

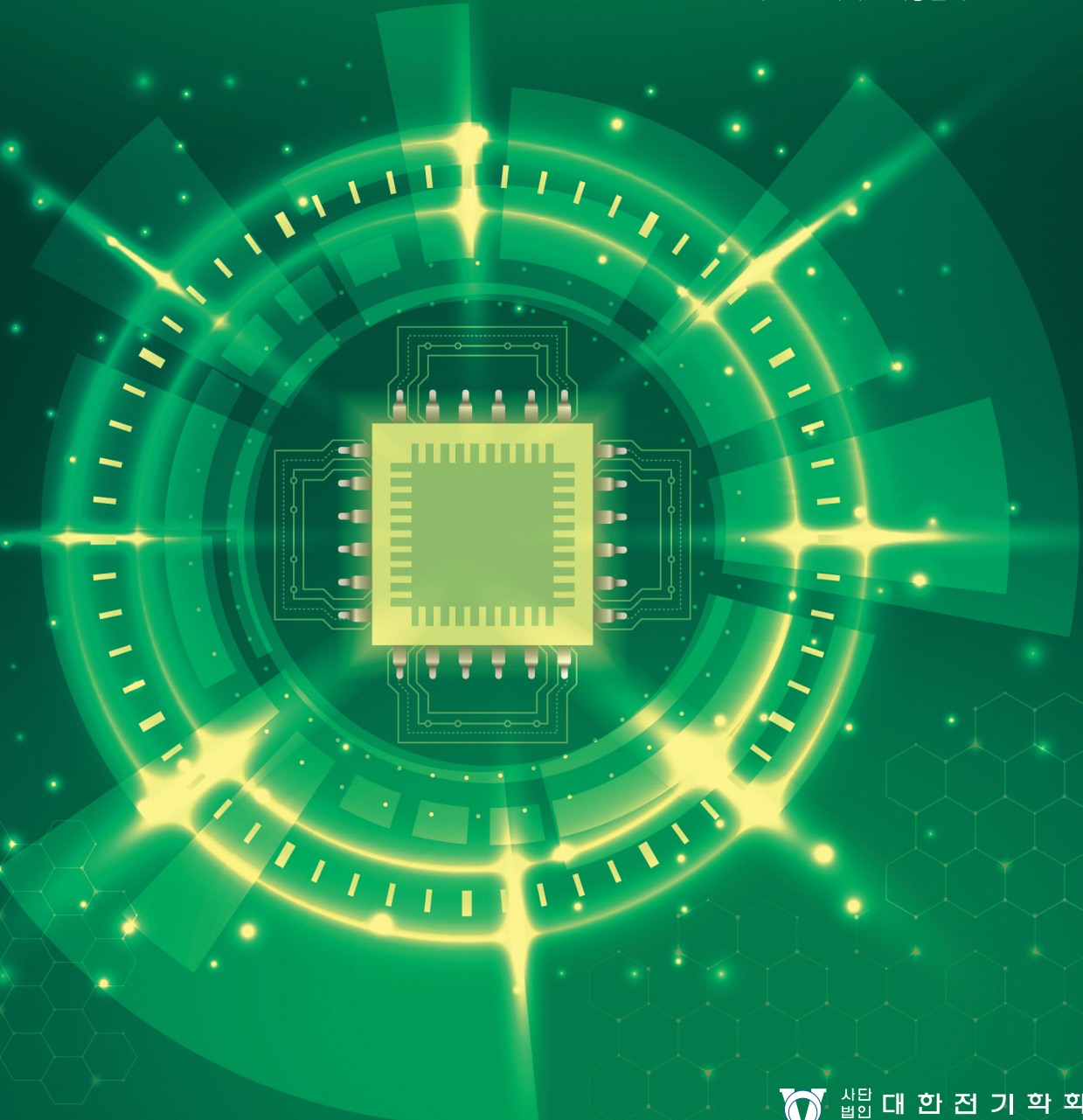


5

전기의 세계

기획 시리즈 유기 반도체 기반 차세대 광전자소자
연구개발 기술 동향

자유 기고문 넓은 밴드갭을 가지는 CsPbI₂Br 무기
페로브스카이트 태양전지





2024 대한전기학회 하계 학술대회

제55회

KIEE
Summer
Conference
2024

7월 10일(수) ~ 13일(토)

제주국제컨벤션센터(ICC제주)



논문신청

| 논문제목 접수

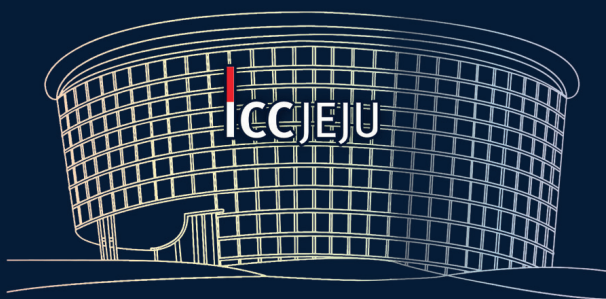
- 접수 마감 : 2024년 4월 15일(월)
- 학술대회 홈페이지(<http://conf.kiee.or.kr>)에서 접수

| 논문(원문) 접수

- 논문(원문) 접수 마감 : 2024년 5월 13일(월)
- 학술대회 홈페이지(<http://conf.kiee.or.kr>)에서 접수

사전등록 신청

- 사전등록 : 2024년 5월 24일(금)까지



주최 대한전기학회

후원 한국과학기술단체총연합회

K water
한국수자원공사

LH
한국토지주택공사

한국수력원자력주

전력거래소
Korea Power Exchange

한국남부발전주

대한전기협회
Korea Electric Association

한국동서발전주

한국전기안전공사

한국중부발전주

CONTENTS

The Korean Institute of Electrical Engineers

전기계뉴스



국민의 저탄소·친환경 아이디어를 모집합니다 | 2

배터리·AI·반도체 공장 물리는 美, 열·전력 공급 투자 확대 | 2

기획시리즈-유기 반도체 기반 차세대 광전자소자

연구개발 기술 동향

고효율 하이브리드 발광 트랜지스터 연구 개발 동향 | 7

유기 광전자소자를 위한 전사 인쇄 공정과 저조도 및

광검출기 응용 연구 최신 기술 동향 | 12

투명 태양전지를 위한 근적외선 선택적 흡수 유기 반도체 소재

연구개발 현황 | 23

자유기고문

넓은 밴드갭을 가지는 CsPbI₂Br 무기 페로브스카이트 태양전지 | 29

극한 기후와 외부 충격에 강인한 전력망 구축을 위한

전력망 복원력(Grid Resilience) 평가 및 관리 체계의 필요성 | 35

학회 소식

4차이사회 회의록 | 41

학회소식 | 42

회원가입안내 | 43

전기의 세계

KIEE Magazine

Vol. 73, No. 5 May 2024

발행일 2024년 5월 1일
발행인 이병준
편집인 허 진
발행처 사단법인 대한전기학회
(06130) 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22
과학기술회관 1관 901호
Tel 02-553-0151 Fax 02-566-9957
<http://www.kiee.or.kr>

학회 본부 임원

회장 이병준
차기회장 이준호
부회장 박종배 이준호 문승일 김석주 김홍근 차준민
홍선기 김용상 김경호 최상열 손진근
협동부회장 김구환 김상권 김태욱 노대석 서장철 신윤용
심은보 오호진 육심균 이경숙 이인호 이찬주
정기석 최원호 최효진

감사 김세호 장용무
총무이사 송화창 전동훈 최홍석 곽은섭 이정호 신용준
재무이사 허 돈 안길영
기획·정책이사 차한주 허 진 김슬기
편집이사 남순열 정호성 허 진
학술이사 주성관 배성우 최영준 오현진 우정욱
회원·교육이사 조현중 최승연 김지희
사업이사 김정주 장병훈 한경희
산학협동이사 손성용 정상용 박재성
국제이사 강승택 김래영
기술이사 장길수 신정훈
소통이사 김정수 박정욱 서정호 유희덕 이상복

부문회 회장

A부문 회장 차준민 B부문 회장 홍선기
C부문 회장 김용상 D부문 회장 김경호
E부문 회장 최상열 I부문 회장 손진근

전임 편집인

2016년 이병국 2017년~2018년 정인성
2019년~2021년 강승택 2022년~2024년 허 진

온라인

수협은행 1010-2175-5210(대한전기학회)
국민은행 349401-04-009338(대한전기학회)

편집·디자인 드림기획 031-705-3812
인쇄 드림기획 031-705-3812

학회 사무국 직원별 담당 연락처(☎ 02-553-0151~7)

사무국장
김정훈 : 업무총괄, 하계학술대회, D부문회, I부문회
electran@kiee.or.kr ☎ 0156

경영지원팀

팀장 이상필 : 총무, 미니드론경진대회, E부문회
elecproc@kiee.or.kr ☎ 0152

차장 서영은 : 교육원, 본부위원회, 여성과학기술위원회, C부문회
account@kiee.or.kr ☎ 0155

차장 최순례 : 회원관리, 회계관리, 지회, 홈페이지관리
member@kiee.or.kr ☎ 0154

편집팀

팀장 송호석 : 학회지, 본부위원회, A부문회
elecjour@kiee.or.kr ☎ 0153

부장 전필준 : 국문논문, 연구용역, 전문위원회, B부문회, D부문회
jun@kiee.or.kr ☎ 0157

과장 박소희 : 영문논문(JEET), 국제업무, KIEE-CEO클럽, I부문회
jeet@kiee.or.kr ☎ 0151

전기계 뉴스



국민의 저탄소·친환경 아이디어를 모집합니다

2024년 탄소중립분야 문제해결 아이디어 대국민 공모저탄소·친환경 과제에 대한 국민 아이디어 모집...

총 아이디어 거래금 5,000만원

**2024 탄소중립분야
문제해결
아이디어
대국민공모**

총 아이디어 거래금 5000만원!

공모기간

- (1차) 2024.04.18(목) ~ 05.09(목)
- (2차) 2024.04.23(화) ~ 05.16(목)

참가자격

- 아이디어 플랫폼[IDEARO]에 가입한 국민 누구나

접수방법 (www.idearo.kr)

- 플랫폼 회원가입
- [일반지]-[전문과제]에서 과제확인
- 1p 컨셉 아이디어 등록

진행일정

- 과제별 상세페이지에서 확인

문의처

- 02.3459.2809

해결과제

대응제품(기술)	공모기간
· 태양광 구조물 안전진단 시스템 · 합차의 하이브리드형 무시동 공조 시스템 · 고압 연계분류 시스템을 적용한 옥외용 이끼 하우스 · 카메라 영상 기반 차량 내 승차인원 감지기	(1차) 4.18(목)~5.09(목)
· 카드식 이동형 전기차 충전시스템 · 자원재순환을 통한 저온유지 튜브랙(Tube Rack) · 전차 폐기물로 만든 업사이클링 가구 · 탄소포집·제거가 가능한 인공토양 · 단일소재 화장용 케이스 · 폐원수익의 화학적 분해를 통한 원료화 기술	(2차) 4.23(화)~5.16(목)

진행방법 및 지급보상

- 과제별 3개 내외의 컨셉 아이디어를 선정하고 아이디어 고도화를 진행
- 과제당 500만원 내외의 아이디어 거래금을 기여도에 따라 분배

특허청은 5월 16일까지 기후변화대응 및 정부혁신의 일환으로 '2024년 탄소중립분야 문제해결 아이디어 대국민 공모'를 실시한다고 밝혔다.

이번에 모집하는 10개 과제는 특허청 '탄소중립분야 아이디어 거래·사업화 지원사업'에 참여한 중소기업이 개발하고자 하는 저탄소·친환경 제품에 대한 문제해결 공모과제이다.

과제 해결을 위한 국민 아이디어는 특허청 '아이디어로*'를 통해 온라인으로 접수하며, 발굴된 아이디어는 중소기업이 선정·구매하여 탄소중립분야 신제품 개발 및 제품 고도화에 활용할 예정이다.

상세 과제로는 ▲인공토양의 탄소포집·제거 기능을 유지하면서도 생산원가를 절감할 수 있는 아이디어 ▲ 다양한 혼합소재의 폐현수막을 화학적으로 재활용하기 위한 아이디어 등이 있으며, 접수기간은 과제별로 상이하다.

접수된 아이디어 중 전문가 평가를 통해 과제별 3개 내외의 아이디어를 선정하며, 선정된 아이디어는 아이디어 제안자가 과제 제안기업, 지식재산 전문가 등과 함께 아이디어 개선 및 고도화 과정*을 진행한다. 기업은 개선된 아이디어 중 우수한 아이디어를 최종 선정 및 구매하고, 과제당 최대 500만원의 아이디어 거래금을 아이디어 제안자에게 기여도에 따라 분배할 예정이다.

목성호 산업재산정책국장은 "기업이 기후변화에 효과적으로 대응하기 위해서는 외부 아이디어를 도입하는 오픈 이노베이션(개방형 혁신)을 전략적으로 활용해야 한다"고 강조하면서 "창의적인 아이디어가 중소기업 제품혁신의 디딤돌이 될 수 있도록 국민 여러분의 많은 관심과 참여를 부탁드립니다"고 밝혔다.

배터리·AI·반도체 공장 물리는美, 열·전력 공급 투자 확대

美서 데이터센터·반도체공장 등 첨단산업 늘면서 전력 공급 우려도 ↑

전력 공급 확대하면서 송전망 확충 및 보수 필요성도 높아져국내 전력기기 경쟁력 높아...전력기기 시장 장기 호황기로



데이터센터 전경. 사진은 기사의 특성사실과 관련 없음. [사진=마이크로소프트]

인공지능(AI) 열풍이 전력기기 시장 '슈퍼 사이클'로 이어졌다. 미국이 첨단 산업 유치에 사활을 걸고 있는 상황 속 AI와 반도체 등을 육성하기 위해서는 막대한 전력 공급이 필수 조건이기 때문이다. 국내 전력기기 업계도 모처럼 꾸준한 투자 성과를 이루게 됐다.

지난 18일 뱅크오브아메리카(BofA) 보고서에 따르면 미국 데이터센터 전력 소비량은 올해 172테라와트시(TWh)에서 2030년 405TWh로 2배 이상 증가할 것으로 예상된다. 전체 공급량에서 차지하는 비중은 4.2%에서 8.1%로 2배 가까이 높아진다.

AI 경쟁이 원인이다. 지난해부터 AI 상용화가 본격화하면서 빅테크 기업들은 앞다퉀 데이터센터를 신설하고 투자 비용을 상향하고 있다. 데이터센터 1개가 소모하는 전력량은 수메가와트(MW)급이다. 국제에너지기구(IEA)가 2030년까지 세계적으로도 데이터센터 전력소모량이 일본 수준인 1000TW를 넘어설 것으로 우려하기도 했다.

전기계 뉴스



미국 정부와 빅테크들은 고효율 반도체를 찾으며 해법을 모색했지만, 오히려 흑만 더 붙었다. 새로운 AI 반도체가 상대적으로 전력 소비가 많은 엔비디아 '쿠다' 생태계를 좀처럼 넘어서지 못하고 있는 데다 미국 정부가 막대한 지원금까지 주면서 만든 현지 반도체 공장이 내년 가동을 시작하면 데이터센터 절반 수준의 전력을 잡아먹을 예정이라서다. 필수 장비인 EUV 1대 소모 전력도 1MW 이상, 반도체 공장 전체가 쓰는 전력은 데이터센터보다 훨씬 크다.



엔비디아는 GPT-MoE 1.8T를 90일간 작동한 결과 블랙웰을 적용한 GB200 NVL72가 전작인 호퍼 대비 전력 사용량을 4분의 1로 줄였다고 밝혔다. 다만 AI 산업 특성상 실제 전력 소모를 줄일 수 있을지는 미지수다. [제공=엔비디아]

반도체 업계도 고민이 크다. 안정적이고 많은, 그리고 친환경적인 전력을 공급받아야 하지만 미국 내 환경이 그렇지 못해서다. 미국은 생산 전력



미국 테네시주 멤피스에 있는 효성중공업의 초고압 변압기 생산공장 [제공=효성중공업]

중 절반 수준을 천연가스로 충당하고 있다. 아직 신재생에너지 직접 공급도 어려운 상황이다. 이 때문에 'RE100' 달성을 위해서는 탄소배출권을 구매해야만 한다.

미국 정부도 행동에 나섰다. 화석연료 가동 중단을 연기하고 신재생에너지 공급 설비도 빠르게 확충하면서 일단 공식적인 전체 전력 공급량을 올해 4000TW에서 2030년 5000TW로 늘릴 계획으로 추정된다. 신재생에너지 발전 시설 투자도 지속 중이며 소형 원자로(SMR)까지 상용화하면 공급량은 훨씬 늘릴 수 있을 것으로 기대된다.

문제는 송전망이다. 신재생에너지 공급지가 바다와 해변 등 실제 공장과는 다소 거리가 있는 데다 기존 송전망도 50년 이상 노후화돼 사실상 대부분을 새로 공사해야 하는 수준이다.

국내 변압기가 호황을 맞이한 이유다. 미국은 전력기기 산업이 발달하지 못해 수입 비중이 대부분으로 알려져있다. 중국산도 세계적인 경쟁력을 보유하고 있지만 미-중 무역분쟁으로 벽을 뚫지 못했다.



대한전선이 미국 뉴욕에서 노후 케이블 교체 공사를 진행하고 있다. [제공=대한전선]

변압기 호황은 전선으로도 확대됐다. 전기 제품에 두루 쓰이는 구리가 품귀 현상으로 가격이 급등, 전선 가격도 치솟은 영향이다.

미국뿐이 아니다. 세계적으로도 데이터센터와 반도체 공장, 친환경 에너지 발전을 확대하면서 전력기기 업계는 세계적인 수주 성과를 이어가고 있다. 해저케이블 등 고부가가치 비중도 높아지는 추세다. 데이터센터는 물론 반도체 공장은 안정적으로 전력을 공급해야만 가동할 수 있는 만큼 ESS 등 관련 설비도 늘어나면서 전력 기기 수요 성장 가능성은 더욱 크다.

이에 따라 전력기기 호황기는 한동안 이어질 것이라는 전망이 지배적이다. KB증권은 '전력기기 강세, 시작에 불과'라는 보고서를 통해 전력기기 산업 슈퍼사이클이 2030년 이상 지속될 것으로 기대했다. 전 세계 20개 변압기 업체 중 초고압 변압기 생산업체가 20%에 불과하고, 이미 2030년 구매 계약을 체결할 만큼 공급난도 심하다고 덧붙였다. 전선 역시 비슷한 상황, 구리 가격도 내년 상반기 최고가를 경신하면서 실적 상승을 견인할 것으로 분석했다.

기획시리즈



유기 반도체 기반 차세대 광전자소자 연구개발 기술 동향

고효율 하이브리드 발광 트랜지스터 연구 개발 동향
유기 광전자소자를 위한 전사 인쇄 공정과 저조도 및
광검출기 응용 연구 최신 기술 동향
투명 태양전지를 위한 근적외선 선택적 흡수
유기 반도체 소재 연구개발 현황

유기 반도체 기반 차세대 광전자소자 연구개발 기술 동향

Latest Technology Trends of
Organic Semiconductor-Based Next
Generation Optoelectronic Devices



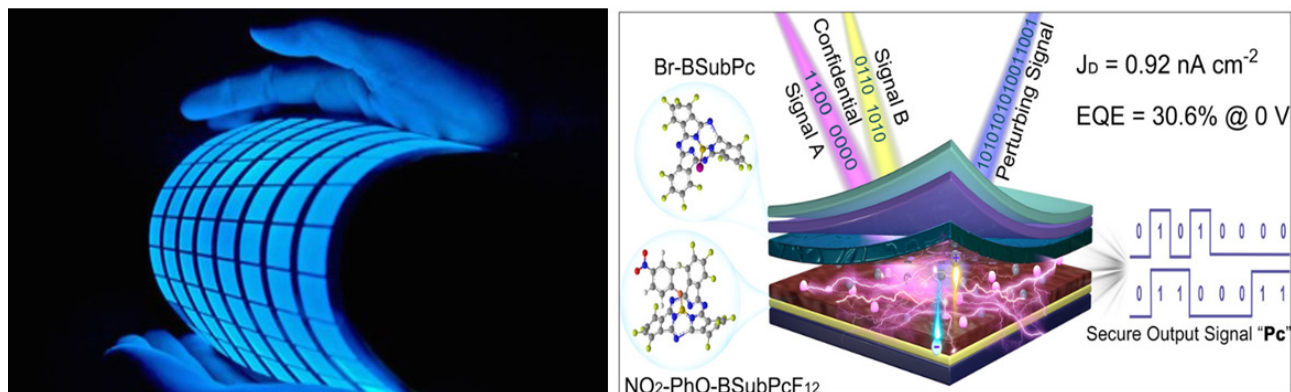
강동원(Dong-Won Kang)
중앙대학교



대한 전기학회 회원 그리고 독자 여러분께 인사드립니다. 저는 중앙대학교 에너지시스템공학부 발전전기 관련 발전소자 및 반도체 소재에 관한 교육과 연구의 일을 하는 강동원입니다.

이번 기획시리즈의 주제는 “유기 반도체 기반 차세대 광전자소자 연구개발 기술 동향”입니다. 유기 반도체는 다양한 광전자 소자에 널리 활용되고 있는 소재입니다. 첫째로 널리 연구개발되고 있는 활용처 중의 하나인 발광 전계 효과 트랜지스터 또는 유기 발광 트랜지스터라고도 알려진 발광 트랜지스터는 트랜지스터와 발광 다이오드의 기능을 결합한 새로운 기술을 나타내며 유기 반도체를 활용하는 애플리케이션 중의 하나입니다. 발광 트랜지스

터는 전류의 흐름을 제어하는 기존 트랜지스터와 전류가 통과할 때 빛을 방출하는 발광 다이오드의 기능의 통합을 통해 트랜지스터의 전기적 특성을 제어하여 발광을 조절할 수 있습니다. 일반적으로 소스 전극과 드레인 전극 사이에 끼워진 활성층 역할을 하는 유기 반도체 재료로 구성되며, 게이트 전극은 전하 캐리어의 흐름을 제어합니다. 높은 외부 양자 효율과 낮은 작동 전압, 조정 가능한 방출 스펙트럼을 포함하여 인상적인 성능 지표를 보여주는 소재 및 기술을 목표로 잠재력이 있는 우수 결과들이 발표되고 있으며, 소자의 성능을 개선하려는 노력은 전하 운반체 이동도 향상, 비방사성 재결합 손실 감소, 장치 작동 안정성 향상에 더욱 중점을 두고 있습니다. 발광 트랜지스터 기술은 플렉서블 디스플레이



출처 (좌) The Postscript, "Organic Light Emitting Transistor Market", (우) ACS Appl. Mater. Interfaces 2022, 14, 37, 42277–4228

그림 1 (좌) 유기 발광 트랜지스터 및 (우) 유기 반도체 기반 센서용 광검출기 예시

레이, 조명, 간판, 웨어러블 전자 장치를 포함한 다양한 애플리케이션에 대한 가능성을 갖고 있다고 볼 수 있으며, 이러한 응용 분야에 대한 발광 트랜지스터 기반 소자 및 시스템의 타당성과 상업성을 고려하는 추가적인 연구도 진행 중에 있습니다.

