위각을 유지하였다. 가변형 루버는 초기에는 고정형 루버와 동일한 방위각으로 배치한 후, 오전 시간대 태양 위치의 변화를 고려하여 −90° ~ 0° 범위로 단계적으로 회전시켰다. 이후 고정형 PV 루버 시스템과 가변형 PV 루버 시스템 간의 발전성능을 비교분석하였다. 이러한 실험을 통해 루버의 방위각 조절이 수직 양면형 PV 루버 시스템의 발전 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

Key Words : Vertical bifacial PV louver system(수직 양면형 PV 루버 시스템), Azimuth(방위각), Solar position(태양 위치), East-facing façade(동향 외벽), Power generation performance(발전성능)

† Corresponding author, E-mail: jtkim@kongju.ac.kr

후 기
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (RS-2023-00266248, RS-2024-00394769).



Oral Session

자원량평가

Renewable Energy Resources (RER) Session

RER-O-1

한반도 주변 해역의 겨울철 풍력자원 변동과 북극진동의 연계성: 장기 재분석자료와 국가 해상풍력자원지도(2026년판) 분석

Winter Wind Resource Variability over the Seas Surrounding the Korean Peninsula and Its Relationship with the Arctic Oscillation: An Analysis of Long-Term Reanalysis Data and the National Offshore Wind Resource Map of Korea (2026 Edition)

이민규*, 오동건*†, 김진영*, 김창기*, 김현구*

Minkyu Lee*, DongGun Oh*†, Jin-Young Kim*, Chang Ki Kim*, Hyun-Goo Kim*

*한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실

Abstract : 본 연구에서는 1985-2024년 유럽중기예보센터의 제5세대 재분석자료(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)와 미국 해양대기청 기후예측센터의 북극진동(Arctic Oscillation, AO) 지수를 이용하여 한반도 주변 해역의 겨울철 풍황과 AO의 관계를 분석하였다. 분석 영역은 배타적경제수역 내 수심 1,000 m 이하 해역에서 한일중간수역과 한중잠정조치수역을 제외하여 설정하고, 이를 해상풍력 경제성 평가가 가능한 영역으로 가정하였다. 시간별 100 m 바람 성분으로 풍속과 풍력에너지밀도를 산출한 뒤 월평균하여 겨울철인 12월, 1월, 2월(DJF)의 상관분석과 AO 위상별 합성분석을 수행하였다. DJF AO 지수와 풍속 아노말리의 상관계수는 전체 해역에서 −0.577($p<0.001$)이었으며, 서해(−0.567), 남해(−0.524), 동해(−0.484) 모두 유의한 음의 상관을 보였다. 공간적으로는 서해의 외해 쪽에서 음의 상관이 상대적으로 강하고 남해 연안과 동해에서 약해지는 분포가 나타났다. AO 평균의 ±1표준편차를 기준으로 선정한 음의 위상 7개 연도와 양의 위상 6개 연도의 합성장은 동아시아 기압배치 및 한반도 주변 하층 흐름의 변화와 해상 100 m 풍속의 위상 차이를 보여주었다. 전체 해역의 DJF 평균 WPD는 기후평균 약 560 W m^{-2}에 비해 음의 위상에서 약 630 W m^{-2}, 양의 위상에서 약 520 W m^{-2}로 나타났으며, AO-WPD 상관계수는 −0.563($p<0.01$)이었다. 이러한 결과는 AO와 연관된 겨울철 대규모 순환의 변화가 국내 해상풍력 자원의 경년 변동을 해석하는 데 유용함을 시사한다. 추가로 관측자료 기반 편향보정을 적용한 2015-2024년 2 km 해상도의 WRF 기반 국가 해상풍력자원지도를 같은 기간의 ERA5와 비교하였다. 두 자료는 평균풍속과 WPD의 광역적인 공간분포 및 겨울철 AO-풍속의 음의 상관을 공통적으로 나타냈으며, WRF는 연안과 도서 주변의 공간적 차이를 보다 세밀하게 표현하였다. 보정된 WRF의 DJF AO-100 m 풍속 상관은 $r=-0.594$($p=0.070$)로 10% 유의수준에서 유의하였다.

Key Words : 북극진동(Arctic Oscillation), 해상풍력(Offshore wind), ERA5(ERA5), 겨울철 풍황(Winter wind resources), 경년변동(Interannual variability), WRF(WRF)

† Corresponding author, E-mail: dgoh313@kier.re.kr

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C6-2404-18)과 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업의 지원(RS-2025-02213126)을 받아 수행한 연구입니다.

RER-O-2

달 표면 태양 위치 계산의 데이터 기반 잔차 보정 유효성 분석

Data-Driven Residual Correction for Lunar Surface Solar Position Computation

최민태*, 최요순*†
Mintae Choi*, Yosoon Choi*†
*세종대학교 에너지자원공학과

Abstract : 최근 달 기지 건설과 우주 자원 탐사 연구가 본격화됨에 따라 달 표면에서 안정적인 에너지 공급원을 확보하기 위한 태양광 발전 잠재량 평가의 중요성이 커지고 있다. 선행 연구에서는 물리 기반 태양 위치 계산에서 발생하는 잔차를 신경망으로 보정하여 계산 정밀도를 향상시켰으나, 이러한 데이터 기반 잔차 보정이 어떤 조건에서 유효한지는 정량적으로 규명되지 않았다. 본 연구에서는 JPL Horizons의 달 표면 관측자 기준 산출값을 참조값으로 설정하고, 물리 모델의 정의를 참조값에 단계적으로 일치시킨 7개 조건과 물리적 불일치를 의도적으로 부여한 9개 조건 등 총 16개 조건에 대해 4개의 학습 모델을 동일한 조건으로 적용하여 데이터 기반 잔차 보정의 유효성을 비교·분석하였다. 분석에는 220개 지점에서 생성된 총 562,540개의 표본을 사용하였다. 그 결과, 물리 모델의 정의를 참조값과 완전히 일치시킨 조건에서는 평균 3차원 각오차가 3.55×10^{-7}°로 나타나 참조값의 표현 한계에 근접한 정밀도를 확보하였다. 반면 데이터 기반 보정의 효과는 보정 전 잔차의 크기와 단조적인 관계를 보이지 않았으며, 조건에 따라 오차가 최대 78.9% 감소하는 경우가 있는 반면 29-35% 증가하는 경우도 확인되었다. 이러한 차이를 설명하는 주요 요인은 잔차의 표본 밖 예측 가능성으로 나타났으며, 보정 효과와 잔차의 표본 밖 예측 가능성 간 조건 단위 순위상관계수는 +0.947로 나타났다. 이는 잔차의 예측 가능성을 이용하여 데이터 기반 보정의 적용 유효성을 사전에 판단할 수 있음을 보여준다. 또한 학습 가능한 잔차를 물리 모델의 점검 신호로 활용한 결과, 광행차 계산에서 달 표면 관측자의 자전 속도 4.62 m/s가 누락되어 있음을 확인하였으며, 이를 물리 모델에 반영함으로써 잔차를 참조값의 반올림 수준까지 감소시켰다. 본 연구는 물리모델의 정확도 수준에 따라 데이터 기반 잔차 보정의 효과가 달라질 수 있음을 정량적으로 규명하고, 잔차의 표본 밖 예측 가능성을 보정 적용 여부를 판단하는 지표이자 물리모델의 불완전성을 진단하는 신호로 활용할 수 있음을 제시하였다. 이러한 결과는 달 표면 태양 위치 계산뿐만 아니라 물리 기반 계산과 데이터 기반 보정을 결합하는 다양한 하이브리드 모델에서 보정의 적용 조건을 판단하고 물리모델을 개선하는 방법론으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 태양 위치 계산(Solar position computation), 달 표면 태양광(Lunar solar power), 잔차 보정(Residual correction), 기계학습(Machine learning), 물리 정확도(Physics fidelity)

†Corresponding author, E-mail: energy@sejong.ac.kr

RER-O-3

Spectral Splitting 기반 PV-Linear Fresnel Reflector 하이브리드 시스템의 국내 적용성 평가 연구

Feasibility Study of a Spectral-Splitting-Based PV-Linear Fresnel Reflector Hybrid System in Korea

김창기*†, 김현구*, 오명찬*, Yu Xie**
Chang Ki Kim*†, Hyungoo Kim*, Myeongchan Oh*, Yu Xie**
*한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실, **National Laboratory of the Rockies

Abstract : 본 연구에서는 동일한 집광 면적에서 태양광 발전과 집광태양열 생산을 동시에 수행할 수 있는 spectral-splitting 기반 PV-LFR(Linear Fresnel Reflector) 하이브리드 시스템의 국내 적용 가능성을 평가하기 위한 모델링 체계를 구축하였다. 제안 시스템은 기상조건에 따라 운전모드를 구분하며, 흐린 조건에서는 all-sky spectral solar irradiance를 이용하여 PV 발전을 수행하고, 맑은 조건에서는 직접일사 성분을 활용하여 PV 발전과 LFR 열생산을 동시에 수행하도록 구성하였다. 특히 주간에 LFR에서 생산된 열에너지는 즉시 발전에 사용하지 않고 열에너지저장장치(TES)에 저장한 후 야간에 전력으로 전환함으로써, 주간 PV 발전과의 출력 중첩을 최소화하고 태양에너지 기반 전력공급 시간을 야간까지 확장하는 운전전략을 적용하였다. 입력자료로는 300-1100 nm 범위의 spectral GHI 및 spectral DNI를 이용하였으며, PV 발전량은 해당 파장범위에서의 스펙트럼 분배와 태양전지의 파장별 응답특성을 고려하여 계산하였다. LFR 열생산량은 spectral DNI와 분광 반사특성 및 광학·열효율을 기반으로 산정하고, 1100 nm 이상의 파장영역은 clear-sky spectral model을 이용하여 확장하도록 구성하였다. 또한 TES의 충·방전 효율, 저장용량 및 발전계통 효율을 고려한 시간별 에너지수지 모델을 통해 주간 열저장과 야간 전력생산을 모의하였다. 이러한 시스템 구성은 동일 부지에서의 태양에너지 이용률을 높이는 동시에 주간 PV 발전과 야간 TES 기반 발전을 결합함으로써 시간적 전력공급 범위를 확대할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

Key Words : 분광분리 (Spectral Splitting), 태양광발전 (Photovoltaics), 선형 프레넬 반사경 (Linear Fresnel Reflector), 집광태양열 (Concentrated Solar Thermal), 열에너지저장 (Thermal Energy Storage)

†Corresponding author, E-mail: ckkim@kier.re.kr

후 기
본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업(C6-8620)으로 수행한 결과입니다.

RER-O-4

SAM Copilot: 자연어 기반 태양광 시스템 설계·분석 및 의사결정 자동화

SAM Copilot: Natural-Language Automation of Photovoltaic System Design, Analysis, and Decision Support

김태헌*, 최요순*†
Taeheon Kim*, Yosoon Choi*†
*세종대학교 에너지자원공학과

Abstract : 본 연구에서는 대형언어모델(LLM)과 물리 기반 태양광 시뮬레이션 엔진 PySAM을 연계하여, 자연어 입력만으로 태양광 시스템의 설계, 성능 분석, 설계 탐색, 최적화 및 의사결정 지원을 수행하는 AI 시스템인 SAM Copilot을 개발하였다. 기존 태양광 시뮬레이션 워크플로는 전문적인 모델 설정과 반복적인 수작업 실행을 요구하므로 설계 탐색의 효율성이 낮고 비전문가의 접근에도 제약이 있다. SAM Copilot은 사용자의 자연어 설계 의도를 실행 가능한 시뮬레이션 절차로 자동 변환하며, LLM은 사용자 의도 해석, 분석 절차 계획 및 시뮬레이션 결과 해석을 담당하고, 발전량 및 기술경제적 성능과 관련된 수치 계산은 PySAM이 수행하도록 역할을 분리하였다. 개발된 시스템의 적용 가능성을 평가하기 위해 서울 지역의 1 MW급 태양광 시스템을 대상으로 기준 성능 분석, 설계 공간 탐색, 설계 최적화 및 기술경제적 의사결정 지원의 네 가지 과업을 수행하였다. 그 결과 자연어 질의로부터 시뮬레이션 조건 설정, 반복 실행 및 결과 해석에 이르는 일련의 과정이 자동화되었으며, 각 과업에서 PySAM 계산에 기반한 물리적으로 일관된 결과가 산출됨을 확인하였다. 또한 설계 공간 탐색 및 최적화 과정에서는 최적 설계 구성뿐만 아니라 성능 차이가 작은 넓은 근최적 영역이 함께 확인되었으며, 복수의 후보 설계안이 유사한 기술경제적 성능을 나타내어 설계자가 다양한 제약조건과 선호도를 고려하여 대안을 선택할 수 있는 가능성을 보여주었다. 이러한 결과는 SAM Copilot이 단순한 대화형 질의응답을 넘어 자연어를 기반으로 태양광 시스템의 설계 실행, 성능 분석, 설계 탐색, 최적화 및 의사결정 지원 과정을 통합적으로 자동화할 수 있음을 보여준다.

Key Words : 대형언어모델(Large language model), 태양광 시스템 설계(Photovoltaic system design), 시뮬레이션 기반 AI 에이전트(Simulation-grounded AI agent)

† Corresponding author, E-mail: energy@sejong.ac.kr

RER-O-5

계통접속용량 유지형 태양광 리파워링의 잠재량 평가

Assessment of Solar Photovaltaic Repowering Potential under Fixed Grid Connection Capacity

김현구*, 윤창열*, 오명찬*, 김창기*†
Hyun-Goo Kim*, Changyeol Yun*, Myeongchan Oh*, Chang Ki Kim*†
*한국에너지기술연구원 신재생빅데이터실

Abstract : 국내 태양광 보급확대는 신규 부지확보와 계통접속 여력의 제약을 받고 있어 기존 발전소의 부지와 계통자산을 활용하는 리파워링이 보완적 확대수단으로 검토될 필요가 있다. 본 연구는 연도별 태양광 신규 설치용량을 기반으로 설치 후 20년에 도달하는 리파워링 대상 코호트를 산정하고, 기존 AC 계통접속용량 및 공통접속지점(POI)을 유지하면서 DC 설비용량을 25% 증설하는 계통접속용량 유지형 태양광 리파워링 시나리오를 적용하였다. 기준 이용률 14.9%, 연간 성능저하율 0.50%, 접속용량 초과 손실률 1%를 적용한 결과, 20년 노후설비의 성능회복과 DC 증설효과가 결합되어 기존설비 계속운전 대비 리파워링 후 첫해 발전량은 약 36.8% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 과거 태양광 보급 확대에 따라 2030년대 이후 리파워링 대상용량이 빠르게 증가하므로, 계통접속용량 유지형 리파워링은 추가 계통증설 부담을 최소화하면서 설비용량과 발전량을 확대할 수 있는 정책적 옵션으로 활용될 가능성이 있다. 다만 본 연구결과는 연도별 태양광 발전소 규모의 분포와 실제 발전소별 AC·POI 및 구조·배치 조건의 제한으로 인해 확정적 실현량이 아닌 기준 잠재량으로 해석할 필요가 있다.

Key Words : 태양광 리파워링 (Solar Photovoltaic Repowering), 계통접속용량 (Grid Connection Capacity), 보급잠재량 (Deployment Potential), 공통접속지점 (POI; Point of Interconnection)

† Corresponding author, E-mail: ckkim@kier.re.kr

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 연구과제의 결과입니다. (과제번호: C6-2403-15)

RER-I-1

브라질 지상형·옥상형 태양광 자원 잠재량 비교 평가

Comparative Assessment of Utility-scale and Rooftop Solar PV Potential in Brazil

Paula C. S. Borba*, 문준(Joon Moon)**†
*Princeton University, Andlinger Center for Energy and the Environment,
**홍익대학교 경영학과

Abstract : 태양광 자원 잠재량 평가는 국가 탄소중립 경로의 상한을 규정하는 핵심 입력이나, 지상형과 옥상형은 산정의 출발점이 근본적으로 다름에도 통합적으로 비교된 사례가 드물다. 본 연구는 브라질의 탄소중립 경로를 분석하는 Net Zero Brazil(NZB) 프로젝트의 일환으로, 27개 주를 대상으로 두 방식의 산정체계를 병렬 구축하고, 그 결과를 다지역 에너지시스템 최적화 모델(MACRO)의 지역별 용량 상한 제약으로 반영하고자 한다. 지상형은 토지 가용성에서 출발하여 보호구역 및 공유림, 원주민·킬롬볼라 영역, 도시지역 1 km 완충구간, 경사 10% 초과 지역, 기존 설비 점유지를 배제 대상으로 설정하고, 각 기준을 250 m 격자의 이진 마스크로 변환한 뒤 순차적으로 결합하여 적합지를 도출하였다. 옥상형은 이와 달리 주택 통계에서 출발하여, 지역별 가용 옥상면적 계수와 IBGE 가구 수를 결합해 주별 적합 옥상면적을 추정하고 160 MW/km^{2}의 출력밀도를 적용하였다. 발전 특성은 2,267개 대표 지점에 대해 PVGIS와 ERA-5 자료로 시간별 발전량을 모의한 뒤 정격용량으로 정규화하여 이용률 시계열로 변환하였으며, 지상형은 단축 추적식을, 옥상형은 경사각과 방위각이 최적화된 고정형을 가정하였다. 분석 결과 전국 기술적 잠재량은 지상형 82.4 TW, 옥상형 238 GW로 약 346배의 격차를 보였으며, 주별 순위 상관계수는 0.37에 그쳐 두 자원의 공간 분포가 서로 독립적임이 확인되었다. 지상형은 마투그로수, 바이아, 마투그로수두술 등 내륙 주에 집중된 반면, 옥상형은 상파울루, 미나스제라이스, 리우데자네이루 등 인구 밀집 주에 집중되었다. 2025년 기존 설비는 잠재량 대비 지상형 0.02%, 옥상형 3.0% 수준으로, 옥상형에서만 자원 상한이 유의미한 구속력을 가질 가능성이 시사된다. 본 연구는 기술적 잠재량과 실현 잠재량을 구분하여 제시함으로써, 자원량 산정의 정밀도가 우선적으로 요구되는 지역과 기술을 식별하는 접근을 제안한다.

Key Words : 태양광 자원 잠재량(Solar PV resource potential), 옥상 태양광(Rooftop PV), 실현 잠재량(Realizable potential), 이용률(Capacity factor), 토지 이용 제약(Land-use constraints)

† Corresponding author, E-mail: jmooon25@hongik.ac.kr

후 기

본 연구는 Princeton University, IMEA, UNICAMP가 공동으로 수행 중인 Net Zero Brazil(NZB) 프로젝트의 연구 내용 중 일부입니다

RER-O-6

K-HELM: 한국 시군구 · 시간대 · 용도별 전력수요 데이터, 2004-2050

K-HELM: Municipal Electricity Demand by Hour and End Use in Korea, 2004-2050

최현태*†
Hyuntae Choi*†
*한국과학기술원(KAIST), 대전광역시 유성구 대학로 291, 34141, 대한민국

Abstract : Long-term energy-system planning requires electricity-demand data that show where, when and for what purpose electricity is consumed. For Korea, however, no public dataset jointly resolves demand by municipality, hour and end use or projects all three dimensions under national decarbonization scenarios. K-HELM (Korean Hourly End-use Load by Municipality) covers 229 local units from 2004 to 2050. For 2004–2023, K-HELM provides monthly demand profiles differentiated by municipality, hour of day and end use. It adds chronological hourly reconstructions for 2024–2025 and an hourly projection for every year from 2026 to 2050. Historical demand is reconstructed by combining municipal utility billing, end-use load profiles, national system-load records and regional temperature observations. Future national demand is anchored to GCAM v9.1 projections under Reference and net-zero CO_2 scenarios. Separate layers allocate transport growth, concentrate additional electric-heating demand on cold days and add temperature-related changes under SSP2-4.5 and SSP3-7.0. The reconstruction reproduces official regional accounting by end use with a national mean absolute percentage error of 0.13% and preserves the national system load in every observed hour. When hourly patterns estimated through 2024 are applied to 2025, the reconstructed load-duration curve has a mean absolute error of 0.9%, while the annual peak is understated by 5.6%. By 2050, electricity sales reach 733.9 TWh under the Reference scenario, 33.6% above 2025, and 832.4 TWh under net-zero CO_2, an increase of 51.5%. The Reference scenario remains summer-peaking. Under net zero, electrified heating raises winter demand above the summer peak from 2040 onward; by 2050, the winter and summer peaks reach 142.0 and 136.6 GW, respectively. Reference growth remains concentrated in the semiconductor corridor south of Seoul, whereas additional net-zero growth shifts toward dense residential districts. K-HELM is an open, internally consistent dataset for capacity-expansion modeling, transmission planning, infrastructure siting and climate-risk analysis in Korea.

Key Words : Electricity demand; spatial downscaling; hourly load profile; end-use disaggregation; Republic of Korea

† Corresponding author, E-mail: hyuntae.choi@kaist.ac.kr

RER-O-7

PyPSA와 GenX/Macro 계열 모델의 재생에너지 자원량 평가 방법론 비교와 국내 적용 시사점

A Comparison of Renewable Energy Resource Assessment Methodologies in PyPSA and GenX/Macro with Implications for Korea

이지현*, 허태민**,***†

Jihyeon Lee*, Taemin Heo**,***†

*홍익대학교 건설환경공학과, **서울대학교 첨단융합학부, ***서울대학교 건설환경도시공학부

Abstract : 우리나라 재생에너지 자원량 평가는 국가 자원지도를 바탕으로 이론적·지리적·기술적 잠재량을 산정하는 방식으로 수행되며, 연평균 풍속과 연간 일사량 같은 장기 평균 자원량이 기준이 된다. 설비 확충 규모는 전원별 총량으로 정해지고 잠재량 산정과 후보지 검토는 별도로 이루어져, 용량 계획과 입지 평가가 서로 다른 단계에서 다루어진다. 한편 해외에서는 거시 에너지시스템 모델로 이 두 단계를 하나의 최적화 문제로 통합하여 지역별 자원량, 설비 및 운영 비용, 배출 목표를 동시에 고려하는 용량 확장 계획(capacity expansion planning)이 활용되고 있으며, 여기에는 계절성과 일중 변동을 담은 8,760시간 이용률 프로파일이 핵심 입력 자료가 된다. 이러한 프레임워크의 대표 사례인 유럽의 PyPSA(PyPSA-Eur, PyPSA-Earth)와 미국 프린스턴대의 GenX/Macro 계열 모델(Net Zero America 프로젝트에 적용)은 이용률 프로파일을 도출하는 절차가 서로 다르다. 본 연구는 이 두 방식을 입력 데이터의 종류, 공간 및 시간 해상도, 산정 방법론, 정확도 확보 방식이라는 네 가지 관점에서 비교한다. PyPSA-Earth는 기후 재분석 자료 입력부터 토지 배제조건 적용, 물리적 변환, 변전소 영역 단위 공간 집계까지를 워크플로 내부의 연속된 규칙(rule)으로 처리한다. 반면 Net Zero America는 외부 발전 프로파일을 PowerGenome으로 표준화하고, GIS 분석으로 구성한 후보지(Candidate Project Area, CPA)를 군집화하여 모델에 입력한 뒤 최적화 결과를 다시 후보지 단위로 다운스케일링한다. 이 비교를 바탕으로 국내 적용에 주는 시사점과 선결되어야 할 자료 측면의 과제를 정리하고자 한다.

Key Words : 자원량 평가(Renewable energy resource assessment), 거시에너지시스템(Macro energy system), PyPSA, GenX, Macro

† Corresponding author, E-mail: taeminheo@snu.ac.kr

후 기

이 연구는 서울대학교 신임교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었음. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2026-25495303).

RER-O-8

제주 풍력단지 실측 비교를 통한 PyPSA-Earth 기반 시간별 풍력 이용률 추정의 국내 적용성 평가

Assessing the Applicability of PyPSA-Earth Hourly Wind Capacity Factor Estimates to Korea Using Measured Jeju Wind Farm Data

박준형*, 허태민**,***†

Junhyung Park*, Taemin Heo**,***†

*홍익대학교 건설환경공학과, **서울대학교 첨단융합학부, ***서울대학교 건설환경도시공학부

Abstract : 탄소중립 목표 달성을 위해 풍력·태양광 등 변동성 재생에너지의 보급이 빠르게 확대되고 있다. 에너지시스템 모델링을 통해 상향식(bottom-up)으로 에너지 믹스와 탈탄소화 경로를 최적화하기 위해서는 재생에너지 발전의 변동성을 반영한 연간 시간별 이용률(Capacity Factor, CF) 프로파일이 필수적이다. 그러나 국내에서 공개된 풍력자원 자료는 장기 평균 풍황 기반의 자원지도와 기술적 잠재량 산정에 초점을 두고 있어, 임의 입지에 대해 에너지시스템 모델의 입력으로 활용할 수 있는 연간 시간별 이용률 프로파일은 체계적으로 제공되지 않고 있다. 한편 전 세계를 대상으로 에너지시스템 모델을 자동 구축하는 오픈소스 프레임워크인 PyPSA-Earth는 ERA5 재분석 데이터와 atlite를 이용하여 시간별 이용률을 산출한다. 2025년에는 이를 기반으로 국내 전력시스템을 구축한 PyPSA-Korea(Kwak et al., 2025)가 발표되었으나, 검증은 전원별 연간 발전량 수준에서 이루어져 풍력 이용률의 시간별·단지별 재현성은 별도로 평가되지 않았다. 본 연구에서는 PyPSA-Earth의 이용률 산출 체계를 이용하여 제주도 풍력단지의 시간별 이용률을 모의하고, 전력거래소와 제주에너지공사로부터 확보한 실제 풍력단지의 발전 실적 기반 이용률과 비교한다. 재분석 자료의 공간해상도, 풍속 고도 보정, 터빈 파워커브, 출력제어 등 오차 발생 가능 요인별로 편향(bias)과 변동성 재현 오차에 대한 기여도를 정량적으로 평가함으로써, PyPSA-Earth의 국내 적용 가능성을 평가하고 국내 에너지시스템 모델링을 위한 개발 방향을 제시한다.

Key Words : 풍력발전 이용률(Wind Capacity Factor), 재분석 데이터(ERA5 Reanalysis), 재생에너지 모델링(Renewable Energy Modeling), PyPSA-Earth, atlite

† Corresponding author, E-mail: taeminheo@snu.ac.kr

후 기

이 연구는 서울대학교 신임교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었음. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2026-25495303).

RER-O-9

도시 구조 특성을 고려한 기후변화 시나리오 기반 전력 수요 민감도 분석

Electricity Demand Sensitivity Analysis under Climate Change Scenarios Considering Urban Structural Characteristics

유승철*, 김창기*†
Seungcheol Yoo*, ChangKi Kim*†
*한국에너지기술연구원

Abstract : 최근 평균기온 상승과 폭염 및 한파 등 이상기후의 증가로 전력 수요의 변동성과 불확실성이 확대되고 있다. 특히 냉·난방 수요는 온도 변화에 민감하게 반응하며, 동일한 기후 조건에서도 건축물의 규모, 밀도 및 세대수 등 도시 구조적 특성에 따라 에너지 소비 특성이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 미래 전력 수요 변화를 분석하기 위해서는 기후 조건과 도시 구조 특성을 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 도시 구조 특성을 고려하여 기후변화에 따른 전력 수요의 민감도와 장기 변화 특성을 분석하였다. 이를 위해 주거, 상업 및 혼합지역을 대상으로 이미지, 정형 및 시계열 데이터를 구축하고, 각 데이터의 특성을 통합적으로 반영하기 위해 CNN, MLP 및 LSTM을 결합한 멀티모달 AI 기반 전력 수요 예측 모델을 적용하였다. 예측 변수별 영향을 분석하기 위해 설명가능 인공지능(XAI) 방법을 활용하였다. SHAP 분석을 통해 도시 구조 변수의 영향도를 분석하고, IG 분석을 통해 기후변수의 기여도를 분석하였다. 분석 결과, 건축면적, 세대수 및 건폐율 등의 변수가 전력 수요에 주요한 영향을 미쳤으며, 기후변수 중에서는 평균기온의 영향이 상대적으로 크게 나타났음을 확인하였다. 또한, 미래 전력 수요의 기후변화 민감도 분석을 위하여 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 및 SSP5-8.5 시나리오를 적용하였다. 분석 결과, 모든 시나리오에서 장기적으로 전력 수요가 증가하였으며, 온실가스 배출 수준이 높은 시나리오일수록 증가 폭이 확대되는 경향을 확인하였다. 이를 통해 도시 구조와 기후 조건이 미래 전력 수요 변화에 복합적으로 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 기후변화와 도시 구조 특성에 따른 장기 전력 수요의 변화 특성 및 도시 에너지 수요 예측을 분석하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 기후변화 시나리오(Climate Change Scenarios), 설명가능 인공지능(Explainable AI, XAI), 도시 구조(Urban Structural), 멀티모달 인공지능(Multimodal A.I), 전력 수요(Electricity Demand)

† Corresponding author, E-mail: ckkim@kier.re.kr

RER-O-10

수열에너지원 자원지도 및 잠재량 분석 플랫폼 개발

Development of a Resource Map and Potential Analysis Platform for Hydrothermal Energy Sources

윤창열*†, 강민구*, 김보영*, 오명찬*, 박영석*
Changyeol Yun*†, Mingu Kang*, Boyoung Kim*, Myeongchan Oh*, Youngseok Bak*
*한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실

Abstract : 태양광, 풍력 등 주요 재생에너지원은 고해상도 잠재량 분석을 기반으로 보급목표와 중장기 보급계획을 수립하고 있다. 반면 수열에너지는 잠재량 자료가 광역권 단위의 낮은 공간 해상도에 머물러 있어 도입 가능성 판단과 지원정책 수립에 한계가 있다. 본 연구의 목표는 하천수, 상수, 하수, 지하수 등 국내 수열원을 대상으로 전국 500m × 500m 격자 단위의 수열 자원지도와 잠재량 분석 플랫폼을 구축하는 것이다. 이를 위해 수열 열유량 개념을 정의하고, 이에 기반한 잠재량 연산모델을 개발한다. 수온 자료는 Landsat 등 위성영상 기반의 표층 수온 추정 기술로 확보한다. 표층 수온과 취수심 수온을 연계하는 개념모델도 함께 개발하여 관측자료로 검증한다. 수열원별 모니터링 사이트를 구축하여 수온, 유량, 수질 측정자료를 수집한다. 수집한 자료는 정제하여 수열자원 표준 DB로 구축하고 국가참조표준 등재를 추진한다. 잠재량은 이론적, 기술적, 시장 잠재량의 세 단계로 구분하여 산정한다. 경제성 평가에는 국내외 기술성숙도와 시장 규모를 반영한 기술경제성 평가 DB(K-ATB; Korea Annual Technology Baseline)를 격자 데이터와 연계하여 활용한다. 평가 지표는 균등화 열 생산단가(LCOH; Levelized Cost of Heat)와 균등화 열 회피비용(LACH; Levelized Avoided Cost of Heat)이다. 또한 에너지 가격 시나리오별 민감도 분석을 수행하고, 기후 시나리오 수치모델 자료로 미래 수열 잠재량을 전망한다. 이를 종합하여 정책 시나리오별 시장 잠재량을 도출한다. 최종적으로 수열자원 DB, 잠재량 분석 모델, 시나리오 기능을 통합한 WebGIS 기반 오픈 플랫폼을 구축한다. 이 플랫폼은 국가 및 지자체의 수열에너지 보급 정책 수립과 탄소중립 시나리오 연계 분석을 지원할 것이다.

Key Words : 수열에너지(Hydrothermal energy), 자원지도(Resource map), 잠재량 분석(Potential analysis), 균등화 열생산단가(Levelized cost of heat), 균등화 열 회피비용(Levelized avoided cost of heat)

† Corresponding author, E-mail: yuncy@kier.re.kr

후 기

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수열에너지 활용기술 및 에너지믹스 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: RS-2026-25501383).

RER-O-11

수열에너지 자원지도 및 잠재량 분석을 위한 수열원 공급방식의 다변화

Diversification of Water-source Supply Methods for Hydrothermal Energy Resource Mapping and Potential Assessment

최종웅*†, 조용*, 안수황*, 최윤창*, 이용구*
Jongwoong Choi*†, Yong Cho*, Soohwang Ahn*, Yunchang Choi*, Yonggu Lee*
*한국수자원공사 K-water연구원

Abstract : 수열에너지는 물을 열원으로 히트펌프를 통해 건축물을 냉난방하는 재생에너지로서 그 범위는 해수의 표층 및 하천수의 열을 변환시켜 얻어지는 에너지로 정의하고 있다. 하천수는 국가하천 또는 지방하천, 하천구역 및 하천시설의 지표면에 흐르거나 하천 바닥에 스며들어 흐르는 물 또는 하천에 저장되어 있는 물로 하천법에 의거한다. 수열에너지의 사용은 에너지 절감, 미세먼지 저감 등 친환경 효과가 있으며, 대표적인 국내 수열에너지 적용은 광역상수도 원수 50천톤/일 수열원으로하여 시간당 3,000RT 수열에너지를 생산하는 서울 롯데월드 타워와 2027년까지 16,500RT 규모의 융복합 클러스터 조성사업을 추진하고 있는 강원 수열에너지 클러스터가 있다. 해외에서는 하천수, 정수, 호소수의 수열에너지를 도시 공급과 데이터 센터 냉방 기술 등에 활용하고 있다. 국내 연구에서는 소양강댐 심층수를 활용하여 IDC(Internet Data Center) 프리쿨링형 수열시스템 실증시험(100RT급)을 통한 냉방의 효과 분석, 동절기 열에너지 공급방식에 수열시스템을 적용한 수처리공정 승온시스템개발을 통한 난방의 효과 검증, 하천수의 열원을 이용하여 열원믹스 기술을 적용한 하이브리드 500RT 냉난방시스템 개발의 연구가 수행되었다. 수열에너지의 다양한 기술개발이 수행되고 있으나, 수열에너지를 정책적, 기술적으로 활용하기 위한 지역별, 계절별 특성을 고려한 과학적 자원지도 및 잠재량 평가 체계는 아직 국내에서는 미미하다. 수열에너지 사업추진에 따른 수열원 공급방식 다변화와 정책부응, 실용성과 경제성을 갖춘 건물군 단위 열에너지 운영기술 확보를 위한 수열원 자원지도가 필요하며, 수열에너지 자원잠재량 개발의 산정모델을 검증하기 위한 하천수, 상수, 지하수 등 수열에너지 자원지도 구축을 위한 수열원 활용에 대하여 소개한다.

Key Words : 수열에너지(Hydrothermal energy), 히트펌프(Heat pump), 수열원(Hydrothermal source), 자원잠재량(Resource potential), 산정모델검증(Estimation model validation)

† Corresponding author, E-mail: jwchoi@kwater.or.kr

후 기

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수열에너지 활용기술 및 에너지믹스 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(과제번호 : RS-2026-25501383).

RER-O-12

수열원별 균등화열생산비용(LCOH) 산정을 위한 프로세스 기반 기술비용 DB 구축 방안 설계: 상수 · 하수 · 하천수 · 지하수 열원의 LCOH 예비 산정 결과를 중심으로

김종익*, 조상민**†
*한국공학대학교 AI융합탄소중립전문대학원, **한국공학대학교 융합기술에너지대학원

Abstract : 본 연구는 네 가지 수열원(상수·하수·하천수·지하수)의 균등화열생산비용(Levelized Cost of Heat, LCOH)을 산정하기 위한 프로세스 기반 기술·비용 DB의 설계와, 이를 통해 도출한 DB 조사 방향을 제시한다. 국내외 선행연구를 검토한 결과, 국내 연구는 하천수에 편중되어 있으며 상수·하수에 대한 LCOH를 산정하여 발표된 연구는 없는 것으로 판단된다. 그리고 취수펌프 전력, 열교환기 세정, 주기적 부품 교체, 열원 사용대가 등 수열원 간 차이를 만드는 비용항목이 누락되어 있음을 확인했다. 또한 연구마다 비용 측정 범위(설비의 구성, 유지보수율의 적용 기준 등)가 달랐다. 이에 본 연구는 수열원의 흐름(취수→이송→열원측 열교환→히트펌프→열공급→배수·환수)을 기준으로 세부 비용항목을 정의하고, 선행연구의 항목별 비용 값을 비교한 이후, 분석 파라미터로 선정하였다. 본 연구의 분석 기준 대상은 보건업종 상업건물 냉난방(냉방 설계용량 1,000RT, 등가 가동시간 1,174시간, 할인율 4.5%, 경제수명 20년)으로 하되, 수열원별 이격거리를 달리 설정하였다. 비용 단가는 2025년을 기준으로 환산한 하천수 사례의 설비·관로 공사비와 관경별 옥외배관 단가, 해외 하수열 회수 사례 등을 사용하였으며, 해외 선행연구 사례를 참조할 경우 연평균 환율, GDP 디플레이터, 건설공사비지수를 활용하여 2025년 실질가격에 맞추었다. 전력비용은 2026년 6월 시행 일반용 전력(을) 고압A 요금표를 보건업종 기준 월·시간대 부하계수로 가중평균하여 적용하였다. 기준안의 LCOH는 163~279원/Gcal 수준으로 산정되어 수열원별 차이가 크게 나타났다. 다만, 선행연구의 실적치를 활용하는 본 연구의 특성으로 인해 서로 다른 연구의 단계별 비용을 범위 확인 없이 활용하면 비용이 중복 계상되어 LCOH가 과대 산정될 수 있음을 확인하였다. 반대로 취수펌프 전력비용을 누락하면 취수거리와 양정이 큰 수열원일수록 과소 산정되었다. 또한 수열원 간 비용 격차는 열원의 종류보다 취수거리와 부하율에 더 크게 좌우되었다. 이는 향후 DB 조사가 다음 원칙을 따라야 함을 시사한다. 첫째, 비용은 프로세스 단계별로 분해하여 수집하고, 세금 등 간접비를 포함하는지를 함께 기록해야 한다. 둘째, 관로 비용은 거리·관경·포장상태별로, 설비 비용은 용량 구간별로 분리 조사하여 수열원별 특성이 반영되어야 한다. 셋째, 유지보수비용은 요율 및 적용 기준을 프로세스별로 확보해야 한다. 넷째, 열원 사용대가, 주기적 교체비, 하수 열교환기 세정비, 지하수 관정 비용, 국내 간접비 제비율 등을 우선 조사 대상으로 삼아야 한다.