더 나아가서, 유기 반도체 기반 센서용 광검출기도 중요한 활용처라고 할 수 있습니다. 유기 반도체 기반 광검출기는 그 감도를 높이는 것이 핵심 연구 중의 하나입니다. 여기에는 특히 가시광선 및 근적외선 스펙트럼 영역에서 높은 감광성 및 감지성을 달성하기 위해 소자 구조 및 재료를 최적화하는 것이 포함됩니다. 많은 연구들은 센서 응용을 위한 유기 반도체 기반 광검출기의 선택성과 특이성을 개선하기 위해 노력하고 있습니다. 여기에는 복잡한 화학적 및 생물학적 환경에서 표적 분석물을 선택적으로 감지하기 위해 맞춤형 유기 재료로 센서 어레이를 설계하는 것이 포함됩니다. 또한 환경 모니터링, 의료 진단, 스마트 농업 등의 응용 분야를 위해 유기 반도체 기반 광검출기와 사물 인터넷(IoT) 플랫폼을 통합하는 데 대한 관심이 높아지고 있습니다. 실시간 감지 및 데이터 통신을 위해 IoT 시스템과 호환되는 저전력, 고성능 광검출기를 개발하기 위해 노력하고 있습니다.

또한, 유기 반도체 기반의 태양전지는 더욱 오랜기간 동안 연구개발 되어온 대표 활용처 중의 하나입니다. 연구자들은 유기태양전지의 전력변환 효율을 높이기 위해 지속적으로 노력을 해오고 있으며 여기에는 에너지 레벨이 최적화된 신소재 개발, 소자의 아키텍처 개선, 제조 기술 개선이 포함됩니다. 유기 소재의 특성으로 투명하고 가벼우며 유연하게 저온에서 제작이 가능하다

는 점은 큰 장점이라고 할 수 있겠습니다. 광전변환효율을 높이면서도 가시광에서 투명한 특성을 갖도록 제조하는 단일접합 또는 적층형 전지기술은 매우 유망하며 높은 관심과 함께 연구개발이 진행되고 있습니다. 또한, 유기태양전지의 작동 수명과 안정성을 높이는 안정적인 유기재료 및 봉지법 개발에도 기회가 집중되고 있습니다.

본 기획시리즈의 첫 번째 원고에서는 고효율 하이브리드 발광 트랜지스터 연구 개발 동향을 조사하였으며, 최근 개발되고 있는 높은 발광 효율의 유·무기 구조의 하이브리드 발광 트랜지스터에 대한 동향을 구체적으로 살펴봅니다. 두 번째 원고에서는 최근 비폴러렌계 엑셉터 및 다양한 신규 소재의 등장으로 급격한 성장세를 보이고 있는 유기반도체 기반 광전자소자에 대한 최신 기술 동향을 요약합니다. 향후 상업성과 기술성을 높일 수 있는 대면적 공정 기술과 더불어 저조도 환경에서 구동 가능한 차세대 광전자소자 및 센서에 적용 가능한 광검출기로의 확장 연구에 대해서 구체적으로 들여다 볼 것입니다. 세 번째 원고에서는 심미성을 고려하는 건물일체형 태양광 시스템에 적용 및 확장을 고려할 수 있는 유기 반도체 소재 기반의 차세대 투명 태양전지에 대한 기술동향을 살필 것입니다. 또한 발전효율의 한계를 극복하기 위한 투명 유기 태양전지 기반의 적층형 소자 기술을 통하여 미래 기술의 흐름에 대해서 논의해 볼 것입니다.

이 세 원고는 유기 반도체 기반 차세대 광전자소자 연구개발 기술 동향의 최신 동향을 폭넓게 다루며, 이들 기술의 미래 발전 방향과 시장 확대 가능성을 제시할 것입니다.



고효율 하이브리드 발광 트랜지스터 연구 개발 동향

Recent studies on high efficiency hybrid light-emitting transistors

박유정, 서정화 | 서울시립대학교

Yu Jung Park, Jung Hwa Seo | University of Seoul, Korea



요 약

발광 트랜지스터 (Light-emitting transistor, LET)는 박막 트랜지스터 (Thin film transistor, TFT)의 스위칭 기능과 발광 다이오드 (Light-emitting diode, LED)의 발광 특성을 하나의 소자에 구현하는 복합 기능 소자로서 능동형 (Active-matrix) 디스플레이 소자뿐만 아니라 광통신 소자, 전기적으로 구동하는 레이저로의 응용 가능성으로 인해 주목받고 있다. 본문에서는 최근 개발되고 있는 높은 발광 효율을 가지는 유·무기 구조의 하이브리드 발광 트랜지스터 연구 동향을 살펴본다.

Abstract

Light-emitting transistors (LETs) have drawn increasing attention as components in active-matrix displays, optical communications and electrically pumped lasers owing to their bi-functionality, which incorporates the switching function of field effect transistors (FETs) and the light-emitting function of light-emitting diodes (LEDs) in a single, compact device configuration. Herein, recent studies on inorganic metal semiconductor/organic emitter structured hybrid LETs for high luminous efficiency are outlined.

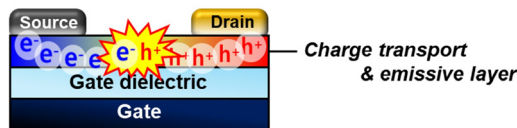
1. 서 론

발광 트랜지스터 (Light-emitting transistor, LET)는 박막 트랜지스터 (Thin film transistor, TFT)의 스위칭 기능과 발광 다이오드 (Light-emitting diode, LED)의 발광 특성을 하나의 소자에 구현하는 복합 기능 소자로서 능동형 (Active-matrix) 디스플레이 소자뿐만 아니라 광통신 소자, 전기적으로 구동하는 레이저로의 응용 가능성으로 인해 주목받고 있다. 별도의 TFT 백플레인 없이 필요없기 때문에 초집적화가 가능하고 제작단가를 획기적으로 낮출 수 있다는 장점에도 불구하고, 최근 연구 개발 동

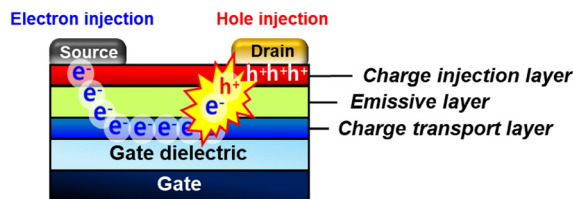
향을 살펴보면 전하이동도, 휘도 등의 성능은 기존의 반도체 소자와 비견될 만큼 많은 발전을 이루었지만 발광 효율 측면에서는 여전히 유기 발광 다이오드 (Organic LED, OLED) 소자에 비해 현저히 낮은 5 % 이하의 외부양자효율 (external quantum efficiency, EQE)이 보고되고 있다. 본 기획 시리즈에서는 단극형 발광 트랜지스터의 연구 동향을 살펴보고 향후 디스플레이 소자의 활용을 위한 발광 트랜지스터의 연구 개발 방향에 대한 전망을 제시하고자 한다.

2. 발광 트랜지스터 기술 개요

발광 트랜지스터는 양극성 소재를 전하 수송 및 발광 소재로 사용하는 단층 구조의 양극성 발광 트랜지스터 (ambipolar LET)와 n형 혹은 p형의 전하 수송 층과 별도의 발광층, 그리고 반대 전하를 주입하는 전하 주입 층으로 구성된 삼층 구조의 단극성 발광 트랜지스터 (Unipolar LET)로 크게 분류할 수 있다 (그림 1)[1-2]. 양극성 발광 트랜지스터에서는 게이트 전극에 인가된 바이어스에 의해 형성된 채널에서 평면상으로 움직이는 전자 및 정공의 재결합에 의해 엑시톤 (exciton)이 생성되어 발광한다. 이 경우 (i) 효율적인 전자 및 정공 주입이 가능한 소스-드레인 전극의 선택, (ii) 전자 및 정공 수송과 동시에 전계 발광이 가능한 활성층 소재의 선택, (iii) 트랩이 없는 gate dielectric 소재의 선택이 성능을 결정하는 중요한 요소들이다[1]. 양극성 전하 전달 특성은 발광 트랜지스터에서 효율적인 전자-정공 재결합을 유도하는 바람직한 특성이지만 일반적으로 양극성 유기 반도체 소재의 전하 이동도는 $10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 을 넘지 않는 것으로 알려져 있다. 이토록 낮은 전하 이동도는 발광 트랜지스터의 동작 속도를 느리게 하는 주요한 요인이다. 전하 이동도가 높은 발광 소재가 매우 드물기 때문에 효율적 양극성 수송을 달성하기 위한 대안적 연구가 필요하다. 단극성 발광 트랜지스터는 전하 수송 층 소재의 극성에 따라 n-type과 p-type LET로 분류할 수 있다. 유기 반도체 기반 발광 트랜지스터 (organic LET)의 경우 정공 이동도가 높은 p-type 소재 기반의 발광 트랜지스터가 주로 연구되었다. 단극형 발광 트랜지스터는 양극성 발광 트랜지스터와 비교하여 상대적으로 높은 전하 이동도를 가지며 우수한 스위칭 특성을 나타내는 전류 점멸비 ($I_{\text{on/off}}$)가 양극성 트랜지스터에 비해 월등히 크다. 그러나 채널을 통해 흐르는 전자 또는 정공 (다수 전하) 수송 특성은 뛰어나지만, 발광 측면에서 반대 전하 (소수 전하)의 주입은 필연적으로 낮을 수밖에 없어 엑시톤 형성을 위한 재결합 효율이 낮아 결과적으로 발광 효율이 매우 낮다. 또한, 채널 영역 내에서도 드레인 전극에 인접한 국지적인 발광이 일어난다[2]. 따라서, 소수 전하 주입을 개선하기 위해 전하 주입 층을 소스-드레인 전극과 발광층 사이에 도입하거나 소스 전극과 드레인 전극을 각각 다른 평면상에 두는 non-planar 전극을 형성하는 방법 등으로 연구가 이루어지고 있다.



(a) Ambipolar LET



(b) Unipolar LET (n-type)

그림 1 발광 트랜지스터의 구조;
(a) 양극성 발광 트랜지스터, (b) 단극성 발광 트랜지스터.

3. 발광 트랜지스터 기술 동향

2003년 테트라센 기반 유기 박막 트랜지스터의 채널에서 처음으로 발광 현상이 보고된 이후 10년간 유기 반도체 기반 발광 트랜지스터 (Organic LET)에 대한 연구가 활발히 진행되었다[3]. 그러나 유기 반도체가 가지는 전하 이동도의 한계와 그로 인해 높은 구동 전압, 현재까지 낮은 외부양자효율 ($\sim 10^{-3} \%$) 등 성능 면에서 답보상태에 놓여 있었다. 2014년, 호주의 퀸즐랜드 대학의 Ebinazar B. Namdas 연구진은 우수한 전자 이동도 ($\sim 15 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)를 가지는 zinc tin oxide (ZTO) 금속 산화물 반도체를 용액 공정을 통해 박막을 형성하고 유기 발광층 소재 (super yellow, SY)를 적층하여 최초로 유·무기 구조의 하이브리드 발광 트랜지스터 (hybrid LET, HLET)를 개발하였고 $4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 전자 이동도, 5×10^4 의 전류 점멸비와 $400 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 의 휘도 (Brightness)와 외부 양자효율 $1.8 \times 10^{-3} \%$ 의 성능을 보고하였다[4]. 이후 2019년, 국내 동아대학교 서정화 연구진에 의해서 zinc-oxinitride (ZnON)라는 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 이상의 높은 전자 이동도를 가지는 것으로 알려진 금속 산화물 반도체 무기 수송층/유기 발광층 (SY) 구조와 각기 다른 일함수를 가지는 세 가지 금속 (Al, Ag, Au)과 잘 알려진 정공 수송 소재인 molybdenum oxide (MoOx) 정공 주입층 조합의 소스-드레인 전극을 적용한 하이브리드 발광 트랜

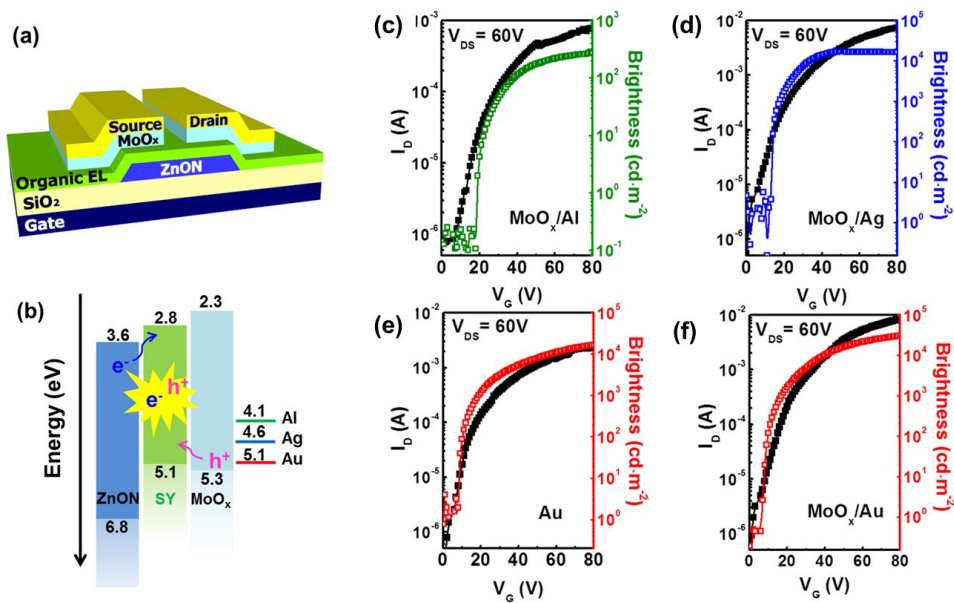


그림 2 ZnON 무기 수송층 기반 하이브리드 발광 트랜지스터의 구조 (a), 에너지레벨 다이어그램 (b), 전기적·광학적 전달 특성 곡선 (c-f)[5].

지스터를 제작 및 특성이 평가되었다. 그 결과, Si/SiO₂/ZnON/SY/MoO_x/Au 구조의 하이브리드 발광 트랜지스터에서 전자 이동도 6.36 cm²V⁻¹s⁻¹, 전류 점밀비 2.6×10^4 , 문턱전압 4.7V, 휘도 (30,400 cd·m⁻²), 외부양자효율 0.1 %의 세계 최고 수준의 성능을 보고된 바 있다 [5] (그림 2).

금속 산화물 반도체 수송층/유기 발광층 구조의 하이브리드 발광 트랜지스터의 개발을 통해 전자 이동도와 휘도 측면에서 큰 진보를 이루었으나 세계 최고 수준 25 % 이상의 외부양자효율을 가지는 유기 발광 다이오드 (OLED) 소자와 견주어 여전히 소자의 발광 효율을 나타내는 외부양자효율은 0.1 % 정도로 현저히 낮은 상황이다[5]. 따라서, 고효율 발광 트랜지스터 개발을 위한 연구가 현재까지도 지속적으로 진행되고 있다. 발광 트랜지스터의 외부양자효율 (η_{EQE})은 주입된 전하의 수에 대한 방출된 광자의 수의 비로 정의되며 OLED와 마찬가지로 다음의 식으로부터 계산될 수 있다.

$$\eta_{EQE} = \eta_{capture} \times \eta_{PLQY} \times \eta_{spin} \times \eta_{out} \quad \text{식 (1)}$$

$\eta_{capture}$ 은 재결합 효율 (recombination efficiency), η_{PLQY} 은

발광 소재의 양자 수율(photoluminescence quantum yield, PLQY), η_{spin} 은 전자 스핀 통계학에 기반한 단일항 또는 삼중항 엑시톤을 생성할 확률 (exciton conversion efficiency), η_{out} 은 광 방출 효율 (out-coupling efficiency)을 각각 나타낸다.

외부양자효율 향상을 위한 한 가지 접근법으로는 뛰어난 색 순도를 가지면서 발광 소재 자체가 가지는 양자 수율 (PLQY)이 매우 우수한 페로브스카이트 양자점 (methylammonium lead bromide perovskite colloidal quantum dot, MAPbBr₃ QD) 소

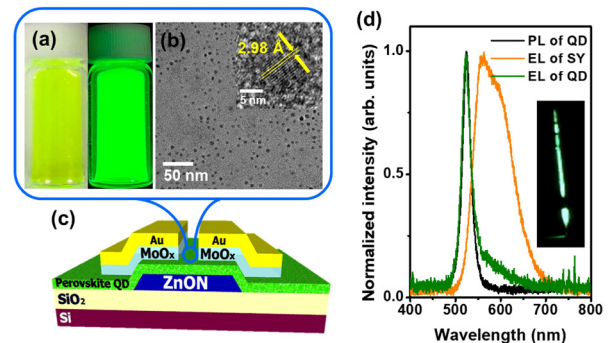


그림 3 페로브스카이트 양자점 소재 (a, b)를 적용한 발광 트랜지스터의 구조 (c)와 광발광 및 전계발광 특성 (d)[6].

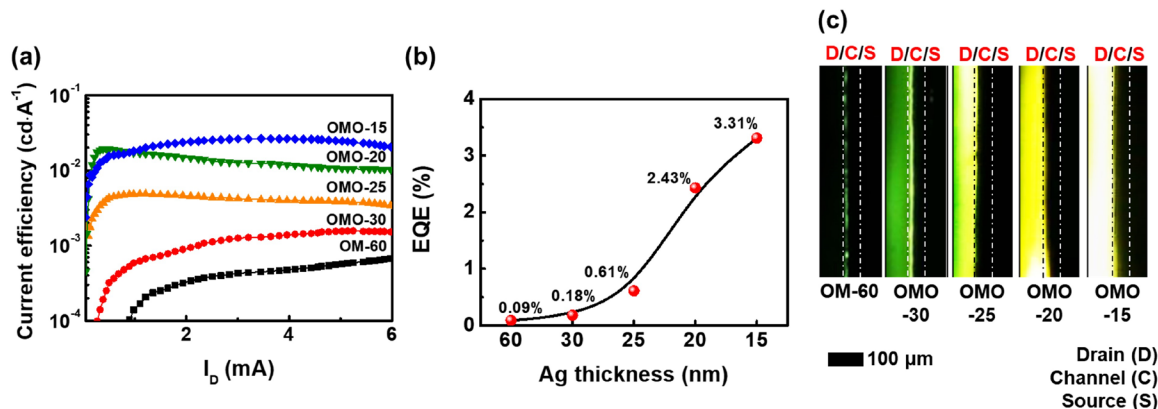


그림 4 Oxide/Metal/Oxide (OMO) 반투과 전극 적용 발광 트랜지스터의 금속 두께 (Ag 15, 20, 25, 30, 60 nm)에 따른 전류 효율 (a), 외부양자효율 (b) 및 발광 사진 (c)[7].

재를 단극형 발광 트랜지스터의 발광층 소재로 도입한 하이브리드 발광 트랜지스터가 국내 연구진에 의해 2020년에 개발되었다. 우수한 전자 이동도 ($12.6 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$), 높은 휘도 ($1.21 \times 10^4 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)뿐만 아니라 기존 유기 발광층 (SY) 소자 (FWHM: 89.57 nm, 외부 양자 효율 0.54%) 대비 우수한 색 순도 (FWHM: 24.59 nm)와 3.3배 이상 향상된 외부 양자 효율 (1.79%)을 보고하였다 [6] (그림 3).

발광 효율 향상을 위한 또 다른 접근법은 소자 내부에서 생성된 광자를 얼마나 외부로 방출시킬 수 있는지를 나타내는 광 방출 효율 (out-coupling efficiency)을 극대화하는 방법이다. 단극형 트랜지스터의 구조적 특성으로 인해 소수 전하가 주입되는 드레인 전극에 인접한 영역 또는 전극 아래에서 생성되는 광자를 효율적으로 소자 외부로 방출시키기 위해서 투명한 소스-드레인 전극을 적용할 수 있다. 최근 국내 동아대학교 서정화 연구진은 Oxide/Metal/Oxide (OMO) (MoOx/Ag/MoOx) 구조의 반투과 전극을 발광 트랜지스터의 소스-드레인 전극으로 적용한 발광 트랜지스터를 개발하였다 (2022년). Ag (silver) 전극의 두께에 따른 투과 특성 및 전기 전도도를 조사하여 최적화된 두께 조건 (8 nm MoOx/15 nm Ag/15 nm MoOx)을 찾았다. 상대적으로 낮은 정공 주입 특성으로 인해 드레인 전극 영역에 국한된 발광을 반투과 전극 도입을 통해 광 추출 효율을 향상시켜 최종적으로 기존의 불투명 금속 전극 소자 (60 nm Ag)의 외부양자효율

(0.09 %) 대비 약 33배 향상된 외부 양자 효율을 (3.31 %)을 보고하였다. OMO 다층 구조의 반투과 전극이 소자의 마이크로 캐비티 효과 (micro-cavity effect)에 의한 휘도 향상과 함께 광 추출 효율을 극대화하였다. 또한, 트랜지스터의 채널 영역에서의 1차원적 선형 발광에서 2차원 면 발광으로의 발광영역의 확대를 보고하였다[7] (그림 4).

4. 단극형 발광 트랜지스터 기술적 한계

발광 트랜지스터의 여러 장점에도 불구하고 상용화 단계에 도달하기까지는 앞서 기술한 발광 효율 개선 이슈뿐만 아니라 낮은 개구율과 안정성 및 신뢰성 향상 수명 연구 등 해결해야 할 여러 당면 과제가 남아있다. 발광 트랜지스터를 디스플레이 소자로 활용하기 위해서는 1) 높은 휘도 (brightness)에서의 높은 외부 양자 효율 2) off current 상태에서의 소비전력 감소, 3) 뛰어난 스위칭 특성, 4) 공간적으로 안정된 발광영역의 조건이 충족되어야 한다[9]. 특히, 저전압 구동을 위해 높은 유전상수 (high-k dielectric constant)를 가지는 gate dielectric으로 도입하는 연구가 진행되었다. Poly[4-(4,4-dihexadecyl-4H-cyclopenta[1,2-b:5,4-b']dithiophen-2-yl)-alt-[1,2,5]thiadiazolo[3,4-c]pyridine] (PCDTBT) 유기 반도체 기반 발광 트랜지스터에 poly(vinylidenefluoride-trifluoroethylene-chlorotrifluoroethylene) (P(VDF-TiFE-CTFE) 고분자 절연체를 gate dielectric

으로 적용한 유기 발광 트랜지스터는 기존의 유기 발광 트랜지스터의 구동 전압보다 낮은 ~ 35 V의 비교적 구동 전압과 휘도 $2,000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 에서의 0.88 %의 외부양자효율을 보고하였다[10]. 2차원 면발광 구현을 위해 기존의 수평형 구조의 발광 트랜지스터에서 OLED 소자와 같은 수직적 구조의 발광 트랜지스터 개발 또한 시도되고 있다[8]. 최근에는 고신뢰성 소자 구현을 위한 초기 단계의 수명 연구가 시도되고 있다[10].

5. 결 론

본 기고문에서는 능동형 디스플레이 소자뿐만 아니라 광통신 소자, 전기적으로 구동하는 레이저로의 다양한 잠재적인 응용 가능성을 가진 복합 기능 소자인 하이브리드 발광 트랜지스터를 소개하고 고효율 발광 트랜지스터 구현을 위해 현재까지 연구된 발광 트랜지스터의 기술 개요 및 연구 동향을 소개하였다. 개발 초기 단계의 유기 반도체 기반 발광 트랜지스터의 외부양자효율 $\sim 10^{-3}$ %에서 최근 보고된 CdSe/ZnS 양자점 소재를 사용한 수직형 구조 (vertical structure)의 하이브리드 발광 트랜지스터에서는 최고 11 %의 높은 외부양자효율이 보고되기 까지 많은 기술적 진보를 이루었다[8]. 이로써 OLED 소자와 견줄만한 높은 발광 효율을 가지는 발광 트랜지스터의 개발도 현실성 있는 목표가 되었다. 지금까지의 발광 트랜지스터 연구는 국내·외 소수의 연구진의 주도로 연구가 진행되어 왔지만 향후 다양한 산업체 및 연구기관의 협업을 통해 발광 트랜지스터 기술 개발이 광범위한 기술 및 산업 분야에서 혁신을 이끌어 낼 수 있을 것으로 전망된다.

[참고문헌]

- [1] M. Muccini et al. "A bright future for organic field-effect transistors", Nat. Mater. 5, 605, 2006.
- [2] J. H. Seo et al. "Solution-processed organic light-emitting transistors incorporating conjugated polyelectrolytes" Adv. Funct. Mater. 21, 3677, 2011.
- [3] A. Hepp et al. "Light-emitting field-effect transistor based on a tetracene thin film" Phys. Rev. Lett. 91, 157406, 2003.
- [4] K. Muhieddine et al. "All solution-processed, hybrid light emitting field-effect transistors" Adv. Mater. 26, 6410, 2014.
- [5] Y. J. Park et al. "Hybrid ZnON organic light emitting transistors with low threshold voltage <5 V" Adv. Optical Mater. 7, 1801290, 2019.
- [6] Y. J. Park et al. "Light-emitting transistors with high color purity using perovskite quantum dot emitters" ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 35175, 2020.
- [7] Y. J. Park et al. "Highly efficient hybrid light-emitting transistors incorporating MoOx/Ag/MoOx semi-transparent electrodes" J. Mater. Chem. C, 10, 880, 2022.
- [8] X. Liu et al. "High efficiency light-emitting transistor with vertical metal-oxide heterostructure" Small 14, 1800265, 2018.
- [9] K. Muhieddine et al. "Hybrid area-emitting transistors: solution processable and with high aperture ratios" Adv. Mater. 27, 6677, 2015.
- [10] S. Nam et al. "Efficient and stable solution-processed organic light-emitting transistors using a high-k dielectric" ACS Photonics 6, 3159, 2019.

저자소개

박유정(Yu Jung Park)

2013년 동아대학교 신소재물리학과 졸업
2020년 동아대학교 물리학과 대학원 졸업
(이학박사)

2020년~2021 동아대학교 물리학과
박사후연구원

2022년~2023 서울시립대학교 물리학과
박사후연구원

2023년~현재 서울시립대학교 물리학과 연구교수
주 연구분야: 반도체 소자 제작 및 물성 분석



서정화(Jung Hwa Seo)

2001년 동아대학교 신소재물리학과 졸업
2007년 연세대학교 물리학과 대학원 졸업
(이학박사)

2007년~2011년 University of California
Santa Barbara 박사후연구원

2011년~2017년 동아대학교 신소재물리학과
조교수

2017년~2021년 동아대학교 반도체학과 부교수
2022년~현재 서울시립대학교 물리학과 교수
주 연구분야: 표면/계면 분석 및 반도체 소자





유기 광전자소자를 위한 전사 인쇄 공정과 저조도 및 광검출기 응용 연구 최신 기술 동향

Recent Advances on Transfer Printing Process for Organic Photoelectronic Devices, and Indoor Light Harvesting and Photodetector Applications

왕동환, 장웅식, 김병기, 임지현, 김민수 | 중앙대학교

Dong Hwan Wang, Woongsik Jang, Byung Gi Kim, Jihyun Lim, Min Soo Kim | Chung-Ang University, Korea



요약

최근 비풀러렌계 엑셉터 및 다양한 신규 소재의 등장으로 급격한 성장세를 보이고 있는 유기반도체 기반 광전자소자에 대한 최신 기술 동향에 대해 알아보고자 한다. 특히, 학계/산업계의 높은 관심이 높은 대면적 공정 기술과 더불어 저조도 환경에서 구동 가능한 차세대 광전자소자 및 센서에 적용 가능한 광검출기로의 확장 연구에 대해 살펴본다.

Abstract

In this article, we discuss the latest technology trends in organic semiconductor-based photoelectronic devices, which have been growing rapidly recently owing to the emergence of non-fullerene accepters and various new materials. In particular, we focus on large-area process technologies, which are of great interest to academia and industry. Furthermore, research on extending them to photodetectors that can be applied to various sensors and photovoltaic devices can operate in indoor light environments are presented as next-generation photoelectronic technology.

1. 서론

유기 광전소자는 뛰어난 성능과 경량, 용액 가공성, 기계적 유연성, 다양한 색상, 투명성이라는 독특한 장점으로 인해 폭넓은 주목을 받아왔다 [1]. 유기 광전소자는 광활성층, 전하 수송층과 함께 고효율, 고안정성을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이 중에서도 정공과 전자 인터페이스 층 가운데 위치한 활성층은 유기 광전소자의 광전 변환 프로세스를 위한 중요한 분야이다. 이에 따라 도너 및 엑셉터 재료를 포함하여 지난 10년 동안 재료 혁신

에 있어 획기적인 발전이 이루어졌으며, 지난 몇 년 동안 비풀러렌 수용체 (NFA)가 연구에 관심이 집중되어 유기 광전소자의 개발로 빠르게 이어졌다. 이러한 수용체는 넓은 흡수 스펙트럼, 조정 가능한 에너지 수준, 높은 흡수 계수 및 잘 정렬된 적층 구조에서 상당한 이점을 보여준다. 특히 최근 몇 년간 장치 엔지니어링 및 재료, 특히 “Y-시리즈” 비풀러렌 수용체 (NFA) 및 온도의 존적 응집 (TDA) 거동을 갖는 공액 폴리머 공여체에 대한 끊임 없는 발전이 촉진되었다 [2].

이러한 차세대 유기광전자 소자의 발전에 있어 고효율과 고안

정성을 유도하기 위한 연구는 지속되고 있으며 유기반도체의 계면 개질 및 분자 배열 조절은 중요한 요인 중 하나다. 이러한 유기반도체의 효과적인 개질 유도할 수 있는 방안 중 인쇄 공정은 용액공정의 한계를 해결할 수 있는 공정으로 소개되고 있다. 여러 인쇄 공정 중 전사 인쇄 공정은 계면 조절과 분자 배향을 전이시킬 수 있는 효과를 보이며, 모폴로지 측면 및 전하 이동에 효율적인 설계를 유도한다. 또한, 전사 인쇄 공정으로 개질된 분자 배향은 주입 장벽 형성 강화하여 효과적인 압전류 억제 특성을 갖는다. 실제, 압전류 억제와 제한된 트랩 밀도는 소자의 저항 개선에 기여하며, 노이즈 전류를 방지하는 역할을 한다. 추가적으로, 최근 유기 태양전지의 우수한 특성은 저조도 광전소자로 높은 효율로 구동하면서 이와 관련하여 연구가 활발히 보고되고 있다. 이에 본 기고문에서는 유기 광전소자에 대한 전사 인쇄 공정 방법과 유기 태양전지 및 유기 광 디텍터의 연구, 더 나아가 저조도 환경에서의 유기 태양전지 기술까지 다루고자 한다.

2. 전사 인쇄 공정기반 유기 광전소자 연구개발 기술 동향

2.1. 광 활성층 전사 인쇄 공정기반 유기 광전소자

유기 태양전지 및 포토디텍터에서 가장 중요한 요소인 광 활성층은 일반적으로 전자 주게인 도너, 전자 받게인 엑셉터가 혼합된 벌크이종접합(bulk heterojunction, 이하 BHJ) 구조를 지니고 있다(그림 1(a)) [3, 4]. 이상적인 BHJ는 도너와 엑셉터의 적절한 상분리를 통해 광 생성된 전하의 효율적인 분리를 유도한다. 그러나, BHJ 용액을 스핀 코팅 시, 도너와 엑셉터간의 표면 에너지 차이에 의해 도너 성분이 박막 표면에 편향되어 특정 구조의 장치에서는 효율적인 전하 분리 및 수송에 불리할 수 있다(그림 1(b)) [5]. 이때, 전사 인쇄 공정을 도입하면 박막의 상을 반전시키는 효과로 인해 정공 수송층과 도너가 풍부한 상, 전자 수송층과 엑셉터가 풍부한 상이 선택적으로 맞게 할 수 있어 전하 분리 및 수송의 촉진 가능하다. 전사 인쇄 공정은 고분자 매개체에 먼저 BHJ를 형성한 후 원하는 타겟 기판에 이를 접착하여 매개체로부터 박막을 박리시켜 기판에 이전하는 표면처리 기반의 공정을 의미한다.

일반적으로 전사 인쇄 공정 시 Polydimethylsiloxane (PDMS)로 알려진 탄성 고분자 매개체를 활용하나, 유기 용매 기반의 소재를 전사할 경우 화학적 안정성이 비교적 낮고 접착 특성이 어려운 PDMS를 활용하기에는 어려운 실정이다. 따라서, 비교적 화학적 안정성이 높고, 매개체 합성단계에서 접착 특성이 가능 탄성 고분자인 Polyurethane Acrylate (PUA)를 매개체로 활용할 수 있다 [6].

전사 인쇄 공정은 단순히 박막을 박리, 이전시키는 것이 아니라 공정에 이용되는 매개체-박막-타겟 기판 세 개 요소의 계면 접착 특성을 고려하여야 한다. 각 요소의 표면 에너지를 기반으로, 고분자 접착 이론을 통해 박막의 접착 거동을 계산하여, 공정 가능한 조건을 확보하고 이를 위한 고분자 매개체 접착 특성 제어가 필수적이다(그림 1(c)). 일반적으로 BHJ는 소수성의 표면특성을 보이므로, PUA 매개체에 BHJ를 형성하기 위해서는 친수성 PUA가 필요하며 이때 친수성 기능기를 지닌 반응성 용제를 이용하여 친수성 PUA 전사 매개체를 합성 후 공정에 도입할 수 있게 된다 [7].

이를 기반으로 최근까지 고효율 소자 제작을 위해 비폴러렌 수용체 물질기반의 유기 광활성층 소재로 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 Y-시리즈는 뛰어난 광전자 특성으로 인해 최근 유기 광전지 분야에서 많은 주목을 받고 있습니다. 이러한 Y-시리즈는 A-DA'D-A Structure로 PM6 (PBDB-TF, PBDB-T-2F)와 같은 Benzodithiophene (BDT), Thiophene, and Benzodithiophene-4,8-dione (BDD)의 D- π -A type copolymer 구조의 주계 물질이 함께 시너지로 활용되어 고효율을 보고하고 있다 [8]. 하지만 PM6:Y6 활성층을 기반으로 고효율의 소자를 제작할 때 끊는점이 낮은 클로로포름(CF)의 사용은 높은 휘발성 때문에 대면적 제작이나 모듈화에 큰 걸림돌이 된다. 특히, 인쇄 공정 및 Roll-to-Roll 공정과 같은 산업공정에 CF 용매를 적용할 경우 균일한 형태의 재현성을 기대하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 휘발성 CF를 끊는점 등 필름화를 조절할 수 있는 용매 선택과 같은 다양한 접근법이 필요하다. 예로 클로로벤젠(CB)은 끊는점이 상대적으로 높기에 CF를 사용하는 경우에 비해 CB 기반 공정을 유기 활성층의 상 안정화에 충분한 시간 동안 적용할 수 있어 전사

인쇄 공정의 도입이 가능하게 된다 [9]. 또한, 대면적 공정 구현을 위해 PM6:Y6 BHJ와 고분자 매질 간의 계면 에너지 및 습윤 선도를 계산하여 고효율 PM6:Y6 형성을 위한 몰드 제작 및 전사 인쇄 공정을 설계하였으며, 균일한 형태를 보이는 큰 활성 면적의 PM6:Y6 박막을 형성하였다 (그림 1(d)). 이러한 계면 최적화뿐만 아니라 Y6가 풍부한 상을 전자 수송층 계면 쪽으로 전하 수송에 유리한 배치함으로써 효율적인 분자 적층 구조를 제어에 기여하게 된다. 또한, 광활성층 내 분자 배열 최적화는 역방향 바이어스 환경에서 비교적 높은 주입 장벽을 형성하여 암전류 억제에도 유리함을 보인다. 특히, 증가된 섂트 누설 저항은 암전류를 억제하고 자체 전력 공급형 광검출기의 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

2.2. 전하 수송층 전사 인쇄 공정기반 유기 광전소자

유기 광전소자의 성능 및 안정성 향상은 계면 조절을 통해 효

과적인 개선을 유도할 수 있다. 먼저 최근 PM6:Y-시리즈 광 활성층과 음극의 계면에서 활용되는 N,N'-Bis[3-(3-(Dimethylamino)propylamino)propyl]perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide (PDINN 또는 NPDI) 전자 수송층은 일함수 조절 및 우수한 전자 친화도에 의한 이동성을 위해 주목 받으며 많이 활용되고 있다. 그러나 NPDI는 2차원의 판상형의 저분자로 PDI 분자 골격은 응집하려는 경향이 강하기 때문에 과도한 분자 응집이 유도될 수 있다. 이는 광 활성층 위에서 전면적 코팅 Coverage를 확보하지 못하는 가능성이 커지며, 이는 소자의 누설 전류 증가로 이어진다. 특히 NPDI는 저분자 물질일 뿐만 아니라 박막의 상 안정화 제어에 불리한 휘발성이 높은 알코올계열 (메탄올 및 에탄올) 용매에 용해성을 가지고 있어 전사 인쇄 공정을 도입하기에 어려운 소재이다. 이에 기존의 휘발성이 높은 용매 대신 Trifluoroethanol (TFE) 용매를 활용, 박막의 형성 속도를 제어하여 저

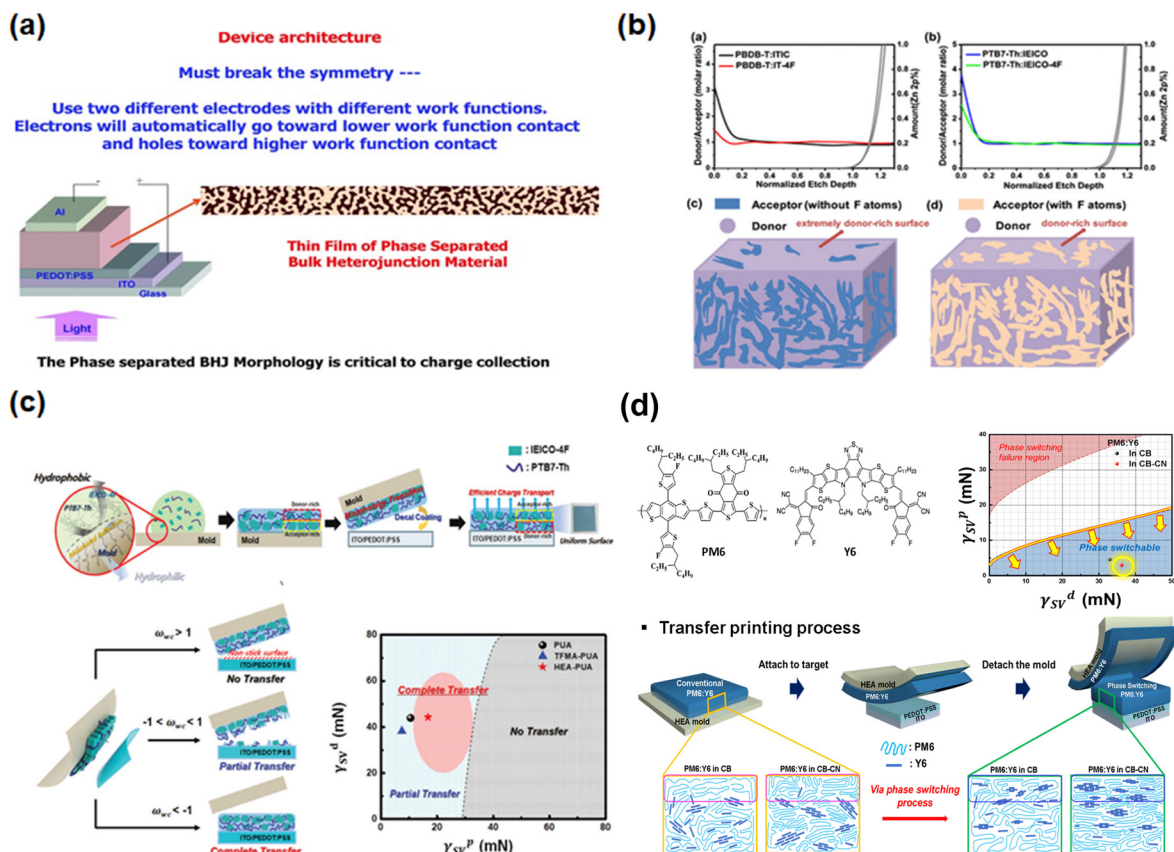


그림 1 (a) BHJ 유기 태양전지 구조 [4], (b) XPS depth profile을 통한 BHJ 박막 구조 분석 [5], (c) 전사인쇄 공정 모식도 및 표면 에너지 계산 기반 박막 접착 거동 모식도 [7], (d) 전사인쇄 공정 및 광활성층 분자 배열 조절 모식도 및 PM6:Y6 분자 구조, 시뮬레이션 그래프 [9].

분자 NPDI를 성공적으로 전사한 연구가 보고되었다 (그림 2(a)) [10]. 전사 인쇄 공정으로 형성된 NPDI 층은 전하이동도를 4.7배 이상 향상시키고 계면의 트랩 밀도도 눈에 띄게 억제하였다. 또한, 정렬된 NPDI 기반 유기 광검출기에서 계면의 모폴로지의 개선과 결함억제는 암전류를 감소시켰으며 성능은 830 nm 파장에서 4.02×10^{12} Jones로 기존 광검출기 대비 2배 넘게 향상되었다. 또한, 정렬된 NPDI 층은 계면에 부동태화 효과를 가져왔으며 이는 소자의 안정성을 향상을 가져오게 된다. 특히, 광 활성층 및 전하 수송층의 활용된 용매를 친환경적으로 도입함으로써 이는 인체 적용시 무해한 특성을 가지며, 이를 기반으로 혈류 부피 변화 감지를 하였으며, 전사공정으로 도입한 광 혈류 센서에서 우수한 시그널 특성을 보였다.

추가적으로, 정공 수송층 및 전극의 계면에서도 전사 인쇄 공정은 효과적인 전하 수송을 유도한다. 그 예로 전도성 고분자를 전사 인쇄 공정을 통해 박막을 형성하여 유기 태양전지 제작에 관한 연구개발을 진행한 결과가 발표된 바 있다 (그림 2(b)). PEDOT:PSS로 알려진 전도성 고분자는 적절한 일함수, 용매 처리를 통한 전도도 개선, 우수한 투과도와 기계적 물성 확보가 가능하여 유/무기 광전자 소자의 중간층 및 전극으로 널리 활용되고 있다 [11]. 일반적으로 물 용매에 분산된 PEDOT:PSS는 PDMS 매개체를 활용하여 전사가 가능하다. 이때 위에서 언급한 접착

특성을 고려하여 박막이 매개체에서 잘 분리되어 타겟 기판 상부에 부착되는 것이 매우 중요하다. 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 PEDOT:PSS 황산 처리를 통해 PEDOT:PSS의 전도도와 접착 특성을 제어하여 매개체-박막 간 접착력을 약화시켜 박막이 매개체로부터 잘 박리될 수 있도록 하였으며, 타겟 기판에 열처리를 통해 표면 연화를 유도하여 박막-타겟 경계면의 접촉 면적을 넓혀 접착력을 강화시켜 전사 인쇄 공정에 성공한 바 있다 [12].

전사 인쇄 공정은 소프트 리소그래피 기술로써, PDMS 및 PUA와 같은 고분자 매개체를 활용하여 박막을 선택적으로 전사 전사하여 하부층에 대한 용매 침투에 의한 박막 손상에 대한 이슈를 상쇄할 수 있으며, 타겟 기판 표면 물성에 관계없이 균일한 박막 제조 및 Sharp한 인터페이스 형성이 가능하다는 장점이 있다.

3. 실내 광을 활용한 저조도 유기 광전소자 연구개발 기술 동향

태양 에너지는 화석 연료에 대한 탁월한 대안이며, 태양광 발전 산업은 최근 몇 년 동안 전례 없는 발전을 이루었다. 이러한 배경 하에 실내조명을 활용한 저조도 유기태양전지 개발은 광범위한 발전 전망을 보여준다. 이는 ~30% 이상의 실내광 소자의 우수한 광전변환효율이 검증되면서, 연구개발의 중요성이 강조되기 때

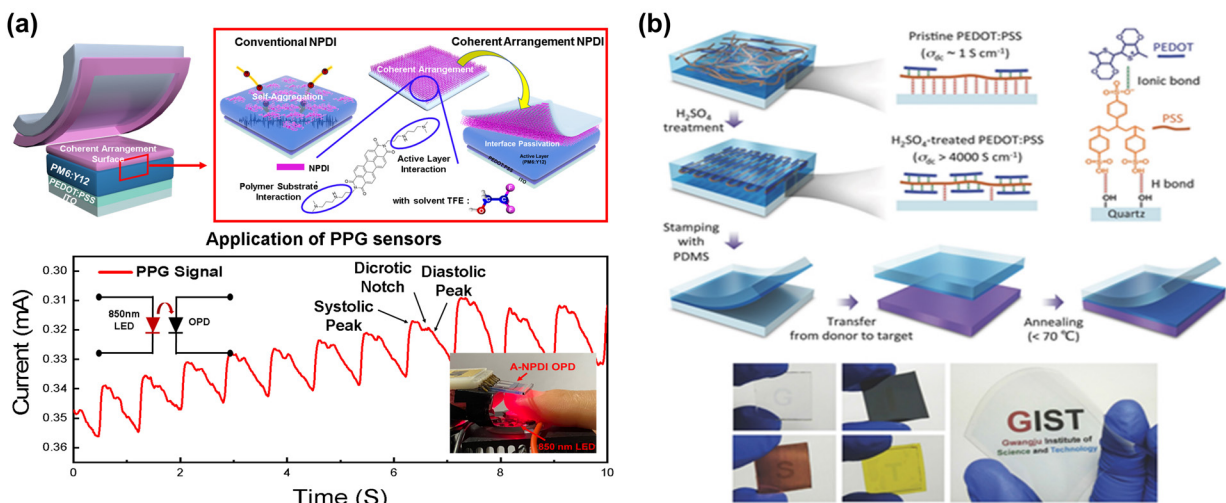


그림 2 (a) 전사인쇄 공정 기반 NPDI 전자 수송층 형성 모식도 및 인체 혈류 부피 감지 시그널 그래프 [10], (b) PEDOT:PSS 전도도 제어 및 전사인쇄 공정 모식도 [12].

문이다. 이처럼 저조도 유기태양전지는 실외 조도 (~120,000 lux) 뿐만 아니라 실내조명 조건(~200-1000 lux)에서도 작동하도록 설계된다. 이하에서 저조도 소자의 광전변환효율 최적화 전략에 대한 개괄적인 원리 및 사례를 논의한다.

먼저, 실내조도가 AM 1.5G 조건에 비해 훨씬 약하기 때문에 누설 전류와 트랩 보조 재결합이 더 지배적 조건으로 실내 장치의 전체 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 높은 광전변환효율 값은 실내 조건에서 정확한 측정이 수반되어야 한다. 광도 측정은 CIE 포토픽 발광 효율 함수와 절대 입사 전력 밀도 스펙트럼을 사용하여 계산된다 [13]. 저조도 유기태양전지 소자의 성능은 단락 전류 밀도 (J_{sc}), 개방 회로 전압 (V_{oc}), 충전율 (FF) 및 광전 변환 효율로 평가할 수 있다. 그러나 실내조명에서는 어두운 조명으로 인해 재결합 효과가 악화되어 n 값 (이상 계수)이 더 커지고 낮은 광전변환효율 값이 생성된다. 광전변환효율 측정은 광원 강도, 조도계 출력 조도 값의 차이, 태양전지 소자의 가장자리 효과와 미광의 영향으로 인해 부정확할 수 있다. 정확한 결과를 얻으려면 광원과 테스트 위치를 동일하게 선택하고, 분광계로 직접 측정된 광 전력 밀도를 적분하여 계산해야 한다. 또한, 적절한 마스크 조리개와 상대적으로 큰 태양전지 유효 영역이 필요하며, 마지막으로 실내 태양광 발전 소자의 측정은 미광의 영향을 제거하기 위해 어두운 환경에서 수행되어야 한다.