† Corresponding author, E-mail: smcho@tukorea.ac.kr

후 기

본 논문은 2026년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (RS-2026-25501383, 1수열에너지원 자원지도 및 잠재량 분석 플랫폼 개발)

RER-O-13

수열에너지 기반 건물에너지 절감을 통한 탄소중립 및 RE 100 달성방안

Strategies for Achieving Carbon Neutrality and RE100 through Hydrothermal Energy Based Building Energy Savings

김시헌*†, 윤수철*
Siheon Kim*†, Soochol Yoon*
*안양대학교 환경에너지공학과

Abstract : 지구 온난화로 인한 네팔 대홍수와 전 지구적 폭염 위험 심화에 대응하기 위해, 2035 NDC 온실가스 감축 목표 달성을 위한 탈탄소로의 기후위기 및 정책 대전환이 필수적이다. 러시아-우크라이나 및 미국-이란 전쟁 등으로 글로벌 화석연료 가격이 급등한 가운데, 한국의 에너지 수입 의존도는 94.3%로 매우 높아, 그 어느 때 보다도 에너지 안보 측면에서 심각한 위기 상황을 맞이하고 있다. 이런 상황에서 수열에너지의 활용은 에너지를 절약하여, 온실가스를 감축하고, 가스수입량을 대폭 줄여 에너지 안보에도 큰 기여를 할 수 있다. 수열에너지 개념 및 기술적 우수성을 살펴보면, 하천수, 하수(처리수), 유출지하수, 해수, 댐·호소수 등 물이 가진 열에너지를 히트펌프를 이용해 건물의 냉난방에 활용하는 친환경 신재생에너지이다. 보일러 및 공기열, 지하수 및 하수, 하천수 및 해수 등 열원별 성능효율계수 및 소요에너지량을 비교하면, 외기 대비 여름철에는 수온이 낮고 겨울철에는 높은 특성을 활용하여 히트펌프 운전 효율을 극대화함으로써 화석연료 직접 연소 대비 최대 30%의 에너지를 절감할 수 있음을 알 수 있다. 실행모델을 제안하면 첫 번째, 수열 친화 도시 경상남도 사천시 적용 모델로, 고성천연가스발전 온배수, 남강의 하천수, 사천·고성 정수장, 하수처리장, 지하수 수열 자원을 종합 연계한 거점형 친환경 열공급 네트워크를 구축이 가능하다. 두 번째로 에너지 독립 도시가 될 수 있는 서울시 성동구 모델로, 한강(2,889만t/일), 중랑물재생센터(100만t/일), 뚝도정수장(44만t/일), 중랑천, 청계천 등을 연계하면, 다른 지자체보다 풍부한 수열 자원을 보유하고 있다. 수열 자원을 활용한 기대효과를 살펴보면, 성동구 전체 난방 가구 수요의 100%를 충족할 수 있고, 연간 도시가스 수입 약 3억 달러(3,082억 Nm³) 절감 및 연간 1,151만 tCO_2의 온실가스 감축 효과로 RE 100 달성을 기대할 수 있다.

Key Words : 수열에너지(Hydrothermal energy), 에너지 독립(Energy independent), 탄소중립(Carbon neutrality) 재생에너지 100%(Renewenergy 100), 건물에너지 절감(Building energy saving)

† Corresponding author, E-mail: shk@anyang.ac.kr

후 기
본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 수열에너지 활용기술 및 에너지믹스 기술개발 사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호: RS-2026-25501383)

RER-O-14

Landsat 지표면온도와 지상관측자료를 활용한 전국 단위 고해상도 하천수온 예측을 위한 통계 분석

Statistical Analysis for Nationwide High-Resolution River Water Temperature Prediction Model Using Landsat Land Surface Temperature and Station Observations

김준교*, 오명찬**, 윤창열**, 박형동***,****†
Junkyo Kim*, Myeongchan Oh**, Chang-Yeol Yun**, Hyeong-Dong Park***,****†
*서울대학교 에너지시스템공학부, **한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실,
***서울대학교 에너지자원공학과, ****서울대학교 에너지자원신기술연구소

Abstract : 수열에너지의 효율적인 활용을 위해서는 전국 하천을 대상으로 한 수열에너지 자원의 공간적 분포와 잠재량 파악이 필요하다. 이를 위한 기초자료로 고해상도 하천 수온 정보가 필요하나, 현재 하천 수온 자료는 일부 관측지점 중심으로 제공되고 있어 전국 하천을 대상으로 연속적인 수온 공간분포를 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 위성영상과 기상 및 하천 수온관측자료를 결합하여 전국 하천의 고해상도 수온지도를 생산할 수 있는 기반기술을 개발하고자 한다. Landsat 기반 고해상도 지표면온도(Land Surface Temperature, LST)데이터를 기상청 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 대기온도 및 물환경정보시스템 자동수질측정망 하천 수온 자료와 연계하여 대기온도와 하천 수온 예측을 위한 통계 분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 위성자료와 지상 관측자료를 연계한 고해상도 하천 수온 추정 방법론을 구축하고, 이를 전국 단위 수열에너지 잠재량의 공간적 평가를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

Key Words : 하천수온(River water temperature), 지표면온도(Land surface temperature), 대기온도(Air temperature) 수열에너지(Hydrothermal energy), 온도지도(Temperature map)

† Corresponding author, E-mail: hpark@snu.ac.kr

후 기
이 성과는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25501383)

RER-I-2

재생e 보급전망의 전기본 반영 현황

Renewable Energy Targets in the Basic Plan for Long-term Electricity Demand and Supply

김준한*†
*한국전력거래소 에너지계획처

Abstract : 그간 전력수급기본계획 수립시 적용되었던 재생e 보급전망의 내용, 기준, 절차, 방법 등과 12차 전기본의 재생e 보급전망 반영결과 등에 대하여 설명합니다. 주용 강의내용은 전력수급기본계획 수립체계, 재생e 보급전망의 전기본 반영현황, 12차 전기본의 재생e 보급전망, 향후 검토과제 등입니다.

Key Words : 전력수급기본계획, 재생에너지 보급목표, 12차 전기본

† Corresponding author, E-mail: kjoonhan@kpx.or.kr

RER-O-15

기후전망 앙상블 기반 일별 신뢰도 급전을 이용한 재생에너지 중심 전력계통 공급적정성 스트레스 테스트

Climate-informed Adequacy Stress Testing of Renewable-dominant Power Systems using Daily Reliability Dispatch Across Projection Ensembles

석의찬*, 변지은**†, 송준호*†
Uichan Seok*, Ji-Eun Byun**†, Junho Song*†
*서울대학교 건설환경도시공학부, **임페리얼 칼리지 런던 건설환경공학부

Abstract : 태양광과 풍력 등 변동성 재생에너지의 확대는 기상조건과 송전망 제약에 따라 전력계통 공급적정성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 장기 기후전망 앙상블을 활용한 일별 신뢰도 급전 프레임워크를 제안하였다. 영국의 29개 버스 전력망을 대상으로 UK Climate Projections 2018의 11개 앙상블 멤버(2020–2069)를 활용하여, 일사량·기온·풍속으로부터 태양광 및 풍력 발전가능량을 산정하고 기온 기반 최대전력수요와 결합하여 부하차단을 최소화하는 DC 최적조류 기반 신뢰도 급전을 수행하였다. 공급부족 위험은 Loss of Load Probability와 95% Conditional Value-at-Risk를 이용하여 평가하였으며, 수요 수준, 송전망 제약, 태양광 및 풍력 설비의 공간적 배치, 그리고 수요와 재생에너지 발전가능량의 일별 결합관계를 비교하였다. 분석 결과, 수요 증가와 송전망 제약은 공급부족 위험을 증가시켰으며, 동일한 총 재생에너지 설비용량에서도 공간적 배치에 따라 위험이 크게 달라졌다. 기준 수요조건에서 균등 배치는 기존 배치 대비 LOLP와 CVaR를 각각 34.9%와 27.1% 감소시켰다. 또한 위험은 겨울과 가을에 집중되었으며, 두 계절에서 수요와 태양광·풍력 발전가능량의 동일 일자 결합관계를 유지한 경우 이를 분리한 경우보다 높은 위험이 나타났다. 본 연구는 재생에너지 중심 전력계통의 공급적정성 평가에서 발전설비의 공간적 배치, 기상 의존성 및 송전망 제약을 통합적으로 고려할 필요성을 보여준다.

Key Words : 재생에너지 자원량 평가(Renewable energy resource assessment), 기후전망 앙상블(Climate projection ensemble), 전력계통 공급적정성(Power-system adequacy), 복합기상 의존성(Compound weather dependence), 송전망 제약(Transmission constraints)

† Corresponding author, E-mail: j.byun@imperial.ac.uk, junhosong@snu.ac.kr

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원(KIAT)의 국제공동기술개발사업(EUREKA Network, 과제번호 P0030038)의 지원을 받아 수행되었습니다.

RER-O-16

수열에너지 잠재량 산정을 위한 전국 표층수온 예측 및 지도화 기초 연구

A Basic Study on Nationwide Surface Water Temperature Prediction and Mapping for Hydrothermal Energy Potential Assessment

오명찬*†, 김보영*, 강민구*, 박영석*, 윤창열*
Myeongchan Oh*†, Boyoung Kim*, Mingu Kang*, Youngseok Bak*, Changyeol Yun*
*한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실

Abstract : 탄소중립을 위한 열에너지 전환에서 수열에너지는 하천과 호소라는 이미 존재하는 자원을 활용한다는 점에서 매력적인 선택지이며, 특히 수요처가 밀집한 도심 하천 인근에서 높은 활용도를 기대할 수 있다. 그러나 수열에너지의 보급은 어디에 얼마나 이용 가능한 열이 있는지를 아는 것에서 출발하는데, 그 기준이 되는 표층수온은 지금까지 지점 관측에 의존해 왔다. 국내 수질 측정망은 하천 본류의 저지대에 편중되어 있어 산지 소하천과 상류 수계의 수온 분포를 담아내지 못하며, 관측 지점을 단순 공간보간하여 지도를 만들 경우 관측망의 구성이 곧 지도의 결과가 되어 버리는 한계가 있다. 결국 잠재량 산정을 위해서는 관측망에 얽매이지 않고 전국을 균일한 격자로 채우는 별도의 추정 체계가 필요하다. 본 연구에서는 위성 지표온도와 재분석 기상자료를 입력으로 지점 수온을 학습하여 전국 수체 격자의 표층수온을 추정하고 연평균 지도를 생산하는 방법을 제시한다. 수체는 대기나 지표면과 달리 열관성이 커서 순간의 기온이나 지표온도가 아니라 그 누적 이력이 수온을 결정하므로, 열완화 과정을 반영한 시간지표를 입력으로 삼는 것이 핵심이 된다. 또한 변수가 많은 기계학습과 변수가 적은 선형모형을 함께 평가하고, 학습에 사용하지 않은 독립 관측망과 관측 공간보간 지도를 기준선으로 두어 산출된 지도의 신뢰도를 여러 축에서 점검하였다. 이 과정에서 어떤 평가 기준을 택하느냐에 따라 모형의 우열과 지도의 해석이 달라질 수 있음을 확인하였으며, 이는 잠재량 지도를 실제 정책과 사업에 활용할 때 반드시 함께 고려되어야 할 부분이다. 본 연구를 바탕으로 국내 수열에너지 잠재량 평가와 입지 선정을 위한 공간정보 기반이 마련될 수 있기를 기대한다.

Key Words : 수열에너지(Hydrothermal energy), 표층수온(Surface water temperature), 위성원격탐사(Satellite remote sensing), 기계학습(Machine learning), 열관성(Thermal inertia)

† Corresponding author, E-mail: amir117@kier.re.kr

후 기
이 성과는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25501383)

RER-O-17

공공데이터 기반 하천수열 에너지 전국 자원지도 구축 및 잠재량 평가

Nationwide Resource Mapping and Potential Assessment of River Water Thermal Energy Using Public Data

김보영*†, 윤창열*, 오명찬*, 박영석*, 강민구*, 김창기*
Boyoung Kim*†, Chang-yeol Yun*, Myeongchan Oh*, Youngseok Bak*, Min-gu Kang*, Chang Ki Kim*
*한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실

Abstract : 탄소중립 이행과 냉난방 부문의 전기화가 진행됨에 따라, 히트펌프의 열원으로서 공기열 대비 온도 안정성이 높은 수열에너지의 활용 가치가 부각되고 있다. 본 연구는 공공데이터 기반 하천수열 자원지도 구축 방법론을 제시한 선행 연구를 발전시켜, 전국 단위의 데이터 인프라 구축과 잠재량 평가 체계의 고도화를 수행하였다. 유량 자료는 공공데이터포털(원자료: 국가수자원관리종합정보시스템, WAMIS)의 시간별 관측자료 약 79만 행을 수집하여 품질관리를 수행하였으며, 전체 1,075개 관측소 중 전 기간 0값이 기록된 관측소를 제외한 716개소를 유효 관측소로 확보하고 결측 및 0값 자료(35.95%)를 처리하였다. 기상 자료는 KIER 국가참조표준 표준기상년(TMY) 데이터를 활용하였고, 하천 공간정보는 선행 100 m 해상도 태양광 자원지도 연구의 하천 벡터에 호소·저수지 정보를 통합하여 전국 수체(水體) 레이어를 구축하였다. 수요 측면에서는 탄소공간정보지도의 도시가스 및 지역난방 자료를 활용하여 난방 열수요의 공간 분포를 파악하고, 냉방 수요는 TMY 기반으로 추정하였다. 잠재량은 물의 밀도, 비열, 유량 및 허용 온도차(ΔT)를 고려한 열회수량 산정식을 기반으로 이론적·기술적·시장 잠재량의 3단계 체계로 정의하였으며, 이를 통해 전국 유량 분포도, 하천-호소 통합 수체 지도, 수요지 열수요 분포도 등 자원지도의 기반 산출물을 도출하였다. 본 연구는 정밀 수온 관측이 제한된 여건에서 공공데이터만으로 전국 하천수열 자원의 공간적 평가 기반을 구축하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 위성 기반 표면수온 및 취수심 수온 자료와 환경 제약조건을 통합하여 실제 적용 가능한 이용 잠재량 평가로 확장할 계획이다.

Key Words : 하천수열에너지(River water thermal energy), 자원지도(Resource map), 잠재량 평가(Potential assessment), 공공데이터(Public data), 히트펌프(Heat pump)

†Corresponding author, E-mail: bykim@kier.re.kr

후 기

본 연구는 한국환경산업기술원의 환경기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호: RS-2026-25501383).

RER-O-18

서울 상수도 수열자원의 격자 분석과 행정구역별 통계분석 및 시각화

Grid-Based Analysis, District-Level Statistics, and Visualization of Water-Supply Thermal Resources in Seoul

박영석*, 강민구*, 오명찬*, 김보영*, 윤창열*†
Youngseok Bak*, Mingu Kang*, Myeongchan Oh*, Boyoung Kim*,
Chang-Yeol Yun*†
*한국에너지기술연구원

Abstract : 도시 상수도의 수열에너지를 활용하려면 자원의 공간 분포와 계절별 열교환 조건을 함께 파악해야 한다. 본 연구는 서울 상수도 수열자원을 500m 격자와 1시간 간격으로 분석하고 자치구별 자원·건물 통계와 서울 시내 건물 주변의 상수 수열 잠재량을 조회하는 2D·3D 시각화 환경을 구축하였다. 유량과 수온은 2025년 서울 6개 정수센터의 일별 송수량과 팔당 원수의 시간별 수온을 사용하였다. 격자화한 서울 전역의 관로 자료를 바탕으로 물에서 열을 회수하는 온열과 물로 열을 방출하는 냉열을 구분하여 수온 조건별 자원량을 산정하였다. 그 결과 유효 500m 격자 2,088개 중 상위 약 10%가 배분 자원량의 50.3%를 차지하였다. 냉열 활용 수온 상한을 25°C로 두면 6~9월 냉방기 유효시간 2,927시간 중 55.5%에서 냉열 이용이 가능하였고 상한을 28°C로 높이면 이 비율은 84.1%로 늘었다. 자치구별 자원 몫은 건축물대장 기반 연면적 몫과 비교하고 건물 용도·규모별 분포도 함께 집계하였다. 향후 열 수요와 연계하여 입지별 이용 가능량 평가로 확장하고자 한다.

Key Words : 수열에너지(Water thermal energy), 자원 잠재량(Renewable Energy Resources), 온도 제약(Temperature constraint), 건물 연계 시각화(Building-linked visualization)

† Corresponding author, E-mail: yuncy@kier.re.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행한 수열에너지 연구개발과제의 결과입니다. (과제번호 : RS-2026-25501383)



Oral Session

에너지저장 및 섹터커플링
Energy Storage System & Sector Coupling (ESS&SC) Session

ESS&SC-O-1

20 Ah $LiFePO_4$ 파우치 셀의 냉각수 유동 중단 대응을 위한 대향면 CPCM-액체 냉각 하이브리드 열관리 시스템의 수치적 연구

Numerical Study of an Opposed-Face CPCM–Liquid Cooling Hybrid Thermal Management System for a 20 Ah $LiFePO_4$ Pouch Cell under Coolant-Flow Interruption

무하마드 다일*, 김영원*†
Muhammad Dail*, Young Won Kim*†
*한국생산기술연구원 에너지나노그룹

Abstract : Active liquid cooling of lithium-ion batteries becomes ineffective during coolant-flow interruption, while conventional CPCM–liquid cooling systems may consume their latent-heat reserve during normal operation. This study numerically evaluates an opposed-face configuration comprising a 2 mm copper-foam/RT28HC composite on one face of a 20 Ah $LiFePO_4$ pouch cell and an aluminum fishbone-channel cold plate on the opposite face. A conjugate heat-transfer model incorporating the enthalpy–porosity method was solved in ANSYS Fluent at 5C and 298.15 K using a transient heat source reconstructed from published experimental data. Under uninterrupted cooling, the hybrid system limited the peak cell temperature to 300.85 K, compared with 302.24 K for liquid cooling alone and 308.39 K for the uncooled cell, while reducing the face-to-face temperature difference by 76%. After coolant flow was interrupted at 200 s, the peak temperature reached 301.63 K, compared with 304.30 K for liquid cooling alone. It required 158 s and 334 s to rise by 1 K and 2 K, respectively. CPCM melting began at 408 s, with more than 80% of the latent-heat capacity remaining unused at the end of discharge. The preserved reserve provides a passive thermal margin for controlled shutdown following cooling-system failure.

Key Words : 배터리 열관리(Battery thermal management), 복합상변화물질(Composite phase change material), 액체 냉각(Liquid cooling), 냉각수 유동 중단(Coolant-flow interruption), 잠열 예비(Latent thermal reserve)

† Corresponding author, E-mail: ywkim@kitech.re.kr

후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Climate, Energy & Environment(MCEE) of the Republic of Korea (No. RS-2024-00441895).

ESS&SC-O-2

계절별 운전상태를 고려한 집합 히트펌프의 주파수응답 가용용량 산정 및 계통 동특성 평가

Assessment of Available Frequency-Response Capacity and Power-System Dynamics of Aggregated Heat Pumps Considering Seasonal Operating States

최우영*†, 김고은*,**, 이태승*
Woo Yeong Choi*†, Go-Eun Kim*,**, Tae-Seung Lee*
*한국전기연구원, **전북대학교 전기공학과

Abstract : 재생에너지 확대에 따른 전력계통의 주파수 변동에 대응하기 위해 집합 히트펌프의 수요측 유연성 활용이 요구된다. 집합 히트펌프의 주파수응답 기여도는 설비의 정격용량뿐 아니라 사고 직전 운전 전력, 부하조정 가능범위 및 제어 응답특성에 의해 결정된다. 특히 계절별 전력소비와 열·축열 관련 운전 제약의 변화는 응답에 참여할 수 있는 용량을 변화시키므로, 운전상태 기반의 가용용량 산정과 계통 동특성 해석을 연계할 필요가 있다. 본 논문에서는 계절별 운전상태를 고려하여 집합 히트펌프의 주파수응답 가용용량을 산정하고, 대표 운전조건에서 실현되는 전력응답과 계통 주파수 효과를 평가하는 방법을 제안한다. 먼저 춘·추, 하계 및 동계의 전력소비 프로파일을 기반으로 운전 시나리오를 구성하고, 최소·최대 제어전력과 열에너지저장장치(TES)의 운전가능상태를 반영하여 부하조정 가용용량(AFC)을 계산한다. 전체 시나리오의 AFC 경험적 분포에서 저·중·고 가용수준에 대응하는 대표 운전상태를 선정한 후, 기존 집합 히트펌프 동적 부하모델인 EHPLOD를 적용하여 PSS/E 사고해석을 수행한다. 각 대표조건에서는 동일한 초기 운전상태와 외란에 대해 제어 활성화 및 비활성화 케이스를 비교하고, 전력응답으로부터 사고 후 평가시점별 전달률과 실현 전달용량(DFC)을 산출한다. 또한 주파수 최저점과 회복특성의 변화를 분석하여 가용용량이 계통 주파수 응답에 기여하는 정도를 평가한다. 제안한 방법은 계절별 가용용량 평가와 대표조건의 동특성 검증을 연결함으로써, TES/P2H 자원의 운전조건별 주파수응답 활용성을 정량적으로 검토하는 절차를 제공한다.

Key Words : 집합 히트펌프(Aggregated heat pumps), 가용 유연성 용량(Available flexibility capacity), 수요반응(Demand response), 열-전력 연계(Power-to-heat), 열저장장치(Thermal energy storage.)

†Corresponding author, E-mail: choiwy@keri.re.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (과제번호 : RS-2024-00419184).

ESS&SC-O-3

MILP-Based Dispatch Optimization and Techno-Economic Evaluation of a Power-to-Heat Building Energy System with Demand Response

Muhammad Farooq*,**, Byung-Ju Lim**, Sung-Hoon Cho**, Ga-Ram Lee**, Si-eun Kwon*,**, Chang-Dae Park*,**†

*University of Science and Technology (UST),

** Korea Institute of Machinery and Materials, Carbon Neutral Energy Machinery Research Institute

Abstract : This study develops a mixed-integer linear programming (MILP) framework for optimizing the operation of a heat-dominated power-to-heat (P2H) building energy system in South Korea. The existing system supplies space heating and domestic hot water using separate heat sources and has no thermal storage, which limits operational flexibility. In contrast, the upgraded system introduces heat pumps and a stratified thermal energy storage (TES) tank to convert surplus electricity into heat, store it, and flexibly supply it to both space heating and domestic hot water demands. This transforms the original heat-source-specific configuration into an integrated P2H system. A full-year, hourly energy-balanced model is developed in python and validated against a TRNSYS model of the proposed system. The MILP dispatch is then compared with a rule-based dispatch strategy under the same equipment configuration, time-of-use tariffs, and demand response (DR) requirements. The proposed upgrade reduces the levelized cost of heat from 130.6 to 78.2-79.8 $/MWh, while MILP optimization further improves the annual operating economics without increasing installed capacity. A discounted cash-flow analysis is also conducted to evaluate the investment. Future work will extend the framework to multi-objective optimization and rolling-horizon MILP using load forecasting.

Key Words : Power-to-heat (P2H), Mixed-integer linear programming (MILP), Dispatch optimization, Thermal energy storage (TES), Demand response, District heating

† Corresponding author, E-mail: parkcdae@kimm.re.kr

Acknowledgments

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and by financial resources granted by the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (RS-2024-00419184 and 00432726)

ESS&SC-O-4

히트펌프-TES 연계 건물군 열네트워크 실증시스템 구축 및 운전 최적화

Development and Operational Optimization of a Building Thermal Network Demonstration System Integrating Heat Pumps and Thermal Energy Storage

최원철*†, 조장현*
Won-Chul Choi*†, Jang-hyun Cho*
*선다코리아 주식회사

Abstract : 본 연구에서는 건물군의 열에너지 수요관리 및 전력부하 유연성 확보를 목적으로 히트펌프와 열에너지저장시스템(TES)을 연계한 열네트워크 실증시스템을 설계·구축하였다. 실증대상지의 기존 열원, 냉난방 설비 및 에너지 수요 특성을 분석하여 고온·중온 및 공기열원 히트펌프와 TES 등 열 생산·저장 설비의 용량과 운전조건을 선정하고, 열생산·저장·공급이 연계되는 열네트워크 공정과 배관·전기 계통을 설계하였다. 실증시스템은 다수 실증사이트를 대상으로 실증사이트 내 수요자원으로 구성하였으며, 설비 간 연계운전 로직을 통해 시스템 운전 특성을 분석 중이다. 향후 실증운전 데이터를 기반으로 히트펌프와 TES의 충·방열 운전 및 열 공급 스케줄을 최적화하고, 피크전력 저감과 열에너지 수요관리 효과를 검증함으로써 건물군 단위 열네트워크의 효율적인 운영기술을 확보하고자 한다.

Key Words : 열에너지 수요관리(Thermal Energy Demand Management), 열네트워크(Thermal Network), 히트펌프(Heat Pump), 열에너지저장시스템(Thermal Energy Storage, TES), 운영 최적화(Operational Optimization)

†Corresponding author, E-mail: sundakorea@hanmail.net

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. RS-2024-00419184)



Poster Session

태양광에너지 Photovoltaic Energy (PVE) 209

건물에너지설비 Building Energy Systems (BES) 257

제로에너지 건물 Zero Energy Buildings (ZEB) 261

건축환경 Building Environment Engineering (BEE) 265

태양열융합 Solar Thermal Convergence (STC) 269

신재생융합 Renewable Energy Convergence (REC) 273

자원량평가 Renewable Energy Resources (RER) 281

에너지저장 및 섹터커플링 Energy Storage System & Sector Coupling (ESS&SC) 282

태양수소에너지 Solar to Hydrogen (S2H) 292

PVE-P-1

태양광 모듈의 전과정평가를 위한 데이터 분류 및 정의에 대한 연구

A Study on Classification and Definition of Life Cycle Inventories(LCI) Data for Photovoltaic Modules

송다혜*, 문정민*, 김창헌*†
Dahye Song*, Jungmin Moon*, Changheon Kim*†
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract : 전 세계적으로 기후변화 위기에 대응하기 위해 재생에너지 보급률을 늘리고 있다. 국제에너지기구(IEA)에서는 2025년 기준 전체 재생에너지 설비 증설량 중 태양광 시스템이 75% 이상에 해당한다고 보고하였으며, 국내에서도 신재생에너지 발전의 상당 부분을 태양광 발전이 차지하고 있다. 태양광 분야에서는 글로벌 환경규제가 강화됨에 따라 모듈 성능뿐만 아니라 모듈의 제조와 폐기를 포함한 전주기에서의 탄소 배출량 관리가 하나의 경쟁력으로 자리 잡고 있다. 유럽연합(EU)의 경우 지속 가능한 제품을 위한 에코디자인 규정(Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR)과 유럽 수출 시 생산 과정에서 발생한 탄소 배출량에 따라 비용을 부과하는 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)를 시행하고 있다. 국내에서는 한국에너지공단을 통해 '태양광 모듈 탄소검증제'를 운영하며 제품별 탄소 등급을 1~5로 구분하여 제조 과정에서의 탄소 배출량을 정량적으로 평가하고 있다. 그러나 '태양광 모듈 탄소검증제'의 경우 생산부터 폐기에 속하는 cradle-to-grave가 아닌, 모듈 제조 과정까지의 탄소 배출량을 기준으로 한다. 따라서 국내 태양광 모듈의 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 위해서는 생산부터 폐기 또는 재사용 공정을 포함한 국내 실정에 적합한 탄소 배출량 산출 기준에 대한 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 한국형 저탄소 태양광 모듈의 LCA 기반을 마련하기 위해 원재료 채굴부터 모듈 생산 및 사용종료 단계까지의 단계별 필요 산정 데이터를 정리하였다. 또, GHG Protocol(Greenhouse Gas Protocol)의 scope 분류 체계에 따라 전주기 요소를 분류하여 국내 실정에 맞는 태양광 발전 전과정목록(LCI) 데이터를 정의 및 산정하고자 한다.

Key Words : 저탄소태양광모듈(Low-carbon solar module), 탄소발자국(Carbon footprint), 수명주기(Life cycle), 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA), 사용종료단계(End-of-Life)

† Corresponding author, E-mail: chkim@kopti.re.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2026-25615802)

PVE-P-2

태양전지 선별 기준이 태양광 모듈 출력 편차에 미치는 영향

Effect of Solar Cell Sorting Criteria on Photovoltaic Module Power Variation

배수현*†
Soohyun Bae*†
*한국에너지기술연구원 태양광연구단

Abstract : 태양광 모듈은 다수의 태양전지가 전기적으로 연결되어 구성되므로 개별 태양전지의 전기적 특성 편차는 셀 간 mismatch를 발생시키며, 최종 모듈의 출력과 출력 분포에 영향을 미칠 수 있음. 특히 동일한 출력 등급으로 분류된 태양전지에서도 단락전류(Isc), 개방전압(Voc), 충진율(FF) 등의 세부 전기적 특성이 서로 다를 수 있으므로, 단순한 최대출력(Pmax) 기반 선별만으로는 모듈 출력 편차를 효과적으로 제어하기 어려울 수 있음. 본 연구에서는 태양전지의 전기적 특성 분포를 분석하고, 셀 선별 방법에 따른 모듈 출력 및 출력 편차의 변화를 비교하였음. 다수의 태양전지에 대해 Isc, Voc, FF 및 Pmax를 측정하여 각 인자의 분포와 상관관계를 분석하였으며, 이후 무작위 조합과 Pmax 및 주요 전기적 인자를 고려한 선별 조건을 적용하여 모듈을 제작하였음. 제작된 모듈의 전기적 특성을 비교한 결과, 셀의 Pmax 범위를 제한함으로써 모듈 출력 편차 감소 효과를 확인하였음. 최종적으로 셀의 세부 전기적 특성과 모듈 내 셀 조합을 함께 고려하는 선별 전략이 필요함을 확인하였다.

Key Words : 선별(Sorting), 태양광모듈(Photovoltaic module)

† Corresponding author, E-mail: soohyunbae@kier.re.kr

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2023-00303745, RS-2025-02317319).

PVE-P-3

태양광 모듈 전주기 이력관리를 위한 고장 유형 분류체계 연구

Study on a Classification System for Photovoltaic Module Life Cycle Management

송다혜*, 문정민*, 김창헌*†
Dahye Song*, Jungmin Moon*, Changheon Kim*†
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract : 지속가능한 에너지 전환과 전력 부문의 탈탄소화가 전 세계적으로 가속화됨에 따라 태양광 발전은 핵심 재생에너지원으로 자리매김하고 있다. 태양광 발전설비의 보급 확대와 대규모화가 지속되면서 발전량 증대뿐만 아니라 설비의 안정적 운영, 유지보수 비용 절감 및 장기 신뢰성 확보의 중요성도 함께 증가하고 있다. 특히 태양광 모듈에서 발생하는 성능 열화와 다양한 형태의 고장은 발전량 감소와 경제성 저하로 직결되므로, 설비의 상태를 지속적으로 진단하고 이상 징후를 조기에 탐지할 수 있는 기술의 필요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 태양광 모듈의 고장 진단 및 장기 신뢰성 평가를 체계화하기 위해 선행연구를 기반으로 주요 고장 유형과 발생 원인을 분류하고, 각 고장에 적용 가능한 진단기술을 비교·분석하였다. 특히 육안검사 및 전기적 특성 분석과 같은 기존 진단방법을 비롯하여 열화상 이미지 분석, 머신러닝 기반 고장 분류 및 이상탐지, IoT 기반 실시간 모니터링 등 최신 진단기술의 적용 가능성을 검토하였다. 이를 통해 개별 고장 탐지를 넘어 고장 심각도 평가, 성능 열화 추적 및 잔여수명 예측으로 확장 가능한 진단 프레임워크의 구성 방향을 제시하였다.

Key Words : 태양광모듈(Photovoltaic Module), 인공지능(Artificial intelligence, AI), 수명주기(Life cycle), 가속 시뮬레이션(Acceleration simulation), 재활용(Recycling)

† Corresponding author, E-mail: chkim@kopti.re.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2026-25615802)

PVE-P-4

열화 가속 모델을 이용한 태양광 모듈 수명주기 시뮬레이션 연구

Study on a Life Cycle Acceleration Simulation with Degradation Acceleration Model

김창헌*†, 김주희**, 문정민*
Changheon Kim*†, Ju-Hee Kim**, Jungmin Moon*
*한국광기술원 AI에너지연구센터, **(주)동서기공 연구개발본부

Abstract : 태양광 발전설비의 보급 확대와 함께 장기간 운영된 태양광 모듈의 성능 저하와 잔존수명 예측에 대한 중요성이 증가하고 있다. 특히 최근에는 모듈의 열화가 단순한 경년변화뿐만 아니라 온도, 습도, 일사량 등 복합적인 환경 스트레스에 의해 가속될 수 있다는 점에서, 물리적 열화 메커니즘과 데이터 기반 예측기법을 결합한 수명예측 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 기후변화에 따른 장기적인 운전환경 변화를 고려한 모듈 신뢰성 평가와 수명종료 시점 예측은 태양광 발전설비의 유지관리 및 재사용·재활용 의사결정을 위한 핵심 요소로 부각되고 있다. 본 연구에서는 장기간 옥외환경에서 운전된 태양광 모듈의 열화 특성을 기반으로 물리적 열화 가속모델과 머신러닝을 결합한 수명주기 시뮬레이션 방법을 제안한다. 분석 대상은 2004년 설치되어 2022년 철거된 초기 정격출력 75 W급 실리콘 태양광 모듈이며, 철거 시 평균 출력은 48.5 W로 측정되었다. 광주지역의 기온, 상대습도 및 일사량 데이터를 모듈의 전기적 특성 변화와 연계하고, 온도 스트레스에 따른 열화를 표현하는 Arrhenius 모델과 온도·습도의 복합 영향을 고려하는 Peck 모델을 적용하였다. 또한 XGBoost, Random Forest 및 선형회귀 등의 데이터 기반 회귀 모델을 적용하여 환경조건과 출력 저하 간의 관계를 분석하고, 물리모델과 데이터 기반 모델을 연계하여 장기 출력 저하와 모듈 수명을 예측하였다. 아울러 RCP 4.5 및 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 기온과 습도 변화가 모듈의 열화 및 수명에 미치는 영향을 분석하였다.

Key Words : 태양광모듈(Photovoltaic Module), 인공지능(Artificial intelligence, AI), 수명주기(Life cycle), 가속 시뮬레이션(Acceleration simulation), 재활용(Recycling)

† Corresponding author, E-mail: chkim@kopti.re.kr

후 기
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00358809)

PVE-P-5

우주용 태양광 모듈을 위한 필름 기반 초경량 모듈 소재 및 공정

Film-Based Materials and Fabrication Processes for Ultralight Space Photovoltaic Modules

류준*, 박예랑*, 권다영*, 한재익*, 백하늘*, 김재현*, 박노창*, 이용환*†
Jun Ryu*, Yerang Park*, Da Young Kwon*, Jae-ik Han*, Ha Neul Baek*, Jaehyeon Kim*, Nochang Park*, Yonghwan Lee*†
*한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터

Abstract : 우주용 유연 태양광 모듈은 고에너지 방사선, 진공 및 반복적인 열사이클 환경에서 장기 신뢰성을 확보해야 한다. 지상용 태양광 모듈에 널리 사용되는 ethylene vinyl acetate(EVA)는 방사선에 의한 변색과 화학적 열화에 취약하다. 반면, polydimethylsiloxane(PDMS)은 우수한 광투과성, 유연성 및 내방사선 특성을 갖춰 대체 봉지재로 주목받고 있으나, 고분자 보호 필름과의 낮은 접착력으로 인해 계면 박리가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 필름 기반 초경량 우주용 태양광 모듈 구현을 위해 봉지 소재의 계면 구조와 경화 공정을 최적화하였다. 먼저, perhydropolysilazane(PHPS) 기반 딥코팅 공정을 통해 polyethylene terephthalate(PET) 필름 표면에 SiO_2 기반 무기층을 형성하여 PDMS와의 계면 접착력을 향상시켰다. 그러나 PDMS 경화 과정에서 발생하는 기체 부산물로 인해 미세 공극이 형성되어 봉지 구조의 신뢰성을 저해할 가능성이 확인되었다. 이를 억제하기 위해 기체 방출과 PDMS 가교 반응을 조절하는 다단계 온도 제어 경화 공정을 개발하였다. 최적화된 공정을 적용한 결과, 박리시험에서 계면 접착력 향상을 확인하였으며, 미세 공극 없이 안정적인 계면을 형성하였다. 또한, 연속식 대면적 코팅 공정을 구축하여 공정 확장성을 검토하고, 최적화된 PET/SiO_2/PDMS 구조를 적용한 III-V 화합물 태양전지 기반 유연 모듈을 제작하였다. 제작된 모듈은 높은 비출력과 기계적 유연성을 나타냈으며, 이를 통해 제안한 필름 기반 초경량 봉지 소재 및 공정의 차세대 우주용 태양광 모듈 적용 가능성을 제시하였다

Key Words : 우주용 태양광 모듈(space photovoltaic module); 초경량 차폐 필름(ultralight shielding film); 유연 태양광 모듈(flexible photovoltaic module); PDMS 봉지재(PDMS encapsulant); PHPS 유래 SiO_2(PHPS-derived SiO_2); 계면 접착력(interfacial adhesion); 무기포 봉지(bubble-free encapsulation)

† Corresponding author, E-mail: ylee@keti.re.kr

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2022-NR068563).

PVE-P-6

클래스 불균형을 고려한 태양광 모듈 전계발광 영상의 다중 클래스 결함 분할 모델 개발

Development of a Class-Imbalance-Aware Multi-Class Defect Segmentation Model for Photovoltaic Electroluminescence Images

문정민*, 김창헌*†
Jungmin Moon*, Changheon Kim*†
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract : 태양광 모듈의 전계발광(Electroluminescence, EL) 영상은 크랙, 비활성 영역, 부식 및 전극 이상 등 육안으로 확인하기 어려운 셀 내부 결함을 비접촉 방식으로 분석할 수 있어 태양광 모듈의 자동 결함 진단을 위한 주요 데이터로 활용되고 있다. 그러나 실제 EL 영상 데이터는 결함 종류별 발생 빈도의 차이가 크며, 일부 희소 결함 클래스의 학습 데이터가 매우 부족하여 다중 클래스 의미론적 분할 모델이 데이터가 많은 클래스에 편향되는 문제가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 클래스 불균형 환경에서 희소 결함의 분할 성능을 향상시키기 위해 희소 클래스 기반 샘플링, 결함 마스크 기반 선택적 데이터 증강 및 계층적 보조학습을 결합한 다중 클래스 EL 영상 분할 모델을 개발하였다. 제안 모델은 ConvNeXtV2 기반 인코더와 U-Net 디코더를 이용하여 28개 클래스를 분할하고, 학습 과정에서 클래스 출현 빈도를 고려한 Rare-Class Aware Sampling과 희소 결함 중심 영역 학습을 적용하였다. 또한 결함 마스크를 정상 EL 영상 영역에 선택적으로 합성하는 Defect-Aware Copy-Paste 기법을 적용하여 부족한 희소 결함의 학습 기회를 확대하였다. 이와 함께 세부 클래스 분할과 동시에 배경, 셀 구조 및 결함 영역을 구분하는 계층적 보조 분류와 경계 학습을 수행하고, 클래스 불균형을 고려한 손실함수를 적용하였다. 실험에는 28개 클래스로 구성된 EL 영상 데이터셋을 사용하였으며, 학습 2,044장, 검증 65장 및 시험 66장으로 모델 성능을 평가하였다. 시험 데이터 평가 결과 Pixel Accuracy 94.28%, Macro F1-score 76.86%, mIoU 64.84% 및 Weighted F1-score 94.42%를 나타냈다. 특히 시험 데이터에 존재하는 희소 클래스에 대해 Tail F1-score 83.43% 및 Tail mIoU 72.32%를 나타내어 클래스 불균형 환경에서도 희소 결함에 대한 분할 가능성을 확인하였다. 이를 통해 제안 방법이 데이터 수가 제한적인 태양광 모듈 EL 결함의 다중 클래스 분할 성능 향상에 활용될 수 있음을 확인하였다.

Key Words : 태양광 모듈(Photovoltaic Module), 전계발광 영상(Electroluminescence Image), 의미론적 분할(Semantic Segmentation), 클래스 불균형(Class Imbalance), 희소 결함(Rare Defect), 데이터 증강(Data Augmentation)

† Corresponding author, E-mail: chkim@kopti.re.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2024-00358809).

PVE-P-7

양이온 교환과 공정 중 황 증착을 통한 100℃ 저온 공정 기반 $AgBiS_2$ p-i-n 태양전지

$AgBiS_2$ p-i-n Solar Cells Processed at 100°C through Cation Exchange and In Situ Sulfur Deposition

최민호*, 권나영*, 나누리*, 김수환** 박종성*,**†
Minho Choi*, Nayeong Kwon*, Nuri Na*, Suwhan Kim**, Jongsung Park*,**†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **미래융복합기술연구소

Abstract : Developing low-temperature fabrication routes that eliminate the need for post-sulfurization is an important step toward advancing vacuum-processed $AgBiS_2$ thin film solar cells. Here, we present a sequential thermal evaporation strategy that combines Bi_2S_3/Ag_2S stacked precursors with in-situ sulfur supply to fabricate p-i-n $AgBiS_2$ solar cells without post-sulfurization. Ag incorporation into the pre-deposited Bi_2S_3 layer drives cation exchange, enabling α-$AgBiS_2$ formation at a processing temperature of only 100°C. Concurrent sulfur supply controls the local sulfur chemical environment, mitigating sulfur deficiency and reducing undercoordinated Bi species while strengthening Bi-S bonding. These changes improve the structural and electronic quality of the absorber, facilitating carrier collection and suppressing recombination losses. The optimized devices achieve a power conversion efficiency of 4.35%, with a short circuit current density of 31.8 mA/cm^2 and an open-circuit voltage of 299 mV. By integrating sulfur management into absorber deposition, this approach eliminates the need for a separate sulfurization treatment and establishes a low-temperature fabrication route for lead-free $AgBiS_2$ solar cells, with potential applications in flexible and lightweight photovoltaics.

Key Words : AgBiS2, Thermal evaporation, Cation-exchange

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00257494).
This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (RS-2023-00257494).

PVE-P-8

박막 태양전지를 위한 순차 스퍼터링 및 후속 황화 처리를 통한 $AgBiS_2$ 박막의 화학양론적 조성 제어

Stoichiometric Control of $AgBiS_2$ Thin Films through Sequential Sputtering and Post-Sulfurization for Thin Film Solar Cells

권나영*, 나누리*, 김수환*, 박종성*†
Nayeong Kwon*, Nuri Na*, Suhwan Kim*, Jongsung Park*†
*경상국립대학교 에너지공학과

Abstract : Silver bismuth sulfide (AgBiSs) has rapidly emerged as a promising semiconductor alternative to conventional absorber materials in thin film solar cells. Despite its favorable properties as a absorber, the lack of fabrication processes capable of producing high-quality thin films remains a critical limitation to device reproducibility. In this study, sequential sputtering using Bi_2S_3 and Ag_2S targets was introduced for the first time. This approach substantially broadened the window for stoichiometric control compared with deposition processes based on individual Ag and Bi metals. Subsequent sulfurization further facilitated elemental redistribution and crystal growth, resulting in a nearly stoichiometric sulfur content of 48.35 at% in the thin film. When the optimized absorber layer was incorporated into an n–i–p structured solar cell, the device exhibited an open-circuit voltage (V_{OC}) of 133 mV, a short-circuit current density (J_{SC}) of 6.69 mA cm^{-2}, and a power conversion efficiency of 0.266%. The enhanced current was achieved by alleviating the sulfur deficient state of the initially deposited Ag_2S and Bi_2S_3 precursors through post-treatment. These results demonstrate that sequential sputtering combined with post-sulfurization provides an effective strategy for controlling the stoichiometry of $AgBiS_2$ thin films.

Key Words : Sputtering sequence, AgBiS2 thin film, Sulfurization, Stoichiometric control

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

PVE-P-9

재사용 태양광 모듈 이력관리를 위한 접착형 RFID 태그의 옥외환경 신뢰성 평가

Reliability Evaluation of Adhesive RFID Tags for Reused Photovoltaic Module Traceability under Outdoor Environmental Conditions

류승환*†, 정회경*, 정득영*, 최진호**, 남우준**
SeungHwan Ryu*†, HoeKyeong Jung*, DeukYoung Jung*,
JinHo Choi**, WooJun Nam**
*㈜에이치에스쏠라에너지, **충북테크노파크 차세대에너지센터 태양광산업팀

Abstract : This study evaluated the outdoor reliability of adhesively retrofitted RFID tags for traceability of reused PV modules. Five enclosure materials-ABS, PPS, rigid PVC, PP, and PE-were first compared through damp heat, thermal cycling, and UV exposure tests. Adhesion defects were observed in rigid PVC and PP under damp-heat conditions, while rigid PVC also showed warping and discoloration after thermal cycling. RFID readability was maintained for all materials after the accelerated tests. Based on the combined physical and functional performance, PPS was selected for field demonstration. PPS-enclosed RFID tags were bonded to the rear backsheet of 50 reused PV modules using an HB-050 hybrid polymer adhesive. The modules were exposed to an outdoor rooftop PV environment for 335 days. At the final inspection, all 50 RFID tags remained attached and readable, resulting in a 100% retention rate and 100% read rate. The mean visual and functional degradation index (VFDI) was 98.58. Minor cracking, lifting, deformation, and discoloration were observed in a limited number of specimens, but no functional failure occurred. The mean maximum read distances were 1.30m, 2.30m, and 3.22m at 0°, 30°, and 45°, respectively. These results indicate that PPS-enclosed RFID tags bonded with a hybrid polymer adhesive can maintain stable attachment and communication performance under approximately one year of outdoor exposure. This approach shows potential for lifecycle traceability of reused PV modules.

Key Words : Reused PV module, RFID, Traceability, Retrofit, Outdoor reliability, Hybrid polymer

† Corresponding author, E-mail: ryush@hsse.co.kr

후 기
본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 신재생에너지핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행한「태양광 재활용/재사용 체계구축을 위한 AI 기반 전주기 태양광 모듈 이력관리 기술 개발」연구 과제 결과입니다. (과제번호 : RS-2024-00358809).

PVE-P-10

공동 스퍼터링으로 제작된 $AgBiS_2$ 박막 태양전지의 성능 최적화

Performance Optimization of Co-Sputtered $AgBiS_2$ Thin-Film Solar Cells

나누리*, 권나영*, 김수환**, 박종성*,**†
Nuri Na*, Nayeong Kwon*, Suwhan Kim**, Jongsung Park*,**†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 미래융복합기술연구소

Abstract : Silver bismuth sulfide ($AgBiS_2$) is a promising lead-free absorber material for thin-film solar cells owing to its suitable bandgap, high absorption coefficient, and environmentally benign constituent elements. In this study, $AgBiS_2$ thin films were fabricated by radio-frequency (RF) magnetron co-sputtering using Ag_2S and Bi_2S_3 sulfide targets under substrate-heating conditions without additional post-treatment. The effects of sputtering power on the film composition, microstructure, and photovoltaic performance were systematically investigated. By controlling the Ag_2S:Bi_2S_3 target power ratio, near-stoichiometric $AgBiS_2$ films were obtained over low-, middle-, and high-power regimes. Increasing the sputtering power promoted grain growth and improved crystallinity, whereas the middle-power condition provided the most favorable overall device characteristics. Based on these results, absorbers deposited under the middle- and high-power conditions were incorporated into photovoltaic devices with different configurations. The best performance was obtained from the absorber deposited under the middle-power condition in a p–i–n device employing a mixed MeO-2PACz/MeO-4PACz hole-transport layer, achieving an open-circuit voltage (V_{OC}) of 393 mV. These results indicate that optimization of sputtering power is critical for balancing film composition, structural properties, and photovoltaic performance. This work demonstrates the feasibility of RF magnetron co-sputtering as a vacuum-based route for fabricating $AgBiS_2$ thin-film solar cells without additional post-treatment.

Key Words : $AgBiS_2$ Solar cell(태양전지), Substrate heating(기판가열), Co-Sputtering(진공 증착법)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

PVE-P-11

실물모형 화재시험 데이터 기반 외벽 BIPV 시스템의 화재 거동 특성 분석

Fire Behavior Characteristics of Façade BIPV Systems based on Full-scale Fire Test Data

최민호*, 김규진*, 이상문*, 이승준*†
Minho Choi*, Kyujin Kim*, Sangmoon Lee*, Seungjun Lee*†
*한국건설생활환경시험연구원

Abstract : 제로에너지건축물 의무화에 따라 외벽 BIPV 적용이 확대되고 있으나, BIPV 모듈은 유리, EVA 봉지재, 배면 중공층 등으로 구성되어 일반 외벽 마감재와 다른 화재 거동을 보일 수 있다. 본 연구에서는 KS F 8414에 따라 수행된 외벽 BIPV 시스템 실물모형 화재시험 19건의 결과를 분석하였다. Level 1 및 Level 2 외부 최고온도와 200℃ 도달시간으로 연소실 열원의 적정성을 검토하여 열원 미달 2건을 제외한 17건을 유효 표본으로 선정하였으며, Level 2 외부 최고온도는 시스템 구성에 따라 큰 편차를 보였다. 열전대 시계열 데이터와 시험 영상을 대조한 결과, 화재 진행 중 모듈이 단계적으로 탈락하면서 국부 온도가 급락한 후 재상승하는 패턴과 수직 접합부를 따라 EVA 봉지재의 연소가 확산되는 현상이 관찰되었다. 이는 BIPV 외벽의 화재 확산이 모듈 자체의 가연성뿐만 아니라 모듈의 탈락 및 접합부 구성에도 영향을 받음을 시사하며, 향후 BIPV 외벽 시스템의 화재안전 설계 및 성능평가 기준 마련을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 건물일체형 태양광(BIPV), 실물모형 화재시험(Full-scale fire test), KS F 8414, 화재 확산(Fire spread), 모듈 탈락(Module detachment)

† Corresponding author, E-mail: seungjoon2.lee@kcl.re.kr

후 기
본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025-02313726).

PVE-P-12

내해면 태양광모듈용 기반 POE 봉지재의 물리적 특성 및 접착 성능 개선

Physical Properties and Improvement of POE for Adhesion Performance of Solar Module

윤성민*†, 박민준*, 이칠형*
Sungmin Youn*†, Minjoon Park* and Chil-hyoung Lee*
*한국생산기술연구원

Abstract : As demands for long-term reliability of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules have increased recently, polyolefin elastomers (POE) with superior moisture barrier properties and thermal stability compared to conventional ethylene vinyl acetate (EVA) are gaining attention as the next-generation encapsulant material. However, due to the material properties of POE, its adhesion strength to glass is low, which posed a limitation in applying it to solar modules where strong glass bonding is essential. This study proposes a new optimization strategy that maximizes the interfacial adhesion performance of POE bags by combining the radical initiator (Luperox 101) with the silane coupling agent (VTMS).

Key Words : POE encapsulant, Bifacial PV applications, Radical initiator, Adhesion strength

† Corresponding author, E-mail: aslove1@kitech.re.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 신재생에너지핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25538597).

PVE-P-13

사용후 태양광 모듈을 활용한 저탄소 재활용 공정 및 그린 수소 생산 기술

Low-Carbon Recycling Processes and Green Hydrogen Production Technologies Using End-of-Life Photovoltaic Modules

박예랑*, 류준*, 권다영*, 한재익*, 백하늘*, 김재현*, 이용환*†
Yerang Park*, Jun Ryu*, Da Young Kwon*, Jae-ik Han*, Ha Neul Baek*, Jaehyeon Kim*, Yonghwan Lee*†
*한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터

Abstract : 태양광 발전의 보급 확대에 따라 사용후 실리콘 태양광 모듈의 자원순환과 고부가가치 재활용 기술 개발이 중요해지고 있다. 본 연구에서는 사용후 태양광 모듈을 광열 변환 소재로 재활용하고, 열전 발전과 알칼리 수전해를 연계한 자가구동형 그린 수소 생산 시스템을 구현하였다. 재활용 모듈은 600 nm 파장에서 약 92%의 광흡수율을 나타냈으며, 태양광 조사 시 온도가 74 °C까지 상승하여 흡수된 빛을 열에너지로 변환할 수 있음을 확인하였다. 또한, 40 mm × 40 mm 크기의 재활용 모듈과 열전 발전기(thermo-electric generator, TEG)를 결합한 하이브리드 장치는 1 sun (AM1.5G) 조사 조건에서 최대 2.14 mW의 전기출력을 나타냈다. 나아가 DC/DC 컨버터와 알칼리 수전해 시스템을 통합하여 열전 발전으로 생성된 전력을 수소 생산에 활용하였으며, 외부 전력 공급 없이 구동되는 재생에너지 기반 수소 생산의 가능성을 실험적으로 확인하였다. 이러한 결과는 사용후 태양광 모듈을 광열 변환, 열전 발전 및 수소 생산에 활용할 수 있음을 보여주며, 자원순환과 재생에너지 생산을 연계하는 새로운 업사이클링 경로를 제시한다.

Key Words : 폐태양광 모듈'(end-of-life photovoltaic module), 광흡수체(solar absorber), solar-thermal conversion(광-열 전환), 수소 생산(hydrogen generation)

†Corresponding author, E-mail: ylee@keti.re.kr

후 기
이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00303745,탄소배출이 적고 재활용이 용이한 모듈 소재 및 공정 기술개발)

PVE-P-14

사례기반추론을 활용한 베리오그램 선택 기반 크리깅 기상 보간 및 태양광 발전량 예측

Photovoltaic Power Forecasting Using CBR-Based Variogram Selection and Kriging Meteorological Interpolation

김민준*, 이원철**†
Minjun Kim*, Woncheol Lee**†
*숭실대학교 에너지정책기술융합학과, *숭실대학교 전자정보공학부

Abstract : Accurate meteorological data at photovoltaic (PV) sites are essential for reliable PV power forecasting, but direct observations are often unavailable because of the spatial mismatch between meteorological stations and PV sites. This study proposes a Case-Based Reasoning and Ordinary Kriging (CBR-OK) method for meteorological interpolation and PV power forecasting. A historical case base was constructed using variogram parameters and fitting metrics, and ANN-derived feature importance was applied to case retrieval. Similar cases were retrieved using KNN, and an SVM was employed to classify the variogram model for new meteorological cases. The retrieved variogram parameters were then used for OK interpolation. Evaluation using data from 2023–2025 showed that CBR-OK reduced RMSE by 19.44–20.24% for temperature and 21.41–21.53% for relative humidity compared with the Nearest Neighbor (NN) method. When the interpolated meteorological data were applied to LSTM, Bi-LSTM, and GRU models, the MAE for 1 h-ahead PV power forecasting was reduced by 11.92%, 16.03%, and 15.37%, respectively. These results demonstrate that the proposed CBR-OK method improves meteorological interpolation and provides effective inputs for PV power forecasting.

Key Words : 사례기반추론(Case based-reasoning), 베리오그램 선택(Variogram selection), 정규 크리깅(Ordinary kriging), 기상자료 보간(Meteoroloical Interpolation)

† Corresponding author, E-mail: wlee@ssu.ac.kr

후 기

이 논문은 2026년도 교육부 및 서울특별시의 재원으로 서울앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(ANCHOR)의결과입니다. (2026-ANCHOR-01-020-04)

PVE-P-15

우주 태양전지용 초광대역 밴드갭 페로브스카이트 태양전지의 양성자 내방사선 향상을 위한 패시베이션 연구

Passivation Study for Enhancing Proton Radiation Tolerance of Ultra-Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells for Space Applications

Sang Won Kang*, Da Seul Lee**, Minwoo Lee***, Jae Sung Yun***, Jongsung Park*,**†

*Department of Energy System Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam 52828, Republic of Korea

**Gyeongnam Aerospace & Defense Institute of Science and Technology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

***Australian Centre for Advanced Photovoltaics (ACAP), School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia

Abstract : Ultra-wide-bandgap (UWBG, Eg ≥ 1.8 eV) perovskites are promising materials for space photovoltaic applications owing to their high specific power and lightweight characteristics. However, Br-rich compositions suffer from severe instability under high-energy radiation environments due to radiation-induced halide migration and phase segregation. Among various passivation strategies, propane-1,3-diammonium iodide ($PDAI_2$) has been reported to improve the radiation tolerance of perovskite materials. Nevertheless, a systematic comparison between $PDAI_2$ and fluorinated phenethylammonium iodide (F-PEAI), which is widely used for surface passivation and stability enhancement, has not yet been reported. In this study, $PDAI_2$- and F-PEAI-passivated UWBG perovskite films and devices were systematically investigated under proton irradiation. $PDAI_2$ provided more effective passivation of the perovskite surface and resulted in superior stability at the film level, whereas F-PEAI formed a more favorable interface with the C_{60} electron transport layer and exhibited better device-level performance. Based on these complementary functions, a bilayer passivation strategy was developed by depositing F-PEAI on top of $PDAI_2$. The $PDAI_2$/F-PEAI bilayer-passivated devices exhibited both high photovoltaic efficiency and improved stability, benefiting from the effective perovskite passivation by $PDAI_2$ and the favorable interfacial interaction between F-PEAI and C_{60}. These results demonstrate that combining passivation molecules with complementary functions is a promising strategy for simultaneously improving the efficiency and radiation stability of UWBG perovskite devices for space applications.

Key Words : Ultra-wide-bandgap, Perovskite, Proton irradiation, Bilayer

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

PVE-P-16

탠덤용 페로브스카이트 상부셀 적용을 위한 ALD-SnO2 최적화 연구

Optimization of ALD-SnO2 for Perovskite Top Cells in Tandem Solar Cells

서형원*, 이다슬**, 김수환**, 박종성*,**†
HyeongWon Seo*, DaSeul Lee**, Suwhan Kim**, Jounsung Park*,**†
*경상국립대학교 에너지시스템 공학과, **경상국립대학교 경남항공우주방산과학기술원

Abstract : Securing the high quality of the electron transport layer (ETL) in the perovskite top cell is essential for maximizing the power conversion efficiency of silicon-perovskite two-terminal tandem solar cells. In this study, we investigated the process optimization of SnO2 thin films deposited via Atomic Layer Deposition (ALD) for application as an ETL in perovskite top cells.To achieve optimal film properties, key deposition parameters including chamber temperature, precursor canister temperature, pulse time, and purge time were systematically adjusted to evaluate their effects on growth behavior, surface morphology, and optoelectronic properties. The chamber and canister temperatures directly influenced impurity reduction and crystallinity by controlling surface reaction kinetics and precursor vapor pressure. Furthermore, precise tuning of the pulse and purge times facilitated a self-limiting surface reaction while suppressing unwanted parasitic chemical vapor deposition (CVD) reactions, leading to the formation of pinhole-free and uniform SnO2 thin films.The optimized ALD SnO2 layer effectively protects the underlying fragile layers from subsequent transparent conductive oxide (TCO) sputtering processes and enhances charge extraction efficiency, thereby contributing to the realization of high-efficiency silicon-perovskite tandem solar cells.

Key Words : Atomic layer Depostion(ALD) , SnO2

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

PVE-P-17

머신러닝 기반 베리오그램 분류 예측기를 결합한 사례기반 크리깅 기상데이터 공간보간 및 태양광 발전량 예측

Photovoltaic Power Forecasting Using Case-Based Kriging with a Machine Learning-Based Variogram Classifier for Meteorogical Data Interpolation

김미림*, 김민준**, 이원철†
Mirim Kim*, Minjun Kim**, Woncheol Lee†
*숭실대학교 전자정보공학부, **숭실대학교 에너지정책기술융합학과

Abstract : 태양광 발전량은 일사량, 일조시간, 온도, 습도, 풍속 등 기상조건의 영향을 받으므로 정확한 예측을 위해 발전소 위치의 신뢰성 있는 기상데이터 확보가 중요하다. 그러나 실제 태양광 발전소 위치에 기상관측소가 없는 경우가 많아 주변 관측자료의 공간보간이 필요하다. 본 연구에서는 사례기반추론(CBR)으로 기상상태에 따른 베리오그램 모델과 파라미터를 결정하고, 크리깅(Kriging)을 통해 발전소 위치의 기상데이터를 생성하여 발전량 예측에 활용하였다. 과거 기상데이터의 실험적 베리오그램에 Exponential, Gaussian, Spherical, Penta-spherical 모델을 적합하여 Nugget, Sill, Range 값과 모델 정보를 포함한 사례 DB를 구축하였다. ANN의 Permutation Importance로 특징 가중치를 산정하고 Euclidean, Manhattan, Grey 유사도와 K-NN으로 유사 사례의 베리오그램 모델과 파라미터를 결정하였다. 이를 이용해 울산 한 곳, 충남 한 곳, 강원 한 곳의 기상데이터를 Kriging으로 보간하고, 가장 가까운 관측소 값을 사용하는 Nearest Neighbor(NN) 방식과 비교하였다. 생성된 기상데이터와 발전량으로 LSTM 및 ARIMA 예측을 수행한 결과, Kriging 적용 시 LSTM의 RMSE는 각각 1.43%, 3.94%, 5.28%, MAE는 3.20%, 3.14%, 4.52% 감소했으며, ARIMA의 RMSE는 4.31%, 6.30%, 1.08%, MAE는 3.92%, 5.82%, 2.40% 감소하였다. 이는 공간적 상관관계를 고려한 Kriging 기반 기상데이터가 NN보다 발전량 예측 오차 감소에 효과적임을 보여준다.

Key Words : 태양광 발전량 예측(Photovoltaic Power Forecasting), 기상데이터 공간보간(Meteorological Data Interpolation), 사례기반추론(Case-Based Reasoning), 크리깅(Kriging), 베리오그램(Variogram)

† Corresponding author, E-mail: wlee@ssu.ac.kr

후 기
이 논문은 2026년도 교육부 및 서울특별시의 재원으로 서울앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(ANCHOR)의결과입니다. (2026-ANCHOR-01-020-04)

PVE-P-18

전 진공 공정 기반 실리콘/페로브스카이트 일체형 태양전지

All-vacuum Processed Silicon/perovskite Monolithic Tandem Solar Cell

김기륜*, 정민지*, 박지혜*, 임종철*, 장효식*†
Giryun Kim*, Minji Jung*, Jihye Park*, Jong Chul Lim*, Hyo Sik Chang*†
*충남대학교 에너지과학기술대학원

Abstract : The development of high-efficiency monolithic perovskite/silicon tandem solar cells offers a promising pathway to surpass the Shockley–Queisser limit. This study introduces a fully vacuum-processed fabrication approach using atomic layer deposition (ALD) and thermal evaporation. ALD provides sub-nanometer precise control over layer thickness, enabling the fabrication of thin films tailored to optimize the perovskite layer[1, 2]. By adjusting deposition parameters and fine-tuning layer thicknesses, we achieved growth of surface-chemistry-optimized layers with excellent electrical and optical properties, while minimizing interlayer interferences. This method facilitates the formation of uniform, high-quality, and defect-minimized multilayer structures on textured substrates. Structural and optical characterizations including X-ray diffraction (XRD), UV-Vis spectroscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) confirm the crystallinity, surface chemistry, and reduced defect density of the films. The wide bandgap perovskite layer was deposited via thermal evaporation, followed by the formation of recombination and interfacial layers under controlled vacuum conditions. Interface integrity and uniformity were verified through characterization, underscoring their importance for device performance. Furthermore, NiOx was depositied with self-assembled monolayers (SAMs) to enhance charge extraction efficiency and stability at the interfaces. The resulting devices demonstrated a high power conversion efficiency (PCE), with notable improvements in open-circuit voltage (Voc), fill factor (FF), and reduced recombination losses. This scalable vacuum process facilitates the fabrication of high-quality, multilayered tandem devices with minimized interlayer interference, paving the way for scalable production of large-area, high-performance photovoltaic modules.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar cell), 실리콘 태양전지(SIsolar cell), 탠덤 태양전지(Tandem solar cell)

† Corresponding author, E-mail: hschang@cnu.ac.kr

PVE-P-19

부유식 변전소 적용에 따른 수상태양광시스템 송전효율 및 LCOE 비교

Comparison of Transmission Efficiency and LCOE in Floating Photovoltaic Systems Using a Floating Substation

최소담*, 이지은*†, 이성현*, 양동건*, 조현식*, 최면귀*
Sodam Choi*, Jieun Lee*†, Sunghyun Lee*, Donggeon Yang*, Hyunsik Jo*, Myeongwi Choi*
*한국수자원공사 K-water연구원

Abstract : 수상태양광 시스템은 육상부지 활용의 제약을 완화할 수 있는 재생에너지 발전방식으로, 최근 대형화가 지속되고 있다. 대규모 수상태양광 시스템에서는 수상에 분산된 발전블록과 육상 전기설비 간의 거리가 증가할 수 있으며, 이 경우 다수 회선의 저압 직류 수중케이블을 이용한 장거리 전력전송으로 인해 전압강하, 전력손실 및 케이블 비용이 증가할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 장거리 DC 송전구조의 개선방안으로 수상태양광 시스템 인근에 인버터와 변압설비를 배치하는 부유식 변전소를 적용하고, 기존 육상형 전력변환 방식과의 전력전송 특성 및 경제성을 비교하였다. 부유식 변전소 적용에 따른 효과를 분석하기 위해 기존 케이블 단면적을 유지한 상태에서 DC 송전거리만 단축한 경우와, 송전거리 단축 후 케이블 단면적을 축소한 경우를 구분하여 전압강하, 전력손실 및 전력전송효율을 검토하였다. 또한 부유식 변전소 적용에 따라 형성되는 중전압 교류 송전구간의 손실과 케이블 및 설비비용을 고려하여 균등화 발전비용(Levelized Cost of Energy)을 비교하였다.

Key Words : 수상태양광(Floating Photovoltaic), 부유식 변전소(Floating Substation), 송전효율(Transmission Efficiency), 전력손실(Power Loss), 균등화발전비용(Levelized Cost of Energy)

† Corresponding author, E-mail: jelee@kwater.or.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2024-00459289).

PVE-P-20

페로브스카이트 태양전지의 결함 패시베이션 및 성능 향상을 위한 2-PEAI 농도 최적화 연구

Research on Optimizing 2-PEAI Concentration for Defect Passivation and Enhanced Performance in Perovskite Solar Cells

강하나*, 김미정*,**,김문회*, 송재진***, 양정엽*,**,***†
Hana Kang*, Mijoung Kim*,**, Moonhoe Kim*, Jaejin Song***,
JungYup Yang*,**,***†
*군산대학교 물리학과, ** 군산대학교 기초과학연구소, ***군산대학교 이차전지에너지학부

Abstract : 유·무기 할라이드 페로브스카이트 태양전지는 우수한 광전기적 특성을 지니고 있으나, 박막 표면 및 결정립계(Grain boundary)에 존재하는 결함으로 인한 비방사성 재결합(Non-radiative recombination)이 소자의 효율과 안정성을 저해하는 주요 원인으로 작용하고 있다. 본 연구에서는 이러한 계면 결함을 효과적으로 제어하기 위해 2-phenethylammonium iodide(2-PEAI)를 전구체 첨가제로 도입하고, 농도 최적화를 통해 전하 운송 및 소자 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 2-PEAI 농도를 0~1.00wt% 범위에서 조절한 결과, 0.5wt% 조건에서 가장 우수한 결정성 향상 및 결함 억제 효과가 나타남을 확인하였다. 특히, 2-PEAI가 페로브스카이트 내 미반응 Pb^{2+} 이온과 상호작용하여 계면 결함을 성공적으로 패시베이션(Passivation) 하였으며, XRD 및 광학 분석(PL, TRPL)을 통해 비방사성 재결합이 크게 억제됨을 교차 검증하였다. 결과적으로 0.5wt% 조건에서 최적화된 전하 추출 특성을 바탕으로 개방전압(V_{oc}), 단락전류밀도(J_{sc}) 및 전력변환효율(PCE)이 모두 두드러지게 향상되었다. 본 연구는 미량의 2-PEAI 농도 제어만으로도 페로브스카이트 계면의 특성을 획기적으로 개선하여 고성능 태양전지를 구현할 수 있는 실효적인 전략을 제시한다.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지(Perovskite solar cells),첨가제(Additive), 스핀코팅(Spin coating), 패시베이션(Passivation)

† Corresponding author, E-mail: jungyup.yang@kunsan.ac.kr

PVE-P-21

분자 동역학 기반, 준-2D/3D 이중층 할라이드 페로브스카이트의 수분 침투 및 열화 메커니즘 연구

Molecular Dynamics Study on Moisture Ingress and Degradation Mechanism in Quasi-2D/3D Bilayer Halide Perovskites

최원규*, 안영기*, 정재성*†
Won-Gyu Choi*, Young-Gi An*, Jae-Seong Jeong*†
*한국전자기술연구원 신재생에너지연구센터

Abstract : Halide perovskite solar cells have achieved a certified power conversion efficiency (PCE) of 28.0%, and perovskite/Si tandem cells have reached 35.2%. Despite these impressive improvements, the intrinsic instability of perovskites under ambient atmospheres, particularly humidity-induced degradation, remains a primary challenge. To overcome this, various strategies have been adopted, including additive, compositional, and interfacial engineering. Among them, interfacial engineering using two-dimensional (2D) perovskites has proven effective in suppressing degradation, representing one of the most promising approaches for long-term stability. However, an atomic-scale understanding of the passivation mechanism remains limited. In this study, classical molecular dynamics (MD) simulation was conducted to investigate moisture ingress and resulting degradation in 3D and quasi-2D/3D perovskites. Bilayer models were constructed by introducing butylammonium (BA^+) or phenethylammonium (PEA^+) onto the 3D formamidinium lead iodide ($FAPbI_3$) layer, and the inorganic PbI_6^{4-} octahedral framework was constrained to isolate the dynamic behavior of organic components. To assess the effect of the bulky organic cation type, the relative effectiveness of quasi-2D layers was compared in terms of humidity-induced degradation. In the pristine 3D perovskite, adsorbed water molecules disrupt the electrostatic interactions between FA^+ ions and the PbI_6^{4-} framework, inducing FA^+ ions to migrate and detach from their lattice sites, leading to structural degradation. In contrast, the quasi-2D layers act as a barrier against both moisture ingress and organic cation migration, thereby significantly delaying degradation. These atomistic simulations are expected to provide a fundamental understanding of how low-dimensional passivators mitigate moisture-induced degradation, offering a basis for designing moisture-stable perovskite solar cells.

Key Words : Halide perovksites, Molecular dynamics, Qusai-2D/3D bilayer, Moisture-induced degradation

† Corresponding author, E-mail: jjseicp@keti.re.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25536388).

PVE-P-22

진공증착법을 이용한 와이드 밴드갭 $CsPbI_3$ 기반 무기 페로브스카이트의 조성 제어

Composition Control of Wide-Bandgap $CsPbI_3$-Based Inorganic Perovskite via Vacuum Deposition

박지혜*, 정민지*, 김기륜*, 임종철*, 장효식*†
Jihye Park*, Minji Jeong*, Giryun Kim*, Jongchul Lim*, Hyo Sik Chang*†
*충남대학교 에너지과학기술학과

Abstract : 페로브스카이트 태양전지는 조성에 따라 광학적 특성을 조절할 수 있어 최근 다양한 조성의 페로브스카이트 및 고효율 실리콘-페로브스카이트 탠덤 태양전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 공정 재현성 및 대면적 상용화를 위해 진공증착법을 이용한 페로브스카이트 박막의 연구의 필요성이 높아지고있다. 실리콘-페로브스카이트 탠덤 태양전지의 상부셀에 적합한 페로브스카이트 밴드갭은 약 1.7 eV로 알려져있다. 그러나 1.7 eV의 밴드갭을 갖는 $CsPbI_3$ 조성은 높은 상변화온도로 인해 탠덤 소자 공정에 적용하기 어려우며, 상온에서의 상 안정성과 수분 안정성이 낮다는 한계가 있다. 본 연구에서는 $CsPbI_3$ 기반 무기 페로브스카이트에 FA와 Br 이온을 도핑하여 상온에서의 상 안정성과 수분 안정성을 향상시키고자 하였다. 전층 진공 공정을 통해 무기물 기반 소자를 제작하였으며, 150℃ 열처리 조건에서 셀 면적 0.094 cm^2의 건식 페로브스카이트 태양전지에서 최고 효율 22%를 달성하였다.