최적화된 나노 모폴로지는 트랩 상태 밀도를 감소시키는 데 중요하다. 실내 조건에서 트랩 효과에 대한 연구는 실내 조건에서 트랩 효과의 상세한 메커니즘을 제공할 뿐만 아니라 실내 적용을 위한 올바른 재료 설계 선택에 대한 지침도 제공한다. 구조적 결함과 구조적 결함 (고분자 사슬의 꼬임 및 꼬임)은 내인성 장애를 유발할 수 있으며, 주변 환경에 노출되면 외인성 장애로 이어질 수 있다. 이는 비공유 분자 구조 및 용액 처리된 유기 반도체는 본질적으로 무질서한 물질로부터 발생할 수 있다. 이는 두 가지 유형의 장애 모두 전자 꼬리 상태가 점차 확대되어 밴드갭 트랩 상태에 국부적인 상태가 생성된다 [14, 15]. 트랩 상태는 트랩 보조 재결합뿐만 아니라 비방사성 Shockley-Read-Hall 재결합을 유도하여 추가 에너지 손실을 초래할 수 있으므로 소자 성능이 저하된다. 이에, 분자 구성 최적화 [16, 17], 분자 패키징 개선 [18, 19], 수

직 위상 분포 조절과 같은 접근법은 트랩 상태 밀도를 줄이는 데 도움이 되는 경향이 있다 [20].

한편, 실내조명은 AM 1.5G 조명과 달리 빛 강도가 낮으며, 주로 가시 영역 (400~750 nm)에 있다. 따라서 실내 광자 수집에 적합한 밴드갭, 높은 흡수 능력 및 뛰어난 캐리어 이동성을 가진 고분자 공여체 PBDB-T와 그 파생물이 저조도 소자로 자주 적용된다 [21]. 한편, PBDB-TF 기반 도너 물질 외에도 3개의 공액 폴리머 도너 WF3, WF3S, WF3F를 합성하고 이를 PC₇₁BM과 혼합한 소자가 제작됐다 [22]. 이 단일 성분 소재는 우수한 열 안정성과 광 안정성을 나타내므로 실내 응용 분야에도 적합하다. 또한, 포르피린과 그 유도체는 자연적으로 강력한 광 수확기이므로 저조도 유기태양전지에 효과적으로 활용될 수 있다 [23]. 포르피린 기반 광 수확기의 구조는 광자 수집 효율과 소자 성능에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 포르피린 이량체 (dimer) 및 비폴러렌 수용체기반 이진 광활성 시스템 (C8TEBDT-2P-IDIC)의 저조도 유기태양전지가 설계되었다. 이는 효율적인 전하 생성과 이동, 우수한 전하 재결합 특성을 유도하여, 300 lux LED 광원 하에서 12.3%의 유망한 광전변환효율이 달성되었다. 또한, HD-4Cl을 변형하여 넓은 밴드갭 비폴러렌 수용체 HDO-4Cl이 합성되었다 [24]. HDO-4Cl은 전자 친화력이 더 작아서 손상되지 않은 전자를 얻는 데 도움이 된다. PBDB-TF와 HDO-4Cl을 활성층 물질로 사용하여 1000 lux LED 조사에서 23.4%의 바람직한 광전변환효율을 얻었다 (그림 3(a) 및 3(d)). 또한, 넓은 밴드갭 폴리머 공여체 PBDB-TF와 낮은 밴드갭 수용체 IT-4F를 사용하여 제작된 소자는 1000 lux LED 조명에서 20.8%의 인상적인 광전변환효율 값이 달성되었다 (그림 3(b) 및 3(e)) [25]. 특히, 최대 500시간 동안 연속 조명에 노출되었을 때 장치가 원래 광전변환효율 값의 95%를 유지했다는 점은 주목할 만하다(그림 4e). 이는 실내 장치의 장치 안정성이 우수함을 의미한다. 동시에 수용체 IO-4Cl을 합리적으로 합성하여 PBDB-TF와 혼합한 결과, 이원계는 400 nm에서 700 nm까지 강한 흡광도를 보이며 높은 (EQE) EL 값을 나타냈다. 2700 K LED 조명 조건에서 장치의 광전변환효율은 26.1%에 도달했으며 실제 응용 분야에서 우수한 안정성을 실현했다 (그림 3(c) 및 3(f)) [26].

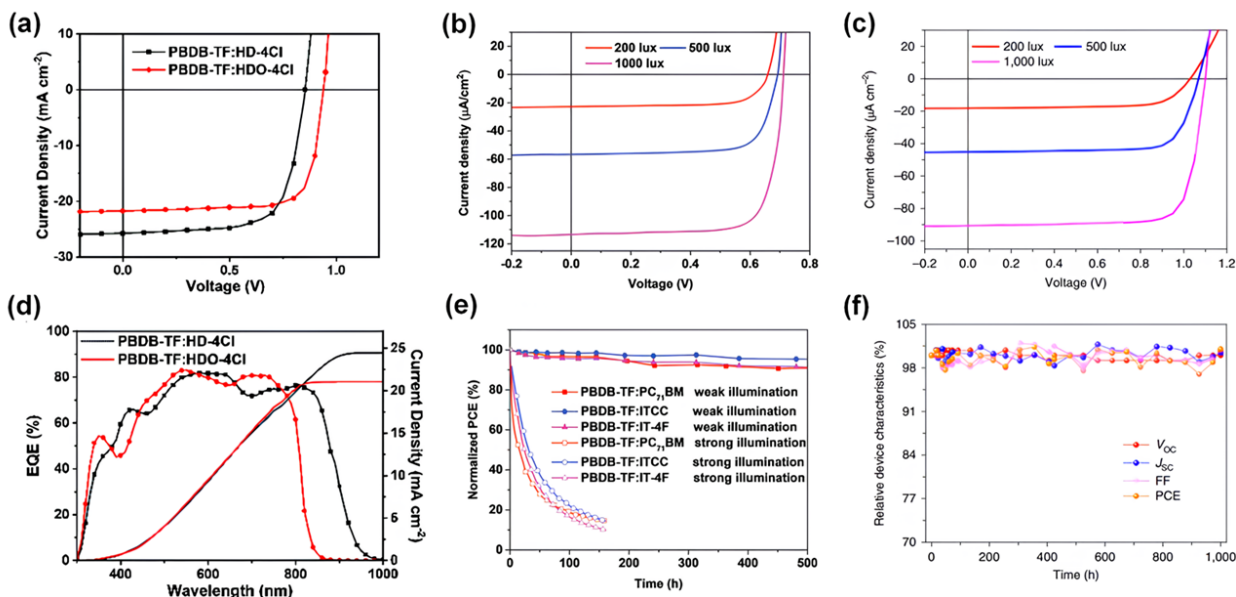


그림 3 저조도 유기태양전지 중 (a) 다양한 조도(200, 500, 1000 lux)의 따뜻한 흰색 LED (2700 K) 조명 하에서 PBDB-TF:HDO-4CI 기반의 소자의 J-V 특성 및 (d) EQE 응답 [24].

(b) 다양한 조도 (200, 500, 1000 lux)의 따뜻한 흰색 LED (2700 K) 조명 하에서 PBDB-TF:IT-4F 기반의 소자 J-V 특성 및 (e) 안정성 [25].

(c) 다양한 조도 (200, 500, 1000 lux)의 따뜻한 흰색 LED (2700 K) 조명 하에서 PBDB-TF:IO-4CI 기반의 소자 J-V 특성 및 (f) 시간별 소자 특성 곡선 [26].

4. 광검출 향상 및 암전류 억제 기술 기반 유기 광검출기 연구개발 기술 동향

유기 광검출기로 구성된 이미지 센서는 연구개발 단계에서 보여준 우수한 성능과 상용 이미지 센서 구조에 사용되는 광검출기와 차별화된 선택적 색상 감지 능력을 보여주며, 유기 광검출기 기반 이미지 센서의 상용화를 가속화 하고 있다 [27]. 최근에는 센서 분야뿐만 아니라, 광통신 및 바이오 센싱 등 다양한 응용분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 색상 선택성이 우수한 유기 광검출기는 색상 필터 없이도 작동할 수 있기 때문에, 이미지 센서를 구성하는 컬러 필터를 제거함으로써, 크기를 최소화하는 데 중요한 역할을 한다. 또한, 유기 활성층 소재는 높은 흡수 계수 때문에 수백 나노미터 수준의 두께로도 효과적인 빛 감지를 가능하게 하여 장치 크기와 무게를 줄이는 데 기여해 질량 대비 에너지 소비 효율을 높일 수 있다. 유기 광검출기는 응답 속도, 암전류 억제, 광전류 향상 및 선형 동적 범위를 포함한 다양한 평가 지표에서 실리콘 광다이오드와 비교하여 우수한 성능을 보고하고 있다 [28].

광검출기는 주입된 빛을 전기 신호로 변환된 광전류가 발생하여, 이를 검출함으로써, 빛 신호를 감지한다. 주입된 광자는 유기

반도체 층에 의해 흡수되어 광학 밴드갭 에너지보다 높은 빛에너지가 입사되었을 때, 전자가 흥분되는 데 필요한 에너지를 공급받아, 전자-정공 쌍인 여기자를 형성한다 [4]. 그러므로 광전류는 유기 반도체 물질의 밴드갭 에너지 및 전하 이동성에 강한 의존성을 보인다. 유기 반도체 내에서는 여기자의 직접적인 분리가 어렵기 때문에, 단일 구조에서 자유 전하 생성 양자 수율이 낮으며, 이는 낮은 외부 양자 효율을 유발한다 [29]. 따라서 유기 반도체에서의 단축된 여기자 확산 길이를 극복하기 위해 전자 도너와 전자 억셉터의 조합 구조가 효율적인 전하 생성을 위해 BHJ로 도입되었다. BHJ의 에너지 오프셋은 도너의 전자 또는 정공 이동을 위한 여기자 결합 에너지보다 높기에, 우수한 흡수 능력과 효율적인 전하 이동을 위해 태양전지에서 이 구조가 설계되었다. 태양전지와는 달리, 광 검출기는 외부 전기장 아래에서 자유 전하 캐리어 추출을 유도하기 위해 작동한다. 또한, 태양전지의 목표는 태양 조명 아래에서 생성된 전력을 최대화하는 것이며, 반면에 광검출기에서는 높은 선택적 감도가 중요하기에, 따라서 태양전지와 광검출기는 서로 다른 전략에 기반을 두어 평가되어야 한다.

장치 내에서 다크 상태에서 전류가 발생하는 이유는 전하가 반도체 층에 주입될 수 있기 때문이다. 암전류는 광검출기의 감

도를 저해하므로, 성능 향상을 위해서는 정확한 암전류의 평가를 통해, 암전류를 효과적으로 제어해야 한다. 광검출기로 입사하는 다양한 조명하에서 노이즈 전류는 신호 대 노이즈 비율을 감소시킨다. 암전류와 마찬가지로, 노이즈 억제제는 유기 광검출기의 감도를 향상시키는 핵심 요소이다. 따라서 장치 내 노이즈 전류를 최소화하기 위해 노이즈 전류 생성 메커니즘을 상세히 이해하는 것이 선행되어야 한다. 암전류는 열에너지 또는 전기장에 의한 예기치 않은 누출과 같은 다양한 원인으로 발생한다 [30]. 광 검출기 구조에는 전극과 반도체 층이 있으며, 각 전극이 서로 다른 페르미 에너지를 가질 때, 전자는 낮은 페르미 에너지를 가진 전극 방향으로 수집된다. 외부 바이어스가 없는 다이오드 구조에서는 빌트인 포텐셜과 관련된 밴드 벤딩 현상이 발생한다 [31]. 반도체와 전극 간의 에너지 차이로 형성된 쇼트키 장벽은 전자 주입을 방해하지만, 일부 전자는 장벽 에너지를 넘어 다른 전극으로 전이될 수 있다. 상온 (300 K)에서는 열에너지로 인한 여기자를 생성하기 쉽지 않기 때문에 암전류는 전하 주입으로 인해 발생한다. 일반적으로, 광검출기 장치 내 열 발광과 관련된 리처드슨-쇼트키 방정식에 의해 설명될 수 있다 [32].

유기광전자 소자의 큰 발전을 주도하는 비풀러렌계 억제터를 적용하여, 성능이 향상된 유기 광검출기 연구가 보고되고 있다. eh-IDTBR 소재를 활용하여, 암전류를 억제함으로써 -1 V 환경하에서 1.6×10^{13} Jones의 성능 지표를 보고하였다 (그림 4(a) 및 4(b)) [33]. 특히, 풀러렌계에서 보이는 확산 현상에 의한 Tail 형태의 반응 신호를 극복하여, μ s 수준의 빠른 반응속도를 달성하였다. 신규 개발된 COTIC-4F 소재는 1.1 eV의 낮은 밴드갭 에너지를 통해 1100 nm 영역까지 광 변환이 가능하여, 920 nm 영역에서 1.7×10^{11} Jones를 나타냈다 (그림 4(c) 및 4(d)). 바이어스 인가 시에도 안정적인 구동 특성을 보였고, 이는 적외선 영역을 활용하는 센서로의 확장 가능성을 제안하였다 [34].

최근 광전류를 크게 향상시키고자 하는 전략으로 Photomultiplication (PM) 현상에 기반을 두는 유기 광검출기의 개발이 대두되고 있다. PM 현상은 단일 광자로부터 다수의 전자-정공 쌍을 생성하여, 광검출기의 감지 능력을 향상시킬 수 있다. 높은 바이어스에서 구동하는 PM 광검출기는 고속 이미지 센싱 등의 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 특정 유기 반도체 소재의 전하

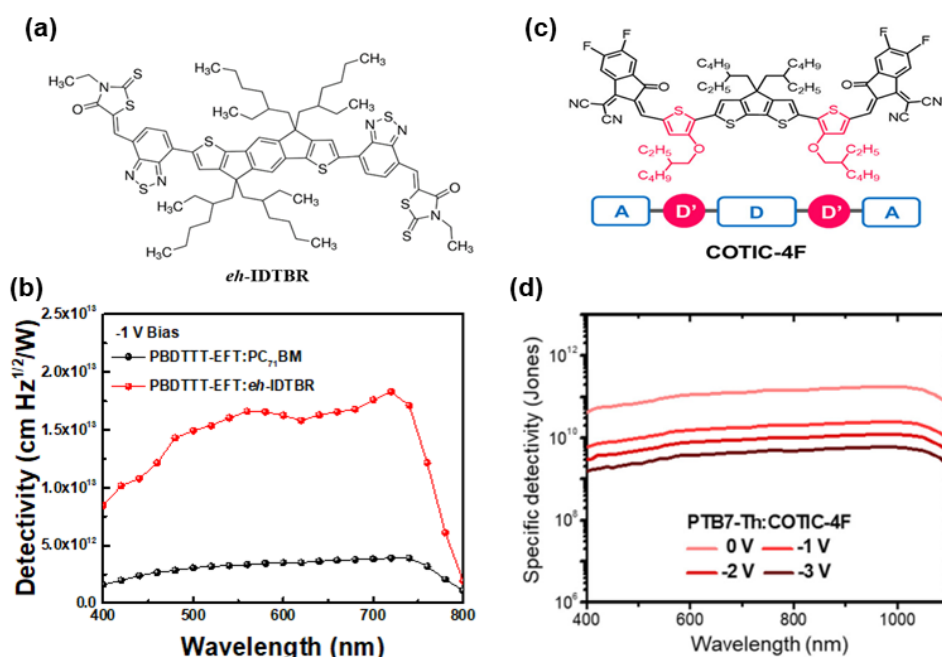


그림 4 (a) eh-IDTBR 구조 및 (b) eh-IDTBR 기반 파장별 광검출기 성능 특성 [33].
(c) COTIC-4F 구조 및 (d) COTIC-4F 기반 파장별 광검출기 성능 특성 [34].

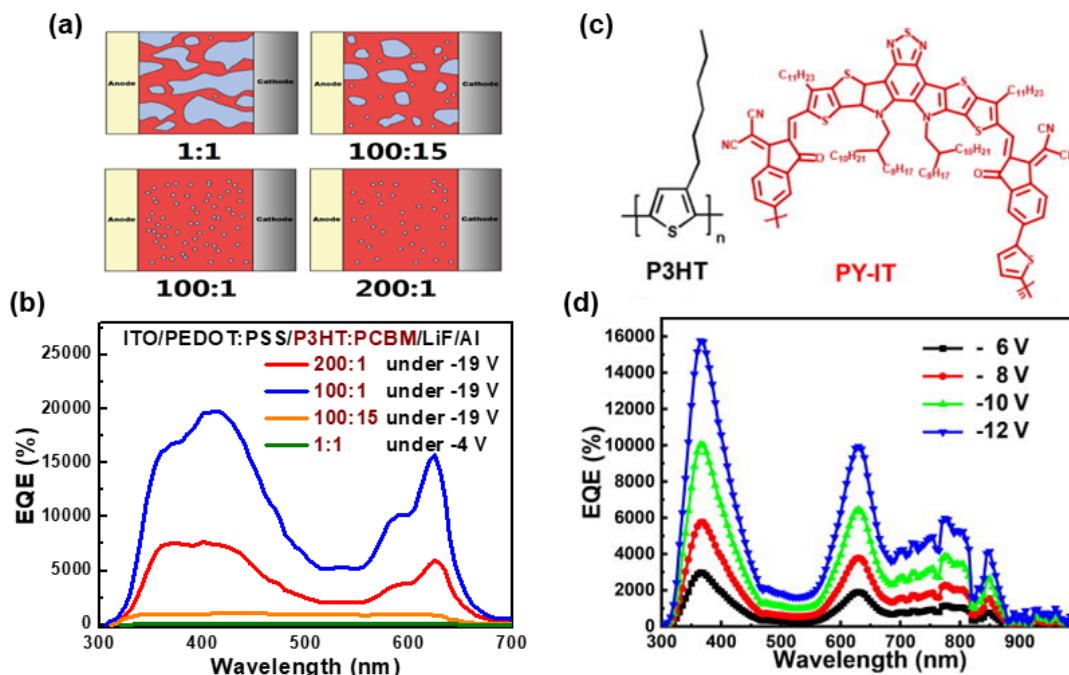


그림 5 (a) P3HT와 PC₆₀BM 비율 조절 기반 PM 광검출기 구조 및 (b) 비율 조절 기반 PM 광검출기 파장별 외부 양자 효율 특성 [35].
(c) PY-IT 구조 및 (d) PY-IT 기반 PM 광검출기 바이어스별 외부 양자 효율 특성 [36].

이동 특성을 조절하여 PM 효과를 향상시키는 연구가 보고되고 있으며, 광학적 구조와 흡수 영역 최적화를 통해 광자의 효율적인 수집을 유도하고, 계면에서의 트랩 밀도를 증가시킴으로써 트랩에 의한 전하 주입을 가속화 하여, 여기자 생성률을 증가시키는 방법이 제안되고 있다. PM 유기 광검출기는 P3HT 도너 소재를 메인 매트릭스로 구성하여, 소량의 PC₆₀BM을 첨가함으로써 구현되었다 (그림 5(a)) [35]. 1:1 비율로 섞었을 때는 랜덤하게 도너와 엑셉터의 상이 형성되기 때문에, 이중 연속 전하 전송 채널을 형성함에 따라, 외부 양자 효율이 향상되지만, 높은 전기장이 인가되더라도, 100%를 초과할 수 없다. 한편, 도너 대 엑셉터 비율을 200:1로 구성하면, 단일 차지 전송 채널을 형성하여, 소량의 PC₆₀BM에 의한 트랩 사이트에 트랩된 차지 캐리어들이 높은 전기장을 인가함에 따라 각 전극으로 주입되는 PM 현상에 따라, -19 V에서 20000% 수준의 외부 양자 효율을 달성하였다 (그림 5(b)). 최근에는 고분자 엑셉터 소재인 PY-IT를 도입하여, quasi-planar 접합을 형성함으로써, PM 현상을 통해 -12 V에서 16000%의 높은 외부 양자 효율을 달성했다 (그림 5(c) 및 5(d)) [36].

5. 결론

본 고에서는 현재까지 연구개발이 진행되어 온 유기 광전소자에 대한 연구 중, 차세대 대면적 공정으로 주목받고 있는 전사 인쇄 공정 기술에 대한 개요와 더불어, 확장 분야로써 실내광을 활용한 저조도 유기 광전소자 및 이미지 센서로 적용 가능한 유기 광검출기 기술까지 간략히 소개하였다. 비폴러렌계 엑셉터의 개발로 유기 광전소자의 발전에 황금시대가 도래하였다. 유기 광전소자에 대한 지대한 관심과 함께, 새로운 소재 및 인터페이스 층의 합성, 처리 방법, 장치 내구성, 대면적 장치를 위한 제작 공정과 같은 다양한 도전이 여전히 존재한다. 전사 인쇄 공정을 도입한 유기 광전소자는 광전 변환 효율과 장기적 운전 안정성을 향상시킬 큰 잠재력을 보여, 향후 비진공/저온 상용화 핵심 공정 측면으로 유망하다. 또한, 유기 광전소자는 다양한 분야에 파생되어, 최근에는 저조도 환경에서 우수한 발전을 보여, 에너지 하베스팅 기술로 확장되며, 안정적인 광신호와 더불어 암전류의 효율적 억제를 통해 신호 대비 노이즈 비율이 우수한 유기 광검출기로 활용

되고 있다. 유기 광전소자의 상업화를 위해서는 현실적인 운영 환경에서의 장기 내구성을 보장해야 한다. 첨가제 및 인터페이스 층, 그리고 캡슐화와 같은 장치 안정성을 향상시키기 위한 많은 연구 결과 기반으로 유기 광전소자의 장기 안정성은 획기적으로 개선됐다. 비록 유기 광전소자의 대기, 열 및 조명 등의 스트레스에 대한 안정성이 확인되었지만, NFA의 형태학적 및 화학적 안정성은 산소, 수분, 열, 조명 및 기계적 스트레스와 같은 여러 요인의 조합에 대한 향상이 여전히 필요하다. 이를 위해서는 분자 구조를 통제하여 유기 반도체의 안정성을 극대화하는 것이 필요하다. 비풀러렌계 엑셉터의 도입으로 19% 이상의 높은 광전 변환 효율을 달성하며, 상업화에 대한 기대가 매년 증가하고 있다. 한편, 대면적 유기 광전소자의 구현을 위해서는 성능 감소에 문제가 되지 않는 대규모 제조 공정이 개발되어야 한다. 현재까지 다양한 대면적 제조 공정 기술들이 제안되었지만, 할로겐 용매의 사용, 불연속 인터페이스 층의 형성 등 상업화 가능성을 위해 극복해야 할 장벽들이 많이 존재하고 있다. 이러한 문제를 효과적으로 극복하기 위해서는 친환경 용매 기반 저온 용해성과 지속적인 생산 공정에서 안정적인 구동 특성을 갖는 유기반도체를 신규 합성/원천 기술화하는 것이 필수적일 것이다.