Key Words : 진공증착(Vacuum deposition), 무기 페로브스카이트(Inorganic-perovskite), 와이드 밴드갭 페로브스카이트(Wide-Bandgap perovskite)

† Corresponding author, E-mail: hschang@cnu.ac.kr

PVE-P-23

테오필린 기반 결함 패시베이션을 통한 페로브스카이트 태양전지의 광전 성능 향상

Enhanced Photovoltaic Performance of Perovskite Solar Cells through Theophylline-Mediated Defect Passivation

송재진*, 강하나**, 김미정**,***,김문회**, 양정엽**,***,****†
Jaejin Song*, Hana Kang**, Mijoung Kim**,***, Moonhoe Kim**,
JungYup Yang**,***,****†
*군산대학교 에너지학과, ** 군산대학교 물리학과, ***군산대학교 기초과학연구소,
****군산대학교 이차전지에너지학부

Abstract : 유·무기 할라이드 페로브스카이트 태양전지는 높은 광흡수율과 조절 가능한 밴드갭, 저비용 용액 공정 등의 장점을 지니지만, 박막 표면과 결정립계의 결함으로 발생하는 비방사 재결합이 소자 성능을 제한한다. 본 연구에서는 이러한 결함을 제어하기 위해 $Cs_{0.175}FA_{0.750}MA_{0.075}Pb(I_{0.880}Br_{0.120})_3$ 페로브스카이트에 테오필린(theophylline)을 첨가하고, 농도에 따른 박막 특성과 광전 성능의 상관관계를 조사하였다. 첨가 농도는 0, 0.25, 0.5, 0.75 및 1.0 wt%로 설정하여 비교하였다. FT-IR 및 XPS 분석 결과는 테오필린의 루이스 염기성 C=O 작용기가 배위가 불완전한 Pb^{2+}와 상호작용하여 결함 패시베이션에 기여함을 뒷받침하였다. XRD 분석에서는 첨가제 도입 이후에도 주요 회절 피크의 위치가 유지되었으며, 0.5 wt%에서 반치폭이 감소하여 결정성 개선을 시사하였다. SEM 분석에서도 해당 농도에서 결정립의 크기와 균일성이 향상되고 핀홀이 감소한 표면 형상이 관찰되었다. UV–vis 분석에서 광학적 밴드갭의 뚜렷한 변화는 나타나지 않았으나, 최적 농도에서의 PL 발광 세기 증가와 TRPL 전하 운반자 수명 연장은 비방사 재결합의 억제를 나타냈다. 또한 공간전하제한전류(SCLC) 분석에서 트랩 충만 한계 전압이 무첨가 소자의 1.38 V에서 0.5 wt% 소자의 1.07 V로 낮아져 트랩 밀도 감소를 뒷받침하였다. 0.5 wt% 테오필린을 첨가한 소자는 AM 1.5G 1-sun 조건에서 개방전압 1.142 V, 단락전류밀도 22.22 mA cm^{-2}, 충전율 80.29% 및 광전변환효율 20.38%를 나타냈다. 아울러 색온도 6500 K의 LED를 이용한 1000 lux 실내광 조건에서는 35.83%의 광전변환효율을 달성하였다. 이러한 결과는 테오필린 기반 첨가제 공학이 결함 패시베이션과 전하 재결합 억제를 통해 페로브스카이트 태양전지의 성능을 개선하고, 실내광 에너지 변환 소자로의 활용 가능성을 높이는 유효한 접근법임을 보여준다.

Key Words : Perovskite solar cells; Theophylline; Additive engineering; Defect passivation; Indoor photovoltaics

† Corresponding author, E-mail: jungyup.yang@kunsan.ac.kr

PVE-P-24

페로브스카이트 태양광 모듈의 출력평가 전 광 노출에 따른 출력 및 MPPT 특성 연구

Effect of Pre-measurement Light Exposure on Output and MPPT Characteristics of Perovskite PV Modules

김형진*, 임종록*†, 한성민*
Hyeongjin Kim*, Jongrok Lim*†, Sungmin Han*
*한국산업기술시험원 신재생에너지기술센터

Abstract : 페로브스카이트 태양 발전은 높은 변환효율과 차세대 태양전지로서의 잠재력으로 인해 많은 관심을 받고 있으며, 모듈 단위의 출력 평가 및 안정화 특성에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 페로브스카이트 태양광 모듈의 정확한 출력 특성을 평가하기 위해서는 출력 측정값뿐만 아니라 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 적용 이후 출력이 안정화되는 과정에 대한 분석이 필요하다. 또한 출력 측정 전 모듈이 Light 또는 Dark 상태로 보관되는 경우 보관 조건에 따라 이후의 출력 및 안정화 특성이 달라질 수 있으므로 이에 대한 검토가 요구되고 있다. 하지만 보관 조건 및 조건 변화에 따른 출력과 MPPT 안정화 특성을 함께 비교한 연구는 아직 충분하지 않은 실정이다. 이에 본 논문에서는 페로브스카이트 태양광 모듈을 대상으로 초기 MPPT 안정화 출력을 측정한 후 Light 및 Dark 조건에서 보관하였으며, 이후 동일 크기 모듈의 보관 조건을 구분하여 추가 시험을 수행하였다. 각 보관 단계에서 시간에 따른 출력 변화, 안정화 출력, 안정화 소요 시간 및 Pmax를 비교하여 보관 조건에 따른 특성을 분석하였다. 실험 결과, Light 및 Dark 보관 조건에 따라 출력과 MPPT 안정화 특성에 차이가 나타났으며, 보관 조건이 변경된 경우에도 서로 다른 출력 변화 특성이 확인되었다. 이러한 결과를 통해 페로브스카이트 태양광 모듈의 출력 평가 시 보관 조건과 조건 변화를 함께 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Key Words : 페로브스카이트 태양광 모듈(Perovskite photovoltaic module), 보관 조건(Storage condition), 최대 전력점 추적(Maximum power point tracking), 안정화 특성(Stabilization characteristics)

† Corresponding author, E-mail: jongrok@ktl.re.kr

PVE-P-25

Degradation of Perovskite/Crystalline Silicon Tandem Photovoltaic Modules under Current Injection at Constant Temperature

강승모*†
*한국산업기술시험원

Abstract : Due to the inherent material characteristics of perovskite devices, it is difficult to directly apply conventional reliability evaluation methods developed for photovoltaic modules. In particular, in tests involving current injection, such as thermal cycling tests, degradation induced by externally applied current may have a greater impact than the degradation mechanism originally intended to be evaluated. In this study, the degradation of perovskite/crystalline silicon tandem photovoltaic modules as a function of applied current was experimentally investigated. First, the output power of the modules was measured using a continuous-light LED solar simulator with a Class A+ rating or higher. To exclude degradation caused by light exposure, the measurement and stabilization procedure was completed within 30 min after stabilization. Subsequently, the perovskite/crystalline silicon tandem photovoltaic modules were placed in an environmental chamber maintained at a constant temperature of 25 °C. Three specimens were tested for each current-injection condition, and currents corresponding to 0, 0.1, 0.3, 0.5, and 1.0 times the maximum power point current (I_mp) of each module were applied. When no current was applied, only minor changes in output power were observed. In contrast, when a current equivalent to the maximum power point current was applied, output power degradation ranging from 7.5% to 12.9% was observed. Furthermore, the degradation rate increased linearly with increasing applied current. These results confirm that, even under constant-temperature conditions, the degradation rate varies depending on the magnitude of the applied current. The findings of this study are expected to contribute to the development of appropriate current-injection conditions for the reliability assessment of perovskite/crystalline silicon tandem photovoltaic modules.

Key Words : 페로브스카이트 (Perovskite), 탠덤 태양광 모듈 (Tandem photovoltaic module), 전류 인가(Current Injection), 온도 사이클 시험 (Thermal cycling test), 신뢰성 시험 (Qualification test)

† Corresponding author, E-mail: alankang@ktl.re.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 신재생에너지핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025-25444655).

PVE-P-26

태양광 구조물 변형에 따른 모듈 휨 현상이 I-V 출력 특성에 미치는 영향

Analysis of I-V Output Characteristics of PV Modules Under Structural Deformation and Bending

오수정*†, 김종민*, 조성구*, 강해권*, 장주희*
Su-Jeong Oh*†, Chong-Min Kim*, Seong-Koo Cho*, Hae-Gweon Kang*, Ju-Hee Jang*
*한국전기안전공사 전기안전연구원

Abstract : 태양광 발전설비는 설치 각도 및 거치 구조물의 특성상 시공 오차나 하중에 의한 구조물 변형이 발생할 수 있으며, 이에 따라 모듈 자체에 휨(bending) 응력이 가해질 수 있다. 이러한 기계적 응력은 미세균열을 유발하여 전기적 성능 저하와 국부적 발열로 이어질 위험이 있으나, 실제 운용 환경에서 이를 정량적으로 검증한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 평판형(Flat), 좌우 휨형(Lateral bending), 대각 휨형(Diagonal bending) 3가지 케이스의 실험 구조물을 구축하고, 약 1년 10개월간 20분 간격으로 모듈 표면온도와 I-V 데이터를 수집하였다. 초기(설치 직후) 측정값을 기준(baseline)으로 설정하고, 이후 시계열 데이터를 표준시험조건(STC) 기준으로 정규화하여 최대출력(Pmax), 개방전압(Voc), 단락전류(Isc), 충진율(FF)의 초기 대비 변화율을 케이스별로 산출하였다. 또한 온도 데이터를 통해 케이스 간 국부 발열 편차 및 계절적 변동 특성을 분석하였다. 분석 결과, 대각 휨 케이스의 연간 Pmax 열화율은 -3.06%로 평판형(-1.47%/year) 대비 약 2.1배 높게 나타났으며, 관측 마지막 3개월 구간의 누적 출력 손실 역시 대각 휨 -7.39%, 좌우 휨 -5.88%로 평판형(-2.88%)을 크게 상회하였다. 단락전류(Isc) 열화율에서도 동일한 경향(대각 휨 -2.04%/year, 좌우 휨 -2.25%/year, 평판형 -1.04%/year)이 확인되어, 전류 손실이 출력 열화를 일으키는 주요 원인임을 확인하였다. 또한 대각 휨 케이스에서는 모듈 표면 온도편차가 시간 경과에 따라 유의하게 상승하는 경향이 나타났다. 이는 구조물 변형에 의한 모듈 휨이 시간 경과에 따라 전기적 출력 성능의 열화를 가속화하며, 장기적으로 발전량 손실 및 설비 수명 단축의 위험 요인이 될 수 있음을 시사한다. 본 연구 결과는 태양광 구조물의 설계·시공 단계에서 모듈 휨 방지를 위한 품질관리 기준 마련 및 유지보수 점검 항목 설정에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 태양광 모듈(PV Modules), 구조물 변형(Structure Deformation), 모듈 휨(Module Bending), I-V 특성(I-V Characteristics), 성능 저하(Performance Degradation)

†Corresponding author, E-mail: krystaloh@kesco.or.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2024-00400278).

PVE-P-27

우주환경 열화 WBG 페로브스카이트의 표면 형상 특성과 SPV 열화 간 상관관계 분석: KPFM 기반 연구

Correlation Analysis between Surface Morphological Features and SPV Degradation in WBG PVSK under Proton Irradiation: KPFM-Based Study

이수민*, 채승현*, 장수성**, 박종성**, 김도형*†
Sumin Lee*, SeungHyun Chae*, Suseong Jang**, Jongsung Park**, Dohyung Kim*†
*충북대학교 신소재공학과, **경상국립대학교 에너지공학과

Abstract : 우주환경과 같은 극한환경에서 활용되는 태양전지에서는 고에너지 방사선에 대한 내구성과 이에 따른 성능 열화의 이해가 중요하다. 특히 Wide-Bandgap(WBG) 페로브스카이트는 우주 태양전지용 소재로서 비교적 우수한 방사선 내성이 보고되고 있으나, 이러한 내방사선 특성의 기원과 방사선 조사에 따른 국소적 전기적·형상학적 변화에 대해서는 아직 충분한 이해가 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 양성자 조사 전후 1.68 eV WBG 페로브스카이트의 AFM/KPFM 데이터를 기반으로 표면 형상 특성과 표면 광전압(Surface Photovoltage, SPV) 열화 간의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. Dark 및 Light 조건에서 측정된 Topography와 접촉 전위차(Contact Potential Difference, CPD) 데이터를 정합한 후, Light와 Dark CPD의 차이를 이용하여 SPV map을 계산하였다. Topography는 background 보정 후 Relative Height, Gradient, Curvature 및 Local Roughness의 네 가지 표면 형상 특성으로 분리하고, Pristine과 Irradiation 조건에서 각 특성의 변화와 분포를 비교하였다. 또한 동일 위치의 SPV와 각 표면 형상 특성을 pixel-by-pixel 방식으로 대응시켜 상관관계를 분석하고, 조사 후 SPV 저하와 연관되는 표면 형상 특성을 평가하였다. 이를 기반으로 열화 취약도(degradation susceptibility)를 계산하여 Pristine Topography에서 상대적으로 열화에 취약할 것으로 예상되는 영역을 시각화하였다. 본 연구는 WBG 페로브스카이트의 나노스케일 표면 형상과 SPV 열화 간의 공간적 상관관계를 정량화하고 잠재적인 열화 취약 영역을 탐색하는 분석 방법을 제시하며, 우주 방사선 환경에서 WBG 페로브스카이트의 국부적 열화 거동과 방사선 내구성을 평가하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 표면 광전압(Surface Photovoltage, SPV), 표면 형상(Topography), 양성자 조사(Proton Irradiation), 열화(Degradation), 원자힘현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)

† Corresponding author, E-mail: dohyungkim@chungbuk.ac.kr

PVE-P-28

양면형 태양광 발전설비의 이종모듈 사용에 따른 안전성 분석

Safety of Bifacial Photovoltaic (PV) Systems using Different Types of Module

장주희*†, 김종민*, 조성구*, 오수정*, 강해권*
Juhee Jang*†, Chong Min Kim*, Sung-Koo Cho*, Su-Jeong Oh*,
Hae-Gweon Kang*
*한국전기안전공사 전기안전연구원

Abstract : 전세계적으로 태양광 발전설비의 설치 용량이 증가하고 있다. 태양광 발전설비의 수명은 20년~25년으로 예상되어지며, 태양광 발전설비의 노후화 및 고장으로 구성요소의 교체시기가 도래하고 있다. 태양광 발전설비의 어레이는 표준(KS C IEC 60364-7-712) 및 규정(KEC 522.2.1)에 따라 동일한 단락전류를 갖는 모듈로 스트링을 구성하도록 제한한다. 하지만, 태양광 발전설비의 구성요소의 단종 등으로 일부 구성요소에 대한 교체가 어렵다. 본 논문에서는 한 개의 스트링을 구성할 때 이종모듈 사용에 따라 발생하는 안전성을 분석하였다. 스트링을 구성하는 모듈은 KS C IEC 62548 및 KS C IEC 62446-1에 따라 안전성 확보를 위해 스트링 전압, 스트링 전류, 개방전압이 각각 5% 이내의 편차를 갖도록 구성하였다. 분석 시스템은 10직렬 2병렬로 구성되었으며, 500W/m^2이상의 조건에서 모듈온도의 편차와 성능을 분석하였다. 분석 결과 모듈온도의 편차는 이종 모듈 간 최대 약 3℃로 확인되었다. 또한, 전면 일사량 기준 평균 PR은 스트링 1과 스트링 2 각각 93.4%, 99.5%로 확인되었다. 모듈 온도의 차이는 크게 확인되지 않았으나 스트링 1번의 모듈 후면 유리가 파손되는 모듈 결함이 확인되었다. 해당 연구를 통해 이종모듈 사용시 모듈의 온도 미스매치가 발생하고 성능의 저하를 확인할 수 있었다. 또한, 태양광 발전 설비의 안전성 확보를 위해 시험기준에서의 시스템 구성 뿐만아니라 설치 조건에서의 고려가 필요할 것으로 판단되었다.

Key Words : 태양광발전시스템(Photovoltaics systems), 미스매치(Mismatch), 발전성능(Output performance), 설치조건(Installation conditions), 이종모듈(Different types of module)

†Corresponding author, E-mail: juheejang@kesco.or.kr

후 기

본 연구는 2026년도 한국전기안전공사의 재원을 지원받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : 2026-0102).

PVE-P-29

폐태양전지 실리콘 알칼리 반응 및 수소 발생 거동

Alkaline Reaction and Hydrogen Generation Behavior of Silicon from Waste Photovoltaic Cells

손주희*,***, 강기환**, 임원빈***, 이진석*†
Juhee Son*,***, Gi-Hwan Kang**, Wonbin Im***, Jinseok Lee*†
*한국에너지기술연구원 신재생 시스템 연구실, **한국에너지기술연구원 태양광연구단,
***한양대학교 일반대학원 신소재공학과

Abstract : 폐태양광(PV) 모듈의 발생량 증가에 따라 태양전지에 포함된 실리콘을 고부가가치 자원으로 재활용하기 위한 기술 개발의 중요성이 증가하고 있다. 실리콘은 알칼리 수용액과 반응하여 수소와 sodium silicate를 생성할 수 있으나, 실제 폐태양전지는 Si 이외에도 Al, Ag 등의 성분을 포함해 반응 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 폐태양전지 분말의 NaOH 용액 내 용해 및 수소 발생 특성을 평가하고, 태양전지 구성 성분과 반응조건의 영향을 분석하였다. Cell 분말을 서로 다른 농도의 NaOH 용액에서 24 h 반응시킨 결과, 모든 조건에서 미용해 잔사가 발생하였다. 잔사를 EDS, XPS 및 FT-IR로 분석한 결과, Al, Si 및 O가 공존하는 비정질계 물질의 형성이 확인되었다. 반면, HCl 전처리로 Al을 제거한 태양전지 분말은 99% 이상의 에칭률을 나타냈으며, Al, Ag 등의 금속 불순물이 없는 Si wafer 분말은 완전 용해되었다. 이러한 결과로부터 Al 성분 및 반응 중 형성되는 Al-Si-O계 잔사가 Si의 알칼리 용해를 저해하는 주요 요인임을 확인하였다. 이를 바탕으로 실제 태양전지 분말의 NaOH 농도와 교반속도에 따른 초기 수소 발생 속도 및 반응 온도를 비교한 결과, 반응조건에 따라 수소 발생 및 발열 거동이 달라짐을 확인하였다. 본 연구 결과는 불순물 제어와 반응조건 최적화의 중요성을 보여주며, 수소 생산과 물유리 회수를 연계한 자원화 공정 설계의 기초자료로 활용될 수 있다.

Key Words : 폐태양전지(Waste photovoltaic cells), 실리콘(Silicon), 알칼리 용액(Alkaline solution) 수소 생산(Hydrogen generation), 물유리(Water galss ; Sodium silicate)

† Corresponding author, E-mail: jslee@kier.re.kr

후 기

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 태양광 패널 재활용 기술개발사업(RS-2025-02223005)과 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업(RS-2025-02213132)의 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단의 지원을 받아 연구되었습니다.

PVE-P-30

산 보조 습식 식각을 통한 실리콘 이종접합 태양전지 표면 개질

Surface Modification of Silicon Heterojunction Solar Cells via Acid-assisted Wet Etching Process

김형우*†, 김용진*, 김언수*, 조윤애*, 이상희*, 유진수*, 정경택*, 송희은*
Hyungwoo Kim*†, Yongjin Kim*, Unsoo Kim*, Yunae Cho*, Sang Hee Lee*, Junsu Yoo*, Kyung Taek Jeong*, Hee-Eun Song*
*한국에너지기술연구원 태양광연구단

Abstract : Tandem solar cells have emerged as a key technology for next-generation photovoltaics, demonstrating power conversion efficiencies (PCEs) that surpass the theoretical limit of single-junction crystalline silicon solar cells. Among them, perovskite/silicon tandem solar cells have achieved remarkable PCEs of up to 35.2%. A widely studied configuration is the 2-terminal structure, which integrates a bandgap-tuned perovskite solar cell with a silicon heterojunction (SHJ) cell in a p-i-n architecture. For optimal device performance, precise control over the interfacial morphology between the two sub-cells is crucial. In this work, we modulated the surface morphology of silicon solar cells through wet chemical processes using nitric acid, acetic acid, and hydrofluoric acid, enabling control over surface features such as size and roughness. This surface engineering significantly improved the electrical properties of the stacked layers, including amorphous silicon (a-Si:H) and transparent conducting oxides (TCOs). Our results not only enhance the efficiency of silicon bottom cells, but also suggest the enormous potential of surface engineering to drive significant performance improvements in perovskite/silicon tandem solar cells.

Key Words : 이종접합 태양전지(Heterojunction solar cells), 비결정 실리콘(Amorphous silicon), 마이크로구조(Microstructure), 산보조 습식식각(Acid-assisted wet etching)

† Corresponding author, E-mail: hsong@kier.re.kr

PVE-P-31

태양광 전기추진선의 모듈식 전력계통 시스템

A Modular Power System for Solar-Powered Electric Vessels

조범기*, 권정민*†
Beomki Cho*, Jungmin Kwon*†
*국립한밭대학교 전기공학과

Abstract : 본 논문에서는 일사량에 따른 발전량 변동에 대응하며, 발전량이 부족 시 육상전원을 통한 보충 충전이 가능한 태양광 전기추진선의 모듈식 전력 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 복수의 태양광 컨버터, 배터리 충방전용 양방향 DC/DC 컨버터, 육상전원 정류기 및 추진부하들을 공통 DC 버스에 연계한 구조이다. 각 전력변환 모듈들은 DC 버스 전압에 따라 운전 모드를 자율적으로 전환한다. 태양광 컨버터는 최대전력점 추종(MPPT) 운전을 기본으로 하되 배터리 만충 시 출력 제한 운전으로 전환한다. 양방향 DC/DC 컨버터는 드룹 제어를 통해 모듈 간 전류를 분담하고 전력 수급에 따라 충방전을 수행한다. 이를 통해 상위 제어기 없이 일사량 변동에 대응하고며, 모듈 이중화를 통해 고장에 대응하도록 구성하였다. 또한 정박 중 안정적인 육상전원 충전을 위해 약계통 조건에서 공진을 억제하고 전압 강하에 대응하는 정류기 전류 제어 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안 시스템의 자율 운전과 안정적인 전력 공급 및 충전 성능을 검증하였다.

Key Words : 태양광에너지(Photovoltaic energy), 전기추진선박(Electric vessels), 모듈식 전력계통 시스템(Modular power system)

† Corresponding author, E-mail: jmkwon@hanbat.ac.kr

PVE-P-32

A Study on Environmental Impacts of End-of-Life Photovoltaic Panels in South Korea by LCA

Shella Angelina Herlintama*, Haein Cho**, Choonghee Lee**, Yong-Chul Jang***†, Jin-Seok Lee*

*Renewable Energy System Laboratory, Korea Institute of Energy Research

**Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University

***Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

Abstract : In recent decades, photovoltaic (PV) panel technology development has grown significantly around the world. As the demand for the installation of PV panel increases, high volume of PV panel waste is expected in the future. However, most LCA studies have often excluded the end-of-life (EoL) stage, mainly due to the low amount of PV panels that have reached the disposal stage so far. This study aims to assess the environmental impacts of recycling PV panel waste in South Korea using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The environmental impacts were analyzed using a "gate-to-gate" approach based on the functional unit of 1,000 kg of c-Si PV panel. This study was performed using OpenLCA software v.2.5.0, with inventory datasets sourced from Ecoinvent 3.11 database and complemented by primary data collected from three domestic recycling facility. Impact assessment was conducted using the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method. The overall greenhouse gas emissions associated with climate change impact was quantified at approximately 404 kg CO_2-eq. The major contributors are related to the thermal process of the shredded PV sandwich, followed by the energy consumption, and transportation. However, energy recovery from thermal treatment provides a notable offset benefit, reducing burdens in the overall impact categories. These findings provide valuable insights into the EoL stage of PV panels in South Korea, which can be used to design future waste management strategies and policy direction regarding the EoL of PV panel.

Key Words : Greenhouse gas emissions, Life cycle assessment, Photovoltaic panel, Recycling

† Corresponding author, E-mail: gogator@cnu.ac.kr

PVE-P-33

고출력 은 저감 제로버스바(ZBB) 태양광 모듈을 위한 태양전지 전극 디자인 설계

Electrode Design for High-Performance and Low-Ag Consumption Zero-Busbar (ZBB) Photovoltaic Modules

김언수*
Unsoo Kim*†
*한국에너지기술연구원 태양광연구단

Abstract : 급격한 태양광 모듈의 보급에 따라 태양광 분야의 은 수요는 최근 10년 간 289.3%가 증가하였으며, 같은 기간 은 가격은 100%가 증가하였다. 기하급수적으로 증가하는 태양광 보급량의 증가에 대응하고, 특정 국가가 독과점하고 있는 태양광 시장에서 가격 경쟁력을 통해 점유율을 확보하기 위해서는 은 저감 태양광 모듈의 개발이 필수적이다. 은 사용량(mg/W)는 필연적으로 태양전지 셀의 전극 디자인 및 전극 페이스트의 조성에 영향을 받으며, 은 저사용 모듈 제작을 위한 전극 디자인을 수행하기 위해서는 전극 디자인에 따른 은 사용량 및 셀 출력 계산을 수행하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 전극 디자인에 따른 손실율 분석(loss analysis)를 통해 셀의 출력과 은 사용량을 계산하여 최종적으로 은 사용량 5 mg/W 이하의 태양광 모듈을 제작할 수 있는 전극 디자인은 설계한다. 설계 과정을 통해 은 저감 태양광 모듈을 위한 리본 개수, 리본 직경, 핑거 선폭 설계에 대한 기준을 세운다.

Key Words : 은 저감(Low-Ag consumption), 전극 설계(Electrode design), 시뮬레이션(Simulation), 태양광 모듈(Photovoltaic Module)

† Corresponding author, E-mail: tjckus92@kier.re.kr

PVE-P-34

수소화 실리콘질화막 물성이 태양전지 성능에 미치는 종합적 영향 분석

Analysis of the Comprehensive Impact of Hydrogenated Silicon Nitride Film Properties on Solar Cell Performance

김문세*, 이진영**, 심서우*, 김도회*, 김용진*, 임규현*, 민관홍*, 송희은*, 조윤애*, 김언수*, 김형우*, 정경택*, 이해석***†, 이상희*†, 김가현**†
Munse Kim*, Jin Young Lee*, Seo Woo Sim*, Do Hoe Kim*, Yong-Jin Kim*, Kyuhyeon lm*, Kwan Hong Min*, Hee-eun Song*, Yunae Cho*, Unsoo Kim*, Kyung Taek Jeong*, Hae-Seok Lee***†, Sang Hee Lee*†, Ka-Hyun Kim**†
*한국에너지기술연구원 태양광연구단, **충북대학교 물리학과, ***고려대학교 에너지환경대학원

Abstract : SiN_X:H films exhibit unique optical, physical, and chemical properties, making them widely applicable in semiconductor technology. Notably, SiN_X:H films play a crucial role in silicon solar cell fabrication, where they are indispensable for their dual functionality: as anti-reflective coatings to reduce surface reflectance through refractive index tuning, and as passivation layers to minimize carrier recombination. In particular, the stoichiometry of SiN_X:H films can be tailored by adjusting the gas flow ratio of SiH_4 and NH3, allowing for control over various film properties including structural, passivation, and optical properties. Specifically, the refractive index of SiN_X:H films can be tuned from 1.8 to 2.5 depending on stoichiometry, which corresponds to bandgap energies ranging from approximately 4 to 8 eV. Furthermore, based on stoichiometry, these films can contain 5–30 atomic percent hydrogen, which absorbs thermal energy during fast-firing, enabling hydrogen to penetrate the c-Si surface and bulk regions to effectively passivate dangling bond defects. As such, stoichiometric control during SiN_X:H film deposition is essential for optimizing the physical properties relevant to solar cell performance. In this study, we investigate the impact of SiN_X:H film stoichiometry on the photovoltaic characteristics of PERC solar cells. The composition and hydrogen content of SiN_X:H films were analyzed for different stoichiometries, followed by an examination of film density. We investigated the surface passivation properties with respect to film compositions, and evaluated both the refractive index and bandgap using optical constant modeling. Additionally, we conducted an emitter shunt analysis to comprehensively discuss the effects of SiN_X:H composition on PERC cell efficiency.

Key Words : 플라즈마화학기상증착(PECVD), 실리콘 질화막(Silicon nitride), 박막 밀도(Film density), PERC 태양전지(PERC solar cells), 전극 션팅(Metal electrode shunting)

† Corresponding author, E-mail: lshee@kier.re.kr, lhseok@korea.ac.kr, kahyunkim@chungbuk.ac.kr

PVE-P-35

200kW급 루프탑-영농형 태양광 하부 작물(감자)의 생육 및 수량 특성 분석

Growth and Yield Characteristics of Potato (*Solanum tuberosum L.*) Cultivated under a 200kW-Roof top type Agrivoltaic System

김근호*†, 임광현*, 박성민*
Geun Ho Gim*†, Gwanghyun Im*, Seong Min Park*
*(재)녹색에너지연구원

Abstract : Agrivoltaics combines overhead power generation with crop cultivation, but designing structures that minimize yield loss beneath the panels remains a key challenge. A previous 15kW fixed-roof demonstration (2017–2019) showed annual potato yield reductions of 8.9-16.5% compared with open-field controls, with no statistically significant differences in growth metrics or total yield. In this study, potatoes were grown under a newly installed 200kW agrivoltaic system to compare rooftop and foldable structures. Individual weights of 432 tubers from three rooftop replicates(25 plants) and one foldable plot(9 plants) were analyzed using t-tests and one-way ANOVA. The rooftop type produced 62.8% higher tuber weight per plant (925.6 ± 373.5 g vs. 568.6 ± 174.8 g; $p<0.001$) and more tubers per plant(13.5 ± 4.1 vs. 10.4 ± 2.9; $p<0.05$). It also tended to show higher average tuber weight(68.5 vs. 55.8 g) and a higher proportion of marketable tubers(≥ 80 g; 31.1% vs. 18.1%), suggesting that its higher light transmittance favored tuber enlargement. However, significant variation among rooftop replicates($F=10.81$, $p<0.001$) indicated spatially uneven growth caused by partial shading and microclimate. Together with the earlier results, these findings suggest that stable potato production is achievable when structural and shading design are optimized. Multi-year validation with open-field controls and an integrated economic analysis of power and crop yield are planned.

Key Words : 영농형 태양광(Agrivoltaic), 루프탑형(Rooftop), 생육 및 수량(Growth and Yield)

† Corresponding author, E-mail: ggh1242@gei.re.kr

후 기

본 연구는 2025년도 산업통산부의 재원으로 신재생에너지핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2022-KP002796).

PVE-P-36

M12 n type 태양전지를 이용한 대면적 양면형 태양광 모듈 개발 및 옥외 성능 평가

Development and Outdoor Performance Evaluation of Large-Area Bifacial PV Modules Using M12 n type Solar Cells

안서연*, 김근호*†
Seo Yeon An*, Geun Ho GIM*†
*(재)녹색에너지연구원

Abstract : This study evaluated the outdoor performance of 700W-class high-power photovoltaic(PV) modules developed to reduce installation costs and the levelized cost of energy(LCOE). Bifacial PV modules based on M12 n-TOPCon, p-PERC, and n-HJT solar cells, together with commercial p-PERC monofacial modules, were installed at a 46.8 kWp outdoor demonstration site. Power generation and front- and rear-side irradiance were monitored throughout 2025, with 326 valid days used for performance analysis. The measured rear-side irradiance was approximately 11.5% of the front-side irradiance. Among the tested modules, the M12 n-TOPCon bifacial module achieved the highest specific yield of 1,275kWh/kWp, corresponding to an average equivalent generation time of approximately 3.9 h/day. The specific yields of the n-HJT bifacial, commercial p-PERC monofacial, and p-PERC bifacial modules were 1,250, 1,232, and 1,214kWh/kWp, respectively. Compared with the commercial p-PERC monofacial and p-PERC bifacial modules, the M12 n-TOPCon bifacial module exhibited approximately 3.5% and 5.1% higher specific yields, respectively. These results demonstrate the superior outdoor energy-generation performance of the M12 n-TOPCon bifacial module and suggest its potential to contribute to LCOE reduction through the application of large-area, high-power n-type PV module technology.

Key Words : M12 n-type(M12 n형), 대면적 양면형 태양광 모듈(Large-aera bificial PV module)

† Corresponding author, E-mail: ggh1242@gei.re.kr

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원으로 진행하였습니다(과제번호 : 20223030010180).

PVE-P-37

양면형 태양광 방음벽(PVNB)의 발전량–눈부심 위험성 통합 평가: 서울시 내부순환로 적용 사례

Comprehensive Assessment of Power Generation and Glare Risk for Bifacial Photovoltaic Noise Barriers: A Case Study of Seoul Inner Ring Road

이민용*, 김동원* 백종길*, 송형준*†
Minyong Lee*, Dongwon Kim*, Jonggil Baek*, Hyeongjun Song*†
*서울과학기술대학교 안전공학과

Abstract : 태양광 방음벽(PVNB)은 소음 저감과 발전을 동시에 수행하는 융합 기술로 주목받고 있으나, 도로에 인접해 수직 설치되는 수직 양면형 PVNB 표면의 반사광(glare)이 운전자에게 After-image를 유발해 사고 위험을 높일 수 있다. 그럼에도 이에 대한 체계적 평가 방안이 미흡하다. 본 연구에서는 발전량과 눈부심 위험성을 함께 고려하는 통합 평가 방법을 제안하고자 서울시 내부순환로(16.2 km, 100 m 간격)에 PVNB 적용가능성을 분석하였다.. Solar Glare Hazard Analysis Tool(SGHAT)로 연중 반사광을 계산해 일간 누적 눈부심 시간 (Average Daily Solar Glare Duration, T_{SG})을 산출하고, 발생 빈도(O)·강도(S) 기반 S×O 매트릭스(25등급)로 위험도를 구하였다. 또한 설치 방위각별 발전량을 25등급으로 각각 정량화하였다. 분석 결과 PVNB가 남향인 동-서 도로 구간(PVNB 남북 방향 설치) 은 반사로 인한 T_{SG}가 여름철 90분 이상 발생하는 구간이 다수 발생하는 반면, 남-북 방향 도로(PVNB 동서방향 설치) 에서는 발전량도 15% 이상 높고 안전성 측면에서도 유리하였다. 통합 지표 적용 결과 전체 16.2 km 구간 중 5.8 km가 설치 적합 구간으로 도출되었으며, 예상 발전량(3.8 GWh)은 도로 운영 필요 연간 에너지(약 2.4-2.7 GWh)를 자립적으로 충당한 수준이다. 본 평가 방법은 PVNB 설치 위치·방향 결정 시 발전 성능과 시각적 안전성을 함께 고려하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

Key Words : 태양광 방음벽(Photovoltaic Noise Barrier), 양면형 태양전지(Bifacial PV), 눈부심(Solar Glare), 위험성평가(Risk Assessment), SGHAT

† Corresponding author, E-mail: hj.song@seoultech.ac.kr

후 기

본 연구는 2026 년도 기후에너지환경부의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2025-02317319).

PVE-P-38

고정식 루프탑형 영농형 태양광 시스템의 철거 실증: 기초형식에 따른 기초 철거 특성 분석

Field Dismantling Demonstration of Fixed Rooftop-Type Agrivoltaic Systems: Dismantling Characteristics of Two Foundation Types

임광현*, 박성민*, 안서연*, 김근호*†
Gwanghyun Im*, Sung Min Park*, Seoyeon An*, Geun Ho Gim*†
*녹색에너지연구원 녹색에너지실

Abstract : This study conducted field dismantling demonstrations on two fixed rooftop-type agrivoltaic systems with different foundation types and analyzed their foundation dismantling methods and work characteristics. Case 1 consisted of 16 metal screw-pile foundations, whereas Case 2 consisted of 20 concrete foundations cast within fiber-reinforced polymer (FRP) formwork. A common dismantling sequence was applied to both cases, including electrical isolation, removal of photovoltaic modules and electrical equipment, sequential dismantling of structural members, foundation dismantling, removal and transport of dismantled materials, backfilling of excavated areas, and final inspection. In Case 1, direct pull-out was attempted for all 16 foundations. Two foundations (12.5%) were removed by direct pull-out, whereas the remaining 14 (87.5%) required local soil excavation followed by excavation-assisted pull-out using an excavator. The mean net foundation dismantling time was 22.5 min/foundation. In Case 2, all 20 foundations were removed by excavating the surrounding soil and then lifting the foundation bodies with an excavator; the mean net foundation dismantling time was 36.0 min/foundation. In both cases, the excavated areas were backfilled after foundation removal, and no residual materials were observed at the sites. The field demonstrations showed that the foundation dismantling pathway differed by foundation type. Screw-pile foundations required excavation-assisted pull-out when direct pull-out was limited, whereas surrounding excavation followed by lifting of the foundation body constituted the basic dismantling pathway for FRP-cased concrete foundations. Based on these results, a conceptual process was organized comprising common dismantling steps and foundation-type-specific branches for foundation dismantling.