[참고문헌]

- [1] R. Yu, et al. "Research Advances of Nonfused Ring Acceptors for Organic Solar Cells", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 15, 2781-2803, 2024.
- [2] C. Yang, et al. "Hot-Casting Strategy Empowers High-Boiling Solvent-Processed Organic Solar Cells with Over 18.5% Efficiency", *Advanced Materials*, 36, 2305356, 2024.
- [3] M.C. Scharber, et al "Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells", *Progress in Polymer Science*, 38, 1929-1940, 2013.
- [4] A.J. Heeger. "25th Anniversary Article: Bulk Heterojunction Solar Cells: Understanding the Mechanism of Operation", *Advanced Materials* 26, 10-28, 2014.
- [5] M. Chen, et al. "Influences of Non-fullerene Acceptor Fluorination on Three-Dimensional Morphology and Photovoltaic Properties of Organic Solar Cells", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11, 26194-26203, 2019.
- [6] J.K. Kim, et al. "Enhanced Performance and Stability of Polymer BHJ Photovoltaic Devices from Dry Transfer of PEDOT:PSS", *ChemSusChem*, 7, 1957-1963, 2014.
- [7] M.S. Kim, et al. "Morphology Inversion of a Non-Fullerene Acceptor Via Adhesion Controlled Decal-Coating for Efficient Conversion and Detection in Organic Electronics", *Advanced Functional Materials*, 31, 2103705, 2021.
- [8] Q. Guo, et al. "Recent advances in PM6:Y6-based organic solar cells", *Materials Chemistry Frontiers*, 5, 3257-3280, 2021.
- [9] J. Lim, et al. "Preferred Acceptor-Domain Positioning via a Phase-Switched Bulk Heterojunction for Self-Powered Photodetector and Photovoltaic Applications", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11, 625-637, 2023.
- [10] J. Lim, et al. "Coherent arrangement of perylene diimide derivative via adhesion-controlled transfer for noise-suppressed light signal detection", *Journal of Materials Chemistry A*, 12, 7765-7776, 2024.
- [11] J. Zhang, et al. "High Efficiency over 18.6% of Organic Solar Cells Enabled by PEDOT:PSS/Br-2PACz Dual-Anode Interface", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16, 9117-9125, 2024.
- [12] N. Kim, et al. "Highly Conductive All-Plastic Electrodes Fabricated Using a Novel Chemically Controlled Transfer-Printing Method", *Advanced Materials*, 27, 2317-2323, 2015.
- [13] Y. Cui, et al. "Organic photovoltaic cells for indoor applications: opportunities and challenges", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12, 38815-38828, 2020.
- [14] Y. Zhang, et al. "An electron acceptor analogue for lowering trap density in organic solar cells", *Advanced Materials*, 33 (2021) 2008134.
- [15] G. Zuo, et al. "General rule for the energy of water-induced traps in organic semiconductors", *Nature Materials*, 18 (2019) 588-593.
- [16] M. Shi, et al. "Remove the water-induced traps toward improved

- performance in organic solar cells", *Science China-Materials*, 64, 2629-2644, 2021.
- [17] J. Wu, et al. "Exceptionally low charge trapping enables highly efficient organic bulk heterojunction solar cells", *Energy & Environmental Science*, 13, 2422-2430, 2020.
- [18] L. Ma, et al. "High-efficiency nonfullerene organic solar cells enabled by 1000 nm thick active layers with a low trap-state density", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12, 18777-18784, 2020.
- [19] Y. XIA, et al. "Molecular doping inhibits charge trapping in low-temperature-processed ZnO toward flexible organic solar cells", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13, 14423-14432, 2021.
- [20] P. Bi, et al. "Suppressing trap states and energy loss by optimizing vertical phase distribution through ternary strategy in organic solar cells", *Science China Chemistry*, 64, 599-607, 2021.
- [21] S. Zhang, et al. "Over 14% efficiency in polymer solar cells enabled by a chlorinated polymer donor", *Advanced Materials*, 30, 1800868, 2018.
- [22] R. Singh, et al. "Highly efficient indoor organic solar cells by voltage loss minimization through fine-tuning of polymer structures", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11, 36905-36916, 2019.
- [23] V. Piradi, et al. "Highly Semitransparent Indoor Nonfullerene Organic Solar Cells Based on Benzodithiophene-Bridged Porphyrin Dimers", *Energy Technology*, 10, 2100908, 2022.
- [24] Y. Xu, et al. "Organic photovoltaic cells with high efficiencies for both indoor and outdoor applications", *Materials Chemistry Frontiers*, 5, 893-900, 2021.
- [25] Y. Cui, et al. "1 cm² organic photovoltaic cells for indoor application with over 20% efficiency", *Advanced Materials*, 31, 1904512, 2019.
- [26] Y. Cui, et al. "Wide-gap non-fullerene acceptor enabling high-performance organic photovoltaic cells for indoor applications", *Nature Energy*, 4, 768-775, 2019.
- [27] Z. Zhao et al. "Recent progress on broadband organic photodetectors and their applications", *Laser & Photonics Reviews*, 14, 2000262, 2020.
- [28] P.C.Y. Chow et al. "Organic Photodetectors for Next-Generation Wearable Electronics", *Advanced Materials*, 32, 1902045, 2020.
- [29] A. Dkhissi, "Excitons in organic semiconductors", *Synthetic Metals*, 161, 1441-1443, 2011.
- [30] W. Jang et al. "Theoretical and Experimental Investigation of Barrier-Energy-Dependent Charge Injection Mechanisms in Organic Photodetectors", *Advanced Functional Materials*, 33, 2209615, 2023.
- [31] S. M. Sze, "Semiconductor devices: physics and technology", John Wiley & Sons, New Jersey, 8, 417, 2008.
- [32] J.G. Simmons, "Richardson-Schottky Effect in Solids", *Physical Review Letters*, 15, 967, 1965.
- [33] W. Jang et al. "Superior Noise Suppression, Response time, and Device Stability of Non-Fullerene System over Fullerene Counterpart in Organic Photodiode", *Advanced Functional Materials*, 30, 2001402, 2020.
- [34] J. Lee et al. "Side-Chain Engineering of Nonfullerene Acceptors for Near-Infrared Organic Photodetectors and Photovoltaics", *ACS Energy Letter*, 4, 1401-1409, 2019.
- [35] W. Wang et al. "Highly Narrowband Photomultiplication Type Organic Photodetectors", *Nano Letter*, 17, 1995-2002, 2017.
- [36] H. Zhang et al. "Photomultiplication type quasi-planar all-polymer photodetectors with tunable response range", *Applied Physics Letters*, 123, 111101, 2023.

저자소개

왕동환 (Dong Hwan Wang)

2012년 한국과학기술원 생명화학공학과 공학박사
2014년 - 현재 중앙대학교 조교수, 부교수, 교수
2020년 - 2021년 미국 캘리포니아 산타바바라 대학교 (UCSB)

주 연구분야 : 유기/페로브스카이트 태양전지,
광검출기 센서, 전사 공정,
양자점 합성 등



장웅식 (Woongsik Jang)

2022년 중앙대학교 융합공학과 공학박사
 2022년 - 현재 중앙대학교 박사후연구원
 2020년 미국 캘리포니아 산타바바라 대학교
 (UCSB) 교환학생
 주 연구분야: 유기 반도체 광전자소자
 (태양전지, 광검출기), 전하 역학 분석

**김병기 (Byung Gi Kim)**

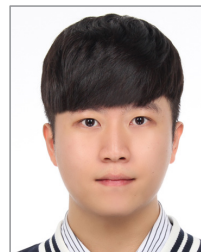
2019년 중앙대학교 융합공학부 공학사
 2019년 - 현재 중앙대학교 지능형반도체공학과
 석박통합과정
 2023년 - 스위스 EPFL (로잔연방공과대학교)
 교환학생
 주 연구분야: 실내/외 페로브스카이트
 태양전지/광검출기,
 금속 산화물 합성 등

**임지현 (Jihyun Lim)**

2018년 한국외국어대학교 화학과 이학사
 2020년 중앙대학교 융합공학과 공학석사
 2020년 - 현재 중앙대학교 지능형반도체공학과
 박사과정
 주 연구분야: 유기/페로브스카이트 태양전지 및
 광검출기 센서, 나노 소재 물성 제어 및
 전사 공정 등

**김민수 (Min Soo Kim)**

2019년 동아대학교 신소재물리학과 이학사
 2021년 중앙대학교 융합공학과 공학석사
 2021년 - 현재 중앙대학교 지능형반도체공학과
 박사과정
 주 연구분야: 유기 태양전지/광검출기 센서,
 고분자 물성 제어 및 전사 공정 등





투명 태양전지를 위한 근적외선 선택적 흡수 유기 반도체 소재 연구개발 현황

Technology trend of organic semiconductor materials with near-infrared selective absorption for transparent solar cells

강동원 · 이서준 · 류 준 · 이정연 | 중앙대학교

Dong-Won Kang · Seojun Lee · Jun Ryu · Jeong-Yeon Lee | Chung-Ang University, Korea



요 약

심미성을 위한 건물일체형 태양광 시스템에 적용할 수 있는 차세대 투명 유기 반도체 소재 및 태양전지에 대하여 기술 개요 및 기술동향을 살펴본다. 또한 효율적 한계를 해결하기 위한 투명 유기 태양전지 기반의 적층형 소자 기술을 통하여 미래를 전망한다.

Abstract

In this report, technical information and trends regarding next generation transparent organic semiconductor materials and solar cells that can be applied to building-integrated photovoltaic (BIPV) system for aesthetics. In addition, one can anticipate the future perspective through the tandem device technology based on transparent organic solar cells to solve efficiency limitations.

1. 서 론

세계의 에너지 수요가 계속 증가함에 따라 재생 가능하고 지속 가능한 에너지 개발은 최근 수십 년 동안 뜨거운 연구 주제가 되었다. 태양광 에너지의 사용은 화석 연료처럼 환경에 오염이나 손상을 일으키지 않아 친환경적이며 무제한 활용이 가능하여 재생에너지 중 가장 주목받고 있다. 이러한 친환경적인 태양광 에너지를 광전효과를 이용하여 전기 에너지로 변환 시켜주는 태양전지 기술이 개발 되어왔다.

지금까지 다양한 재료를 사용한 태양전지가 연구, 개발되어 왔다. 이 중에서 경량화, 유연성, 반투명성, 제작 용이성 등의 장점을 지닌 유기태양전지 (Organic Solar Cell, OSC)가 유망한 태양

전지 기술로 각광받고 있다. 특히, 다른 심미성이 떨어지는 다른 태양전지들에 비해, 유기 태양전지는 유기 소재에 따라 빛의 파장대역을 선택적으로 흡수할 수 있는 특성이 있어 투명 태양전지에 적용할 수 있는 큰 장점이 있다. 사람이 인지할 수 있는 가시광 영역 (380~780 nm)의 빛 흡수를 최소화 시키고 근적외선 영역 (800~1300 nm) 빛을 선택적으로 흡수하여 투명 태양전지로 적용시킬 수 있다.

따라서 본 기획시리즈에서는 건물일체형 태양광 (building-integrated photovoltaic, BIPV) 시스템에 활용할 수 있는 근적외선 선택적 흡수 유기 반도체 기반의 투명 태양전지 기술 동향에 대해서 살펴보고, 추가적인 성능 향상을 위한 투명 적층형 (tandem, 탠덤) 전지 기술 현황에 대해서도 짚어본다.

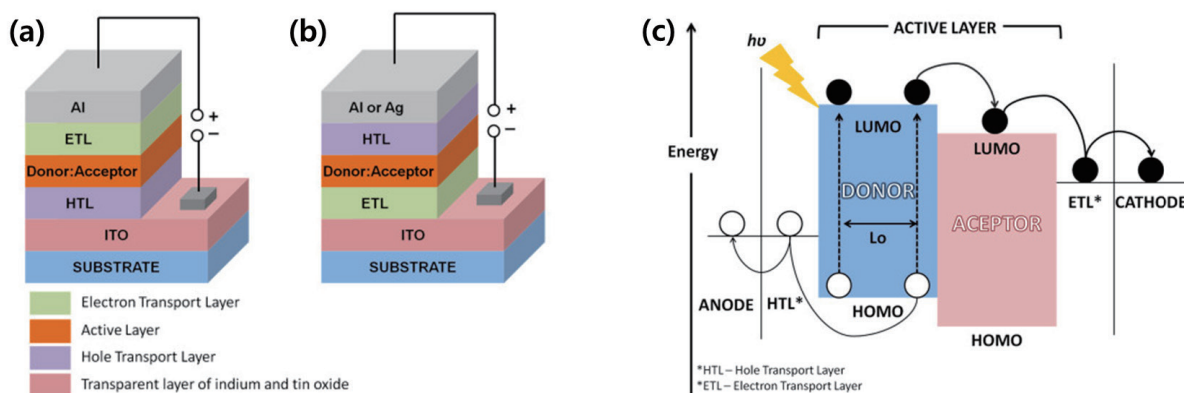


그림 1 유기태양전지의 구조 (a) 정구조 (b) 역구조 및 (c) 유기태양전지의 동작원리 [1]

2. 유기 태양전지 기술 개요

유기 소재는 공정 가공성이 우수하고 반도체로서의 특성을 갖추고 있어 다양한 학문 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 유기 소재를 활용하여 제작하는 유기 태양전지는 p-type과 n-type의 성질을 가지는 유기 반도체를 혼합하여 광활성층을 형성하고, 이를 응용하여 태양광을 전기로 변환하는 기술이다. 이러한 유기 소재의 장점 중 하나는 분자구조 변화 용이성으로, 이는 고성능 유기 태양전지를 위한 소재 개발의 잠재력을 높이는 데 기여하고 있다. 또한, 유기 태양전지는 높은 흡광률을 가지고 있어 100 nm 수준의 매우 얇은 박막으로 제작이 가능하므로, 소재의 경량화 및 유연성 확보에 기여한다.

유기 태양전지는 일반적으로 그림 1과 같이 구조에 따라 정구조와 역구조로 구분되며, 최근에는 광활성층을 복합체 (Bulk Heterojunction)로 구성된 유기 반도체 소재를 주로 활용하고 있다. 유기 태양전지는 빛이 입사되면 광활성층에서 엑시톤이 형성되고, 엑시톤이 분리되면서 전자는 음극으로, 정공은 양극으로 흘러 광전류를 형성하는 메커니즘을 통해 동작된다.

유기 태양전지는 1990년대에 고분자 계열의 도너 (donor)와 fullerene 계열의 억셉터 (acceptor)를 활용한 복합체 구조가 제시되었고, 이후 다양한 소재를 사용한 복합체 시스템이 개발되었으며, P3HT:PC₆₀BM을 활용하여 처음으로 10% 이상의 광변환효율을 달성하였다[2]. 그러나 fullerene 계열의 낮은 광 흡수, 밴드갭 변화의 제한, 에너지 준위의 부적절 등의 문제로 인해 큰 손

실이 발생하여 발전에 제한이 있었다. 이후 앞서 언급한 문제점을 극복하기 위해 좁은 밴드갭과 높은 흡수계수를 가지는 non-fullerene acceptor 계열인 ITIC, Y6 등의 저분자 소재들이 개발되면서 유기 태양전지의 발전이 가속되었다. 이들은 고분자나 저분자 도너 소재와 에너지 호환성 측면에서 손실을 최소화할 수 있도록 설계되어 효과적인 광-전기 변환 공정을 달성하였다. 최근에는 PM6:L8-BO, PM6:BTP-H2, PM6:L8-BO:BTP-H2 등의 소재를 활용하여 19.2%의 광변환효율을 달성하는 등 유기 태양전지의 상용화의 가능성이 더 높아졌다[3].

3. 투명 유기 반도체 소재 및 태양전지 기술 동향

투명 태양전지는 가시광 영역의 높은 빛 투과도와 근적외선 영역의 빛에 대한 높은 활용도가 필수적이다. 이러한 관점에서, 선택적 빛 흡수와 밴드갭 조절이 용이한 유기 반도체 소재가 투명 태양전지 응용에 큰 잠재력을 갖고 있다. 투명 유기 태양전지에서 도너와 억셉터로 구성되는 유기 광활성층은 투명도와 성능면에서 가장 중요한 역할을 한다. 따라서, 가시광 영역에서 투과도가 높고 근적외선의 흡수가 높은 도너와 억셉터 유기 소재를 찾고 개발하는 것이 매우 중요하다.

2010년에 Christoph J. Brabec 교수 연구진은 P3HT (donor):PC₆₀BM (acceptor)을 이용하여 최초의 투명 태양전지를 보고하였는데, 투과율 32%에서 1.95%의 다소 낮은 광변환효율 (power conversion efficiency, PCE)을 나타냈다[4]. 이 결과는 가시광 영

역의 빛을 많이 흡수하고 근적외선은 거의 활용하지 못하는 넓은 밴드갭의 유기 도너 및 억셉터 소재를 활용하였기 때문이다.

이후 2011년 독일에서 최초로 근적외선 흡수가 가능한 도너 유기 물질 Ph₂-benz-bodipy를 이용한 Ph₂-benz-bodipy:C₆₀ 유기 광활성층을 적용하여 평균 가시광 투과율 (average visible transmittance, AVT) 47.9%와 2.2%의 PCE를 달성한 결과가 보

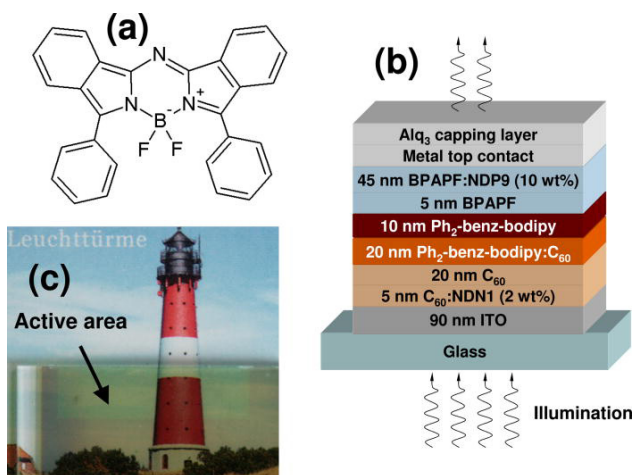


그림 2 근적외선 흡수가 가능한 도너 유기 소재를 최초로 적용한 유기 투명 태양전지 [5]

고된 바 있다[5]. 가시광 영역 (400~600 nm)의 빛에 대한 반응이 매우 낮고 근적외선 영역의 빛에 대한 반응이 높았기 때문에 보다 높은 AVT 투과율과 효율을 확보할 수 있었다.

이후, 가시광 빛 투과율과 근적외선 흡수율을 높이는 투명 유기 반도체 소재와 이를 적용한 투명 태양전지에 대한 많은 연구가 진행되어왔다.

특히, 2018년 중국 연구팀에서 three thieno[3,2-b]thiophene 구조의 도입을 활용하여 강한 근적외선 흡수를 가지며 전하이동도가 큰 새로운 유기 억셉터 FOIC를 개발하였다. FOIC는 기존 ITIC3와 비교하여 크게 상향 이동된 HOMO level과 약간의 하향 이동된 LUMO level의 특성을 보여 1.32 eV의 낮은 밴드갭 및 $1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 전자 이동도를 달성하고, 약 100 nm의 적색 편이 (red-shift)를 보여주었다. PTB7-Th 도너 소재를 활용하여 제작된 유기 태양전지는 10.3%의 PCE와 37.4%의 AVT를 보여주었다. 이는 35% 이상의 AVT를 가지는 투명 유기 태양전지 중 가장 높은 효율을 달성한 결과이다[6].

최근 2023년, 국내 한국화학연구원의 고서진 박사 연구팀은 고성능의 근적외선 흡수 유기 억셉터로 주목받는 Y6와 쌍을 이루

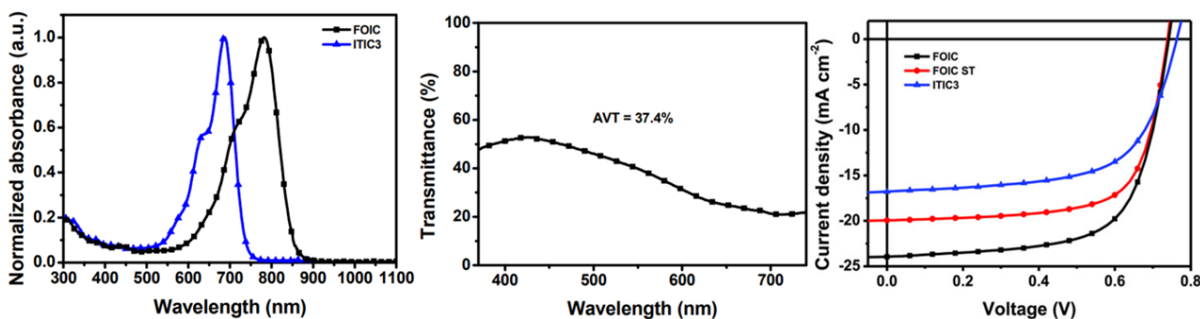


그림 3 FOIC 억셉터를 적용한 투명 유기 태양전지 결과 [6]

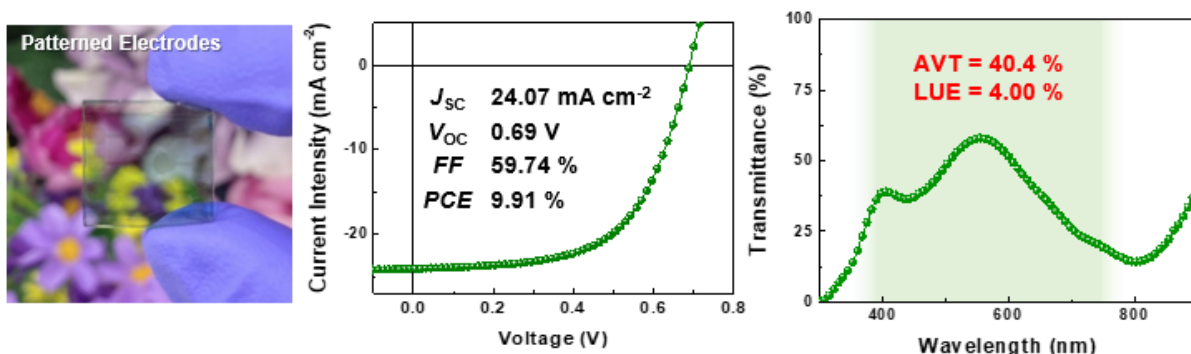


그림 4 PL2 도너를 적용한 투명 유기 태양전지 실제 사진과 성능 결과 [7]

기 위한 고분자를 개발하기 위해 CPDT 코어 기반의 NIR 흡수를 위한 새로운 고분자 도너인 PL2를 설계하였다. PL2 고분자 도너는 높은 가시광 투과율로 근적외선 영역의 빛을 흡수할 수 있고, 깊은 HOMO level은 Y6 엑셉터와의 에너지준위 정렬에 적합하여 소자의 V_{oc} 손실을 최소화하는 결과를 보여주었다. 또한 PL2를 활용한 반투명 소자는 9.91%의 광변환효율과 40.4%의 평균 가시광 투과율을 발표한 바 있다. 이는 40% 이상의 AVT를 갖는 투명 유기 태양전지에서 가장 높은 효율 결과이다[7].

4. 투명 유기 태양전지의 기술적 한계

상기 섹션에서 언급한 것처럼, 유기 태양전지는 다른 태양전지들에 대비하여 선택적 빛 흡수를 통한 투명성을 제공할 수 있는 차세대 기술로 평가받고 있지만, 아직도 현재 기술적 한계점이 존재한다.

2023년 평균 가시광 투과율 (average visible transmittance, AVT) 40%와 9.9%의 효율을 달성한 투명 유기 태양전지 연구결과[7]가 있지만 AVT 50% 이상의 투명 태양전지의 성능은 현재 5%이하의 성능이며[8] 이를 뛰어넘는 성능의 결과가 나오지 않는 상황이고 이렇게 투과도를 높이면 효율이 현저히 감소하는 한계점이 있다. 이러한 한계점을 고려하면 투명도와 효율을 동시에 가져갈 수 있는 기술과 연구가 BIPV 시스템을 위해 더욱 필요하다.

다른 한계점으로 유기 태양전지의 장기 안정성이 매우 취약하

다는 점이다, 유기 태양전지는 빛 조사를 받으면 활성층의 산화에 의한 광화학 분해가 일어나 기능의 상실이 유발되어 장기 빛 안정성이 다른 태양전지에 비해 떨어진다. 또한, 공기 중의 산소와 물의 유입이 유기 태양전지의 각각의 층들에 심각한 물리적, 화학적 저하를 일으키거나 층 사이의 계면에 결함을 발생시켜 성능이 저하되는 문제점이 있다[9]. 유기 태양전지의 안정성 향상은 투명 유기 태양전지를 이용한 BIPV 시스템 상용화를 향한 가속도를 낼 수 있는 핵심 요소이며, 이에 관련된 다양한 연구가 현재도 진행 중이다.

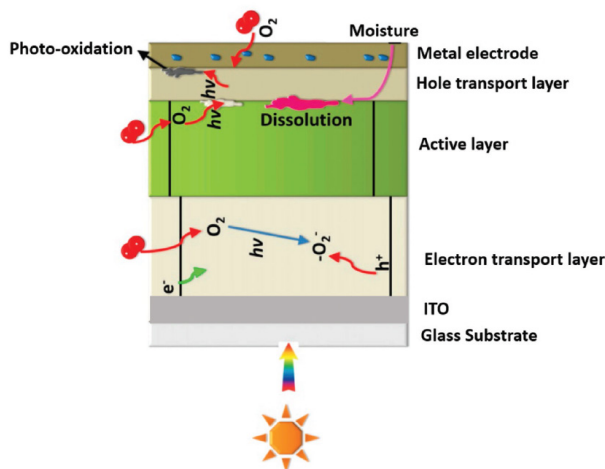


그림 6 유기 태양전지의 열화 메커니즘 [9]

5. 투명 유기 태양전지 기반의 적층형 (Tandem) 전지 기술 동향

단일 접합 투명 유기 태양전지의 효율 한계 문제점을 해결하기 위해서 적층형 (탠덤) 소자 기술을 도입하는 방법이 있다. 2019년 미국 워싱턴 대학교의 Alex K.-Y. Jen 교수 연구팀은 근적외선 영역의 빛을 더 흡수할 수 있는 유기 엑셉터 6TIC-4F와 PTB7-Th 도너와 함께 사용하여 만든 61.7%의 AVT 및 5.9%의 PCE를 갖는 낮은 밴드갭 (1.36 eV)의 유기 태양전지와 넓은 밴드갭 (2.36 eV)의 $\text{FAPbBr}_{2.43}\text{Cl}_{0.57}$ 페로브스카이트 소재를 이용하여 만든 AVT 68.2%, PCE 7.5%를 갖는 페로브스카이트 태양전지를 결합하여 투명 탠덤 태양전지를 개발하였다[10]. 이렇게 개발된 페로브스카이트/유기 투명 탠덤 태양전지는 52.9%의 AVT 및 10.7%의

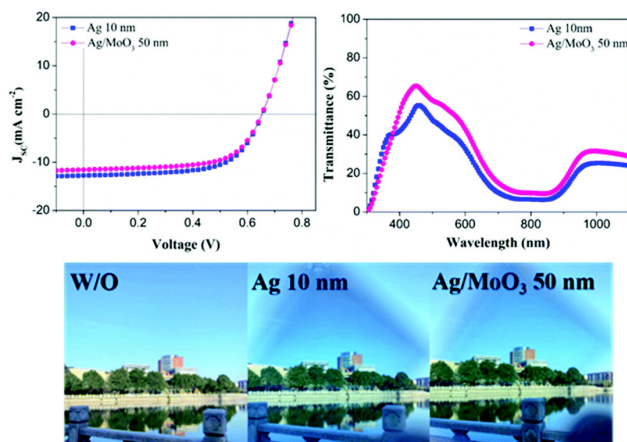


그림 5 AVT 50.8% 및 PCE 5%의 투명 유기 태양전지 성능 결과와 실제 사진 [8]

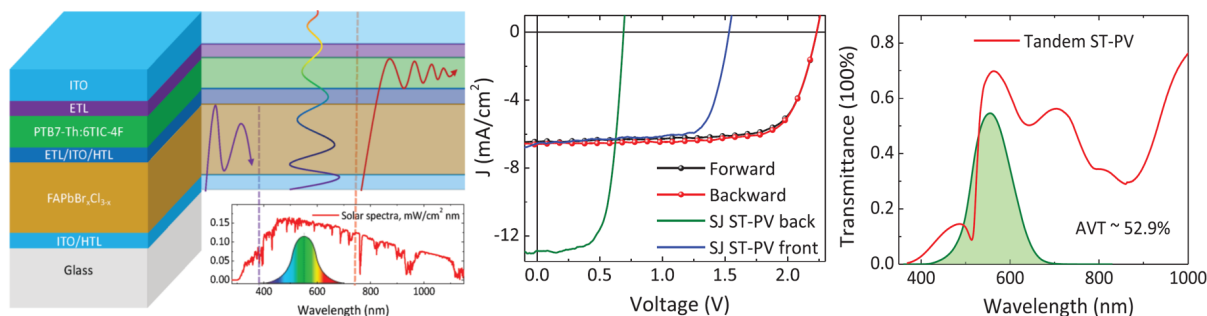


그림 7 52.9%의 AVT 및 10.7%의 PCE 성능을 보여준 페로브스카이트/유기 투명 탠덤 태양전지 결과 [10]

PCE 성능을 보인 것으로 보고된 바 있다. 이러한 탠덤 소자 기술로 50% 이상의 AVT를 확보함과 동시에 단일접합 소자의 효율을 증가하는 결과이다.

유기/유기 탠덤 태양전지도 현재까지 많은 연구가 되었지만, 아직 근적외선 흡수용 유기 태양전지를 제대로 활용하지 못하고 있다. 2022년, PBDT[2F]T:PC₇₁BM의 유기 상부 셀과 PCE10:PC₆₁BM의 유기 하부 셀을 이용하여 탠덤 태양전지 결과가 발표된 바 있다[11]. 그러나, 근적외선 영역의 빛을 거의 활용하지 않았으며 탠덤 태양전지의 AVT는 49.2%, 성능은 5.3%의 PCE를 보여 단일접합 투명 태양전지에 비해 많은 효율 증가를 보이지 않았다.

이러한 결과로 미루어 보았을 때, 고효율의 투명 탠덤 태양전지를 위해서는 근적외선 선택적 흡수용 유기 태양전지와 가시광 영역의 빛 흡수를 최소화하고 자외선 (ultraviolet, UV) 영역의 빛을 강하게 흡수하는 상부 태양전지를 밴드갭에 알맞게 선택하여 개발하는 것이 필수적이다.

6. 결 론

본 고에서는 투명 유기 태양전지를 위한 적외선 선택적 흡수 유기 반도체 소재 및 이를 활용한 태양전지 기술에 대한 연구동향과 더불어, 투명 유기 태양전지의 한계 및 고성능을 위한 투명 탠덤형 태양전지 기술까지 간략히 소개하였다. 투명한 유기 태양전지는 심미성 문제로 인하여 건물 일체형 태양광 시스템에 기피되어온 기존의 태양전지의 단점을 해결할 수 있는 새로운 대안으

로 제시된다. 또한 탠덤 태양전지 기술을 통해 제조할 수 있는 고성능 투명 태양전지는 건물 일체형 태양전지의 상업화를 더욱 가속화될 수 있는 유망한 기술로 손꼽힌다. 현재는 내구성 개선 및 고성능 투명 유기 태양전지 개발이 상업화를 위한 가장 중요한 기술적 요소라고 볼 수 있으며, 대학 연구실뿐만 아니라 연구소 및 산업체와의 협력을 통해 상업화를 위한 기술 개발을 진행하여 미래에너지를 위한 기술을 확보할 필요가 있다. 나아가서 화석 연료의 사용을 줄이고 친환경 에너지의 보급을 확대하는 기반 기술로 활용될 것이라 기대한다.

[참고문헌]

- [1] Taihana Paula et al. "Recent advances in polymer structures for organic solar cells: A review", AIMS Energy, 10(1): 149-176, 2022
- [2] Jinbo Zhao et al. "Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents", Nat. Energy, 1, 15027, 2016
- [3] Chengliang He et al. "Manipulating the D:A interfacial energetics and intermolecular packing for 19.2% efficiency organic photovoltaics", Energy Environ. Sci., 15, 2537-2544, 2022
- [4] Tayebbeh Ameri et al. "Fabrication, Optical Modeling, and Color Characterization of Semitransparent Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells in an Inverted Structure", Adv. Funct. Mater., 20(10), 1592, 2010
- [5] Jan Meiss et al. "Near-infrared absorbing semitransparent organic solar cells", Appl. Phys. Lett. 99, 193307, 2011

- [6] Tengfei Li et al. "Fused Tris(thienothiophene)-Based Electron Acceptor with Strong Near-Infrared Absorption for High-Performance As-Cast Solar Cells", *Adv. Mater.* 30, 1705969, 2018
- [7] Jung Won Yoon et al. "Semitransparent organic solar cells with light utilization efficiency of 4% using fused-cyclopentadithiophene based near-infrared polymer donor", *Chem. Eng. J.*, 452, 139423, 2023
- [8] Qingyun Wei et al. "A near-infrared polymer enables over 50% transmittance in semi-transparent organic solar cells", *J. Mater. Chem. C*, 10, 5887-5895, 2022
- [9] Leiping Duan et al. "Progress in Stability of Organic Solar Cells", *Adv. Sci.* 7, 1903259, 2020
- [10] Lijian Zuo et al. "Highly Efficient Semitransparent Solar Cells with Selective Absorption and Tandem Architecture", *Adv. Mater.* 31, 1901683, 2019
- [11] Erdin Almuquoddas et al. "Semi-transparent fullerene-based tandem solar cells with excellent light utilization efficiency enabled by careful selection of sub-cells", *Org. Electron.* 109, 106633, 2022

저자소개

강동원(Dong-Won Kang)

2007년 서울대학교 전기공학부 졸업
 2013년 동 대학교 대학원 졸업(공학박)
 2013~2015년 동경공업대학 박사후연구원
 2015~2018년 청주대학교 조교수
 2018년~현재 중앙대학교 부교수
 현재 전기재료 C부문회 이사
 주 연구분야: 반도체 재료 및 태양전지 등



이서준 (Seojun Lee)

2017년 청주대학교 태양광에너지공학과 졸업
 (공학사)
 2019년 중앙대학교 대학원 에너지시스템공학과
 졸업 (공학석사)
 2019년 ~ 현재 동 대학교 대학원 스마트시티학과
 (박사과정)
 주 연구분야: 차세대 에너지 소재 및 소자 등



류 준 (Jun Ryu)

2019년 청주대학교 태양광에너지공학과 졸업
 (공학사)
 2021년 중앙대학교 대학원 스마트시티학과 졸업
 (공학석사)
 2021년 ~ 현재 동 대학교 대학원 스마트시티학과
 (박사과정)
 주 연구분야: 차세대 에너지 소재 및 소자 등



이정연 (Jeong-Yeon Lee)

2023년 숙명여자대학교 ICT 융합공학부
 전자공학전공 졸업 (공학사)
 2023년~ 현재 중앙대학교 대학원 스마트시티학과
 (석사과정)
 주 연구분야: 차세대 에너지 소재 및 소자 등





넓은 밴드갭을 가지는 CsPbI_2Br 무기 페로브스카이트 태양전지

Wide band-gap CsPbI_2Br Inorganic Perovskite Solar Cells

강동원 · 이동건 · 이준호 | 중앙대학교

Dong-Won Kang · Dong-Gun Lee · Jun-Ho Lee | Chung-Ang University, Korea



요약

기존의 유-무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지의 열적 불안정성을 보완하는 무기 페로브스카이트 CsPbI_2Br 태양전지의 연구가 활발히 진행되고 있고, 현재까지 17.8%의 높은 광전변환효율을 단시간에 달성하였다. CsPbI_2Br 태양전지의 특징, 공정 과정, 주요연구방향을 소개하고, 상용화를 위해 극복해야할 문제들을 다룬다.

Abstract

Research on inorganic perovskite CsPbI_2Br solar cells, which address the thermal instability issues of existing organic-inorganic hybrid perovskite solar cells, is actively underway. A high photoelectric conversion efficiency of 17.8% has been achieved in a relatively short period. This research introduces the characteristics, manufacturing process, and key research directions of CsPbI_2Br solar cells, as well as addressing the challenges that need to be overcome for commercialization.

1. 서론

신재생에너지의 중요성이 점점 증가함에 따라, 페로브스카이트 태양전지는 우수한 광전 변환 효율과 저렴한 제조비용으로 주

목받고 있다. 초기 연구는 주로 MAPbI_3 (methylammonium lead triiodide) 와 같은 유-무기 하이브리드 할라이드 페로브스카이트에 초점을 맞추었으나, MA^+ (CH_3NH_3^+ , methylammonium) 나 FA^+ ($\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+$, formamidinium) 와 같은 유기물의 본연적 특

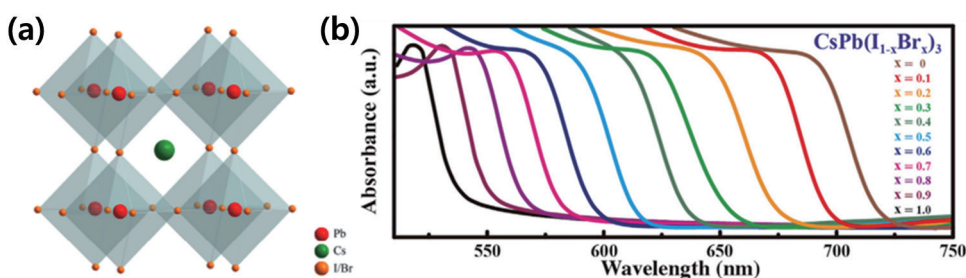


그림 1 (a) $\text{CsPb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$ 페로브스카이트 결정 구조 [3], (b) 할라이드 조성 비율에 따른 광흡수도 변화 [4]

성인 열 및 화학적 불안정성 문제로 인해 장기적인 실용화에 어려움을 겪었다. 이러한 배경 하에, 그림 1과 같이 페로브스카이트 구조에서 1가 양이온 자리를 무기 원소인 Cs⁺ 으로 대체하고 할라이드 이온 I과 Br의 비율을 조절하여 다양한 밴드갭을 가지는 CsPb(I_{1-x}Br_x)₃ (E_g = 1.73 ~ 2.32 eV) 페로브스카이트의 연구가 활발히 이루어졌다. 특히 I과 Br의 비율이 2:1 인 CsPbI₂Br 조성의 무기 페로브스카이트가 많이 연구되었는데, 다중접합 태양전지의 넓은 밴드갭 셀 또는 반투명 태양전지에 적합한 1.92 eV의 밴드갭을 가졌을 뿐만 아니라, 적절한 양의 Br 첨가로 상대적으로 우수한 안정성 등의 장점을 가지고 있었기 때문이었다. 이러한 관심으로 CsPbI₂Br 페로브스카이트 태양전지의 광전변환 효율은 2016년 9.8%를 시작으로 2024년 현재 17.8%까지 가파르게 상승하였다. [1, 2]

2. CsPbI₂Br 페로브스카이트의 특성

CsPb(I_{1-x}Br_x)₃ 페로브스카이트 조성에서 I (iodine)의 비율이 커지면 밴드갭은 낮아져 더 넓은 파장의 빛을 흡수할 수 있지만 상대적으로 큰 I 이온 반지름으로 인해 페로브스카이트 구조가 불안정해진다. 반대로 Br (bromine)의 비율이 커질수록 상대적으로 작은 Br 이온 반지름으로 인해 페로브스카이트 구조는 안정해지지만 밴드갭은 지나치게 커져 충분한 양의 빛을 흡수하지 못한다. 이와 같은 상충 관계에서 CsPbI₂Br 페로브스카이트는 많은 이점을 제시한다. 앞서 얘기한 바와 같이 높은 열적 안정성과 적절한 밴드갭을 가질 뿐만 아니라 CsPbI₂Br의 약한 결합 에너지에 의해 자유 전하의 재결합 손실이 낮아 전하수송층 (CTL, charge transfer layer)으로의 효율적인 추출이 가능하다. [5] 하지만 단점 역시 존재한다. 무기 조성으로 인해 열적 안정성은 높였지만 160 ~ 280°C 정도의 상대적으로 높은 공정온도가 필요하여 적층형 구조의 소자를 제작할 때 하부 재료의 열적 안정성에 따른 제한이 생긴다. 습한 환경에도 취약한데, 물 분자가 CsPbI₂Br 결정의 자유에너지 장벽을 낮추어 페로브스카이트 구조를 무너뜨리는 촉매역할을 한다. [6] 이러한 단점들을 극복하기 위해 TiO₂와 같이 열적 안정성이 높은 금속산화물을 하부 재료로 사용하거나,

페로브스카이트 박막 표면에 수분을 막아줄 수 있는 패시베이션 처리 등의 방법들이 연구되고 있는 중이다.

3. CsPbI₂Br 페로브스카이트 박막의 공정 방법

CsPbI₂Br 페로브스카이트 박막 형성 방법은 주로 저렴하고 간단한 용액 공정에 기반을 두고 있으며, 이는 대량 생산에 있어 상당한 이점을 제공한다. 주로 CsI, CsBr, PbI₂, PbBr₂ 전구체를 DMF (dimethyl formamide)와 DMSO (dimethyl sulfoxide) 용매에 녹여 전구체 용액을 만들고, 이를 기판 위에 스핀코팅 등의 방법으로 wetting 한 후 열처리 과정을 통해 페로브스카이트의 결정화가 이루어진다. 여기서 공정 방식에 따라 결정화의 양상이 크게 달라진다. 높은 결정성의 페로브스카이트 박막을 형성하기 위해 아래 3가지의 대표적인 공정 방식으로 주로 제작된다.

1) 점진적 열처리 방식

낮은 온도부터 시작하여 점차 높은 온도로 열처리를 해주어 천천히 결정화를 진행한다. (그림 2(a)) 이와 같은 방식은 페로브스카이트 결정핵의 개수를 최소화하여 grain의 크기를 최대화한다. 그에 따라 높은 결정성의 페로브스카이트 박막을 얻을 수 있지만 정확한 열처리 온도 제어를 필요로 한다.

2) 열풍 방식

스핀코팅 도중 박막에 열풍을 분사하여 빠른 속도로 결정화를 진행한다. (그림 2(b)) 이는 페로브스카이트 용매의 증발 속도를 가속화하여 균일한 결정핵이 생성된 중간상을 형성시켜 높은 결정성의 페로브스카이트 박막을 얻을 수 있다. 이러한 열풍 방식은 대면적 박막 형성에도 유리하여 상업화를 위한 공정으로 주목받고 있다.

3) 반응매 처리 방식

톨루엔 등의 반응매를 wetting된 박막에 처리한 후 열처리를 진행한다. (그림 2(c)) 이러한 반응매 처리 방식은 페로브스카이트

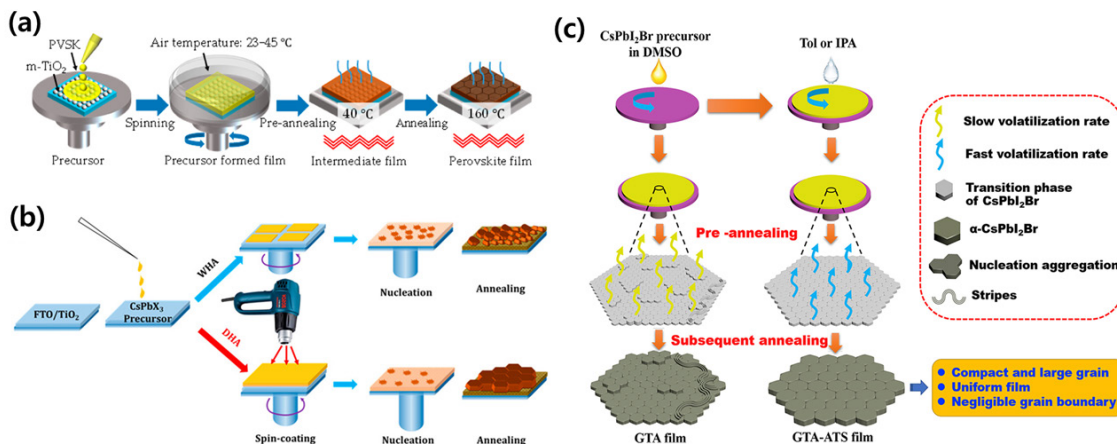


그림 2 CsPbI₂Br 박막 형성의 3가지 대표적 공정 방식, (a) 점진적 열처리 방식 [7], (b) 열풍 방식 [8], (c) 반응매 처리 방식 [9]

트 전구체 용액의 부분적 축적을 해소하여 균일한 분포를 이루게 함과 동시에 DMSO 용매를 빠르게 추출하여 결정핵 생성을 유도 시킴으로써 높은 결정성의 페로브스카이트 박막을 형성시킨다.

이러한 공정을 통해 제작된 CsPbI₂Br 페로브스카이트 박막은 균일한 두께와 우수한 표면 품질을 자랑하며, 이는 소자의 전체 성능에 긍정적인 영향을 미친다.

4. CsPbI₂Br 태양전지의 고효율화를 위한 연구방향

앞서 소개한 CsPbI₂Br 페로브스카이트 박막의 공정 방식 또한 높은 결정성의 박막 형성을 통한 태양전지 고효율화의 한 방법이지만, 다른 몇 가지 핵심적인 고효율화 연구 방향들이 아래와 같이 존재한다.

1) 전하수송층 에너지 레벨 매칭

페로브스카이트 태양전지의 작동 원리는 페로브스카이트 층에서 태양광에 의해 생성된 전자정공쌍들이 전하수송층에 의해 분리되어 전위차를 발생시키는 원리이기 때문에 페로브스카이트 층 양쪽에 존재하는 전자수송층 (ETL, electron transfer layer) 과 정공수송층 (HTL, hole transfer layer)의 역할이 중요하다. 전자수송층의 경우 전자는 전압 손실을 최소화하여 통과시키고 정

공은 지나가지 못하게 해야 한다. 그렇기 때문에 전자수송층의 LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) 에너지 준위는 페로브스카이트의 LUMO 에너지 준위에 비해 낮거나 같아야 하고, HOMO (highest occupied molecular orbital) 에너지 준위는 페로브스카이트의 HOMO 에너지 준위에 비해 충분히 낮아야 한다. 같은 원리로 정공수송층의 경우는 HOMO 에너지 준위가 페로브스카이트의 HOMO 에너지 준위에 비해 같거나 높아야 되고, LUMO 에너지 준위는 페로브스카이트의 LUMO 에너지 준위에 비해 충분히 높아야 한다.

이러한 관점에서 그림 3의 연구를 예시로 들 수 있다. [10] 다양한 HTL을 CsPbI₂Br 페로브스카이트에 적용하여 나타나는 광전변환효율의 변화를 비교하였다. 그림 3(a)에 나타나있듯이 각각의 HTL은 서로 다른 HOMO 에너지 준위를 가지고 있고, P3HT, PTAA, PF8, PIF8 순으로 점점 CsPbI₂Br의 HOMO 에너지 준위와 가까워진다. 그에 따라 정공의 전압 손실이 줄어들어 그림 3(c)에 나타나듯이 개방전압 (V_{oc})의 증가와 함께 광전변환효율이 상승하였다. 이처럼 전하수송층의 에너지 레벨은 페로브스카이트 태양전지의 광전변환효율에 중요한 영향을 미친다.