Key Words : 영농형 태양광(Agrivoltaics), 철거 실증(Dismantling demonstration), 기초 철거(Foundation dismantling), 스크류파일 기초(Screw-pile foundation), FRP 거푸집형 콘크리트 기초(FRP-cased concrete foundation)

† Corresponding author, E-mail: ggh1242@gei.re.kr

후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) of the Republic of Korea (No. RS-2024-00459428).

PVE-P-39

삼중접합 올-페로브스카이트 태양전지의 손실 완화를 위한 저밴드갭 페로브스카이트 박막의 하부계면 제어

Buried Interface Engineering of Low Bandgap Perovskite Thin Films for Loss Mitigation of All-perovskite Triple-junction Solar Cells

윤영훈*†

*한국전자기술연구원 재생에너지 · 수소연구센터

Abstract : 저밴드갭 주석-납(Sn-Pb) 페로브스카이트 박막의 하부계면은 전하 추출과 재결합에 영향을 미치며, 올-페로브스카이트 삼중접합 태양전지의 효율을 제한하는 주요 손실과 밀접하게 연관된다. 본 연구에서는 산화그래핀(GO)과 자기조립 단분자층(SAM)을 이용하여 하부계면을 제어하고, 저밴드갭 단일접합 및 삼중접합 소자의 손실과 성능 변화를 분석하였다. 외부양자효율, 광발광 및 광세기 의존 개방전압 측정을 통해 하부계면에 따른 전하 수집, 비방사 재결합 및 전하 수송과 관련된 손실을 분석한 결과, 저밴드갭 단일접합 소자에서 MeO-2PACz SAM 단독 사용 시 발생하는 전하 수송 제한이 GO/SAM 이중층 도입으로 크게 완화되어 수송에 따른 충진율 손실이 26.0%p에서 7.2%p로 감소하는 것을 확인하였다. 추가적인 하부계면 모폴로지 및 전기적 분석을 통해 전하 추출 손실 완화가 하부계면의 공극 감소와 균일성 향상, 이동성 이온 밀도 감소와 연관됨을 확인하였다. GO/SAM 이중층을 적용한 삼중접합 올-페로브스카이트 태양전지에서는 서브셀 적층에 따른 추가 전압 손실이 약 60 mV에 불과하여, 개별 서브셀의 전압 특성이 적층 후에도 효과적으로 유지되었다. 이러한 낮은 추가 전압 손실은 최종 삼중접합 소자에서 최고 27.3%의 광전변환효율을 구현하는 데 기여하였다. 본 연구는 하부계면 제어에 따른 저밴드갭 단일접합 및 삼중접합 태양전지의 성능 향상을 손실 분석을 통해 해석하여 다중접합 태양전지의 계면 설계와 손실 분석 방향을 제시한다.

Key Words : 페로브스카이트 태양전지 (Perovskite solar cells), 올-페로브스카이트 탠덤 (All-perovskite tandem), 삼중접합 (Triple junction), 계면 제어 (Interface engineering), 손실 분석 (Loss analysis)

†Corresponding author, E-mail: yeonghun.yun@keti.re.kr

PVE-P-40

일사량 예측 모델 개발을 위한 Solargis 데이터 분석

Analysis of Solargis Data for Solar Irradiance Forecasting Model Development

신우균*, 이진석*, 전병기*, 주영철*, 황혜미*, 고석환*†
Woogyun Shin*, Jinseok Lee*, Byungki Jeon*, Youngchul Ju*, Hyemi Hwang*, Sukwhan Ko*†
*한국에너지기술연구원, 신재생시스템연구실

Abstract : 태양광 발전의 보급이 확대되면서 기상 조건에 따라 변동하는 발전 출력을 정확하게 예측하는 일이 중요해지고 있다. 특히 일사량은 태양광 발전 출력에 직접적인 영향을 미치므로, 일사량 예측은 발전량 예측의 정확도를 높이는 데 필요한 기초 자료이다. 정확한 예측 정보는 전력 수급 계획과 예비력 확보 등 안정적인 전력계통 운영에도 활용될 수 있다. 본 연구에서는 일사량 예측 모델 개발에 앞서 2026년 6월부터 9월까지 수집된 Solargis 데이터를 분석하고, 연구원 옥상에 설치된 일사량계의 실측 데이터와 비교하였다. 두 데이터의 시각과 시간 간격을 일치시켜 일사량의 시간별 변동과 데이터 간 차이를 살펴봄으로써, Solargis 데이터의 현장 적용 가능성을 검토하고자 한다. 분석 결과는 향후 일사량 예측 모델의 입력 자료 선정과 전처리 방법을 설정하는 데 활용할 예정이다.

Key Words : 일사량(Irradiance), 일사량 예측(Irradiance Forecasting), Solargis 데이터(Solargis data), 데이터 분석(Data analysis), 태양광 시스템(Photoltaic system)

† Corresponding author, E-mail: korea19@kier.re.kr

후 기
본 연구는 2026년도 기후에너지환경부 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2026-25529146).

PVE-P-41

수면 차광 모의를 통한 수상태양광의 조류 저감 가능성 검토

Assessing Algal Reduction Potential of Floating Photovoltaics Using Shading Simulations

이승재*, 박종윤**†
Seung-Jae Lee*, Jong-Yoon Park**†
*한국수자원공사 물환경계획처, **한국환경연구원 기획경영본부 기획조정실

Abstract : 수상태양광 시설의 수면 피복에 따른 차광은 수중 광환경을 변화시켜 조류 증식에 영향을 줄 수 있다. 본 연구는 국내 다목적댐을 대상 수면 차광 모의결과를 바탕으로 수상태양광의 차광에 의한 조류 저감 가능성과 적용 시 고려사항을 검토하였다. 3차원 수질모형 AEM3D(Aquatic Ecosystem Model 3D)를 이용한 자연형 수상정원 시나리오를 분석 대상으로 하였으며, 수상태양광과 공통된 수면 차광 기작에 주목하였다. 모의기간은 2023년 8월 1일부터 9월 30일까지로, 대상 수역에 20,000, 60,000 및 200,000m^2의 차광 면적을 적용하고 차광 적용 지점으로부터 하류 약 800m에 위치한 평가 지점에서 클로로필-a(Chl-a) 농도를 비교하였다. 분석 결과, 차광 면적 증가에 따라 평균 Chl-a 농도는 기준 시나리오의 23.8 mg/m^3에서 각각 23.7, 23.2 및 21.4 mg/m^3로 감소하였으며, 저감률은 0.4, 2.5 및 10.1%로 나타났다. 최대 Chl-a 농도는 49.8 mg/m^3에서 각각 48.9, 47.5 및 40.5 mg/m^3로 감소하여 1.8, 4.6 및 18.7%의 저감률을 보였다. 이는 모의 조건 내에서 수면 차광 면적 확대가 조류 저감에 기여할 가능성을 시사한다. 다만, 본 결과는 수상정원 기반 차광 시나리오로서 수상태양광 시설의 효과를 직접 검증한 것은 아니다. 또한 수생식물의 영양염류 제거와 수온 변화에 따른 효과는 분석에 포함되지 않았다. 향후 수상태양광 적용성 평가에서는 패널 배치와 간격, 광투과 특성, 수온 및 수체 흐름의 변화를 반영한 모의와 현장 검증이 필요하다. 본 연구는 수상태양광의 수환경 영향평가와 적정 수면 피복 규모 검토를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Key Words : 수상태양광(Floating photovoltaics), 차광효과(Shading effect), 조류 저감(Algal reduction), 수질모델링(Water quality modeling)

† Corresponding author, E-mail: jongyoonpark@kei.re.kr

PVE-P-42

SiNx:H 증착 온도에 따른 TOPCon 태양전지 소성 공정 중 수소 재분포가 Blister 형성과 계면 패시베이션에 미치는 영향

Effect of SiNx:H Deposition Temperature on Hydrogen Redistribution, Blister Formation, and Interface Passivation during Firing of TOPCon Solar Cells

임규현*,**, 김문세*,**, 김용진**, 이상희**, 정경택**, 송희은**, 조윤애**†, 이해석*†, 김가현***†

Kyuhyeon Im*,**, Munse Kim*,**, Yong-Jin Kim**, Sang Hee Lee**, Kyung Taek Jeong**, Hee-eun Song**, Yunae Cho**†, Hae-Seok Lee*†, Ka-hyun Kim***†

*고려대학교 에너지환경대학원, **한국에너지기술연구원 태양광연구단, ***충북대학교 물리학과

Abstract : In TOPCon cells, SiNx:H capping layer acts as a hydrogen source during the firing process. Hydrogen diffusing toward the c-Si/SiOx interface can passivate dangling bonds, whereas hydrogen released outward can induce blisters that damage the passivation stack and the electrode contact. In this study, the deposition temperature of the rear SiNx:H layer in n-type TOPCon structures was varied from 350 to 530 °C to control the hydrogen content and bonding configuration of the film. Implied open-circuit voltage, contact resistance, and blister morphology were evaluated before and after firing, and hydrogen behavior was analyzed by hydrogen exodiffusion, FT-IR, and SIMS depth profiling. The blisters caused delamination extending into the poly-Si layer and voids at the Ag/poly-Si interface, which was accompanied by an increase in contact resistance. In contrast, the after firing iVoc reached its maximum at 450 °C. Exodiffusion and FT-IR results indicated that hydrogen release during firing was mainly associated with changes in Si-H bonds. SIMS profiles showed that the after firing hydrogen concentration at the c-Si/SiOx interface was highest for the 450 °C sample and was not simply proportional to the initial hydrogen content of the SiNx:H layer. These results suggest that the film density of SiNx:H governs the dominant hydrogen pathway during firing, and that the optimum iVoc at 450 °C can be attributed to a balance between suppressed blister-induced damage and effective hydrogen supply to the c-Si/SiOx interface.

Key Words : 패시베이션 (passivationr), 기공 (blister), 접촉 저항 (contact resistace), 실리콘 질화막(Silicon nitride),

† Corresponding author, E-mail: yacho@kier.re.kr, lhseok@korea.ac.kr, kahyunkim@chungbuk.ac.kr

PVE-P-43

음영 손실 최소화를 위한 직렬 접합형 가로등용 태양광 모듈 제조

Fabrication of Series-Connected Photovoltaic Modules for Solar Streetlights under Shading Conditions

윤성민*, 박민준*†
Sungmin Youn*, Min-Joon Park*†
*한국생산기술연구원, 에너지나노그룹

Abstract : This study investigated the fabrication and electrical characteristics of series-connected photovoltaic (PV) modules designed for solar streetlights under partial shading conditions. Crystalline silicon solar cells were divided into five strips using infrared laser scribing and interconnected using electrically conductive adhesive. Six strings, each consisting of 21 series-connected cell strips, were fabricated and arranged in different series-parallel configurations to obtain suitable voltage and current characteristics for solar streetlight applications. The fabricated modules exhibited maximum power outputs of 130.42, 138.65, and 133.29 W for the 6 Parallel(6P), 3 Parallel × 2 Series(3P2S), and 2 Parallel × 3 Series(2P3S) configurations, respectively. Among them, the 3P2S configuration exhibited a maximum power output of 138.65 W with an open-circuit voltage of 29.24 V and was selected considering the voltage requirements and resistive losses of the system. Partial shading corresponding to 10% of the module area was subsequently applied to the developed and commercial PV modules. The power degradation of the developed module was 34.48%, whereas that of the commercial module reached 92.95%. These results demonstrate that an optimized series-parallel configuration can effectively improve the power retention of PV modules under partial shading conditions.

Key Words : 태양광 가로등(Solar streetlight), 음영 손실(Shading loss), 직렬 접합 스트링 셀(Series-connected string cells), 직·병렬 조합(Series-parallel configuration), 결정질 실리콘(Crystalline silicon), 태양광 모듈(Photovoltaic modules)

† Corresponding author, E-mail: pk5659@kitech.re.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00457537, No. RS-2026-25538597)

PVE-P-44

소면적 고전압 태양전지의 제조 및 전기적 특성 분석

Fabrication and Electrical Characteristics of Small-Area High-Voltage Heterojunction Solar Cells

윤성민*, 박민준*†
Sungmin Youn*, Min-Joon Park*†
*한국생산기술연구원, 에너지나노그룹

Abstract : This study investigated the fabrication and electrical characteristics of small-area, high-voltage heterojunction (HJT) solar cells using infrared (IR) laser scribing and series interconnection. HJT solar cells were divided by IR laser scribing followed by mechanical separation, and the scribing depth was evaluated as a function of laser power. Considering the 135 μm cell thickness and the mechanical stability during separation, a laser power of 16.5 W was selected, resulting in a scribing depth of 73 μm. Three split cells were subsequently connected in series using a conductive adhesive to fabricate a small-area, high-voltage solar cell with an area of 21.5 cm^2. The fabricated device achieved an open-circuit voltage of 2.17 V, a short-circuit current density of 10.99 mA/cm^2, a fill factor of 0.796, and a conversion efficiency of 18.91%. The open-circuit voltage increased by approximately 3.03 times compared with that of a single split cell, demonstrating the feasibility of fabricating compact, high-voltage HJT solar cells through IR laser scribing and series interconnection.

Key Words : 소면적 고전압 태양전지(Small-area high-voltage solar cell), 실리콘 이종접합 태양전지(Silicon heterojunction solar cell), 레이저 스크라이빙(Laser scribing), 태양전지 분할(Solar cell splitting), 직렬접합(Series interconnection), 광전변환효율(Solar-to-power conversion efficiency

† Corresponding author, E-mail: pk5659@kitech.re.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. RS-2024-00457537)입니다. 또한 한국생산기술연구원 연구개발적립금사업 "화재·질식 사고 조기 대응을 위한 보급형 고성능 가스 센서 시스템 및 지능형 화재감지기 플랫폼 개발(KITECH UR-26-0001)" 의 지원으로 수행한 연구입니다.

PVE-P-45

SnS 소스의 황 사전 처리를 통한 VTD-SnS의 심층 준위 결함 제어

Deep-Level Defect Control in VTD-SnS Enabled by Pre-Baking the SnS Source with Sulfur

박현우*†, Rahul Kumar YADAV*, 김용태*, 허재영*
Hyeonwoo Park*, Rahul Kumar YADAV*, Yong Tae Kim*, Jaeyoeng HEO*
*전남대학교 신소재공학과

Abstract : Binary Tin sulfide (SnS) has excellent photovoltaic properties; however, its power conversion efficiency (PCE) is typically below 4%. Deep level defect (Sulfur vacancy; V_S) of the vapor transport deposition (VTD)-SnS absorber are the key parameters for the underperformance of solar devices. Here, we reduced the V_S in the SnS absorber layer by pre-baking the SnS source with a small amount of sulfur powder. This increased the efficiency of the SnS solar cell from 3.39% to 4.82%. As clear from XPS analysis this improvement resulted from the reduction in V_S, the deep defects, which enhanced the collection of generated charge carriers. Therefore, the findings of this study provide a novel approach to increasing the efficiency of SnS solar cells by controlling the deep level defect in absorber, which may have significant practical implications for the development of efficient and cost-effective solar cells.

Key Words : Thin-film solar cells, Pre-baking of SnS, Deep-level defect, Efficiency, VTD, Tin sulfide.

† Corresponding author, E-mail: jheo@jnu.ac.kr

PVE-P-46

단계적 이중 버퍼층 전략을 통한 고효율 수열합성 Sb2Se3 박막 태양전지 개발

Stepwise Double Buffer Layer Strategy for High-Efficiency Hydrothermally Deposited Sb2Se3 Thin-Film Solar Cells

송준성*, Parag Patil*, 김용태*, 허재영*†
Junseong Song*†, Parag Patil*, Yong Tae Kim*, Jaeyeong Heo*†
*전남대학교 신소재공학부, **전남대학교 신소재공학부

Abstract : Antimony selenide (Sb2Se3) has recently emerged as a promising material with an optimal band gap, high light absorption coefficient (>105 cm-1), and low toxicity. This study investigates the deposition and optimization of Sb2Se3-based TFSCs via a facile hydrothermal method, and the use of a double buffer layer to analyze its impact on solar cell performance. These hydrothermally grown Sb2Sb3 films were optimized for an FTO/TiO2/CdS/Sb2Se3/Spiro-OMeTAD/Au device structure. In film analysis, XRD patterns revealed the formation of pure-phase material, and SEM images show that the deposited films have a uniform and granular morphology. The AFM study illustrates that an electron transport layer (ETL) prepared with a double buffer layer approach has lower roughness as compared to the Pristine CdS buffer layer. Finally, fabricated TFSCs with a double buffer layer delivered the highest photoconversion efficiency of 6.19% with an open circuit voltage (VOC) of 0.413 V, short circuit current density (JSC) of 26.91 mA cm-2, and a fill factor (FF) of 55%. This performance improvement exceeds 1%p compared with the pristine CdS buffer layer-based device (5.1%). This improvement in device performance is mainly attributed to the formation of a high-quality PN junction resulting from reduced ETL roughness and charge transport properties, which prominently improved JSC, FF, and reduced the series resistance with a double buffer layer.

Key Words : Antimony selenide, Thin film solar cells, Double buffer layer, Hydrothermal

† Corresponding author, E-mail: jheo@jnu.ac.kr

PVE-P-47

PECVD SiNx의 조성비에 따른 패시베이션, 광학 응답 및 결정질 실리콘 태양전지 금속화 신뢰성의 상호 연계

Stoichiometry-Driven Interplay of Passivation, Optical Response, and Metallization Reliability in PECVD SiNx for Crystalline Silicon Solar Cells

김문세*,**†, 송희은*, 김용진*, 조윤애*, 김언수*, 김형우*, 정경택*, 이해석**, 이상희*, 김가현***

Munse Kim*,**†, Hee-eun Song*, Yong-Jin Kim*, Yunae Cho*, Unsoo Kim*, Hyungwoo Kim*, Kyung Taek Jeong*, Hae-Seok Lee**, Sang Hee Lee*, Ka-Hyun Kim***

*한국에너지기술연구원 태양광연구단, **고려대학교 에너지환경대학원, ***충북대학교 물리학과

Abstract : 플라즈마 화학기상증착(PECVD)으로 형성된 수소화 실리콘 나이트라이드(SiNx) 박막은 표면 패시베이션과 광학 제어 기능을 동시에 제공하기 때문에 반도체 소자에서 다기능 유전체층으로 널리 활용되고 있다. 그러나 박막의 조성비, 수소 관련 거동, 계면 전기적 특성 및 공정 신뢰성 간의 상호 연관성은 아직 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 SiH_4/NH_3 전구체 가스비(R*)가 SiNx 박막의 구조적, 전기적, 광학적 및 열적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 분광학적 및 전기적 분석 결과, R* = 0.09 조건에서 높은 고정전하 밀도와 낮은 계면 결함 밀도, 그리고 감소된 캐리어 재결합이 동시에 구현되어 가장 우수한 표면 패시베이션 특성을 나타냈다. 반면, R가 증가하여 Si-rich 조성으로 이동할수록 박막의 질량 밀도는 감소하고 수소 결합 상태가 변화하였으며, 이에 따라 열적 안정성이 저하되고 금속화 공정 중 화학적 반응에 대한 취약성이 증가하였다. 이러한 변화는 유전체층을 통한 Ag 침투를 촉진하고 열처리 이후 emitter shunting 발생 위험을 증가시켰다. 광학 분석에서는 R 증가에 따라 굴절률은 증가한 반면, 광학적 밴드갭은 감소하고 기생 흡수는 증가하였으며, 이는 특히 단파장 영역의 외부양자효율에 영향을 미쳤다. 소자 수준의 측정에서도 중간 조성 조건인 R* = 0.09에서 가장 우수한 전기적·광학적 성능이 확인된 반면, 과도하게 Si-rich한 박막에서는 재결합 증가, 광학 손실 및 공정 유래 열화가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 SiNx의 조성비가 구조적, 전기적, 화학적 및 광학적 특성의 상호 연계된 거동을 지배함을 보여준다. 따라서 패시베이션 품질, 광학 성능 및 금속화 신뢰성을 동시에 최적화하기 위해서는 전구체 가스 조성의 정밀한 제어가 필수적이다. 본 연구 결과는 열적 및 화학적 스트레스가 동시에 작용하는 실리콘 태양전지 및 기타 광전자 소자에서 SiNx 유전체층을 설계하기 위한 실용적인 지침을 제공한다.

Key Words : SiNx:H films, plasma-enhanced chemical vapor deposition, solar cell efficiency, film composition

†Corresponding author, E-mail: kahyunkim@chungbuk.ac.kr

PVE-P-48

TOPCon 태양전지의 Ag-Al 전극 접촉 형성 및 성능 향상을 위한 소성 조건 최적화

Optimization of Firing Conditions for Ag-Al Contact Formation and Improved Performance in TOPCon Solar Cells

조윤애*†, 김문세*, 김용진*, 이상희*, 정경택*, 송희은*
Yunae Cho*†, Munse Kim*, Yong Jin Kim*, Sang Hee Lee*, Kyung Taek Jeong*, Hee-eun Song*
*한국에너지기술연구원, 태양광연구단

Abstract : The formation of low-resistance metal contacts while maintaining effective surface passivation is essential for high-efficiency tunnel oxide passivated contact (TOPCon) solar cells. Front-side metallization using Ag-Al paste is strongly influenced by the firing conditions, which govern contact formation at the passivated boron-doped emitter. This study investigates the effects of burn-out conditions and peak firing temperature on the structural, compositional, and electrical characteristics of Ag-Al contacts. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were employed to examine changes in phase composition and contact morphology under different firing profiles. These observations were correlated with specific contact resistivity and solar cell efficiency to assess the relationship between contact formation and device performance. Based on this analysis, optimal firing conditions were identified for effective Ag-Al metallization. The findings provide a basis for refining the firing process and improving the performance of TOPCon solar cells.

Key Words : ilicon solar cells(실리콘 태양전지), Metallization(전극화)

† Corresponding author, E-mail: yacho@kier.re.kr

BES-P-1

구이 조리 연기의 효과적인 흡입을 위한 식당용 국소 배기 후드의 형상 개발 및 최적화

Geometric Design and Optimization of a Restaurant Ventilation hood for Enhanced Suction of Grilling Fumes

육세진*†, 남학호*, 정재철*
Se-Jin Yook*†, Hak-Ho Nam*, Jae-Cheol Jeong*
*한양대학교 기계공학부

Abstract : 마스크 착용이 불가능한 식음 환경에서는 조리 과정에서 비산하는 고농도 유해 입자와 비말 에어로졸에 취약하게 노출되므로, 주변의 국소 배기 환기 성능 확보가 필수적이다. 특히 구이 전문 식당에 보편적으로 설치된 단일 상부 흡입형 후드는 테이블 주변의 기류 정체 및 호흡선 근방의 오염물질 잔류를 제어하는 데 구조적 한계를 지닌다. 본 연구에서는 다방향 기류 흡입을 유도하는 배기 후드의 새로운 형상을 제안하고, 유동 해석을 통한 형상 최적화 및 소형 챔버를 활용한 실험을 병행하여 공기 중 입자상 물질의 배출 성능을 정량적으로 평가하였다. 주요 형상 매개변수를 도출하기 위해 요인설계(Factorial Design)와 중심합성계획법(CCD) 기반의 반응표면분석법(RSM)을 전산유체역학(CFD)과 연계하여 다목적 최적 설계를 수행하였다. 검증을 위해 소형 챔버를 구축하고, 조리 연기와 비말을 모사한 시험 에어로졸을 주입하여 착석자 호흡 영역에서의 수농도 분포를 비교 분석하였다. 해석 결과, 기존 후드의 중앙 편중 유동으로 인해 발생하던 측면 와류 정체 구역이 신형 후드의 다방향 흡입 메커니즘을 통해 효과적으로 개선됨을 확인하였다. 실험 결과를 보면, 새로 개발된 배기 후드는 대조군 대비 호흡선 근방의 잔류 에어로졸 수농도를 유의미하게 낮추었고, 특히 미세 입자 영역에서 탁월한 배기 효율을 나타냈다. 본 연구에서 개발된 새로운 형상의 배기 후드는 식당 내 조리 연기뿐만 아니라 비말 에어로졸의 확산을 효과적으로 저감하여 식당 이용자들의 건강 증진에 도움될 것으로 기대된다.

Key Words : 국소배기후드(Local exhaust hood), 반응표면분석법(Response surface methodology), 에어로졸(Aerosol)

†Corresponding author, E-mail: ysjnuri@hanyang.ac.kr

후 기

This study has been performed for ‘Development Project for One-stop Platform Technology of Atmospheric Environmental Monitoring UAV System’ (SN: RS-2025-02213909) funded by the ROKG.

BES-P-2

발광다이오드 조명 장치의 방열 성능 개선을 위한 강제대류 냉각의 실험적 평가

Experimental Investigation of Forced Convection Cooling for LED Lighting Fixtures

남학호*, 정재철*, 육세진*†
Hak-Ho Nam*, Jae-Cheol Jeong*, Se-Jin Yook*†
*한양대학교 기계공학부

Abstract : 밀폐된 공간에서 LED 조명 가동 시 발생하는 열 축적은 광효율 저하와 실내 냉방 부하 증가를 초래하므로, 등기구 차원의 효과적인 방열 및 폐열 회수 기술이 요구된다. 본 연구에서는 상용 LED 조명 장치의 기본 외형을 유지하면서 방열 성능을 극대화하기 위해, U자형 알루미늄 구조물을 보조 히트싱크로 장착한 강제대류 냉각 구조를 설계하고 열유동 특성을 실험적으로 평가하였다. 등기구 내 전원공급장치 상부에는 통기용 타공을 형성하고 대향측 끝단에는 흡입 팬을 부착하여 강제 유동을 구현하였으며, 내부 U형 구조물을 통해 LED 모듈과 SMPS의 유효 전열 면적을 넓혔다. 성능 실험 결과, 구조물이 없는 단순 강제대류 대조군과 비교했을 때 누셀트 수와 열회수량은 각각 최대 36.4%, 23.3% 향상되었다. 유로 축소로 인해 압력 강하가 최대 35.1% 증가하였으나, 실험을 수행한 전 레이놀즈 수 범위에서 열성능계수가 모두 1 이상을 기록하여 압력 손실 대비 열전달 촉진 효과가 우수함을 확인하였다. 본 연구의 냉각 구조는 별도의 대규모 개조 없이도 기존 등기구의 열 축적 문제를 완화하고 배기열 회수 효율을 동시에 확보할 수 있는 실용적인 방열 설계 방안으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : 발광다이오드(LED), 방열(Heat dissipation), 강제대류(Forced convection)

† Corresponding author, E-mail: ysjnuri@hanyang.ac.kr

후 기

This work was supported by Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through R&D Program for Fluorinated Greenhouse Gas Mitigation Technologies in Response to International Agreement Project, funded by Korea Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (RS-2026-25501408).

BES-P-3

압력손실 저감을 위한 파이프 곡관부 내벽 형상 개발

Development of Inner-wall Geometry for Pressure Loss Reduction in Pipe Bends

정경진*, 정재철*, 남학호*, 육세진*†
Kyung-Jin Jeong*, Jae-Cheol Jeong*, Hak-Ho Nam*, Se-Jin Yook*†
*한양대학교 기계공학부

Abstract : 기체 이송 관로의 곡관부에서는 급격한 유로 방향 변화 및 유동 박리로 인해 압력손실이 발생한다. 본 연구는 기체를 이송하는 원형 곡관의 내벽에 새로운 구조를 적용하여 유동 박리와 압력손실을 저감하는 것을 목적으로 한다. 새로 개발된 형상의 길이, 높이 및 곡률을 설계변수로 설정하고, 실험계획법에 따라 해석 케이스를 구성한 후 전산유체역학 해석과 반응표면법으로 형상을 최적화하였다. 다양한 레이놀즈수 및 곡률 조건에서 유동 특성을 무차원화하고, 유속 분포, 와류 형성, 박리 영역 및 국부저항계수를 분석하여 압력손실 저감 효과를 평가하였다. 또한 최적 형상을 3D 프린팅으로 제작하고 유속과 차압을 측정하여 수치해석 결과를 검증하였다. 개발된 내벽 구조의 최적 형상은 곡관 내 박리 영역과 난류 운동 에너지를 감소시키고 유동의 직진성을 향상시켰다. 검토한 레이놀즈수 범위에서 기준 형상보다 낮은 국부저항계수를 보였으며, Re = 100,000 부근에서 차압이 최대 약 17% 감소하였다. 수치해석과 실험 결과는 최대 오차 약 10% 이내에서 일치하였으며, 레이놀즈수에 따른 국부저항계수 예측 상관식을 도출하였다. 이러한 결과는 곡관 내벽 형상 개선이 유동 박리를 제어하고 관로의 압력손실을 줄여 송풍 동력 절감에 기여할 수 있음을 시사한다.

Key Words : 압력손실(Pressure loss), 곡관(Pipe bend), 유동 박리(Flow separation)

† Corresponding author, E-mail: ysjnuri@hanyang.ac.kr

후 기

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (RS-2025-25404754).

BES-P-4

설계 요구 조건을 활용한 LLM 기반 건물에너지 모델의 입력오류 수정 평가

Evaluation of LLM-Based Input Error Correction in Building Energy Models Using Design Requirements

이준영*, 김동수*†, 이루다*, 황익하*, 송민준*, 이정은*
Junyoung Lee*, Dongsu Kim*†, Ruda Lee*, Ikha Hwang*, Minjun Song*, Jeongeun Lee*
*국립한밭대학교 건축공학과

Abstract : EnergyPlus를 통한 건물에너지 모델링은 패시브 및 액티브 시스템의 에너지 성능과 실내환경을 평가하는 데 활용된다. 그러나 공조 모델링에서 외기량, 장비 효율 및 제어조건이 설계 의도와 다르게 입력되어도 계산이 정상적으로 완료될 수 있으며, 실행 여부만으로 모델의 적합성을 판단하기에는 한계가 있다. 이러한 입력조건의 검토를 지원하는 방안으로, 자연어로 제시된 설계조건을 해석하고 입력파일의 수정을 제안할 수 있는 대규모 언어모델(Large Language Model, LLM)의 활용을 고려할 수 있다. 이에 본 연구는 건물에너지 모델의 입력오류 수정 정확도를 높이기 위한 LLM의 정보 제공 방식을 검토하고자 하였다. 이를 위해 설계 요구조건과 시뮬레이션 결과의 제공 여부에 따라 결함 주입 전 기준값의 복원 정확도와 수정 대상 외 항목의 변경 여부를 비교하였다. 이에 EnergyPlus 22.2 예제모델에 입력오류를 주입하고, 두 LLM에 제공하는 정보를 네 조건으로 구분하였다. 입력파일만 제공한 조건을 기본으로, 설계 요구조건, 시뮬레이션 결과 또는 두 정보를 추가하였다. 설계 요구조건은 허용범위와 제어 관계로 제시했으며, LLM은 추가 검색과 대화 이력 공유 없이 수정안을 생성하였다. 수정안은 모델에 적용한 뒤, 결함 주입 전 기준값의 복원 여부와 수정 대상 외 항목의 변경 여부를 확인하였다. 기준모델 점검을 거쳐 선정한 네 결함 사례에 대해, 두 LLM과 네 정보 조건에서 각각 세 차례 반복한 총 96개 응답을 분석하였다. 입력오류가 해석 결과에 미치는 영향을 분석한 결과, 외기량 오류 사례는 정상적으로 계산되었음에도 연간 건물 전력사용량이 기준모델보다 5.96% 감소하였다. 동시에 재실 중 냉방 설정온도 미충족시간은 41.5시간에서 122.75시간으로 증가하여, 에너지 사용량의 감소만으로 입력조건의 적절성을 판단하기 어렵다는 점을 보여주었다. 한편, LLM의 기준값 정확 복원율은 입력파일 단독과 시뮬레이션 결과 추가 조건에서 각각 33.3%, 설계 요구조건 추가에서 83.3%, 두 정보 동시 제공에서 79.2%였다. 시험한 사례에서는 설계 요구조건을 제공했을 때 기준입력이 더 많이 복원되었다. 이는 LLM을 활용한 모델 검토에서 설비의 허용조건과 제어 의도를 명시할 필요성을 시사한다.

Key Words : 건물에너지 모델링(Building Energy Modeling), EnergyPlus(EnergyPlus), 대규모 언어 모델(Large Language Model, LLM), 설계 요구조건(Design Requirements)

† Corresponding author, E-mail: dongsu.kim@hanbat.ac.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00266248), 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25498603).

ZEB-P-1

지자체 건물에너지 정책지원을 위한 데이터 플랫폼 활용 시나리오 개발

Development of Data Platform Use Cases for Supporting Local Government Building Energy Policies

김은환*, 조가영*†, 이기용*
Eunhwan Kim*†, Gayoung Cho*†, Kiyong Lee*
*서울연구원 지속가능연구실

Abstract : 건물부문의 탄소중립 이행을 위해서는 건물군의 에너지 소비수준을 분석하고 정책 개입이 필요한 건축물을 효과적으로 선별·관리할 수 있는 데이터 기반의 의사결정 지원이 필요하다. 이를 위해 건축물 정보와 에너지사용량, 기상·공간정보 등 건물에너지 소비에 영향을 미치는 다양한 데이터를 건물단위로 통합하고, 에너지 성능지표와 벤치마킹 방법론을 적용하여 지도 기반으로 조회·분석할 수 있는 건물에너지 데이터 분석·시각화 서비스 DEEPVIEW가 개발되었다. DEEPVIEW는 지역 및 개별 건축물의 에너지 소비특성을 파악하고 유사 건물군과 비교·분석할 수 있는 기능을 제공하나, 이를 실제 정책지원 도구로 활용하기 위해서는 지자체의 정책업무 및 업무 수행절차와 연계한 구체적인 활용방안이 마련될 필요가 있다. 본 연구는 DEEPVIEW에서 제공하는 데이터와 분석기능을 지자체 정책업무에 적용하기 위한 활용 시나리오를 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 첫째, 지자체 정책담당자, 탄소중립지원센터 및 관련 전문가를 대상으로 수행한 FGI와 활용성 검토 결과를 바탕으로 건물에너지 관련 정책업무를 분석하고 업무 수행에 필요한 데이터 및 기능 수요를 도출하였다. 둘째, 도출된 업무 수요와 DEEPVIEW의 데이터 및 분석기능을 매칭하여 정책업무별 지원 가능성을 검토하였다. 셋째, 이를 바탕으로 정책대상 발굴, 사업지원 및 성과관리 등 지자체 건물에너지 정책업무와 연계한 활용 시나리오를 도출하였다. 본 연구는 DEEPVIEW의 데이터 및 분석기능과 실제 지자체 정책업무 간 연계방안을 구체화함으로써 건물에너지 데이터 플랫폼의 지자체 정책 활용방향을 제시하였다.

Key Words : 탄소중립 (Carbon Neutrality), 건물에너지 (Building Energy), 지자체(Local Government), 전문가인터뷰 (Focus Group Interview, FGI), 딥뷰 활용시나리오(DEEPVIEW Use Case)

†Corresponding author, E-mail: bestornggy@gmail.com

후 기
본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행한 연구 과제입니다.(과제번호 : RS-2023-00244769).

ZEB-P-2

Carbon-Aware Optimal Operation of Data Centers Considering Renewable Energy Forecast Uncertainty and Batch Workload Flexibility

김현중*†
Hyunjoong Kim*†
*국립한밭대학교 전기공학과

Abstract : The increasing integration of renewable energy creates opportunities to reduce the carbon emissions associated with data center operations. However, the variability and forecast uncertainty of renewable generation make it difficult to effectively align data center electricity demand with periods of abundant low-carbon energy. This study proposes a carbon-aware optimal operation framework that considers both renewable energy forecast uncertainty and the temporal flexibility of batch workloads. First, EnergyPlus is used to model the time-varying electricity demand of a data center by incorporating outdoor weather conditions, IT equipment utilization, internal heat gains, and the operating characteristics of the cooling system. Computing workloads are then classified into inflexible workloads requiring immediate processing and flexible batch workloads whose execution can be shifted within specified completion deadlines. The processing requirements, server capacity limits, and completion deadlines of batch workloads are explicitly incorporated into the operational model. Forecast errors in solar and wind generation are represented using an uncertainty set, and a robust optimization model is formulated to ensure feasible data center operation and timely workload completion under adverse renewable generation conditions. The proposed framework jointly minimizes electricity procurement costs, carbon emissions, and workload delay penalties by shifting flexible batch workloads toward periods characterized by high renewable energy availability and low grid carbon intensity. Furthermore, the effects of renewable forecast errors and the selected level of robustness on operating costs, carbon emissions, renewable energy utilization, and batch workload schedules are evaluated. By integrating building energy simulation with uncertainty-aware workload scheduling, this study provides a comprehensive framework that jointly captures the physical energy characteristics of data centers and the operational flexibility of computing workloads.