2) 도핑 및 첨가제 적용

페로브스카이트에 도핑이나 첨가제를 적용하는 것도 광전변환효율 상승을 위한 중요한 방법이다. 페로브스카이트 결정구조에서 다른 원자나 분자가 도핑되면 격자구조가 팽창되거나 수축

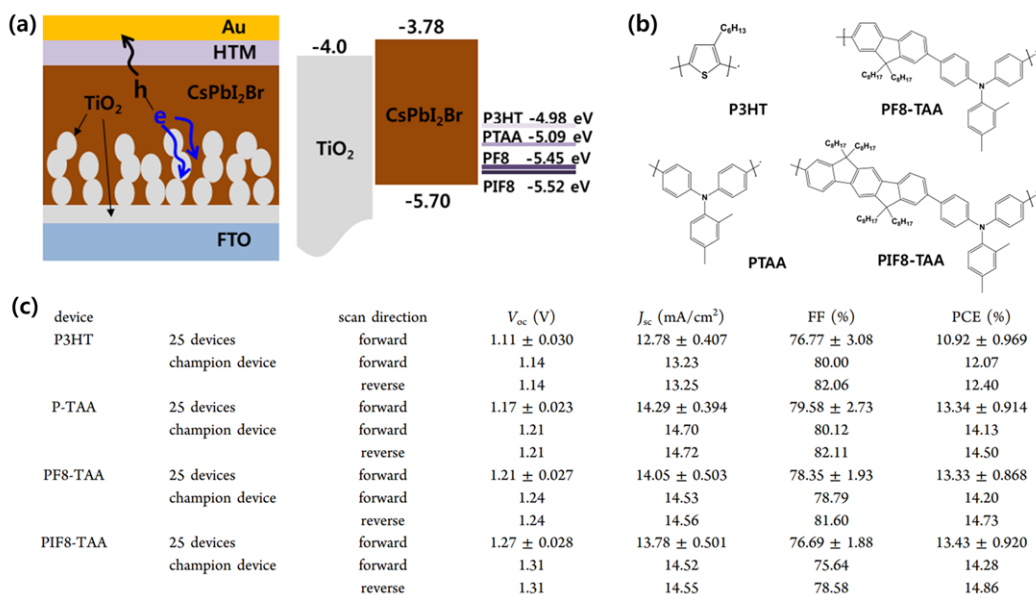


그림 3 (a) 태양전지 구조와 그에 상응하는 에너지 레벨 모식도, (b) 다양한 유기 HTL 화학 구조, (c) 태양전지 성능 평가 결과 [10]

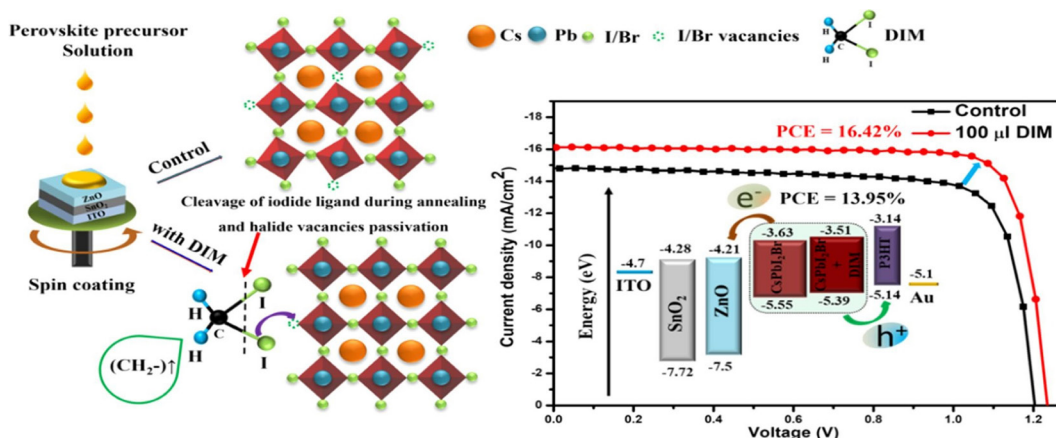


그림 4 DIM 첨가제를 이용한 CsPbI_2Br 결함 제어 연구 결과 [12]

될 수 있다. 그에 따라 페로브스카이트의 에너지 준위 뿐만 아니라 재료의 내재적 특성 등 다양한 요소들이 바뀔 수 있다. 첨가제의 경우도 도핑처럼 격자구조의 변형이 일어날 수 있지만, 페로브스카이트 층의 산화 방지, 결함 제어 등 폭 넓은 용도로 활용된다. 특히 CsPbI_2Br 페로브스카이트의 경우 두 가지 종류의 할라이드 원소가 섞여 있기 때문에 박막 내부 결함이 많으면 빛에 의한 할라이드 분리현상이 가속화될 수 있다. [11] 이러한 현상을 방지하기 위해 첨가제를 도입하여 박막 내부 결함을 제어해줄 수 있다.

첨가제 적용의 예시로 그림 4의 연구를 들 수 있다. [12] CsPbI_2Br

I_2Br 페로브스카이트 전구체 용액에 CH_2I_2 (DIM, diiodomethane)를 첨가하여 I (iodine) 결함을 패시베이션 하여 페로브스카이트 박막 내의 결함을 최소화하였다. 게다가 결함을 패시베이션하고 남은 여분의 알킬기는 페로브스카이트 내부에서 또 다른 결함으로 존재할 수 있는데, 낮은 탄소수의 물질을 사용하여 열처리 과정에서 쉽게 증발되어 최종적인 페로브스카이트 박막 내부에 포함되지 않게 하였다. 이렇게 개선된 페로브스카이트 태양전지의 광전변환효율은 기존 13.95%에서 16.42%까지 상승되었고, 대기 중 안정성 또한 개선되었다. 이처럼 첨가제의 적용은 페로브스카이트 내부결함 제어 등에 중요한 역할을 할 수 있다.

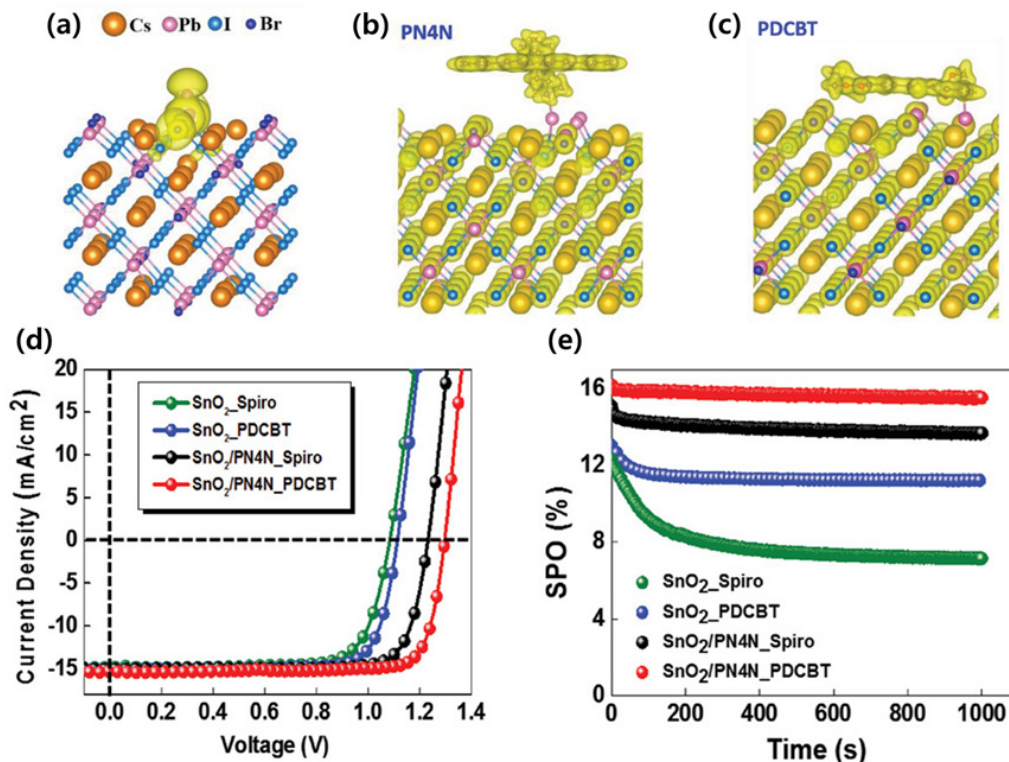


그림 5 (a) 표면 결함이 존재하는 CsPbI₂Br의 전하밀도분포, (b) CsPbI₂Br 페로브스카이트에 PN4N 처리가 되었을 때의 전하밀도분포, (c) PDCBT 처리가 되었을 때의 전하밀도분포, (d) J-V 측정 결과, (e) SPO 측정 결과 [13]

3) 표면 및 계면 제어

앞서 소개한 바와 같이 페로브스카이트 태양전지는 여러 층으로 구성되어 있다. 그만큼 각 층들 사이의 계면이 많이 존재한다는 것이고, 이는 박막 표면의 땀글링 본드 (dangling bond)나 이종접합간의 격자 불일치와 같은 전하가 이동하기 어려운 환경이 형성됨을 뜻한다. 이러한 계면 손실을 억제하기 위해 버퍼층 적용, 자기조립단분자막 적용, 표면 패시베이션 등의 방법을 적용할 수 있다. CsPbI₂Br 페로브스카이트의 표면 및 계면에서의 결함 또한 할라이드 분리현상을 유발할 수 있기 때문에 이러한 결함 제어를 안정성 측면에서도 중요하게 고려해야 한다.

표면 패시베이션의 예시로 그림 5의 연구를 들 수 있다. [13] 그림 5(a)는 표면 결함이 존재하는 CsPbI₂Br 박막 표면의 전하밀도분포를 시뮬레이션 한 것인데, 전자 분포가 표면 결함 주변에 국한되어 이 부분에서 전하가 포획되고 재결합 될 수 있다. 반면에 그림 5(b,c)와 같이 PN4N과 PDCBT가 CsPbI₂Br 표면에 존재하는 경우 강한 결합력으로 인해 표면 결함이 패시베이션 되어

전자 분포의 국소화가 완화되었다. PN4N과 PDCBT를 페로브스카이트 상·하부에 각각 적용하여 태양전지를 제작한 결과 그림 5(d)에 나타나있듯이 광전변환효율이 12.3%에서 16.2%로 상승하였다. 뿐만 아니라, 그림 5(e)의 결과처럼 계면 결함의 감소로 빛에 의한 할라이드 분리현상이 억제되어 상대적으로 일정한 SPO (stabilized power output) 값을 보여주었다.

5. 결 론

본 고에서는 기존의 유-무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지의 열적 불안정성의 단점을 보완한 무기 페로브스카이트 CsPbI₂Br 태양전지에 대해서 살펴보았다. 그 특징으로 간단한 용액 공정으로 박막 제작이 가능하고 대면적 제작이 용이하다. 뿐만 아니라 높은 결정성의 박막 형성을 위한 연구와 전하수송층의 에너지 레벨 매칭, 도핑 및 첨가제 적용, 표면 및 계면 제어 연구를 통해 높은 광전변환효율을 빠르게 달성하여 상용화에 점점 가까

워지고 있다. 하지만 수분에 취약한 특징과 태양광에 의한 할라이드 분리 현상으로 인해 더 많은 후속 연구를 필요로 하고 있는 상황이다. 수분에 대항할 수 있는 패시베이션 물질 개발, 도핑 및 첨가제에 의한 상 안정화, 내부 및 표면 결함의 최소화의 연구가 더욱 활발히 진행된다면 상용화를 향한 장애물들을 극복할 수 있을 것이라고 사료된다.

[참고문헌]

- [1] Sutton, Rebecca J., et al, "Bandgap-tunable cesium lead halide perovskites with high thermal stability for efficient solar cells," *Advanced Energy Materials* 6.8, 1502458, 2016.
- [2] Ding, Yuanjia, et al, "A low-cost hole transport layer enables CsPbI₂Br single-junction and tandem perovskite solar cells with record efficiencies of 17.8% and 21.4%," *Nano Today* 46, 101586, 2022.
- [3] Ma, Tianqi, et al, "The development of all-inorganic CsPbX₃ perovskite solar cells," *Journal of materials science* 55.2, 464-479, 2020.
- [4] Jiang, Yuanzhi, et al, "Reduced-dimensional α -CsPbX₃ perovskites for efficient and stable photovoltaics," *Joule* 2.7, 1356-1368, 2018.
- [5] Lim, Eng Liang, Jinxin Yang, and Zhanhua Wei, "Inorganic CsPbI₂Br halide perovskites: from fundamentals to solar cell optimizations," *Energy & Environmental Science* 16.3, 862-888, 2023.
- [6] Lin, Jia, et al, "Thermochromic halide perovskite solar cells," *Nature materials* 17.3, 261-267, 2018.
- [7] Long, Yi, et al, "Ambient air temperature assisted crystallization for inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells," *Molecules* 26.11, 3398, 2021.
- [8] Mali, Sawanta S., Jyoti V. Patil, and Chang Kook Hong, "Hot-air-assisted fully air-processed barium incorporated CsPbI₂Br perovskite thin films for highly efficient and stable all-inorganic perovskite solar cells," *Nano letters* 19.9, 6213-6220, 2019.
- [9] Chen, Weijie, et al, "Precise control of crystal growth for highly efficient CsPbI₂Br perovskite solar cells," *Joule* 3.1, 191-204, 2019.
- [10] Kim, Do Hun, Jin Hyuck Heo, and Sang Hyuk Im, "Hysteresis-less CsPbI₂Br mesoscopic perovskite solar cells with a high open-circuit voltage exceeding 1.3 V and 14.86% of power conversion efficiency," *ACS applied materials & interfaces* 11.21, 19123-19131, 2019.
- [11] Kuznetsov, Mikhail K., et al, "Enhanced photostability of CsPbI₂Br-based perovskite solar cells through suppression of phase segregation using a zwitterionic additive," *Sustainable Energy & Fuels* 6.15, 3536-3541, 2022.
- [12] Bahadur, Jitendra, et al, "In-situ surface defects passivation with small carbon chain molecules for highly efficient, air-processed inorganic CsPbI₂Br perovskite photovoltaics," *Applied Surface Science* 614, 156229, 2023.
- [13] Tian, Jingjing, et al, "Dual interfacial design for efficient CsPbI₂Br perovskite solar cells with improved photostability," *Advanced materials* 31.23, 1901152, 2019.

저자소개

강동원(Dong-Won Kang)

2007년 서울대학교 전기공학부 졸업
2013년 동 대학교 대학원 졸업(공학)
2013~2015년 동경공업대학 박사후연구원
2015~2018년 청주대학교 조교수
2018년~현재 중앙대학교 부교수
현재 전기재료 C부문의 이사
주 연구분야 : 반도체 재료 및 태양전지 등



이동건(Dong-Gun Lee)

2020년 중앙대학교 에너지시스템공학부 졸업
(공학사)
2020년~현재 동 대학교 대학원 스마트시티학과
(석박통합과정)
주 연구분야 : 차세대 에너지 소재 및 소자 등



이준호(Jun-Ho Lee)

2019년~현재 중앙대학교 에너지시스템공학부
(학사과정)
주 연구분야 : 차세대 에너지 소재 및 소자 등





극한 기후와 외부 충격에 강인한 전력망 구축을 위한 전력망 복원력(Grid Resilience) 평가 및 관리 체계의 필요성

이재걸 책임연구원 | 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소 계통해석팀장



1. 서 론

사전적으로 “복원력(復元力)”이란 물체가 변형되었을 때, 그 물체를 본디의 상태로 되돌리려고 하는 힘이라고 정의된다. 최근 전력망에서도 복원력에 대한 개념이 관심을 받고 있으며 북미 전력회사 중심으로 연구되어 도입 및 활용되고 있다. 최근 우리나라에서도 이상기후 현상과 대규모 재난/재해의 증가로 전력망 복원력(Grid Resilience)의 평가와 관리에 대한 관심도가 높아지고 있다. 본 기고에서는 Grid Resilience에 대한 국/내외 연구 현황을 소개하고 우리나라에 적합한 평가 및 관리 프레임워크를 제안했다.

아래의 표는 북미와 유럽의 전력 관련 기관에서 제시하고 있는 Grid Resilience의 정의를 요약한 것이다[1]. Grid Resilience는 전력회사 또는 기관에 따라서 다소 상이하게 정의하고 있지만 큰 틀에서는 동일한 방향성을 갖고 있다고 할 수 있다. 즉, 외부적인 충격의 발생에 대비한 사전적인 준비, 공급지장이 발생하는 경우 그 피해를 최소화하는 대응, 그리고 피해를 신속하게 회복 및 원상복구 시키는 능력으로 정의가 된다.

아직 우리나라에서 Grid Resilience에 대한 공식적인 정의는 부재한 상태이기 때문에 본 기고에서는 다음과 같은 정의를 제안하고자 한다.

2. 전력망 복원력(Grid Resilience)의 정의

표 1 기관별 Grid Resilience 정의

기관명	Grid Resilience 정의
Electric Power Reserch Institute (EPRI)	Power system resilience in terms of three elements : Prevention, Recovery, and Survivability
North America Electric Reliability Corporation (NERC)	Power system resilience as to prepare and plan, absorb, recover, and adapt to adverse events
United Kingdom Energy Research Center (UKERC)	Power system resilience is the capability of an energy system to tolerate disturbance and to continue to deliver affordable energy service to consumers.

[전력망 복원력(Grid Resilience)에 대한 정의(안)]

(한전 전력연구원, 2024)

저주기 고영향 사건(High Impact Low Frequency Event)에 ① 사전대비(Prevention)하고 HILF 사건의 발생 시 피해를 최소화 할 수 있도록 적절히 ② 대응(Absorb)하며 피해가 발생 시 이를 신속하게 ③ 복구(Restore)하고 정상 상태로 ④ 회복(Recover)할 수 있는 능력. 또한, 일련의 과정에서 축적한 경험을 학습하여 ⑤ 적응(Adapt)할 수 있는 능력

※ 용어의 설명

HILF(High Impact Low Frequency) Event : 자주 발생하지는 않지만 발생하는 경우 큰 영향을 줄 수 있는 사건

(예시: 태풍, 가뭄, 폭우, 폭염 등 이상기후, 지진, 테러 등 재난 상황)

① 사전대비(Prevention) : 사건의 발생 가능성을 예측하고 그 영향을 평가하여 사전적으로 그 영향이 최소화될 수 있도록 취약점을 보강

② 대응(Absorb) : 사건의 발생 시, 피해를 최소화하기 위하여 가능한 수단을 적절하게 활용

③ 복구(Restore) : 사건으로 인해서 발생된 피해를 제거

④ 회복(Restore) : 원래 건전한 계통의 상태(Resilient System)로 복귀

⑤ 적응(Adapt) : 일련의 과정에서 축적한 경험을 학습하여 시스템 및 대응의 취약점을 보완

상기 정의를 좀 더 일반적으로 표현하면 Grid Resilience는 다양한 위험(Hazard)에 대해 전력 공급 체계에서 발생할 수 있는 피해(Risk)를 최소화하고 피해가 발생하는 경우 대응하고 신속하게 피해를 원상복구 할 수 있는 전력망의 능력으로 정의 된다.

3. 신뢰도와 복원력의 개념 비교

현재 전력망의 계획과 운영은 신뢰도(Reliability)를 기반으로 이루어지고 있으나 앞서 언급한 극한의 이벤트(HILF)가 발생하는 경우에 대비하여 전력망에 대한 복원력을 평가하고 대응할 필요성이 있다. 물론 기존 신뢰도 기반의 계통계획과 운영의 필요성이 없어지는 것이 아니며 두 가지 평가 방법을 병행하여 보다 더 강인하고 신뢰성 있는 전력망을 구축할 필요가 있다. 아래의 표는 신뢰도와 복원력의 개념을 간략하게 비교한 것이다.

표 2 전력계통 신뢰도와 복원력 개념 비교표 (한전 전력연구원, 2024)

신뢰도 (Reliability)	복원력 (Resilience)
일정 규모의 설비 고장을 상정하였을 때 전력망이 허용되는 범위 (신뢰도 기준) 내에서 운영 가능 여부를 평가	발생 주기는 낮으나 영향이 큰 극한의 이벤트(HILF)가 발생하는 경우 전력망의 영향과 회복 능력을 평가하는 방법
· 상정 고장 : 설비 이중 고장 (N-2) · 판단 기준 : 전력계통 신뢰도 기준 · 고려 범위 : 전력설비	· 상정 고장 : HILF 극한 이벤트 · 판단 기준 : 피해의 범위 및 지속시간 · 고려 범위 : 전력생산 전 주기 설비

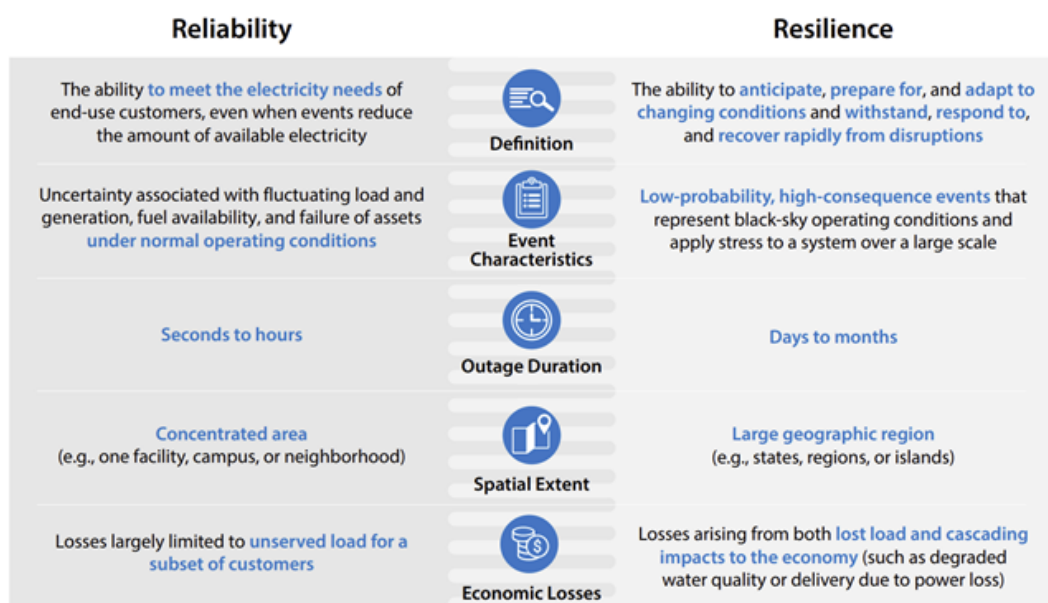


그림 1 전력계통 신뢰도와 복원력 개념 비교표 (미국 NREL, 2023)

아래의 그림은 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 신뢰도와 복원력의 특징을 비교한 자료인데 이를 살펴보면 각 국가의 특성을 반영하고 있기 때문에 우리나라의 특성에 맞게 해석하고 이해할 필요가 있다[2].

신뢰도와 복원력의 검토 범위를 단계별로 비교하면 아래의 그림과 같다. 우선 신뢰도는 사회적으로 합의된 수준의 설비 고장을 상정하고 전력망의 영향을 분석하여 공급지장의 발생 여부 또는 정도까지만을 평가한다. 하지만 복원력은 재난/재해의 발생을 예측하고 이것이 설비 고장에 미칠 영향을 평가한다. 이후 공급지장의 발생 여부와 정도를 평가하는 것은 신뢰도 검토의 범위와 유사하지만 공급지장의 지속과 정전의 복구 그리고 피해에 대한 원상복구까지의 모든 과정을 검토 범위로 포함하는 개념이다.