Key Words : Data center; EnergyPlus; Batch workload scheduling; Renewable energy forecast uncertainty; Robust optimization; Carbon-aware operation;

† Corresponding author, E-mail: hyunjoongkim@hanabat.ac.kr

ZEB-P-3

식물공장 컨테이너의 공기순환 배관 설계 및 열유동 특성에 관한 수치해석 연구

Numerical Study on Air Circulation Piping Design and Thermal Characteristics in a Plant Factory Container

최관용*,**, 윤찬솔*, 김영원*†
Gwan Yong Choi*,**, Chan Sol Yun*, Young Won Kim*†
*한국생산기술연구원 에너지나노그룹, **한양대학교 융합기계공학과

Abstract : 식물공장에서는 LED 조명 및 냉방설비에 의해 지속적인 열부하가 발생하므로 내부 온도를 적정하게 유지하기 위한 공기순환 시스템 설계가 중요하다. 본 연구에서는 식물공장 컨테이너에 적용 가능한 공기순환 배관 구조를 설계하고, 전산유체해석을 이용하여 분기관의 유량 분배 특성과 내부 열유동 특성을 평가하였다. 전체 질량유량을 기준으로 급·배기 배관을 설계한 후 다수의 분기관에서 유량이 균일하게 분배되는지 검토하였으며, 대표 1단 모델과 전체 컨테이너 모델에 대해 LED 발열 조건을 적용하여 내부 유동 및 온도분포를 분석하였다. 해석 결과, 분기관별 유량이 비교적 균일하게 분배되었고 내부 공기 역시 전반적으로 고르게 순환하였다. 또한 LED 주변에서 국부적인 온도 상승이 나타났으나 내부 평균 온도는 약 22~23℃ 수준으로 유지되었다. 이를 통해 제안한 공기순환 배관 구조의 유량 분배 및 열환경 제어 성능을 확인하였다.

Key Words : 식물공장(Plant factory), 공기순환(Air circulation), 배관 설계(Piping design), 전산유체해석(CFD), 열유동(Thermofluid)

† Corresponding author, E-mail: ywkim@kitech.re.kr

후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Climate, Energy & Environment(MCEE) of the Republic of Korea (No. RS-2024-00441895).

ZEB-P-4

도심형 건물 에너지 자율운전을 위한 에너지 공급 및 사용 데이터 분석

Analysis of Energy Supply and Consumption Data for Autonomous Energy Operation of Urban Buildings

김창헌*, 송다혜*
Changheon Kim*†, Song Dahye*
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract: 최근 건묵물은 국가 전체 에너지 소비의 약 30%에 육박하는 주요 에너지 소비원으로, 대도시에서 탄소를 가장 많이 배출하는 에너지 소비원으로 말할 수 있다. 정부는 탄소중립 사회를 지향점으로 제로에너지 건축물 인증 의무화 로드맵에 따라 2020년부터 연면적 1,000m^2 이상 공공건축물을 시작으로 단계적으로 의무화가 확대되고 있으며 2025년에는 민간 건축물 범위까지 확대하고 있다. 그에따라 현재 보급되어있는 BEMS(Building Energy Management System)의 자동제어 방식은 건물 내 설비의 에너지 사용 현황을 모니터하고 가시화하여 사용자의 직관적 판단 혹은 정해진 시나리오에 의해 제어되는 수준에 지나지 않고 있어 에너지 효율화를 위해서는 자동제어 시스템의 개발이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 기계학습 기반의 BEMS 통합 운영 패키지 시스템을 개발하기 위해 건물에너지의 공급 및 사용 데이터의 기초분석 결과를 보고한다. 실증 대상지로 선정한 연구원 시험생산동(클린룸)에서 발생하는 에너지 데이터를 기반으로 데이터 프로파일링, 전처리 그리고 수요·생산 예측을 위한 기초모델을 정의하였다. 실증지 내 개별 구성 설비의 사용량 및 월 평균 전력 사용 추세를 추산하고 이를 통해 향후 AI 자율운전을 위한 운영 시나리오 및 제어 프레임워크의 구성 방향을 제시한다.

Key Words : AI자율운전(AI autonomous operation), 건물 에너지 자립화(Building energy independent), 열전기 복합(Hybrid Thermal-Electiric), 건물에너지(Building energy), 통합운영(Integrated operation)

† Corresponding author, E-mail: chkim@kopti.re.kr

후 기

본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역혁신선도기업육성(R&D), (S3471392)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

BEE-P-1

일본 주택성능표시제도의 평가방법을 적용한 국내 중고층 목조건축물의 결로방지성능 검토

Condensation Prevention Performance Assessment of Mass Timber Buildings based on the Japanese Housing Performance Indication System

배상무*, 김유진*, 김영탁**, 최현중*†
Sangmu Bae*, Yu Jin Kim*, Youngtag Kim**, Hyun-Jung Choi*†
*한국건설기술연구원 건축에너지연구본부, **(주)디알이앤지

Abstract : Mass timber buildings have gained increasing attention as a means of reducing carbon emissions in the building sector. However, quantitative evaluation criteria for condensation prevention performance remain insufficient, leading most evaluations to rely on guidelines developed in other countries. This study evaluates the condensation prevention performance of timber building envelopes under South Korean climatic conditions by applying the Japanese evaluation method, which provides calculation-based procedures for timber envelopes with fibrous insulation. The regions were classified according to heating degree-days, and the evaluation was conducted for each region. Two-dimensional steady-state heat transfer analysis predicted no surface condensation at thermal bridges. Meanwhile, transient hygrothermal analysis identified the presence of an interior-side vapor barrier as a key factor affecting interstitial condensation. In envelopes without an interior-side vapor barrier, the relative humidity at the interface between the glass wool insulation and the structural plywood exceeded 98%, indicating that an interior-side vapor barrier plays a critical role in preventing interstitial condensation in timber building envelopes with fibrous insulation installed in wall cavities.

Key Words : 중고층 목조건축물(Mass timber building), 결로방지성능(Condensation prevention performance), 표면결로(Surface condensation), 내부결로(Internal condensation), 방습층(Vapor barrier)

† Corresponding author, E-mail: mingineu@kict.re.kr

후 기
본 연구는 산림청(한국임업진흥원)의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2024-00400723).

BEE-P-2

서울시 저층주거지의 도시 회복력 향상을 위한 환경 특성 분석

Analysis of Environmental Characteristics of Low-Rise Residential Areas in Seoul for Enhancing Urban Resilience

이기용*, 조가영*†
Kiyong Lee*, Gayoung Cho*†
*서울연구원 지속가능연구실

Abstract : 기후변화에 따른 폭염, 한파, 집중호우 등 극한기후의 발생 빈도와 강도가 증가하면서 도시가 기후위험에 대응하고 재난 이후 기능을 회복할 수 있는 도시 회복력(Urban Resilience)의 중요성이 높아지고 있다. 특히 사람이 거주하는 건축물은 기후위험에 직접적으로 노출되는 도시 구성요소로서, 최근에는 건축물의 기후적응과 주거환경의 회복력을 향상하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 선행연구에서는 기후위험에 대한 도시의 취약성이 인구·사회경제적 특성뿐만 아니라 건축물의 물리적 특성, 도시공간의 형태 및 환경적 특성에 따라 공간적으로 다르게 나타남을 제시하고 있다. 또한 서울을 대상으로 한 연구에서도 폭염 취약지역이 저층·고밀 주거지역 및 골목 등 특정 도시공간에 집중되는 특성이 확인되고 있다. 서울시는 주거환경 개선을 위해 단열성능 개선 및 에너지 효율 개선을 위한 집수리 등을 지원하고 있으나, 신청하는 가구의 노후도와 소득 수준을 중심으로 이루어져 기후변화에 따른 위험에 대한 지역별 노출 및 취약 특성을 종합적으로 고려하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 서울시 저층주거지를 대상으로 건축물 및 주거지 인근의 특성, 인구 및 취약계층 분포, 기후환경 특성 등을 공간적으로 분석하고, 각 요소의 분포 및 중첩 양상을 파악하고자 한다. 이를 통해 서울시 저층주거지의 주거환경 및 기후취약성을 진단하고, 향후 도시 회복력 향상 및 주거환경 개선 관련 정책 지원을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

Key Words : 기후변화(Climate change), 도시 회복력(Urban resilience), 저층주거지(Low-Rise residential Areas), 공간분석(Spatial Analysis)

† Corresponding author, E-mail: zec@si.re.kr

후 기
본 연구는 서울연구원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : 2026-CR-06).

BEE-P-3

창호 유리 사양별 냉·난방부하 영향 분석: 건물 유형 및 기후조건 중심

Analysis of the Impact of Heating and Cooling Loads by Window Glass Specification: Building Type and Climate Conditions Focused

김예은*, 이준영*, 김민우*, 이소예*, 김동수*, 윤종호*†
Yeeun Kim*, Junyoung Lee*, Minwoo Kim*, Soye Lee*, Dongsu Kim*, Jongho Yoon*†
*국립한밭대학교 건축공학과

Abstract : 창호 유리의 열적 성능 특성은 건물의 냉·난방부하에 영향을 미친다. 또한 건물 유형과 기후 조건에 따라 요구되는 창호 성능이 달라질 수 있다. 이에 본 연구는 열관류율(U-value)과 태양열취득계수(Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)를 주요 비교 변수로 설정하고, 시뮬레이션을 통해 건물 유형과 기후조건별 냉·난방부하 저감에 유리한 유리 사양을 파악하고자 하였다. 이를 위해 비교 유리(Glazing, G1~G3) 3종을 선정하였다. G1~G3는 실제 상용 유리 제품의 구성과 물성값을 바탕으로 선정한 비교 사양이며,각 사양의 열관류율($W/m^2 \cdot K$) 및 SHGC 값은 다음과 같다: G1(0.453, 0.346), G2(0.700, 0.366), G3 (0.510, 0.422). 이들 유리 사양 3종을 DOE 프로토타입 건물 4종(상업용, 주거용, 교육용, 사무용) 및 기후조건 16개와 조합하여 구성하고, EnergyPlus 26.1을 이용해 연간 냉·난방부하를 분석하였다. 분석 결과, 냉방 위주 기후 및 건물 유형 조합에서 G1 적용 시, G2와 G3 평균 총부하 대비 평균 약 2.50%의 부하 절감률을 보였다. 반면, 난방 위주 기후 및 건물 유형 조합에서는 G3가 G1과 G2의 평균 총부하 대비 평균 1.12%의 부하 절감률로 가장 적합한 유리 사양으로 분석되었다. 이러한 결과는 유리의 에너지 성능이 U-value 또는 SHGC의 개별적인 크기만으로 결정되지 않으며, 건물 유형과 기후 조건에 따른 냉·난방부하 특성과 두 성능지표의 조합을 종합적으로 고려하여 평가할 필요가 있음을 보여준다.

Key Words : 기후대(Climate Zone), 창호 유리(Window Glazing), 열관류율(U-value), 태양열취득계수(Solar Heat Gain Coefficient, SHGC), 냉·난방부하(Heating and Cooling Load)

†Corresponding author, E-mail: jhyoon@hanbat.ac.kr

후 기
본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “월드클래스 플러스(R&D, P0024373)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

BEE-P-4

지역환경 · 건물 · 건강 · 소득 요인을 반영한 에너지 취약가구의 폭염 리스크 지수 산정

Estimation of a Heatwave Risk Index for Energy-Vulnerable Households Incorporating Regional Environmental, Building, Health, and Income Factors

조가영*†
Gayoung Cho*†
*서울연구원 지속가능연구실

Abstract : 기후변화로 폭염의 빈도와 강도가 증가하면서 에너지 취약가구의 주거환경 위험이 확대되고 있다. 기존 폭염 평가는 주로 기온과 상대습도에 기반한 체감온도 등 기상요인을 중심으로 이루어지거나 일부 사회경제적 지표를 활용해 왔으며, 지역의 환경 및 대응여건, 건물의 물리적 특성, 거주자의 건강 민감도와 사회경제적 취약성을 종합적으로 반영하는 데 한계가 있다. 본 연구는 서울시 에너지 취약가구의 폭염 리스크를 종합적으로 평가하기 위해 국내외 폭염지표의 산정방법과 한계를 검토하고, 활용 가능한 공공데이터를 바탕으로 평가요인을 선정하고 가중치를 적용하였다. 평가체계는 지역환경, 건물, 건강, 소득유형의 네 부문으로 구성하였다. 지역환경 부문에는 폭염일수, 열대야일수, 녹지면적, 무더위쉼터 및 의료기관 접근성을, 건물 부문에는 사용승인연도, 주거유형, 건축구조 및 냉방설비 보유 여부를 적용하였다. 건강 부문에는 성별, 연령, 온열질환, 고혈압 및 당뇨 여부를 반영하였으며, 소득유형 부문은 기초생활수급자, 차상위계층 및 일반가구로 구분하였다. 각 지표의 단위와 영향 방향을 표준화하고 가중치를 적용하여 종합 폭염 리스크 지수를 산정하였다. 본 연구는 기상 및 소득 중심의 단편적 평가에서 벗어나 지역환경, 건물, 건강 및 소득요인을 통합한 폭염 리스크 평가체계를 제시했다는 데 의의가 있으며, 향후 고위험 에너지 취약가구와 우선지원 대상을 선별하고 주거환경 개선, 냉방지원 및 건강·복지서비스를 연계하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

Key Words : 기후변화(Climate Change), 에너지 취약가구(Energy-Vulnerable Households), 폭염 리스크 지수(Heatwave Risk Index), 폭염 취약성(Heat Vulnerability), 지역환경(Local Environmental Factors)

† Corresponding author, E-mail: bestronggy@gmail.com

후 기

본 연구는 2025년도 서울특별시 재원으로 서울연구원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : 2025-PR-46).

STC-P-1

선형 프레넬 렌즈 및 진공관형 집열기 기반 추적 집광형 태양열 시스템 열 성능 분석

Thermal Performance Analysis of a Tracking Concentrating Solar Thermal System Based on a Linear Fresnel Lens and an Evacuated Tube Collector

천승현*, 문병은**†
Seunghyeon Cheon*, Byeongeun Moon**†
*국립순천대학교 스마트농업공학과, **국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

Abstract : 본 연구는 농업시설의 난방 에너지 절감 및 신재생 열에너지 활용을 위해 선형 프레넬 렌즈와 진공관형 집열기를 이용한 추적 집광형 태양열 시스템의 열 성능을 분석하고자 수행하였다. 시스템은 PMMA 재질의 선형 프레넬 렌즈, 2축 태양 추적 시스템, 진공관형 집열기, 순환부 및 축열조로 구성하였다. 집열부는 진공관 내부에 헬리컬 형태의 동관을 삽입하여 집광된 태양에너지가 동관 내부 열매체로 전달되도록 설계하였다. 축열조 용량 50 L 및 순환 유량 1 L/min 조건에서 실험을 수행하였으며, 일사량, 외기 온도, 진공관 표면 온도, 입·출구 및 축열조 수온을 각각 측정하였다. 또한, 일사량과 진공관 표면 온도 간의 지수적 상관관계 분석을 통한 태양 추적 정확도를 분석하였다. 실험 결과, 집열기 출구 평균 수온은 입구 평균 수온보다 약 4.2～5.2℃ 높게 나타나 집광된 태양에너지가 열매체로 전달됨을 확인하였다. 15분 단위의 준정상 상태 조건에서 산정한 집열 효율은 16.3～41.9% 범위로 나타났으며, 평균 집열 효율은 28.1～30.6%로 분석되었다. 또한 50 L 축열조의 수온은 초기 온도 대비 약 22.1～23.0℃ 상승하였다. 축열조의 가열 시간과 온도 상승을 고려한 시스템 종합 효율은 14.0～19.4%로 나타났다. 진공관형 집열기 내부의 열전달 특성을 분석하기 위해 동관, 열매체 및 진공관 내부 영역을 포함한 CFD 해석 모델을 구성하였다. CFD 모델의 해석 결과를 검증하기 위해 특정 시점의 1분 구간 측정 데이터를 대표 운전조건으로 적용하여 예비 열유동 해석을 수행하였다. 해석 결과, 출구 수온은 약 54.0℃로 분석되었으며, 동일 조건의 실측값 53.8℃와 비교하여 상대오차는 약 0.37%로 나타났다. 추후 추가 실험 데이터를 기반으로 CFD 모델의 해석 결과를 검증하고, 이를 바탕으로 태양열 시스템의 열 성능 분석 및 농업시설 에너지 공급 시스템으로 개발하고자 한다.

Key Words : 농업 에너지(Agricultural energy), 선형 프레넬 렌즈(Linear fresnel lens), 헬리컬 동관(Helical copper tube), 진공관형 집열기(Evacuated tube collector), 전산유체역학(Computational fluid dynamics)

†Corresponding author, E-mail: mbe25@scnu.ac.kr

후 기

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전남 앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다(2026-ANCHOR-14-003).

STC-P-2

디지털 트윈 기반 온실 실내환경 및 열원설비 운영관리 모니터링 시스템 개발

Design and Evaluation of an Indoor Environment Monitoring System for Glass Greenhouses According to Envelope Performance

김일권*, 임희원*, 이왕제**, 안영섭**, 이경호**†, 신우철***
Ilkwon Kim*, Heewon Lim*, Wangje Lee**, Youngsub An**, Kyoung-ho Lee**†, U-Cheul Shin***
*다이슨스피어(주), **한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, ***대전대학교 건축공학과

Abstract : 본 연구에서는 온실 실내환경과 열원설비의 통합 운영관리를 위한 기초 모니터링 시스템을 구축하고, 외피 유리가 서로 다른 실증 온실의 일사 유입 특성을 비교·평가하였다. 실증 대상은 일반 단판유리와 복층 진공유리를 각각 적용한 소규모 유리온실 2개소로, 크기는 10 × 8 m, 냉난방 공간은 8 × 8 m, 최고 높이는 6 m, 측고는 3.8 m이며, 외피 유리를 제외한 사양은 동일하다. 각 온실에 온습도 센서 14개, 유리 표면온도 센서 4개, 이산화탄소 센서와 일사계를 각각 설치하고, 외부 일사계를 통해 실내외 일사량을 비교하였다. 모니터링 시스템은 다양한 통신 방식과 센서 출력 형식을 수용하는 이기종 통신 통합 인터페이스를 중심으로 구축하였다. 온습도 센서에는 RS-485-이더넷 변환 방식, 표면온도 센서와 일사계에는 ADC 기반 TCP/IP 통신, 이산화탄소 센서에는 LoRa 무선통신을 적용하였다. 수집 데이터는 무선 AP를 통해 메인 서버로 전송하여 통합 관리하도록 구성하였다. 또한, 향후 열원설비 제어시스템과 연계하여 환경 모니터링과 설비 제어를 단일 시스템에서 수행할 수 있도록, 제어조건 설정과 운영성능 평가를 위한 기초 데이터를 축적하고 있다. 2026년 8월 16일부터 9월 15일까지 수집한 1분 간격의 일사 데이터를 분석한 결과, 외부 대비 내부 누적 일사량 비율은 단판유리 온실 30.8%, 진공유리 온실 20.9%로 나타났다. 진공유리 온실의 누적 일사량은 단판유리 온실보다 32.0% 낮았으며, 일별 비율은 각각 12.3~47.6%와 9.9~34.0%였다. 이는 측정 기간의 설치·운영 조건이 반영된 결과로, 외피 유리의 영향을 해석하기 위해서는 차광 및 계측 조건의 검토가 필요하다. 향후 광학분광계를 추가하여 가시광선 영역의 분광 특성과 광합성광양자속밀도(PPFD)를 비교·평가하고, 열원설비 제어시스템과 연계하여 환경 계측부터 설비 제어까지 통합하는 운영관리 시스템으로 확장하고자 한다.

Key Words : 유리온실(Glass Greenhouse), 외피성능(Envelope performance), 온도센서(Temperature sensor), 저전력광역 네트워크(Long range wide area network, LoRaWAN), 모니터링 시스템(Monitoring system)

†Corresponding author, E-mail: khlee@kier.re.kr

후 기

본 연구는 2025년도 농촌진흥청 신농업기후변화대응체계구축사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다. (과제번호 : RS-2025-02215659).

STC-P-3

태양열 기반 전력생산 기술 현황과 Dish-Stirling 시스템의 기술성·경제성 평가

Review of Solar Thermal Power Generation Technology and Feasibility Assessment of Dish-Stirling Systems

서태범*†, 김철숙**, 조병현***
Taebeom Seo*†, Chulsook Kim**, Byounghun Jo***
*인하대학교 기계공학과, **주식회사인하앤니즈랩, ***코흐멤브레인코리아(주)

Abstract : Concentrating solar power (CSP) converts direct normal irradiance into high-temperature heat and then into electricity through a thermodynamic cycle. Because energy is secured as heat and delivered by synchronous machinery, CSP provides dispatchable output together with rotational inertia and reactive power. This paper reviews the operating principle, system families and performance indicators of CSP, and assesses the technical and economic feasibility of the dish-Stirling configuration. Measured records show that dish-Stirling attains the highest net solar-to-electric efficiency among all solar power technologies, 29.4% in 1984 and 31.25% in 2008, against 13-18% for parabolic troughs and 16-17% for central receivers. An energy balance of the 10 kW EuroDish gives a concentrator efficiency of 74.4%, an engine efficiency of 39.4% and an overall efficiency of 22.5%, identifying the engine as the dominant loss term, while cost sensitivity is dominated by the concentrator. Using the cost data of a domestic 1 MW plant plan, a mass-production capital cost of 2.2 million KRW/kW gives a break-even capacity factor of 19.1% against the average Korean system marginal price of 119.63 KRW/kWh, and 9.5% if a new engine halves the capital cost. At the 25-28% capacity factor typical of dish systems without storage the corresponding LCOE is 91 and 46 KRW/kWh, so sites with an annual DNI above about 1,900 kWh/m^2 reach parity with gas-fired generation once mass production is attained.

Key Words : 집광형 태양열 발전(Concentrating solar power), 접시형 집광기(Parabolic dish concentrator), 스털링 엔진(Stirling engine), 열저장(Thermal energy storage), 균등화 발전원가(Levelized cost of electricity)

† Corresponding author, E-mail: seotb@inha.ac.kr

STC-P-4

에너지자립형 온실 구현을 위한 실내 태양열 집열기와 얕은 지중열교환기 연계 유체순환운전의 실험적 성능 평가

Experimental Performance Evaluation of Indoor Solar Thermal Collectors and Shallow Ground Heat Exchangers for Energy-Self-Sufficient Greenhouses

이왕제*, 안영섭*, 이경호*†
Wangje Lee*, Youngsub An*, Kyoung-ho Lee*†
*한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실

Abstract : 시설원예(온실)는 작물의 안정적인 생산과 품질 유지를 위해 난방, 냉방, 환기 및 환경제어 등에 지속적인 에너지가 요구되며, 특히 동절기 난방을 위한 화석연료 의존도가 높아 에너지 소비 및 온실가스 배출 저감이 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 온실의 냉방부하를 줄여 작기를 연장하고 효율적으로 실내 냉난방 열환경 제어를 구현하며 에너지자립에 기여하기 위하여 실내 바닥면의 태양열 집열기와 얕은지중열교환기와 소규모 실험용 유리온실에 설치하여 운전성능을 평가하였다. 얕은 지중열교환기는 온실의 하부 지중에 약 8 m × 8 m × 2 m 규모로 설치하였고, 배관 재질은 PE(Polyethylene), 외경 32mm를 적용하였다. 지중열교환기는 3단 4열로 총 12개로 설계하였으며, 총 길이와 표면적은 약 2,400 m와 241.3 m^2으로서 2개 구역으로 구분하였다. 공급 및 환수 헤더를 통해 개별 운전과 직·병렬 운전이 가능하다. 실내 태양열집열기의 주목적은 실내로 유입한 일사를 온실 외부로 전달하는 것이며, EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer) 및 폴리프로필렌(PP) 재질의 매트형 집열판을 적용하였다. 집열판은 33 cm × 6 m × 6장을 온실 내부 바닥면에 설치하였으며, 총 설치 면적은 약 11.9 m^2 이다. 온실 내부에 설치된 태양열집열판과 지중열교환기 사이에 물을 통한 순환 유량은 28.5 LPM 수준이다. 태양열 및 지중시스템 성능 분석을 위해 일사량과 실내온도, 입·출구 온도, 유량 등을 측정하였으며, 집열효율과 작동특성, 지중온도 변화 등을 분석하였다. 추후에는 히트펌프와 연계한 실증 운전과 성능평가, 운전전략 등을 수행할 예정이다.

Key Words : 유리온실(Glass greenhouse), 태양열 집열기(Solar thermal Collectors), 얕은지중열교환기(Shallow Ground Heat Exchangers), 온도센서(Temperature sensor), 성능 평가(Performance evaluation)

† Corresponding author, E-mail: khlee@kier.re.kr

후 기

본 연구는 2025년도 농촌진흥청 신농업기후변화대응체계구축사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다. (과제번호 : RS-2005-02215659).

REC-P-1

난류촉진체 적용 간접 증발 냉각기 연계 방식에 따른 냉방 시스템 성능 향상에 관한 연구

Performance Enhancement of a Cooling System According to the Integration Method of an Indirect Cooler with Turbulence Promoters

정현석*, 안건용*, 안태용*, 최휘웅**†
Hyeonseok Jeong*, Geonyong An*, Taeyong Ahn*, Hwiung Choi**†
*전남대학교 냉동공조공학과 대학원,
**전남대학교 냉동공조공학과, 전남대학교 지능형국방우주소재부품연구소

Abstract : 빌딩 에너지 중 45% 이상이 냉난방 열원설비에 사용되므로, 에너지 절감과 환경부하 저감을 위한 친환경 냉방 기술의 필요성이 증대되고 있다. 그 중 간접 증발 냉각기는 물의 증발 잠열을 이용하면서도 공급 공기의 절대 습도가 증가하지 않는다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이러한 간접 증발 냉각기를 증기압축식 냉방 시스템에 적용하고, 연계 방식에 따른 성능 변화 CoolProp를 이용하여 분석하였다. 또한, Low-GWP 냉매 5종을 대상으로 냉동사이클을 모델링하였으며, 건식채널과 습식채널의 배출 공기 활용 방식에 따라 네 가지 시스템을 구성하였다. 그 결과, 건식채널의 냉각 공기로 증발부 부하를 줄이고 습식채널의 냉각·가습 공기로 응축부를 예냉하는 연계 방식이 가장 우수한 성능을 나타냈다. 조사된 냉매 중에서는 R-290을 사용한 경우 성능이 가장 우수하였고, 간접 증발 냉각기 적용으로 압축기 소모동력은 약 32% 감소하였으며, COP는 3.76에서 5.07로 향상되었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 Low-GWP 냉매를 적용한 고효율 냉방 시스템 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : 빌딩 에너지(Building energy), 간접 증발 냉각기(Indirect evaporative cooler), 친환경 냉매(Low-GWP refrigerant), 냉동 사이클(Refrigeration cycle)

† Corresponding author, E-mail: choihu@jnu.ac.kr

REC-P-2

효율적인 음이온 교환막 수전해를 위한 $Ru-Co_3O_4/Mo_2CT_x$ 헤테로구조 내 갈륨 조절 계면 전자 재구성

Gallium-Regulated Interfacial Electronic Reconstruction in $Ru-Co_3O_4/Mo_2CT_x$ Heterostructures for Efficient Anion-Exchange Membrane Water Electrolysis

최지원*, 코말파틸*,**, Yujin Jo*, 권수진**, 최다임**, 박종성*,**†
Jiwon Choi*, Komal Patil*,**, Yujin Jo*, Soojin Kwon**, Daim Choe**,
Jongsung Park*,**†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 에너지공학과

Abstract : 고도로 활성화되고 내구성이 뛰어난 산소 발생 반응(OER) 촉매를 개발하기 위해서는 내재적 활성점과 전도성 지지체 간의 상호작용 조절이 필수적입니다. 본 연구는 $Ru-Co_3O_4$ 헤테로구조를 Mo_2CT_x 맥신(MXene)과 통합하여, 맥신 내에 잔류하는 갈륨(Ga)이 계면 전자 결합 및 OER 활성에 미치는 영향을 규명했습니다. Mo_2CT_x의 제어된 전처리를 통해 잔류 Ga 함량을 0.36 at%에서 0.03 at%로 대폭 감소시켰으며, 이를 통해 얇고 접근성이 높은 층상 구조를 형성하여 $Ru-Co_3O_4$ 활성상과 맥신 지지체 간의 긴밀한 상호작용을 촉진했습니다. X선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과, Ga 제거 후 뚜렷한 계면 전하 재분배가 발생하여 전자적으로 극성화된 $Ru-Co_3O_4-Mo_2CT_x$ 계면이 형성됨을 확인했습니다. 결과적으로 최적화된 저 갈륨 전극(L_Ga@RuCo/NF)은 10, 50, 100 mA cm^{-2}의 전류 밀도에서 각각 212.95, 288.74, 350.42 mV의 매우 낮은 과전압을 나타냈습니다. 이를 음이온 교환막 수전해(AEMWE) 양극에 적용했을 때 2.0 V에서 2.98 A cm^{-2}의 전류 밀도를 달성했으며, 500 mA cm^{-2}에서 100시간 동안 안정적으로 구동되었습니다. 결론적으로 잔류 Ga는 단순한 합성 잔여물이 아닌 금속 산화물-맥신 계면의 중요한 조절자 역할을 하며, 이러한 활성상 엔지니어링과 계면 화학 조절의 시너지는 고성능 AEM 수전해를 위한 효과적인 전략임을 입증합니다.

Key Words : Mo_2CT_x 맥신(Mo_2CT_x MXene), 잔류 갈륨 조절(Residual gallium regulation), $Ru-Co_3O_4$ 헤테로계면($Ru-Co_3O_4$ heterointerface), 계면 전자 변조(Interfacial electronic modulation), 음이온 교환막 수전해(Anion exchange membrane water electrolysis)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

REC-P-3

양면형 태양광 시스템의 건물에너지 성능평가를 위한 일사량 산정방법 비교

Comparison of Solar Irradiance Calculation Methods for Building Energy Performance Assessment of Bifacial Photovoltaic Systems

장예은*†
YeEun Jang*†
*강남대학교 부동산건설학부

Abstract : Bifacial photovoltaic (PV) systems are increasingly considered as an alternative for improving renewable energy generation in buildings because they can utilize not only front-side solar irradiance but also radiation reflected from the ground and surrounding surfaces on the rear side of the module. To incorporate this additional gain into building energy performance assessment, however, rear-side irradiance must be estimated with sufficient reliability. Unlike conventional front-side irradiance, rear-side exposure can be highly sensitive to module geometry, shading, ground reflection, interreflection, sky representation, and the spatial formulation of the calculation method. This study compares three approaches for estimating irradiance on an identical bifacial PV configuration: a Grasshopper-based solar analysis, a Radiance-based ray-tracing simulation, and a simplified two-dimensional calculation method. The calculated front- and rear-side irradiance values were compared to identify systematic differences among the approaches and to examine the modeling assumptions responsible for these discrepancies. The results showed that different approaches can produce substantially different irradiance estimates even under identical geometric and weather conditions. The discrepancies were associated with differences in the treatment of ground-reflected radiation, obstruction and interreflection, sky and solar radiation models, and geometric dimensionality and discretization. These findings highlight the limitations of directly transferring irradiance results across modeling approaches and emphasize the importance of selecting an appropriate calculation method when evaluating the contribution of bifacial PV systems to building energy performance.

Key Words : 양면형 태양광(Bifacial photovoltaics), 후면 일사량(Rear-side irradiance), 일사량 모델링(Solar irradiance modeling), 지면반사일사(Ground-reflected irradiance), 건물에너지성능(Building energy performance)

† Corresponding author, E-mail: yej@kangnam.ac.kr

REC-P-4

태양광 연계 배전망의 전압 관리를 위한 온라인 피드백 최적화 기반 데이터센터 부하 제어

Datac Center Load Control via Online Feedback Optimization for Voltage Regulation in PV-integrated Distribution Networks

김민수*†
Minsoo Kim*†
*국립 한밭대학교 전기공학과

Abstract : 태양광 발전과 데이터센터 부하의 변동에 대응하기 위해서는 배전망의 전압 제약과 데이터센터의 서비스 성능을 함께 고려하는 운영이 필요하다. 특히 데이터센터의 전력수요를 조절하는 과정에서 연산 처리량과 지연이 달라질 수 있으므로, 전압 관리와 서비스 성능 간의 균형을 고려해야 한다. 본 연구에서는 태양광이 연계된 배전망을 대상으로 온라인 피드백 최적화(Online Feedback Optimization, OFO) 기반 데이터센터 부하 제어 방안을 제시한다. 전력 및 전압 계측 정보를 피드백하여 운전 상태의 변화에 따라 제어 입력을 갱신하고, 연산 처리량과 지연을 고려하면서 데이터센터의 전력수요를 조절한다. 또한 전력수요 변화에 따른 전압 응답을 제어 과정에 반영하여, 태양광 출력 및 데이터센터 부하가 변동하는 환경에서의 제어 특성을 검토한다. 제안 방식은 추론 배치를 고정하는 운전 방식 및 전압 수준에 따라 부하를 조절하는 단순 제어 방식과 비교하며, 전압 제약 위반의 정도와 지속시간, 연산 처리량 및 지연을 주요 지표로 평가한다. 이를 바탕으로 운전 조건에 따른 각 방식의 특성과 전압 관리 및 서비스 성능 간의 관계를 분석하고, 데이터센터의 전력수요 유연성을 활용한 배전망 운영 지원의 가능성과 적용 한계를 논의한다.

Key Words : 데이터센터(Data Center), 배전망(Distribution Netowrk), 재생에너지(Renewable Energy), 최적화(Opitmization), 실시간 피드백 최적화(Online Feedback Optimization)

† Corresponding author, E-mail: mskim26@hanbat.ac.kr

REC-P-5

태양광 및 풍력 통합 예측오차를 고려한 등각 예측 기반 ESS 예비력 산정 및 운영

Conformal Prediction-Based ESS Reserved Scheduling and Operation Considering Aggregated Solar and Wind Power Forecast Errors

김민수*†
Minsoo Kim*†
*국립 한밭대학교 전기공학과

Abstract : 태양광과 풍력의 발전량 예측오차에 대응하기 위해서는 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)의 운전 여유를 적절히 확보하고 활용하는 운영 전략이 필요하다. 특히 두 발전원의 예측오차는 같은 시간대에 상쇄되거나 누적될 수 있으므로, 개별 발전원의 불확실성뿐 아니라 합산 발전량의 예측오차를 고려한 예비력 산정이 중요하다. 본 연구에서는 태양광·풍력과 ESS로 구성된 통합 에너지 시스템을 대상으로 Conformal Prediction(CP) 기반 예비력 산정 및 운영 방안을 제시한다. 태양광과 풍력의 발전량 예측값 및 과거 관측자료를 활용하여 합산 예측오차의 특성을 분석하고, CP를 통해 보정한 예측구간을 ESS의 예비력 산정에 반영한다. 예비력은 실제 발전량이 예측보다 부족하거나 초과하는 상황에 대응하기 위한 상·하향 운전 여유로 정의하며, ESS의 충·방전 출력 한계와 충전상태(State of Charge, SOC)를 고려하여 시간대별 예비력 확보량과 운영계획을 결정한다. 제안 방식은 일정 비율의 예비력을 확보하는 방식 및 태양광과 풍력의 예측오차를 개별적으로 고려하는 방식과 비교한다. 예측구간의 실제 포함률과 구간 폭, 예비력 부족 발생률, 보상하지 못한 에너지량 및 운영비용을 주요 지표로 평가하며, 발전원 구성과 ESS 용량에 따른 운영 특성을 분석한다. 이를 통해 통합 예측오차의 불확실성 정량화가 ESS의 예비력 확보와 활용에 미치는 영향을 살펴보고, 예측오차 대응 성능과 운영 경제성 간의 균형을 검토한다.

Key Words : 등각 예측(Conformal Prediction), 에너지 저장 장치(Energy Storage System), 재생에너지(Renewable Energy), 최적화(Opitmization), 예비력 스케줄링(Reserve Scheduling)

† Corresponding author, E-mail: mskim26@hanbat.ac.kr

REC-P-6

ORC 시스템 운전 자동화를 위한 PLC 기반 통합 제어 프로그램 개발

Development of a PLC-Based Integrated Control Program for Automated ORC System Operation

이승호*, 김영원*†
Seung Ho Lee*, Young Won Kim*†
*한국생산기술연구원 에너지나노그룹

Abstract : 본 연구에서는 유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle, ORC) 시스템의 운전 자동화를 위하여 PLC 기반 통합 제어 프로그램을 개발하였다. ORC 시스템은 온도 및 압력 등의 공정상태를 계측하고, 운전 전 준비조건과 운전 중 보호조건을 판단하며, 펌프, 인버터 및 주요 장치의 운전상태를 상호 연계하여 제어할 필요가 있다. 이에 ORC 시스템의 운전조건과 제어대상을 기준으로 PLC 프로그램을 기능별로 구성하고, 계측신호 처리, 초기 운전조건 판단, 보호조건 판단, 장치 운전제어 및 자동운전 기능을 구현하였다. 아날로그 입력부에서는 센서 입력신호를 온도 및 압력 등의 공학값으로 변환하였으며, Initial Set과 Safety Set Point를 각각 자동운전 준비조건과 보호조건 판단에 적용하였다. 또한 펌프 및 인버터의 운전명령과 상태정보를 처리하고, 각 장치의 운전조건과 공정상태를 메인 프로그램에서 종합하여 전체 운전로직과 연계하였다. 자동운전 기능에는 공정 온도 및 압력조건을 이용하여 냉매펌프 인버터 주파수의 증가, 유지 및 감소를 판단하고 주파수 설정값을 단계적으로 조절하는 제어로직을 적용하였다. 이를 통해 ORC 운전에 필요한 계측, 조건판단, 보호, 장치제어 및 자동운전 기능을 기능별 프로그램으로 구성하고 상호 연계된 PLC 제어체계를 구현하였다. 본 연구에서 개발한 PLC 제어 프로그램은 향후 실제 ORC 시스템과의 연계를 통해 운전 자동화 및 통합 제어기능을 구현하기 위한 기반으로 활용될 것으로 기대된다.

Key Words : 유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle), PLC 제어(PLC Control), 운전자동화(Operation Automation), 통합제어(Integrated Control), 제어프로그램(Control Program)

† Corresponding author, E-mail: ywkim@kitech.re.kr

후 기

이 연구는 2026년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20222020800130, 중·저온 산업폐열 이용 하이브리드 발전시스템 개발·실증)

REC-P-7

가축분뇨 자원화 및 재생에너지 생산을 위한 SOFC 연계형 통합 가스화-활성화 공정 개발

Design of an Integrated Gasification-Activation System with SOFC for Livestock Manure Valorization and Renewable Energy Generation

박성민*, 박현선*, 김근호*†
Seong Min Park*, Hyun Sun Park*, Geun Ho Gim*†
*(재)녹색에너지연구원

Abstract : This study aims to establish a sustainable and economically viable energy conversion system using livestock manure, specifically pig manure, through a gasification-activated carbon process integrated with a solid oxide fuel cell (SOFC). Livestock manure generation in Korea remains high, with over 50 million tons produced annually, creating environmental and land-use pressures. Existing treatment methods, such as composting and anaerobic digestion, are limited by economic feasibility, energy demand, and greenhouse gas emissions. To address these limitations, a prototype system was developed consisting of a 30 kg/hr biomass gasifier and a 20 kg/day activator, optimized for converting wood chips into syngas and activated carbon. During the first year of development, the gasifier achieved a maximum syngas calorific value of 1,589 kcal/Nm³ and a conversion efficiency exceeding 62.1%. Activated carbon production was also validated, with a yield of 43.84 kg/day under operational conditions. Simulation tools, including CFD and thermal-flow analysis, were applied to optimize gasifier and burner designs, while thermal balance calculations confirmed sufficient syngas energy to drive the superheated steam activation process.

Key Words : SOFC(연료전지), 가스화-활성화(Gasification-Activation), 바이오차(Bio-cahr), 활성탄(Activated-acrbon)

† Corresponding author, E-mail: ggh1242@gei.re.kr

후 기
본 연구는 2025년 농림축산식품부의 지원을 받아 농림식품기술기획평가원의 지원으로 진행하였습니다(과제번호 : RS-2024-00401764).

REC-P-8

태양열 활용 열분해를 위한 우분의 물리화학적 특성 분석

Physicochemical Characteristics Analysis of Cattle Manure for Solar Thermal Torrefaction

박현선*, 박성민*, 김근호*†
Hyun Sun Park*, Seong Min Park, Geun Ho Gim†
*(재)녹색에너지연구원

Abstract : Cattle manure samples with moisture contents of 49.72-61.64% were collected from a Hanwoo farm in Hampyeong, Korea, and characterized to determine suitable operating conditions for solar thermal torrefaction. Proximate analysis showed volatile matter, ash, and fixed carbon contents of 11.39-30.97, 10.46-30.78 and 1.86-8.19%, respectively. Ultimate analysis indicated carbon, hydrogen, and nitrogen contents of 20.22-38.47, 2.71-4.21 and 1.04-2.78%, respectively. The higher and lower heating values ranged from 1,030-3,410 and 550–2,880kcal/kg, respectively. Thermo gravimetric analysis(TGA) revealed decomposition onset temperatures of 285-297℃, while differential scanning calorimetry(DSC) showed endothermic peaks at 204-244°C, indicating the temperature range associated with active thermal decomposition. In addition, the concentrations of Cd, As, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg and Cr^{6+} were within the applicable Korean 2nd-area soil concern standards. These results provide fundamental information on the thermal decomposition and fuel properties of cattle manure and support the determination of suitable operating conditions and the design of a solar evacuated-tube reactor for cattle manure torrefaction.

Key Words : 태양열(Solar thermal), 반탄화(Torrefaction), 우분(Cattle Manure)

† Corresponding author, E-mail: ggh1242@gei.re.kr

후 기

본 연구는 2025년 농림축산식품부의 지원을 받아 농림식품기술기획평가원의 지원으로 진행하였습니다(과제번호 : RS-2025-02218057).

RER-P-1

하수 수열에너지 잠재량 분석 및 시각화: 남원시 사례

Analysis and Visualization of Wastewater Heat Energy Potential: A Case Study of Namwon

강민구*, 박영석*, 오명찬*, 김보영*, 윤창열*†
Min Gu Kang*, Youngseok Bak*, Myeongchan Oh*, Boyoung Kim*, Changyeol Yun*†
*한국에너지기술연구원

Abstract : 하수는 도시에서 지속적으로 발생하는 미활용 열원이지만, 처리장이나 개별 관로 중심의 기존 평가는 발생원부터 관망과 처리장까지 이어지는 공간분포와 동일 하수의 중복계상 문제를 충분히 반영하기 어렵다. 본 연구는 남원시를 대상으로 건물·인구·하수관망·처리장을 연속된 질량·에너지 시스템으로 해석하고, 하수 수열에너지 잠재량을 100m 기준격자로 분석·시각화하는 방법을 제안하였다. 건물별 인구와 용도정보로 하수 발생량을 추정하고 배수구역과 관망 노드에 연결한 뒤, 복원된 흐름방향에 따라 구간별 유량누적, 유량가중 수온혼합, 관로와 지중의 열교환 및 처리장 유입수온 제약을 순차적으로 계산한다. 관로별 잠재량의 단순합산을 방지하기 위해 배수구역 출구의 질량·에너지 수지로 동시 회수 가능 총량을 제한하며, 관로별 값은 회수 후보지의 공간분포와 우선순위 평가에 활용한다. 또한 격자 중심에서 관망과 열수요처까지의 접근거리를 산정하여 기술적·시장 잠재량 평가에 반영한다. 산정 결과는 이론적·기술적·시장 잠재량으로 구분하고, 격자별 잠재량과 관망·건물·인구정보를 GIS 기반 자원지도로 제공한다. 향후 본 방법론을 전국 하수관망에 적용하여 국내 하수 수열에너지 잠재량을 확정하고 전국 단위 자원지도를 구축하고자 한다.

Key Words : 하수 수열에너지(Wastewater Thermal Energy), 하수관망(Sewer Network), 에너지 잠재량(Energy Potential), 공간분석(Spatial Analysis), 100m 격자(100-m Grid), GIS 시각화(GIS Visualization), 자원지도(Resource Map)

† Corresponding author, E-mail: yuncy@kier.re.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행한 수열에너지 연구개발과제의 결과입니다. (과제번호 : RS-2026-25501383)

ESS&SC-P-1

PMU 접속환경 모의를 위한 HILS 기반 마이크로그리드 모델 개발

Development of a HILS-Based Microgrid Model for Simulating a PMU Interconnection Environment Simulation

조승진*, 김민국*†
Seungjin Jo*, Minkook Kim*†
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract : 본 연구에서는 PMU(Phasor Measurement Unit)의 접속 및 계측 환경을 모의하기 위해 태양광 발전, 에너지저장장치(ESS), 풍력 발전(Wind Turbine), EV(Electric Vehicle) 및 주거용 집합부하로 구성된 HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation) 기반 마이크로그리드 모델을 개발하였다. 모의 계통은 3상 380 V, 60 Hz로 구성했으며, 태양광 발전 30 kW, 풍력 발전 20 kW, ESS 50 kW, EV 충전부하 22 kW, 그리고 주거용 집합 부하 40 kW의 최대 부하용량을 적용하였다. 각 분산에너지 자원과 부하는 Matlab/Simulink 기반으로 모델링하고, 외부 운전 프로파일을 이용하여 자원별 출력 및 부하 변화를 모의할 수 있도록 구성하였다. 또한, 공통 3상 AC 계통에서 분산 전원과 부하가 연계된 정상 운전 조건에서 시변 출력 및 부하 변화에 따른 계통 응답을 확인하였다. 향후 발전, 급격한 발전량 및 부하 변동, 계통 분리 등의 다양한 운전 시나리오를 적용하고 실제 PMU를 연동하여 동기 위상 계측 데이터를 확보한 후, 이를 PMU 데이터 압축 복원 알고리즘의 성능 검증에 활용할 예정이다.

Key Words : 마이크로그리드(Microgrid), PMU(Phasor Measurment Unit), HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation), 실시간 시뮬레이션(Real-Time Simulation), 분산에너지자원(Distribution Energy Resource)

† Corresponding author, E-mail: mkkim@kopti.re.kr

후 기
본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역혁신선도기업육성(R&D), (S3471026)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

ESS&SC-P-2

건물 에너지 생산·소비 예측을 위한 AI 기반 예측모델 설계

Design of AI-Based Prediction Models for Energy Production and Consumption in Buildings

오민재*, 송다혜*, 김용현*†, 김창헌*†
Min-Jae Oh*, Dahye Song*, Yong Hyun Kim*†, Changheon Kim*†
*한국광기술원, AI에너지연구센터

Abstract : 건물 에너지의 효율적인 운영을 위해서는 에너지 생산과 소비의 변동성을 고려한 예측이 중요하다. 특히 태양광 발전이 적용된 건물에서는 기상환경에 따라 발전량이 변동하며, 에너지 소비량은 공정장비와 냉방·공조 등 유틸리티 설비의 운전상태에 따라 변화한다. 따라서 기상환경과 설비 운전특성을 반영하여 건물의 에너지 생산량과 소비량을 사전에 예측할 수 있는 기술이 요구된다. 이에 본 연구에서는 클린룸과 공정장비, 유틸리티 설비 및 태양광 발전설비가 구축된 건물을 대상으로 태양광 발전량과 건물 에너지 소비량을 예측하기 위한 AI 기반 예측모델을 설계하였다. 태양광 발전량 예측모델은 기상정보와 발전설비 운전데이터를 시계열 형태로 구성하고, LSTM을 통해 시간에 따른 발전량 변화 패턴을 학습한 후 Attention 메커니즘을 적용하여 예측에 중요한 시점의 정보를 반영하도록 설계하였다. 에너지 소비량 예측모델은 공정장비 및 유틸리티 설비의 에너지 사용정보와 실내 환경정보를 기반으로 시간 및 과거 부하 특성을 반영한 파생변수를 구성하고, 설비 운전조건과 에너지 소비량 간의 비선형 관계를 학습하기 위해 XGBoost 및 LightGBM 기반 회귀모델을 적용하였다. 모델의 예측 성능은 향후 확보되는 실측값과 예측값 간의 오차를 기반으로 검증하도록 구성하였으며, 태양광 발전량 예측에는 nMAE(Normalized Mean Absolute Error)를 평가지표로 적용하도록 하였다. 향후 대상 건물에서 확보되는 실측 데이터를 기반으로 설계한 예측모델의 성능과 적용 가능성을 검증하고, 건물의 에너지 생산과 소비를 예측하기 위한 AI 기반 에너지 운영의 기반을 마련하고자 한다.

Key Words : 건물에너지(Building energy), 에너지 예측(Energy forecasting), 시계열 딥러닝(Time-series deep learning), 트리 기반 앙상블(Tree-based ensemble)

†Corresponding author, E-mail: yonghyun@kopti.re.kr, chkim@kopti.re.kr

후 기

본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역혁신선도기업육성(R&D), (S3471392)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

ESS&SC-P-3

장거리 열수송을 위한 센티미터 스케일 다층 열저장 캡슐

Centimeter-Scale Multilayer Phase-Change Capsules for Long-Distance Heat Transport

조은*,**, 정영균*, 윤수진*, 최재우*,***,†
Eun Cho*, Youngkyun Jung*, Su-Jin Yoon*, Jae-Woo Choi*†
*한국과학기술연구원 기후 · 환경연구소 물자원순환연구단, **서울대학교 화학생물공학부,
***과학기술연합대학원대학교(UST) KIST 스쿨 에너지-환경융합 전공

Abstract : 상변화 물질(Phase Change Materials, PCM)은 높은 잠열(225.6 kJ/kg)을 기반으로 장거리 열 수송 소재로 활용 가능성이 크다. 그러나 액-고 상변화 과정에서 관 벽에 부착되거나 응집되어 관로를 막는 문제가 발생할 수 있어 실제 시스템 적용에는 한계가 있다. 한편, 현재 단열재 기반의 열전달 공정은 효율이 낮기 때문에 건물 및 지역 단위의 열에너지 활용을 위한 열에너지 네트워크(Thermal Energy Network, TEN) 시스템에서 안정적인 열저장 소재에 대한 수요가 증가하고 있다. 본 연구에서는 친수성 내부 다층 구조의 센티미터 스케일 캡슐을 합성하여 구조적 안정성을 확보하고, 반복적인 상변화 과정에서의 물리화학적인 안정성을 평가하였다. PCM이 충전된 열저장 캡슐의 잠열은 약 155.6 kJ/kg으로 나타냈다. 이는 캡슐을 구성하는 약 30%의 캡슐 질량이 포함된 결과이며, 캡슐 내부 PCM의 고유한 열저장 특성이 잘 유지됨을 의미한다. 또한 열저장 캡슐은 PCM을 적용하지 않은 경우와 비교하여 물의 온도를 약 10배 이상 더 오랜 시간 유지하여 우수한 열저장 성능을 나타냈다. 더불어 1,000회의 반복 상변화 사이클 이후에도 캡슐의 질량, 잠열 및 열전도도에서 유의미한 변화가 관찰되지 않아 내부 PCM의 유실이 없었으며, 우수한 구조적 안정성과 내구성을 확인하였다. 이러한 결과는 본 연구에서 제안한 열저장 캡슐이 우수한 열저장 성능과 반복 상변화에 대한 물리화학적인 안정성을 갖는 구조임을 보여준다. 또한 장거리 열수송을 요구하는 TEN 기반 분산형 열저장 시스템뿐만 아니라 전력피크 저감, 계절 간 축열, 블랙아이스 방지 등 다양한 열에너지 응용 분야에 활용될 수 있음을 시사한다.

Key Words : 상변화물질, 열에너지저장, 센티미터스케일캡슐, 장거리열수송, 물리화학적안정성

† Corresponding author, E-mail: plead36@kist.re.kr

후 기

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : RS-2024-00419184, RS-2025-02317972).

ESS&SC-P-4

건물 이종에너지 예측 AI 모델 개발을 위한 데이터 선별 및 특징 선정 연구

A Study on Data and Feature Selection for the Development of a Heterogeneous Energy Forecasting AI Model in Buildings

오민재*, 양혜정*, 손명우*†
Min-Jae Oh*, Hye Jeong Yang*, Myungwoo Son*†
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract : 최근 에너지 운영 효율화와 탄소중립 대응을 위해 건물·시설 단위 등의 집단에너지에 대한 에너지 AI 예측 모델 개발이 확대되고 있다. 그러나 실측 데이터의 경우 계측 목적과 방식, 품질이 건물별로 상이하여 예측 모델에 직접 활용할 수 없다. 예를 들어, 다양한 건물의 재생발전량과 전기·열에너지 소비량은 다른 특성의 에너지 데이터가 복합적으로 수집되므로, 이종에너지 예측에 적합한 데이터 선별이 필요하다. 본 연구에서는 전기에너지 발전량, 전기 및 열에너지 소비량 예측 AI 모델 개발을 위해 총 80종의 현장 실측 데이터를 분석하였다. 이종에너지의 데이터 항목과 계측 목적에 따른 예측 대상과의 연관성, 실측 데이터의 유효값 비율, 설비 가동 이력 및 시계열 특성을 검토하여 26종의 데이터를 예측 특징으로 선정하였다. 전기 발전량과 열에너지 예측을 위한 데이터 특징은 각각 태양광 발전 출력·일사량·패널 온도, 열량계 순간 유량·공급·환수 온도를 선정하였다. 그리고, 외기 기온·습도·풍속의 기상 데이터는 두 종류의 에너지 예측 모델에 모두 활용하였다. 전기에너지 소비량 예측을 위한 데이터 특징은 계통 송·수전량을 선정하여 예측 대상 변수를 구성하였다. 그 결과, 현장 데이터의 품질과 활용 가능성을 실측 기반으로 검증하고, 건물 이종에너지 예측에 적합한 특징을 선정하였다. 선정된 데이터는 향후 전기에너지 발전량과 전기·열에너지 소비량 예측 AI 모델을 개발하는데 활용할 수 있다.

Key Words : 이종에너지 데이터(Heterogeneous energy date), 데이터 선별 및 특징 선정(Data and feature selection), 에너지 예측 AI 모델(Energy forecasting AI model), 건물에너지(Building energy)

† Corresponding author, E-mail: mwson@kopti.re.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다. (과제번호: RS-2024-00419184)

ESS&SC-P-5

지역난방 수요측 공기열 히트펌프와 상변화 축열조 연계 실증

Demonstration of an Air-Source Heat Pump and Phase-Change Thermal Storage Integrated with District Heating

박태룡*†, 한준규*, 김한국*
TaeRyong Park*†, Jungyu Han*, Hankook Kim*
*GS파워 주식회사

Abstract : 본 연구는 지역난방 수요측에 공기열 히트펌프와 축열조를 연계한 열공급 시스템을 구축하고, 설비 성능과 운영 효과를 검증하기 위한 실증 계획을 제시한다. 실증 대상은 GS파워 업무용 건물이며, 지역난방 2차측 배관에 공기열 히트펌프, 상변화 축열조, 물 축열조를 연계한다. 시스템은 히트펌프의 직접 열공급과 축열조의 축·방열 운전이 가능하도록 구성한다. 실증 과정에서는 외기온도에 따른 히트펌프 성능과 상변화 축열조의 축·방열 특성을 측정하고, 기존 지역난방 공급 방식과 연계 운전 방식을 비교할 예정이다. 또한 열수요, 전기요금 및 설비 성능을 고려하여 히트펌프·축열조·지역난방의 열공급량을 결정하는 운영 알고리즘을 개발하고자 한다. 이를 통해 지역난방 수요측에서 공기열 히트펌프와 고밀도 축열 기술의 적용 가능성을 평가하고, 향후 공동주택 등 건물용 열공급 모델의 기초자료를 확보한다.

Key Words : 공기열 히트펌프(Air-source heat pump), 지역난방(District heating), 상변화 축열조(Phase-change thermal storage), Power-to-Heat, 최적 운영(Optimal operation)

† Corresponding author, E-mail: taeryong.park@gspower.co.kr

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00419184).

ESS&SC-P-6

열원분리형 히트펌프 기반 열공급 사업의 법적 규제 쟁점 분석 및 실증 기반 제도 개선 방안

Analysis of Legal Regulatory Issues and Empirical Demonstration-based Institutional Improvement Measures for Heat Source-Separated Heat Pump Heating Business

김인수*, 김재화*†
Insoo Kim*, Jahwa Kim*†
*가천대학교 산학협력단

Abstract : 최근 산업공정의 미활용열과 재생에너지 잉여전력(P2H)을 활용한 히트펌프 기반 분산형 열공급 사업이 확대되고 있다. 그러나 열원 부지 소유자와 설비 운영주체가 분리되고 무인·원격운영을 전제로 하는 사업구조로 인해 현행 안전 및 전기 관련 법령과의 적용상 충돌 및 제도적 불확실성이 발생하고 있다. 본 연구에서는 반도체 방류수 열회수 사업(사례 1)과 P2H 기반 지역난방 양방향 열거래 사업(사례 2)을 대상으로 고압가스 안전관리법, 전기안전관리법 등 관련 법령과 기술기준을 검토하고, 주요 규제 쟁점의 법적 적용 여부와 제도적 개선 필요성을 분석하였다. 분석 결과, 검토 대상 히트펌프는 고압가스 안전관리법상 냉동제조시설에 해당하여 안전관리자 근무 관련 규정이 적용되는 것으로 나타났으며, 이는 무인·원격운영 사업모델과의 제도적 정합성 측면에서 주요 쟁점으로 확인되었다. 반면 전기안전 분야에서는 원격감시·제어 설비에 대한 안전관리업무 대행 제도가 마련되어 있어 고압가스 안전관리 기준과의 정합성 확보가 필요한 것으로 분석되었다. 또한 사례 1에서는 안전관리자 겸직 요건, 사례 2에서는 복수 건물 간 전력 직접공급 및 열거래 가격·정산 기준이 주요 제도적 쟁점으로 확인되었다. 이에 실증특례 신청 시 규제 적용이 확인된 쟁점을 중심으로 심의 범위를 구체화하고, 무인·원격운영 냉동제조시설의 안전관리 기준 정비와 분산형 열원-집단에너지사업자 간 열거래 표준 단가 및 정산기준 마련을 제안하였다.

Key Words : 열원분리형 히트펌프(Heat source-separated heat pump), 분산형 열에너지(Distributed thermal energy), 열에너지 거래(Thermal energy trading), 에너지 규제(Energy regulation), 규제샌드박스(Regulatory sandbox)

†Corresponding author, E-mail: gachon0609@gmail.com

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00419184).

ESS&SC-P-7

실시간 전력요금(RTP) 기반 P2H-TES 시스템운전 최적화 및 계통유연성 평가

Operational Optimization and Load-Shifting Evaluation of P2H-TES Flexibility Resources Based on Real-Time Pricing

김인수*, 김재화*†
Insoo Kim*, Jaehwa Kim*†
*가천대학교 산학협력단

Abstract : 본 연구에서는 재생에너지 비중 확대에 따른 전력계통의 변동성 증가에 대응하기 위하여, Power-to-Heat,(P2H),열에너지저장(TES)을 활용한 유연성 자원의 운전 최적화 모델을 개발하고 부하 이동(Load- Shifting) 성능을 정량적으로 평가하였다. 실시간전력요금(Real-Time Pricing, RTP) 환경에서 TES의 전력요금 변동 대응 능력과 열부하 시간 이동 잠재력을 분석하기 위해 실증지 운영데이터 기반의 혼합정수선형계획법(Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 본 연구에서는 실증지 저온 열 네트워크의 실제 운전 온도 조건을 반영하여12톤TES의 유효 저장용량을 209.3 kWh로 산정하였으며, 외기온도와 출탕온도를 동시에 고려하는 피스웨이즈(Piecewise) 성능계수(COP) 모델을 적용하여 열역학적 타당성을 확보하였다. 최적화 모델은 히트펌프 출력 제약, TES 충전상태(SOC) 제약 및 Big- M 기반 동시 충·방열 방지 제약을 포함하며, TES 미적용(Baseline), 고정 운전(Fixed Control), RTP 기반 최적 운전(Proposed MILP)의 세 가지 시나리오를 비교 평가하였다. 부하 이동 성능은 피크 시간대 열부하 이동률(LSpeak)과 전력 피크 저감률(LSpower)을 성과지표로 정 량화하였다. 시뮬레이션 결과, RTP 기반 최적 운전 시 피크 시간대 열부하 이동률은 41.8%, 전력 피크 저감률은 24.8%를 기록 하여 우수한 계통 유연성 제공 효과를 보였다. 본 연구 결과는 P2H-TES 유연성 자원의 운영 전략 검증 프레임워크를 제시하며, 향후 실시간 전력시장 도입 시 열-전력 섹터커플링 설비의 최적 운전 가이드라인으로 활용될 수 있다.

Key Words : 전력-열 전환 기술(Power-to-Heat, P2H), 축열 시스템(Thermal Energy Storage, TES),, 실시간 전기요금(Real-Time Pricing, RTP), 혼합정수선형계획법(Mixed-Integer Linear Programming, MILP), 히트펌프(Heat pump)

† Corresponding author, E-mail: gachon0609@gmail.com

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00419184).

ESS&SC-P-8

가상 실증데이터 기반 열·전기 저장시스템의 운영전략별 수요관리 성과 평가

Evaluation of Demand Management Performance by Operating Strategy for Integrated Thermal and Electrical Energy Storage Systems Using Virtual Demonstration Data

정대영*†, 박민수*
Daeyoung Jung*†, Minsoo Park*
*주식회사 베리워즈

Abstract : 본 연구는 열·전기 통합 실증 대상지를 대상으로 가상 실증데이터를 활용하여 열에너지저장시스템(TES), 배터리에너지저장시스템(BESS) 및 히트펌프(HP)의 운영전략별 수요관리 성과를 비교·평가하였다. 재생에너지 및 분산에너지 자원의 확대에 따라 피크부하 저감뿐만 아니라 잉여전력의 활용과 출력제어 대응을 고려한 열·전기 자원의 통합운영 필요성이 증가하고 있다. 이에 기본운전(Project Reference), 피크저감(Peak Reduction), 출력제어 대응(Curtailment Response) 및 통합운전(Integrated Operation)의 네 가지 시나리오를 구성하고, 최대 수전전력(Grid Peak), 계통 수전·역송량 및 출력제어 대응률을 주요 성과지표로 분석하였다. 분석 결과, 기본운전의 최대 수전전력은 약 119.9 kW였으며, 피크저감 및 통합운전 시나리오에서는 약 93.6 kW로 감소하여 약 21.9%의 피크저감 효과가 나타났다. 또한 가상의 출력제어 요청량 5.955 MWh 중 5.737 MWh를 저장·전환자원을 통해 대응하여 약 96.3%의 출력제어 대응률(CMR)을 나타냈다. 본 연구는 실제 현장 실증성과가 아닌 가상 데이터 기반 사전 성능평가로서, 동일한 설비구성에서도 운영전략에 따라 피크저감 및 출력제어 대응 성능이 달라질 수 있음을 확인하였다. 향후 실제 실증 운전데이터를 확보하여 가상 시나리오와의 정합성을 검증하고, 열·전기 저장자원의 통합 수요관리 성과평가 체계로 확장하고자 한다.

Key Words : Thermal Energy Storage (TES), Battery Energy Storage System (BESS), Demand Management, Curtailment Response, Integrated Energy System

†Corresponding author, E-mail: dyjung@verywords.com

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. RS-2024-00419184)

ESS&SC-P-9

식품공장의 수요반응 자원화를 위한 전력 데이터 전처리 및 부하 특성 분석

Power Data Preprocessing and Load Characteristic Analysis for Demand Response Resource Utilization in Food Manufacturing Plants

양혜정*, 김민국*†
Hyejeong Yang*, Minkook Kim*†
*한국광기술원 AI에너지연구센터

Abstract : 식품공장을 수요반응 자원으로 활용하기 위해서는 공장의 설비별 전력 사용 특성을 파악하고, 유연 부하를 선정하는 과정이 선행되어야 한다. 이를 위해 공장에너지관리시스템(FEMS)에서 수집되는 전력 데이터를 분석 목적에 맞게 정제하고 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 그러나 FEMS 데이터는 계측 항목별 구조가 상이하고, 현장 계측 환경에 따라 결측 및 이상값이 발생할 수 있어 체계적인 데이터 전처리 및 품질관리가 요구된다. 이에 본 연구에서는 주요 설비의 에너지 데이터를 전처리하고 사용 패턴을 분석하여, 향후 식품공장의 수요반응 자원화 시나리오 도출을 위한 데이터 기반을 마련하고자 한다. 분석 대상은 강원후평산단에 위치한 H사의 냉동실외기 및 외부냉동과 관련된 5개 부하이며, 각 설비에서 수집된 전력 및 전력량 데이터를 활용하였다. 분석 기간은 2026년 4월부터 8월까지이며, 원시 데이터의 시간 정보와 계측 간격을 확인하고 결측값 및 이상값을 검토하여 분석에 활용 가능한 데이터로 정리하였다. 이후 일별 및 월별 전력 사용량을 산출하고, 설비별 전력 사용 특성과 부하 변동 특성을 비교·분석하였다. 분석 결과, 대상 식품공장은 24시간 가동 특성으로 인해 특정 시간대에 전력 사용량이 집중되기보다는 지속적인 전력 수요가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 5개 설비 간 전력 사용 패턴과 부하 변동 특성에 차이가 나타나 설비별 에너지 사용 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 향후에는 설비별 부하 특성과 부하 이동 가능성을 추가로 분석하여, 24시간 연속 운전 특성을 고려한 수요반응 자원화 방안을 도출하고자 한다.

Key Words : 수요 반응(Demand Response), 유연 부하(Flexibility load), 피크 저감(Peak demand reduction), 공장에너지 관리시스템(Factory energy management system(FEMS))

† Corresponding author, E-mail: mkkim@kopti.re.kr

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2025-02314925).

ESS&SC-P-10

태양광 발전량 예측모델의 정확도-정산금 역전 및 발생 조건 분석

Analyzing the Reversal Between Forecast Accuracy and Settlement Payments in Solar PV Forecasting

박영아*, 양혜정*, 김민국*, 김용현*†
Young-Ah Park*, Hye-Jeong Yang*, Minkook Kim* and Yong Hyun kim†
*한국광기술원 에너지융합연구본부 AI에너지연구센터

Abstract : 국내 재생에너지 발전량 예측제도는 발전사업자가 전일 제출한 예측발전량과 당일 발전실적을 시간대별로 비교하여, 예측오차율이 기준 이내인 시간대에 오차 구간별 차등 정산단가를 적용한다. 태양광 발전량 예측 모델은 통계적 시계열 모형에서 기계학습·딥러닝으로 발전해 왔으며, 주로 평균오차(MAE·RMSE) 최소화를 학습 목표로 설정한다. 그러나 정산은 시간대별 예측오차 기준의 충족 여부에 따라 결정되므로, 예측 모델의 평균오차 감소가 정산금 증가로 이어지는지 검증할 필요성이 있다. 본 연구는 한국전력거래소가 공개한 2025년 지역별 시간별 태양광 발전실적을 분석하였다. 먼저 태양 천정각이 92°를 초과하는 시간대를 야간으로 정의하고, 연계 ESS 방전량 혼입을 배제하고자 야간 발전량이 연간 발전량의 1.5% 미만이면서 연간 200 GWh 이상인 제주·부산(설비용량 합계 543 MW)을 분석 대상으로 선정하였다. 두 지역의 시간별 발전실적으로 하루 전 예측 모델 6종(비학습·기계학습·딥러닝 각 2종)을 일 단위 5-fold 교차검증으로 비교하고, 같은 예측값에 시간대별 예측오차율에 따른 기준단가(4% 이하 4원/kWh, 4% 초과~6% 이하 3원/kWh, 6% 초과 0원/kWh)를 적용해 정산 대상 시간의 정산금을 모의 산정하였다(제주 자원은 제주 시범사업 입찰제도와의 동시 참여를 가정해 계수 0.5 적용). 예측 정확도는 기계학습 계열의 Ridge가 가장 높아 설비용량 대비 RMSE 14.01%로 비학습 Persistence(17.51%)보다 상대적으로 20.0% 낮았다. 반대로 정산금은 Persistence가 연 6.69억원으로 두 지역 모두 1위인 반면 Ridge는 4.12억원에 그쳐 38.4% 적었으며, 정확도와 정산금의 순위상관은 +0.94로 역전이 확인되었다. 원인은 예측오차 분포의 형상에 있다. 기계학습 계열은 큰 오차를 완화해 비학습 계열 대비 오차의 90분위를 30.9%에서 23.3%로 낮췄으나, 25분위는 3.06%에서 4.12%로 높아졌다. 즉, 크게 빗나간 예측은 개선됐지만 4원/kWh를 받을 만큼 정확한 예측이 줄어 해당 단가 적용 시간 비율이 31.3%에서 24.4%로 감소하였다. 딥러닝 계열인 LSTM과 GRU에서도 동일한 양상이 나타나 특정 계열의 문제가 아님을 확인하였다. 기준선을 이동시켜 재산정한 결과 기준선이 시간대별 오차율 중앙값의 약 2배를 초과할 때 역전이 소멸하였으며, 본 연구의 예측 정확도에서 현행 기준선은 0.5~0.7배에 그친다. 예측오차 보정용 ESS 또한 왕복손실에 따른 판매수익 감소를 차감하면 순효과가 모든 조건에서 음수였다. 따라서 등록 기준(평균 예측오차율 10% 이하)과 정산 기준(시간대별 4%/6%)은 서로 반대 방향의 예측 성능을 요구하며, 사업자는 평균오차 제약을 충족하면서 기준선 통과 확률을 높이는 이중 목적함수로 모델을 설계하는 것이 유리하다.

Key Words : 태양광발전량예측(Photovoltaic power forecasting), 재생에너지예측제도(Renewable energy forecasting scheme), 정산기준선(Settlement threshold), 에너지저장장치(Energy storage system)

†Corresponding author, E-mail: yonghyun@kopti.re.kr

후 기
본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00398351).

S2H-P-1

2-MIM 유도 Co 구조체를 활용한 NiCoMo 기반 비귀금속 산소발생반응 촉매 개발

Development of Non-Precious NiCoMo-Based Oxygen Evolution Catalysts Using a 2-MIM-Derived Co Structure

손민서*, 조유진**, 최다임**, 권수진** 파티코말***, 박종성**†, 강동원*†
Minseo Son*, Yujin Jo**, Daim Choe**, Soojin Kwon**, Komal Patill***,
Jongsung Park**, Dong-Won Kang*†,
*중앙대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 에너지시스템공학과,
***경상국립대학교 미래융합기술연구소

Abstract : The use of organic solvents such as DMF and DMSO in conventional MOF synthesis can hinder the development of more environmentally benign and practically accessible fabrication routes. In this study, we developed a DMF/DMSO-free strategy for constructing a 2-methylimidazole (2-MIM)-based Co structure and subsequently growing a NiCoMo electrocatalyst on its surface. The Co–2-MIM structure was first synthesized and deposited onto the substrate, followed by hydrothermal growth of NiCoMo. Interestingly, the initially oval-shaped Co–2-MIM morphology transformed into a nanoflower-like hierarchical architecture after NiCoMo growth, indicating that the preformed Co–2-MIM structure served as a structural platform for the subsequent formation of the NiCoMo phase. This hierarchical architecture can provide enhanced surface exposure and favorable interfacial interactions between the Co–2-MIM and NiCoMo components. The optimized Co–2-MIM/NiCoMo catalyst exhibited excellent oxygen evolution reaction (OER) activity in 1 M KOH, requiring overpotentials of 221 mV and 290 mV to achieve current densities of 10 and 50 mA cm^{-2}, respectively. Structural, morphological, and chemical analyses were further performed to elucidate the role of the Co–2-MIM structure and its morphological evolution during NiCoMo growth. These results demonstrate the potential of a DMF/DMSO-free sequential synthesis strategy for constructing hierarchical Co–2-MIM/NiCoMo electrocatalysts with enhanced OER activity, providing a promising route toward non-precious-metal catalysts relevant to alkaline and anion-exchange-membrane (AEM) water electrolysis.

Key Words : 2-메틸미다졸(2-Methylimidazole, 2-MIM), 니켈·코발트·몰리브덴 산화물(NiCoMoO4), 산소발생반응(Oxygen Evolution Reaction), 음이온교환막(Anion Exchange Membrane), 수전해(Water Electrolysis)

† Corresponding author, E-mail: kangdwn@cau.ac.kr

S2H-P-2

AEM 수전해를 위한 Fe-doped NiMo 고효율, 고내구성 촉매 연구

Fe-Doped NiMo Nanorod Electrodes on Nickel Foam for Durable Anion Exchange Membrane Water Electrolysis

최다임**, Komal Patil***, 조유진**, 조세연**, 권수진**, 박종성*,**†
Daim Choe*, Komal Patil***, Yujin Cho**, Seyeon Cho**, Soojin Kwon**,
Jongsung Park*,**†
*경상국립대학교 에너지공학과, **경상국립대학교 에너지시스템공학과,
***경상국립대학교 미래융합기술연구소

Abstract : Developing earth-abundant electrocatalysts that can sustain efficient operation under practical anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE) conditions remains an important challenge for hydrogen production. Here, Fe-modified NiMo nanorod electrodes were fabricated on nickel foam (NF) through a hydrothermal growth process followed by a simple Fe-containing solution treatment. The resulting Fe-doped NiMo@NF electrode retained a well-defined nanorod architecture with abundant exposed surface sites, providing favorable characteristics for electrochemical water oxidation. Combined electrochemical and physicochemical analyses further indicated that partial dissolution of Mo during the oxygen evolution reaction was associated with electrochemical activation of the catalyst. In a conventional three-electrode configuration, the Fe-doped NiMo@NF electrode reached a current density of 100 mA cm^{-2} at 1.526 V and maintained stable operation with negligible performance loss for 50 h. The electrode was subsequently incorporated into an AEM single cell equipped with a commercial PiperION membrane, where a current density of 830 mA cm^{-2} was achieved at a cell voltage of 2.0 V. These results demonstrate that Fe incorporation into NiMo nanorod electrodes provides an effective approach for combining high catalytic activity with operational durability in AEM water electrolysis.

Key Words : AEMWE(Anion Exchange Membrane water electrolysis), $NiMoO_4$, Nanorod catalyst

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

S2H-P-3

Delaminated Mo_2CT_x MXene-Coupled NiCo-LDH Nanosheets as Efficient Non-Precious Metal Anodes for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis

권수진*, Komal Patil**,박종성*,**†
Soojin Kwon*, Komal Patill**, Jongsung Park*,**†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 미래융복합기술연구소

Abstract : Anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE) has emerged as a promising technology for green hydrogen production by enabling the use of cost-effective non-precious metal electrocatalysts. However, sluggish reaction kinetics and poor electrical conductivity during the oxygen evolution reaction (OER) limit overall system efficiency. Herein, we developed a hybrid NiCo-LDH@Mo_2CT_x/NF electrode by directly growing NiCo-layered double hydroxide (LDH) nanosheets onto delaminated Mo_2CT_x MXene-modified nickel foam via a hydrothermal route. The expanded interlayer spacing of Mo_2CT_x facilitated the uniform growth of LDH nanosheets and improved electron transport throughout the electrode. Structural characterization revealed favorable charge-transfer pathways established between the LDH and MXene components. In a three-electrode system (1.0 M KOH), the NiCo-LDH@Mo_2CT_x/NF electrode demonstrated superior OER activity, requiring low overpotentials of 324 and 393 mV to reach current densities of 50 and 100 mA cm^{-2}, respectively, along with a low Tafel slope of 97.2 mV dec^{-1} and a reduced charge-transfer resistance (Rct = 0.301 Ω). The electrode also maintained stable operation for 50 h at 50 mA cm^{-2}. Furthermore, in an AEMWE single-cell test, the NiCo-LDH@Mo_2CT_x/NF anode delivered a high current density of 1.15 A cm^{-2} at 2.0 V and operated stably for 100 h at 500 mA cm^{-2}. This work demonstrates that integrating conductive Mo_2CT_x MXene with transition metal LDHs is an effective strategy to construct high-performance, durable non-precious anodes for commercial water electrolysis.

Key Words : Oxygen evolution reaction (OER), NiCo-LDH, Mo_2CT_x MXene, Anion Exchange Membrane Water Electrolysis (AEMWE)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

S2H-P-4

고결정성 $Ti_3C_2T_x$ MXene을 이용한 NiCoFe/α-Fe_2O_3 산소발생 전극의 계면 전하이동 향상 및 AEM 수전해 성능 개선

Highly Crystalline $Ti_3C_2T_x$ MXene for Enhanced Interfacial Charge Transfer in NiCoFe/α-Fe_2O_3 Oxygen Evolution Electrodes for AEM Water Electrolysis

조유진*, Patil Komal*, 조대현**, 박종성*†
Yujin Cho*, Patil Komal*, DaeHyun Cho**, Jongsung Park*†
*경상국립대학교 에너지시스템공학과, **경상국립대학교 메카트로닉스공학과

Abstract : Efficient OER electrodes for anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE) require fast electron transport, low interfacial resistance, and good structural stability under alkaline and high-current-density conditions. In this work, highly crystalline $Ti_3C_2T_x$ MXene (HC-MXene), derived from an Al-enriched Ti_3AlC_2 MAX precursor, is used as a conductive framework for NiCoFe/α-Fe_2O_3 OER electrodes. Compared with conventional MXene, HC-MXene shows improved crystalline ordering and electrical conductivity, enabling more efficient electron transport and stronger contact with the active catalyst phase. The HC-MX/NCF/α-Fe_2O_3 electrode exhibits an overpotential of 218.4 mV at 10 mA cm^{-2}, a Tafel slope of 60 mV dec^{-1}, and a charge-transfer resistance of 0.242 ohm. These results indicate that improved MXene crystallinity enhances interfacial charge transfer and OER kinetics. In an AEMWE single cell, the HC-MX/NCF/α-Fe2O3/NF electrode delivers 2.189 A cm^{-2} at 2.0 V and maintains stable operation at 0.5 A cm^{-2} for 150 h, with a voltage degradation rate of 86 microV h^{-1}. These findings demonstrate that highly crystalline MXene is an effective conductive framework for durable and high-performance non-precious-metal OER electrodes for AEMWE.

Key Words : 조명에너지절감(Lighting energy saving), 지능형 차양시스템(Automated shading systems), 자연채광(Daylighting), 차양제어알고리즘(Shading control algorithm), 일영각(Profile angle)

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

후 기

본 연구는 한국 정부(MEST)의 지원을 받아 한국연구재단(NRF)에서 지원한 연구비(RS-2023-00257494)의 지원을 받았습니다

S2H-P-5

조성 제어 기반 마이크로큐브형 니켈-코발트 산화물 전극의 물질전달 향상을 통한 고효율 전기화학적 질산염-암모니아 전환

Binder-free Microcubic Nickel-cobalt Oxide Architectures with Composition Optimized Transport for Efficinet Electrochemical Nitrate Reduction to Ammonia

박성현*, 임효정*, 안태용*, 최진욱**, 심욱*†
Seonghyeon Park*, Hyojung Lim*, Jinuk Choi**,Uk Sim*†
*성균관대학교 나노과학기술학과, **한국에너지공과대학교 에너지공학부

Abstract : The sustainable synthesis of ammonia has drawn considerable attention due to its vital role as a fertilizer precursor and energy carrier, offering a cleaner alternative to the energy-intensive Haber-Bosch process. Herein, a binder-free microcubic nickel-cobalt oxide electrode was directly engineered on a conductive substrate for efficient electrochemical nitrate reduction to ammonia under ambient conditions. By eliminating polymeric binders, this architecture minimizes interfacial charge-transfer resistance, improves durability, and enhances mass transport of nitrate species to accessible active sites. Consequently, the binder free electrode demonstrated superior catalytic activity with higher ammonia yields and Faradaic efficiency compared to conventional slurry-coated counterparts, underscoring direct electrode engineering as an effective strategy for wasatewater remediation and green ammonia production.

Key Words : 질산염 환원 반응(Nitrate reduction reaction), 암모니아 생산(Ammonia production), 니켈-코발트 산화물(Nickel-cobalt oxide), 그린 암모니아(Green ammonia)

† Corresponding author, E-mail: usim@skku.edu

S2H-P-6

그린 수소 생산을 위한 선택적 전기화학적 질산염-암모니아 전환용 망간 산화물 상 리튬 부화 니켈-철 나노 합금의 데이터 주도형 기계학습 유도 설계

Data Driven Machine Learning-Guided Design of Li-Rich NiFe Nano Alloys on Manganese Oxide for Selective Electrochemical Nitrate-to-Ammonia Conversion towards Green Hydrogen Production

심준호*, 박성현*, 심욱*†
Junho Shim*, Seonghyeon Park*, Uk Sim*†
*성균관대학교 나노과학기술학과

Abstract : 지속 가능한 암모니아 합성에 대한 관심의 증가는 비료 생산의 근간이자 미래 에너지 시스템에서 수소 저장 및 수송을 위한 잠재적 매개체로서 암모니아가 지닌 이중적 중요성에 기인합니다. 그럼에도 불구하고 현재 대규모 암모니아 생산은 여전히 하버-보슈 공정에 의존하고 있으며, 이의 가혹한 작동 조건은 높은 에너지 수요와 상당한 탄소 배출을 초래합니다. 이러한 문제로 인해 온화한 조건에서 암모니아를 생산하는 보다 지속 가능한 경로 개발에 대한 관심이 높아졌습니다. 전기화학적 질산염 환원 반응은 상온·상압 조건에서 분산형 접근 방식을 제공하는 동시에 질산염을 함유한 수자원의 가치를 높일 수 있으나, 복잡한 다단계 중간체와 수소 발생 반응과의 경쟁으로 인해 지표 풍부 원소 기반 촉매를 통해 높은 활성과 고선택성을 동시에 달성하는 데에는 여전히 한계가 있습니다. 본 연구에서는 이산화망간 지지체 상의 리튬 고함량 니켈-철 나노 합금으로 구성된 고효율 전기화학 촉매의 기계학습 유도 설계를 보고합니다. 인공지능 기반 스크리닝 프레임워크를 적용하여 리튬 도핑을 통해 니켈-철의 전자 구조를 합리적으로 제어함으로써, 질산염 유래 중간체의 흡착 및 활성화를 강화하고 반응 속도론을 향상시켰습니다. 다공성 니켈 폼에 통합될 때, 해당 촉매는 접근 가능한 활성점 밀도를 증가시키고 빠른 전하 전달 경로를 구축하여 전극 전반에서 효율적인 물질 및 전자 수송을 가능하게 하는 다중 스케일 이종접합 계면을 형성합니다. 알칼리 매질에서 최적화된 촉매는 우수한 질산염 환원 성능을 나타내며 넓은 전위 구간에 걸쳐 암모니아에 대한 높은 패러데이 효율을 제공합니다. 향상된 선택성은 중간체 흡착 에너지론에 기반한 계산 예측과 일치하게 수소 발생 반응이 본질적으로 억제된 데 기인합니다. 본 연구는 태양광 연계 친환경 수소 생산을 향한 차세대 지속 가능한 질산염-암모니아 전환 기술을 위한 인공지능 보조 조성-구조 동시 최적화 전략을 제시합니다.

Key Words : 전기화학적 질산염 환원 반응(Electrochemical nitrate reduction reaction), 암모니아 합성(Ammonia synthesis), 기계학습(Machine learning), 나노 합금(Nano alloys), 이종접합 계면(Heterostructured interface)

†Corresponding author, E-mail: usim@skku.edu

S2H-P-7

Bifunctional MoSSe Electrocatalyst for Nitrate-to-Ammonia Conversion and Oxygen Evolution in a Zero-Gap System

Hyojung Lim*, Jinuk Choi**, Uk Sim*,***†

*Department of Nano Science and Technology, Department of Nano Engineering, SKKU Advanced Institute of Nano Technology (SAINT), Sungkyunkwan University (SKKU), Suwon, Republic of Korea

**Hydrogen Energy Technology Laboratory, Korea Institute of Energy Technology (KENTECH), Naju, Republic of Korea

***Research Institute, NEEL Sciences, INC., Naju, Republic of Korea

Abstract : Electrochemical nitrate reduction reaction (NO_3RR) offers a sustainable route for ammonia (NH_3) production under ambient conditions while simultaneously removing nitrate pollutants. However, practical application remains challenging because NO_3RR involves sluggish multi-electron transfer and competes with the hydrogen evolution reaction, while the anodic oxygen evolution reaction (OER) also requires high over-potential. Therefore, developing a cost-effective bifunctional catalyst capable of promoting both NO_3RR and OER is highly desirable. Here, we developed a bifunctional MoSSe electrocatalyst and evaluated its performance for NO_3RR and OER. MoSSe with a metallic 1T phase exhibited superior NO_3RR activity compared with MoS_2 and $MoSe_2$, benefiting from its two-dimensional structure, enhanced electrical conductivity, and favorable chalcogen modulation. The catalyst achieved an energy efficiency of approximately 29% for nitrate-to-ammonia conversion while also showing favorable OER activity. To evaluate its scale-up potential, a zero-gap electrolyzer with a 3×3 cm^2 active area was constructed using MoSSe at both electrodes. The system delivered an NH_3 production rate of 27.8 mg h-1 with a Faradaic efficiency of 90.8% at 2.1 V and maintained stable operation for 72 h. *In-situ* Raman spectroscopy was further employed to identify reaction intermediates and investigate the NO_3RR and OER pathways on MoSSe. These results demonstrate that bifunctional MoSSe is a promising catalyst platform for scalable and energy-efficient electrochemical nitrate-to-ammonia conversion.

Key Words : Nitrate Reduction Reaction, Ammonia Synthesis, Oxygen Evolution Reaction, MoSSe, Zero-Gap Electrolyzer

† Corresponding author, E-mail: usim@skku.edu

S2H-P-8

Multimetallic CoNiCuRu/MWCNT Electrocatalysts for Efficient Nitrate-to-Ammonia Conversion under Ambient Conditions

Jinuk Choi*, Gyoung Hwa Jeong*, Hyojung Lim**, Seonghyeon Park**, Uk Sim**,***†

*Hydrogen Energy Technology Laboratory, Korea Institute of Energy Technology (KENTECH), Naju, Republic of Korea

**Department of Nano Science and Technology, Department of Nano Engineering, SKKU Advanced Institute of Nano Technology (SAINT), Sungkyunkwan University (SKKU), Suwon, Republic of Korea

***Research Institute, NEEL Sciences, INC., Naju, Republic of Korea

Abstract : Ammonia (NH_3) is a key industrial chemical with broad applications in fertilizer production, hydrogen storage, and carbon-free energy systems. Despite its importance, conventional NH_3 synthesis through the Haber–Bosch process relies on energy-intensive high-temperature and high-pressure conditions, resulting in substantial energy consumption and greenhouse gas emissions. Electrochemical ammonia synthesis offers an attractive alternative by enabling NH_3 production under mild operating conditions. In particular, electrochemical nitrate reduction provides the additional benefit of converting nitrate contaminants into value-added ammonia, thereby integrating chemical production with environmental remediation. Here, we report a quaternary CoNiCuRu catalyst supported on multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) for efficient electrochemical nitrate reduction to ammonia under ambient conditions. The CoNiCuRu/MWCNT catalyst exhibited a high ammonia production rate of 11,850 mg h^{-1} cm^{-2} at -0.6 V *vs.* RHE while maintaining a Faradaic efficiency exceeding 90% at 0.2 V *vs.* RHE. Moreover, an energy efficiency of 43.3% was achieved, benefiting from the suppression of the competing hydrogen evolution reaction at potentials above 0 V *vs.* RHE. The favorable catalytic activity, selectivity, and energy efficiency demonstrate the potential of CoNiCuRu/MWCNTs as a multimetallic electrocatalyst platform for sustainable nitrate-to-ammonia conversion and simultaneous nitrate remediation.

Key Words : Electrochemistry, Multimetallic Catalyst, Energy Conversion, Ammonia Production, Nitrate Reduction Reaction

† Corresponding author, E-mail: usim@skku.edu

S2H-P-9

Hydration-Mediated Electronic Coupling Enables Tunable Narrow-Band Emission from Zeolite-Confined Lead Halide Quantum Dots

안태용*, 심욱*†
Tae-Yong An*, Uk Sim*†
*성균관대학교 나노과학기술학과

Abstract : Understanding how hydration activates luminescence in zeolite-confined lead halides is essential for designing emitters whose optical properties can be controlled through their local environment. Here, we investigate hydration-dependent emission from nonperovskite tetrahedral $[Na_4Cs_6PbX_4]^{8+}$ quantum dots (QDs; X = Cl, Br, I, or mixed halides) confined within the approximately 1.2 nm supercages of FAU zeolite. By systematically varying halide composition and Cs^+ exchange levels, we identify distinct roles of halide identity and QD population in governing hydration-mediated coupling. Upon full hydration, the absorption maxima of Br- and I-based QDs shift from 302 to 511 nm and from 358 to 547 nm, respectively, accompanied by longer emission lifetimes and composition-tunable visible emission with bandwidths of approximately 15–50 nm. In contrast, Cl-based QDs exhibit minimal changes. Increasing Cs^+ exchange produces progressively lower-energy absorption after hydration, while high-resolution transmission electron microscopy reveals approximately 4–5 nm domains in hydrated Br-based samples. Together with X-ray photoelectron spectroscopy and density functional theory calculations, these observations support a mechanism in which water bridges electronically couple QDs across neighboring supercages. The key advance is the identification of halide-dependent connectivity and population-dependent domain formation as complementary controls over the optical response. This work provides a design principle for microporous luminescent materials: the host architecture and confined water can act together to regulate inter-QD coupling, offering a route toward hydration-responsive, color-tunable emitters.

Key Words : Zeolite-confined quantum dots, Nonperovskite lead halides, Hydration-mediated electronic coupling, Water-bridged assembly, Tunable narrow-band emission.

† Corresponding author, E-mail: usim@skku.edu

S2H-P-10

Mo 매개 계면 전자구조 조절을 통한 고성능 알칼라인 AEM 수전해용 $Ni_3S_2/FeNi_2S_4$

Mo-Mediated Interfacial Electronic Regulation of Ni3S2/FeNi2S4 for High-Performance Alkaline AEM Water Electrolysis

Komal Patil*, 박종성*,**†
*경상대학교 미래융복합기술연구소, **경상국립대학교 에너지공학과

Abstract : A Mo-modified $Ni_3S_2/FeNi_2S_4$ heterostructure was constructed as a highly active oxygen evolution reaction (OER) electrocatalyst for alkaline anion-exchange membrane water electrolysis (AEMWE). The incorporation of Mo induces favorable electronic redistribution across the $Ni_3S_2/FeNi_2S_4$ interface, facilitating hydroxide adsorption and promoting rapid interfacial charge transfer during the OER process. As a result, the optimized catalyst requires an overpotential of only 220 mV to reach 50 mA cm^{-2}in 1.0 M KOH and exhibits a low Tafel slope of 41.7 mV dec^{-1}, together with stable operation over 50 h. When integrated into a practical AEM electrolyzer with Pt/C as the cathode, the catalyst delivers cell voltages ranging from 1.66 to 2.18 V at current densities of 1−5 A cm^{-2}at 60 °C. Moreover, prolonged electrolysis at 0.5 A demonstrates approximately 91.7% activity retention after 200 h, confirming the structural robustness of the engineered heterointerface and its suitability for sustained alkaline water electrolysis.

Key Words : Mo doping, 나노복합재료 (nanocomposite), 음극교환막 수전해 (anion exchange membrane), nickel−iron sulfide, AEM single cell

† Corresponding author, E-mail: j.park@gnu.ac.kr

참가 및 등록안내

등록비 안내

- 학술대회 등록
  사전 등록: 2026년 8월 18일(화) ~ 10월 7일(수)
  현장 등록: 2026년 10월 14일(수) ~ 10월 16일(금)

- 참가비(학술대회: 10월 14일(수) - 16일(금))

구분	학생회원		회원(종신회원, 정회원)		비회원	
	사전등록	현장등록	사전등록	현장등록	사전등록	현장등록
연회비 납부자	120,000원	150,000원	190,000원	240,000원	300,000원	350,000원
연회비 미납자	150,000원	180,000원	250,000원	300,000원		

등록비 결제 안내

카드결제	• 학술대회홈페이지 학술행사 → 온라인등록 → 결제페이지 연결 • 초록 등록 및 온라인등록 완료 후 마이페이지 → 결제 → 결제 대기 목록에서 결제
계좌이체	• 은행명 : 우리은행 • 계좌번호 : 126-433275-01-005 / 예금주 : 사단법인 한국태양에너지학회 * 기관명으로 입금할 경우 반드시 학회 이메일로 관련 정보를 알려주시기 바랍니다. (solar@kses.re.kr)

연락처와 홈페이지 안내

- (사)한국태양에너지학회 (www.kses.re.kr)
- 주 소 : (우)30127, 세종특별자치시 한누리대로 249, 에스제이타워 804호(나성동)
- 전 화 : 044-864-1977, 팩 스 : 044-864-1978, 전자우편 : solar@kses.re.kr

주요 행사일정 및 장소

개회식 및 기조강연

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 14:40-15:30
- 장소 : 그랜드볼룸
- 대상 : 한국태양에너지학회 회원 및 일반인

한국태양에너지학회 이사회

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 17:00-18:00
- 장소 : 엘로우홀
- 대상 : 한국태양에너지학회 이사진

특별세션(한국재생열에너지융합협회 & 태양열융합전문 위원회) - 재생열 기술 및 정책

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 13:00-14:30
- 장소 : 핑크홀
- 형태 : Open session

특별세션(한국에너지기술연구원) - KIER N-Lab: 차세대 태양광 기술 워크샵

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 13:00-14:30
- 장소 : 실버홀
- 형태 : Closed session

특별세션(경상국립대학교) - 페로브/실리콘 탠덤 재활용

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 13:00-14:30
- 장소 : 골드홀
- 형태 : Closed session

특별강좌 - BIPV·영농형 태양광 A to Z

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 13:00~14:30
- 장소 : 레드홀
- 형태 : Open session

특별세션(한국재생열에너지융합협회 & 태양열융합전문 위원회) - 재생열 기술 및 정책

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 15:40-17:00
- 장소 : 핑크홀
- 형태 : Closed session

특별세션(태양광자원순환전문위원회) - 태양광 순환경제

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 15:40-17:00
- 장소 : 레드홀
- 형태 : Closed session

에너지최적화 디자인 공모전

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 13:30~14:50
- 장소 : 그랜드볼룸

특별세션(해상풍력 전문위원회) - 해상풍력기술과 해양 FPV 시스템 I

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 13:30-14:50
- 장소 : 골드홀
- 형태 : Open session

특별세션(경상국립대학교) - 차세대 우주 태양전지

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 15:10-16:30
- 장소 : 옐로우홀
- 형태 : Closed session

특별세션(한국생산기술연구원) - PVT-HP AI 연계 냉난방 시스템

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 15:10-16:30
- 장소 : 핑크홀
- 형태 : Closed session

특별세션(해상풍력 전문위원회) - 해상풍력기술과 해양 FPV 시스템 II

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 15:10-16:30
- 장소 : 골드홀
- 형태 : Open session

특별세션(한국에너지기술연구원) - AI기반 O&M플랫폼개발

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 16:40~18:00
- 장소 : 핑크홀
- 형태 : Closed session

학회등록자 중식

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 12:00~13:30
- 장소 : 1층 더샬레(식당)
- 대상 : 2026년 추계학술발표대회 등록자

석식

- 일시 : 2026년 10월 14일(수) 18:00-20:00
- 장소 : 야외테라스
- 대상 : 한국태양에너지학회 임원, 2026년 추계학술발표대회 일반 등록자

만찬 및 시상식

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 18:00-20:00
- 장소 : 그랜드볼룸
- 대상 : 한국태양에너지학회 임원, 2026년 추계학술발표대회 일반 등록자

폐회식

- 일시 : 2026년 10월 15일(목) 20:00-20:30
- 장소 : 그랜드볼룸
- 대상 : 한국태양에너지학회 회원 및 일반인

구두 및 포스터 발표 안내

INVITED SESSION

- 발표 시간 : 20분(발표 15분, 질의 · 응답 5분) ※ 분과별로 발표시간은 조정될 수 있음.
- 시청각 기자재 : 빔 프로젝트
- 요청 사항 : 발표자는 발표파일을 USB메모리로 지참하여 해당 발표세션 전 휴식시간에 발표장 컴퓨터에 파일을 복사한 후, 정상적으로 화면에 보이는지 확인 요망

ORAL SESSION

- 발표 시간 : 15분(발표 10분, 질의 · 응답 5분) ※ 분과별로 발표시간은 조정될 수 있음.
- 시청각 기자재 : 빔 프로젝트
- 요청 사항 : 발표자는 발표파일을 USB메모리로 지참하여 해당 발표세션 전 휴식시간에 발표장 컴퓨터에 파일을 복사한 후, 정상적으로 화면에 보이는지 확인 요망

  ※ 구두발표부문 우수발표상 평가 실시

POSTER SESSION

- 발표 장소 : 그랜드볼룸
- 포스터 규격 : 600×900(예시를 참조하여 작성)
- Poster 시상 : 정해진 시간내에 게시한 모든 포스터에 대해서 서면평가를 통해 선정·시상함.

  ※ 포스터발표부문 우수포스터상 평가 실시
- Poster check-in I (포스터 체크인 및 부착 I) :
  - 10월 14일(수) 09:00~14:00 / 포스터 전시장(그랜드볼룸)내
- Poster check-in II (포스터 체크인 및 부착 II) :
  - 10월 15일(목) 09:00~14:00 / 포스터 전시장(그랜드볼룸)내

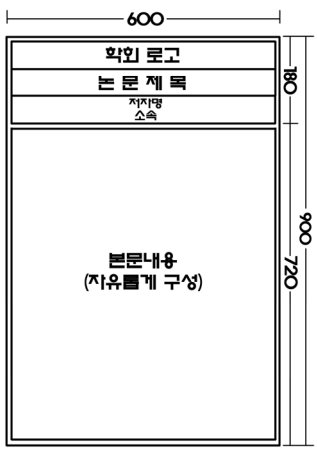
    ※ 발표자 혹은 공동저자가 체크인데스크에서 확인 후, 포스터를 부착함.

    ※ 접수번호가 아닌 프로그램북에 배정된 세션별 논문번호를 확인 후 부착함.

    ※ 부착된 모든 포스터는 제거 시각까지 부착되어 있어야 함.
- Poster presentation I (포스터 발표 I) : 10월 14일(수) 15:40~17:00
- Poster presentation II (포스터 발표 II) : 10월 15일(목) 16:40~18:00

  ※ 지정된 포스터 발표자가 배석하여 연구자들과 질의응답을 진행함.
- Poster removal I (포스터 제거 I) : 10월 14일(수) 18:00~10월 14일(수) 23:30까지
- Poster removal II (포스터 제거 II) : 10월 15일(목) 18:00~10월 15일(목) 23:30까지

  ※ 부착된 모든 포스터를 제거하여야 하며, 기한내에 제거하지 않은 포스터는 임의로 폐기함.



*포스터 규격 예시

좌장 및 발표자 숙지사항

좌장

① 담당분야의 시간과 발표장을 확인해 주십시오.
② 발표시작 10분전까지는 발표장에 입실해 주십시오.
③ 발표자들이 모두 참석했는지 발표시간 전에 확인해 주십시오.
④ 발표시간은 질의응답 5분 포함 초청강연 총 20분, 일반구두 총 15분입니다.
(세션별 발표시간이 다를 수 있으므로 프로그램북을 확인해주세요.)
⑤ 발표시작 전 채점표를 확인해 주십시오.
⑥ 종료시간을 알리는 종은 발표종료 3분 전 한 번, 종료 시 두 번 울리십시오.
⑦ 두 번째 종소리 후에는 발표를 종료시켜 주십시오.

초청강연자

① 발표분야, 발표장 및 시간을 확인해 주십시오.
② 발표 시작 10분전까지는 발표장에 입실해 주십시오.
③ 발표파일을 USB메모리로 지참하여 해당 발표세션 전 휴식시간에 발표장 컴퓨터에 파일을 복사한 후, 정상적으로 화면에 보이는지 확인하시기 바랍니다. 개인 노트북도 사용 가능하나 휴식시간 중에 미리 연결하여 확인하시기 바랍니다.

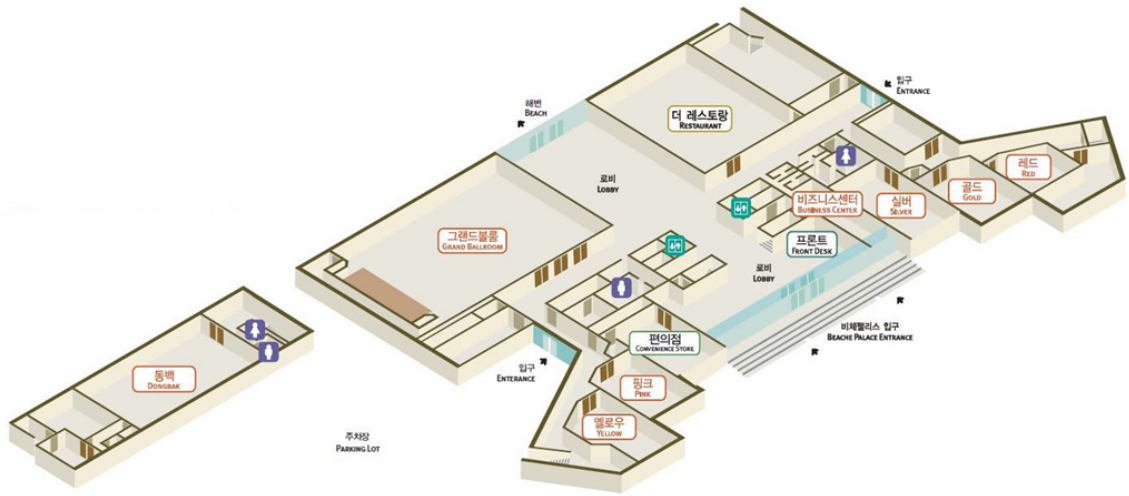
Oral 발표자

① 발표분야, 발표장 및 시간을 확인해 주십시오.
② 발표 시작 5분전까지는 발표장에 입실해 주십시오.
③ 발표시간은 총 15분이고 10분 발표 5분 질의 · 응답입니다.
(세션별 발표시간이 다를 수 있으므로 프로그램북을 확인해주세요.)
④ 종료시간을 알리는 종은 발표종료 3분 전 한 번, 종료 시 두 번 울립니다.
⑤ 두 번째 종소리 후에는 곧 발표를 종료하여 주십시오.
⑥ Oral 발표 기자재는 "빔 프로젝트“와 ”레이저포인터“ 입니다.
⑦ 발표파일을 USB메모리로 지참하여 해당 발표세션 전 휴식시간에 발표장 컴퓨터에 파일을 복사한 후, 정상적으로 화면에 보이는지 확인하시기 바랍니다. 개인 노트북도 사용 가능하나 휴식시간 중에 미리 연결하여 확인하시기 바랍니다.

Poster 발표자

① Poster Check-in, Presentation 시간을 확인해 주십시오.
② 발표장소는 학술행사장의 그랜드볼룸이며, Poster presentation I, II (포스터 발표)전 안내된 시간에 포스터 부착을 완료하여주시기 바랍니다.
③ 포스터 규격(600×900)과 홈페이지에 제시된 양식을 준수해 주시고, 프로그램북에 배정된 세션별 논문번호를 확인 후, 해당되는 판넬에 부착해 주십시오.

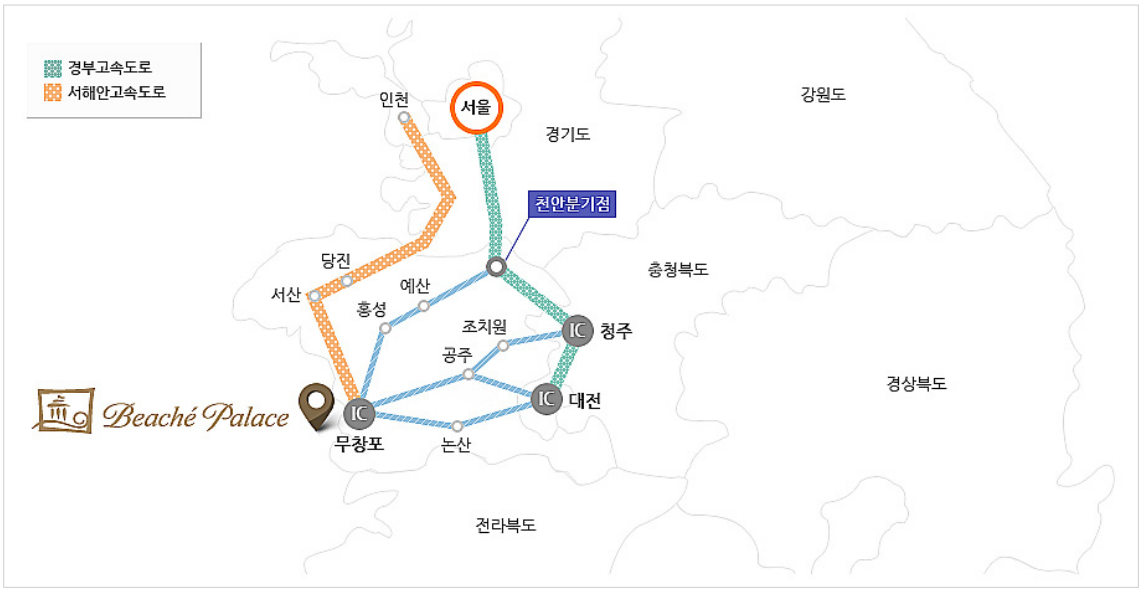
발표장 안내도



행사장 안내: 그랜드볼룸, 옐로우홀, 핑크홀, 실버홀, 골드홀, 레드홀

- 그랜드볼룸: 개회식 및 초청강연, 시상식 및 폐회식, 만찬, 포스터 전시 및 심사
- 옐로우홀 : 특별세션, 구두발표, 이사회
- 핑크홀, 실버홀, 골드홀, 레드홀 : 특별세션, 구두발표
- 로비 : 기업체 전시

무창포 비체팰리스 오시는 길



경부 고속 & 국도

- 코스 : 서울 → 경부고속도로 → 서해안 고속도로(서평택) → 송악 → 당진 → 서산 → 해미 → 홍성 → 광천 → 대천 → 무창포IC
  (매표후 약150m지점 좌회전후 계속 직진 무창포해수욕장끝 지점 비체팰리스콘도 목적지)
- 소요시간 : 2시간

서해안 고속도로

- 코스 : 서울 → 서서울IC → 안산 → 매봉 → 비봉 → 발안 → 서평택 → 송악 → 당진 → 서산 → 해미 → 홍성 → 광천 → 대천 → 무창포IC
  (매표후 약150m지점 좌회전후 계속 직진 무창포해수욕장끝 지점 비체팰리스콘도 목적지)
- 소요시간 : 2시간

서울TG (거리: 169km)

- 코스 : 서울TG → 판교JC → 청계TG → 학의 → 평촌 → 산본 → 조남JC → 서서울TG → 안산JC → 매송 → 비봉 → 발안 → 서평택JC → 서평택 → 송악 → 당진 → 서산 → 해미 → 홍성 → 광천 → 대천 → 무창포IC
  (매표후 약150m지점 좌회전후 계속 직진 무창포해수욕장끝 지점 비체팰리스콘도 목적지)
- 소요시간 : 2시간

동서울TG (거리: 187km)

- 코스 : 동서울TG → 하남JC → 서하남 → 송파 → 성남TG → 성남 → 판교JC → 청계TG → 학의 → 평촌 → 산본 → 조남JC → 서서울TG → 안산JC → 매송 → 비봉 → 발안 → 서평택JC → 서평택 → 송악 → 당진 → 서산 → 해미 → 홍성 → 광천 → 대천 → 무창포

서서울TG (거리: 169km)

• 코스 : 서울TG → 판교JC → 청계TG → 학의 → 평촌 → 산본 → 조남JC → 서서울TG → 안산JC → 매송 → 비봉 → 발안 → 서평택JC → 서평택 → 송악 → 당진 → 서산 → 해미 → 홍성 → 광천 → 대천 → 무창포

철도이용

출발지	도착지	노선	예상소요시간
용산역	웅천역	장항선	3시간 10분

웅천역에서 큰도로를 따라 30m정도 내려오시면 무창포 방면 시내버스가 수시로 있습니다.

버스이용

출발지	도착지	노선	예상소요시간
서울	보령터미널	강남고속 터미널 / 동서울 터미널 / 남부 터미널	2시간
대전	대천터미널	서부터미널에서 무정차 : 06:30~20:30	2시간
		직행/직통 20분 간격으로 운행	2시간 40분
군산	대천터미널	군산 시외버스 터미널에서 1시간 간격으로 운행	1시간
		문의 : 063-445-3824(군산) / 063-277-1572(전주시외버스터미널)	

대천시외버스터미널에서 무창포 방면 시내버스 및 택시를 이용하시면 됩니다.

2026 한국태양에너지학회
추계학술발표대회
2026 KSES Annual Autumn Conference

발행처 : 한국태양에너지학회
주소 : 30127 세종특별자치시 한누리대로 249, 에스제이타워 804호(나성동)
전화 : 044-864-1977 팩스 : 044-864-1978
E-mail : solar@kses.re.kr
발행일 : 2026년 10월 14일
발행인 : 김영원

인 쇄 : (주)에이퍼브
전화 : 02-2274-3666 팩스 : 02-2274-4666