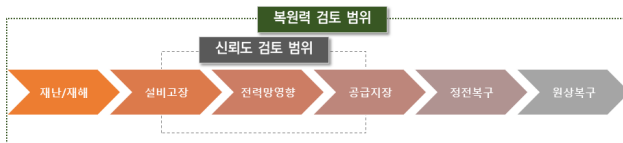


그림 2 전력계통 신뢰도와 복원력 검토 범위(단계별) 비교 (한전 전력연구원, 2024)

신뢰도와 복원력의 검토 범위를 시스템 요소별로 비교하면 아래의 그림과 같다. 우선 신뢰도는 발전소로부터 수송가 직전의 변전소까지를 검토 범위에 포함하고 있다. 하지만 복원력의 경우 연료공급 체계부터 수송가까지 검토 범위가 확장되며 필요에 따라서 통신과 운영 그리고 보안 시스템까지도 포함해야 한다.

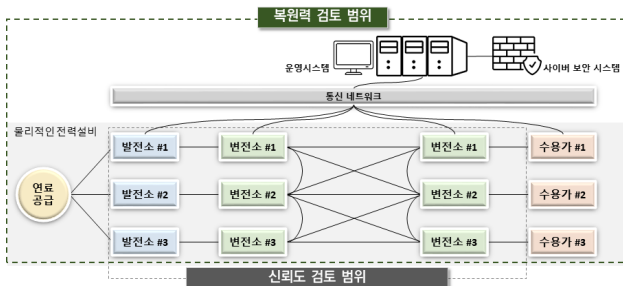


그림 3 전력계통 신뢰도와 복원력 검토 범위(시스템) 비교 (한전 전력연구원, 2024)

이렇듯이 복원력은 신뢰도와는 개념이 상이하며 더욱 넓은 범위를 검토하는 문제로써 향후 신뢰도와 병행 활용함으로써 전력망을 더욱 강인하게 구축, 운영할 수 있게 해주는 개념이다.

4. 전력망 복원력 평가 및 관리의 개념

전력망 복원력을 평가하는 항목과 방식은 국가와 회사별로 운영환경에 따라서 크게 다를 수 있다. 본 기고문에서는 우리나라의 전력망 상황에 적합한 평가 방식을 제안해 보고자 한다. 물론 평가 방법론은 향후 많은 논의를 통해서 결정되어야 하지만 여기에서는 평가 방법에 대한 이해를 위해서 개념적인 접근을 해 보았다.

아래의 그림은 전력망에서 극한의 이벤트가 발생하는 경우 전력망의 성능 저하 속도와 수준, 회복 및 원상복구 속도를 도식화한 복원력 곡선(Resilience Curve)의 예시이다.

기존 연구를 살펴보면 삼각형 모양의 Resilience Metrics(The Resilience Triangle)와 사다리꼴 모양의 Resilience Metrics(The Resilience Trapezoid)를 적용하는 것을 알 수 있다. 이에 우리는 두 가지 Resilience Metrics에 대한 검토를 통해서 전력 시스템의 복원력 평가에 적합한 Resilience Trapezoid를 적용했다[3].

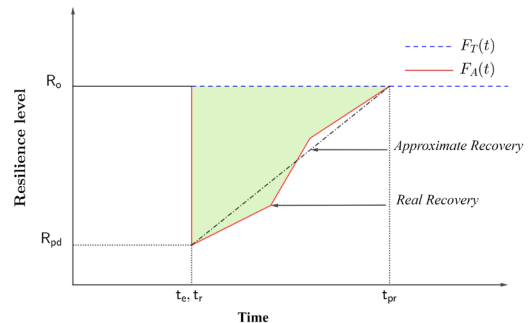


그림 4 The Resilience Triangle 예시

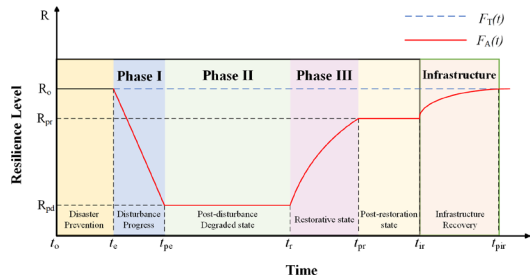


그림 5 The Resilience Trapezoid 예시

Resilience Curve의 가로축은 시간의 변화를 의미하며 세로축은 다양한 전력망의 성능지표를 적용할 수 있는데 여기에서는 전력 공급률로 가정하고 예시를 설명하고자 한다. 여기에서 전력 공

급률은 전력수요량에 대한 공급가능량의 비율을 백분율로 표현한 것이다. Resilience Curve의 A점에서 극한의 이벤트가 발생하여 전력 공급 지장이 일부 발생하게 되면 아래의 그림과 같이 전력 공급률이 B점까지 감소하게 된다. 공급지장이 일정 시간 지속된 이후 C점부터 회복을 진행하면서 전력 공급이 순차적으로 회복되어 D점까지 회복된다. 하지만 근본적인 피해가 원상복구되지 않은 상태에서는 전력 공급률이 100%까지 회복되지 않을 수 있고 설비 피해의 원상복구를 통해서 E점에서 100%까지 전력 공급률을 높여 F점까지 도달하게 된다. A~F까지의 면적이 해당 이벤트에 대한 전력망 복원력으로 정의될 수 있으나 전력망의 복원력을 하나의 지수로 평가하기 어렵기 때문에 Resilience Curve를 이용하여 전력망의 복원력 수준을 표현하는 것이 일반적이다.



그림 6 이벤트 발생 시, 전력망 Resilience Curve의 개념 (한전 전력연구원, 2024)

Resilience Curve를 이용한 전력망 복원력 평가 방법론은 아래의 그림과 같은 관리 체계에서 활용될 수 있다. 우선 극한 기후 조건 등의 HILF 이벤트를 예측하고 이러한 이벤트의 발생 시 전

력망 복원력의 평가를 시행한다. 필요시 설비보강이나 운영 방안 개선 등을 고려하고 이에 따른 전력망 복원력의 기술적 개선 효과를 분석한다. 필요시 개선 방안에 대한 경제성을 고려한 평가를 수행하여 복원력 개선 방안을 선정한다. 이후 이벤트가 발생하는 경우, 실시간 대응의 결과를 학습하는 강화프로그램을 시행하는 선순환 구조의 관리 체계가 필요하다.

NREL은 연구과제를 통해서 군부대에 대한 전력망의 복원력을 평가 관리하는 Guide line을 제시하였다. 우선 Baseline의 복원력 평가를 수행하여 취약점을 정의하며 위험의 수준을 평가한다. 일정 수준의 위험에 대한 극복 전략을 정의하고 상세한 액션 플랜을 수립하며 이벤트의 발생 시 이를 이행하는 일련의 과정을 Guide line으로 제시하고 있다. 이러한 관리 체계는 도시나 국가 단위의 전력망에 대한 활용도 가능한 것으로 설명하고 있다[4].



그림 7 Resilience 관리의 개념 (NREL, 2022)

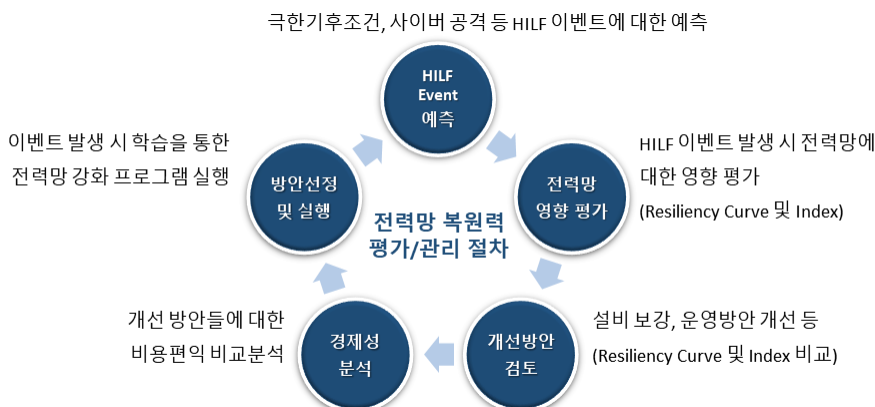


그림 8 Resilience 관리 체계의 개념 (한전 전력연구원, 2024)

전력망 복원력을 실제로 활용하기 위해서는 계획과 운영으로 단계를 구분한 관리 체계의 구축이 필요하며 계획과 운영 단계의 순환구조가 필요하다. 아래의 그림은 이를 고려한 전력망 복원력 관리 체계의 개념을 보여주는 것이다.

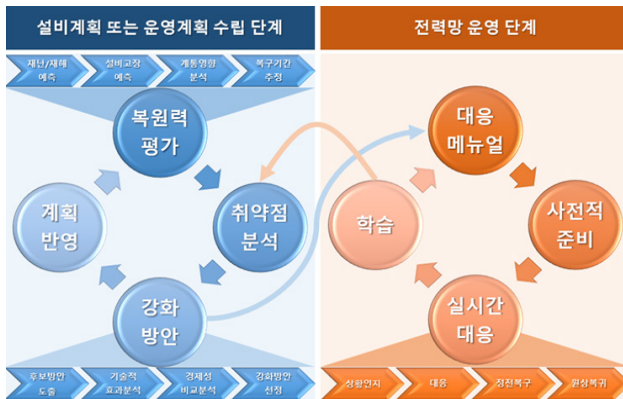


그림 9 설비계획 및 운영 단계에 대한 Resilience 관리 체계의 개념
(한전 전력연구원, 2024)

계획 수립 단계에서 복원력은 재난/재해 예측, 설비고장 예측, 계통영향 분석 그리고 복구기간 추정의 과정을 통해서 평가된다. 이러한 복원력 평가 결과를 기반으로 취약점을 분석하고 필요한 경우 강화 방안을 마련한다. 이때 계획단계보다 운영단계에서의 강화방안이 효율적인 경우 운영단계의 대응 매뉴얼의 개선으로 연계할 수 있다. 이렇게 선정된 강화 방안은 전력설비 확충 또는 운영계획에 반영된다. 운영단계에서는 대응 매뉴얼을 기반으로 사전적인 준비 대응을 수행하고 이벤트가 발생 시 실시간 대응을 위한 상황인지, 대응, 정전복구, 원상복구를 수행한다. 이 과

정에서 학습된 사항은 대응 매뉴얼에 반영되어 강화학습을 진행하는 한편 계획단계의 취약점 분석에도 반영되어 설비확충의 필요성을 검토하는 순환구조를 갖게 된다.

5. 전력망 복원력 평가 및 관리의 필요성

전력망 복원력은 최근 급증하고 있는 재난/재해와 사이버 및 물리적 테러 등의 외부적인 충격 그리고 재생e 비중 증가로 인한 전력망 안정도 여유 저하 등의 원인으로 그 필요성이 강조되고 있다. 최근 전 세계적으로 증가하고 있는 재해/재난이 대규모 전력공 급지장으로 연결이 되고 있기 때문에 신뢰도 기준을 기반으로 한 대응에는 한계가 존재할 수밖에 없기 때문에 전력망 복원력의 평가와 관리의 필요성이 증가하고 있다.

표 3 전력망 복원력의 필요성

원인[Reasons]		해결책[Solutions]
① 재난 / 재해증가	· 이상기온에 따른 자연재난 증가 · 물리적/사이버 테러 위험 증가	Grid Resilience 증대를 통한 강인한 전력망 구축
② 계통 안정도 여유감소	· 재생E 비중 증가로 인한 계통 안정도 저하 · 전력설비 확충지연에 따른 계통안정도 저하	
③ 사회적 책임강화	· "중대재해처벌법" 지정 등 재해와 관련된 사회적 책임과 처벌 강화	

구 분		재난개요	피해규모
산불 태풍	캘리포니아 대형 산불 (2020.7)	■ [발생] 2020년 8월 15일 ■ [지역] 美 서부 캘리포니아 전역 ■ [원인] 고온건조 및 강풍 → 대형화재	- 약 8,500건 화재 발생 (180만 ha) (피해규모 약 \$1조 8080억, 사망자 31명) - 州 전력비상사태선언 → 정전조치 시행
	허리케인 '아이다' (2021.8)	■ [발생] 2021년 8월 29일 ■ [지역] 美 남동부(루이지애나, 뉴올리언스 州) ■ [원인] 지구온난화 → 태풍세력 강화	- 폭우, 홍수 등 추가피해 발생 (67명 사망, 100조원 피해 발생) - 뉴올리언스 전역 62만 가구 정전 발생
이상기온 홍수	호주, 사우스 오스트레일리아 州 폭염 (2023.12)	■ [발생] 2023년 12월 8일 ■ [지역] 사우스오스트레일리아 州 등 ■ [원인] 이상고온 마른번개 100km/h 강풍	- 하루 17건 대형 산불 발생 - 수요증가 → 배전망 과부하 → 정전 발생
	베니스 홍수 (2019)	■ [발생] 2019년 11월 12일 ■ [지역] 이탈리아 북동부 베니스 ■ [원인] 해수면 상승 → 도시 범람	- 수위 상승(해발 1.87m), 도시 85% 침수 (총 10억 유로 피해 추정) - 침수에 의한 감전사고 사망자 발생

그림 10 세계적인 재난/재해 발생 개요

더욱이 2022년도 “중대재해처벌법”이 시행되면서 기업의 사회적 책임이 강화되었으며 전력회사도 안전을 비롯하여 안정적인 전력공급에 대한 의무도 더욱 강화되었기 때문에 강인한 전력망의 구축을 위한 복원력 평가 및 관리 체계의 필요성이 높아지고 있다.

6. 기대효과 및 향후계획

전력망 복원력의 평가 및 관리 체계를 구축함으로써 극한의 재난/재해에 대한 전력망의 대응 능력을 유지하고 피해를 최소화할 수 있다. 또한 발전, 송전, 배전을 비롯하여 연료공급 체계와 통신, 운영 그리고 보안 시스템까지 전체적인 관리를 통해서 더욱 강인한 전력망을 구축할 수 있다. 현재 한국전력공사(KEPCO) 전력연구원에서는 우리나라 환경에 적합한 전력망 복원력 평가 방법론을 연구하고 있으며 관리 체계(안)에 대한 관련된 기관의 의견 수렴 및 다양한 시나리오 개발과 평가를 통하여 그 효과를 입증하는 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

- [1] Lin, J.-H.; Wu, Y.-K. Review of Power System Resilience Concept, Assessment, and Enhancement Measures. Appl. Sci. 2024, 14, 1428. <https://doi.org/10.3390/app14041428>
- [2] NREL, Adapting Existing Energy Planning, Simulation, and Operational Models for Resilience Analysis, TP-6A20-74241, Feb 2020, <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74241.pdf>
- [3] Vega Penagos, C.A.; Díaz, J.L.; Rodriguez-Martinez, O.F.; Andrade, F.; Luna, A.C. Metrics and Strategies Used in Power Grid Resilience. Energies 2024, 17, 168. <https://doi.org/10.3390/en17010168>
- [4] NREL, Designing Resilience for Advanced Energy Systems, FS-5R00-82702, May 2022, <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82702.pdf>

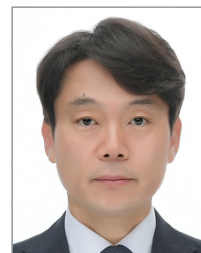
저자소개

이재걸(Jaegul Lee)

2004 인천대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사)
2024 고려대학교 전기전자공학부 대학원 졸업
(공학박)

2004~2010 한전 경영연구소 일반연구원
2010~2019 한전 전력연구원 선임연구원
2019~현재 한전 전력연구원 책임연구원,
계통해석팀장

주연구분야: 전력망 계획 및 운영을 위한 계통해석 등



학회 소식

2024년도 제4차 이사회

일 시 2024년 4월 12일(금) 16:30~17:30

장 소 전기학회 회의실

참석자 이병준, 이준호, 박종배, 이준호, 문승일, 차준민, 홍선기, 김경호, 손진근, 김태욱, 노대석, 최효진, 송화창, 이정호, 허 돈, 차한주, 허 진, 남순열, 주성관, 배성우, 우정욱, 조현중, 최승연, 한경희, 손성용, 정상용, 박재성, 강승택, 김래영, 장길수, 신정훈, 김정수, (감사) 김세호, 장용무

(이상 34명)

주요 회의 내용

1. 신입회원 승인 : 원안대로 승인 함
 - 총 90명 [정회원 40명, 준회원(석사) 19명, 준회원(학부) 20명, 다수년 8명, 제휴 2명, 종신 1명]
 - 총무이사로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
2. 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 임원 변경 건
 - B부문회장으로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 변경 승인함.
3. 기술위원회 신설 승인 요청
 - 기술협의회 위원장으로부터 제안 설명을 듣고 E부문회 산하 LVDC설비 연구회를 LVDC 기술위원회로 신설 승인함.
4. 본부 산하 연구회의 전문위원회 전환(신설) 신청 승인 건
 - 기획정책위원장으로 부터 제안 설명을 듣고 전문위원회 신설 조건에 부합한 전기자동차 연구회의 전문위원회 전환을 승인하고, 부합하지 않은 무선전력전송 연구회의 전문위원회 전환을 부결하며, 부결된 연구회는 기술협의회에서 Joint 기술위원회로의 전환 방안을 검토하기로 함.
 - 발전연구회는 5/30(목)까지 전환에 대한 "확정의견"을 회신받기로 함.
 - 기획정책위원회에서 이사회 상정할 안전에 대한 사전 검토 시 관련 규정에 부합하지 않는 경우 이사회에 상정하지 않는 절차(규정)를 검토하기로 함.
5. 대한전기학회-누리미디어 콘텐츠 개발 및 저작권 계약 완료 : 2024.6.4.~2029.6.3.(5년간)
 - 총무이사로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 인준함.
6. 학회 본부 및 부문회 4월~5월 주요 행사 일정 안내

개최일자	행사명	개최장소
4월	11일(목)~13일(토) [전기설비부문회] 기술위원회 합동 워크숍 및 춘계학술대회	라한 셀렉트호텔 (경주시)
	22일(월)~23일(화) [정보 및 제어 부문회] 2024년 정보 및 제어 심포지엄	롯데리조트 부여
	25일(목)~27일(토) [전기기기 및 에너지변환시스템 부문회] 춘계학술대회	소노벨 천안
	25일(목)~27일(토) [전력기술부문회] 춘계학술대회	소노캄 여수
	25일(목)~27일(토) [산업전기응용부문회] 창립총회 및 춘계학술대회	청풍리조트 레이크호텔 (충북제천)
5월	5월 3일(금) [전기자동차 전문위원회] 워크숍	제주 부영호텔
	20일(월)~22일(수) [교육원] 고장해석과 방향성 보호계전기 정정에 대한 고급과정	과충B1 중회의실7
	5월 31일(금) [전기물성 응용부문회] 전문워크숍 "DC Grid 운영 기술/제품 개발 현황"	한전 전력연구원



학회 소식

회원님의 원고를 기다립니다.

우리 학회 잡지인 「전기의 세계」는 회원 모두가 만들어가는 잡지입니다.
원칙적으로 회원 누구나 자유롭게 기고할 수 있는 열린 저자 체제로 운영하고 있습니다.
다만 원고 모집의 어려움으로 담당 편집위원을 연간 계획과 같이 지정하여 원고를 모으고 있을 뿐
입니다.
특히, 다음 칼럼에 대한 원고를 널리 모집하며 채택된 원고는 소정의 원고료도 드리고 있습니다.

회원소리 : 전기계, 전기학회에 대한 제언이나 느낀 점을 포함한 임의 내용으로 분량은 A4기준 4면
내외입니다.

회원/회원사 동정 : 회원이나 회원사의 동정을 공지하는 난이므로
동정이나 새소식을 보내주세요.

건강/취미 이야기 : 건강이나 취미에 관련된 내용으로
분량은 A4기준 3면 내외입니다.

- **문의처** 대한전기학회 사무국, 송호석
- **전 화** 02-553-0153
- **E-mail** elecjour@kiee.or.kr



학 회 일 지

2024.3.19. ~ 2024.4.18

03.21(목)

제 3 차 학술위원회 (학회 회의실)

03.22(금)

C부문회 2차 이사회 (학회 회의실)

03.26(화)

3차 국문지 편집위원회 (온라인회의)

03.28(목)

I부문회 2차 이사회 (학회 회의실)

04.01(월)

회지 「전기의 세계」 73권 4호(4월호) 발간
전기학회 국문논문지 73권 4호(4월호) 발간

04.02(화)

3차 기술협의회 (온라인회의)

04.05(금)

전기에너지위원회 (학회 회의실)

04.11(목)

E부문 춘계학술대회 04.11 ~ 04.13 (경주)

04.12(금)

본부 4차 이사회 (학회 회의실)
4차 기획정책위원회 (학회 회의실)
KIEE CEO클럽 TF회의 (학회 회의실)

04.15(월)

2차 영문논문지 편집위원회 (온라인회의)

04.18(목)

제 4 차 학술위원회 (학회 회의실)

편집위원

허 진(편집위원장 인천대학교)	이기덕(부위원장 한국전자기술연구원)	조수연(부위원장 한국자동차연구원)	강동원(중앙대학교)
강창목(인천대학교)	강현일(한밭대학교)	노종석(중앙대학교)	민찬식(한국폴리텍대학)
박형준(한국전자통신연구원)	오은성(한서대학교)	유경상(한국에너지기술연구원)	이상봉(영남대학교)
이일무(한국전기기술협회)	임동국(울산대학교)	조춘남(한국폴리텍대학)	



구독 안내

회원 가입 안내

☞ 회원의 구분 및 자격

구분	자격
정회원	① 4년제 대학교를 이수한 분 (박사과정 포함) ② 2~3년제 대학 졸업한 후 실무 경력 2년 이상인 분 ③ 고교 졸업 후 실무경력 4년 이상인 분 또는 전기공학 분야의 학술 및 그 응용에 관하여 상당한 경력이 있는 분
준회원(석사)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학원 전일제 석사과정 재학 중인 분
준회원(학부)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학교 학부생으로 재학 중인 분

☞ 입회비 및 연회비

입회비 및 연회비

구분	입회비	연회비	합계
정회원	15,000원	70,000원	85,000원
준회원(석사)	10,000원	40,000원	50,000원
준회원(학부)	면제	10,000원	10,000원

다수년 회원 및 종신 회원 : 정회원으로써 다수년 회비 또는 종신회비 납부를 희망하는 분

구분	입회비	3년	5년	7년	합계
다수년 회원	15,000원	140,000원	210,000원	350,000원	3년 : 155,000원 5년 : 225,000원 7년 : 365,000원
종신 회원		1,050,000원 [15년분 연회비]			1,065,000원

회원의 혜택

1. 학회지 "전기의 세계" PDF 파일 매달 이용 제공
2. 전자도서관 : 전기학회 국문논문지(통합권), 전기학회 논문지 P권, 영문논문지 2종 (JEET, IJCAS), 학술대회 논문 등 열람 권한 부여
3. 학회 및 유관 기관의 각종 행사 및 주요 소식 등 정보 제공
4. 하계학술대회 및 부문회 춘·추계 학술발표대회와 각종 학술행사에 참가 및 발표기회 부여
5. 대한전기학회 교육원 교육강좌 수강시 회원 자격 부여
6. 전기공학 및 기술발전에 업적이 있는 회원에게 학회상 수여 : 공로상, 학술상, 논문상, 기술상, 표창 등
7. 회원의 학술활동(논문 및 원고)을 학회 발간물에 게재(심사완료 이후) 및 다른 회원에게 홍보할 기회 부여
8. 국내외 학술활동에 관한 정보제공
9. 일정한 자격을 갖춘 회원의 경우 대한전기학회 시니어 회원, 대한전기학회 펠로우(석학)회원 신청자격 부여

회원 가입 절차 및 회비 납부

1. 회원 가입 절차
 - ① 대한전기학회 홈페이지에서 온라인 가입 (<https://www.kiee.or.kr>) → ② 입회비와 연회비 납부 → ③ 이사회에서 신규 회원 승인 → ④ 회원 활동
2. 회비 납부 방법 및 문의처

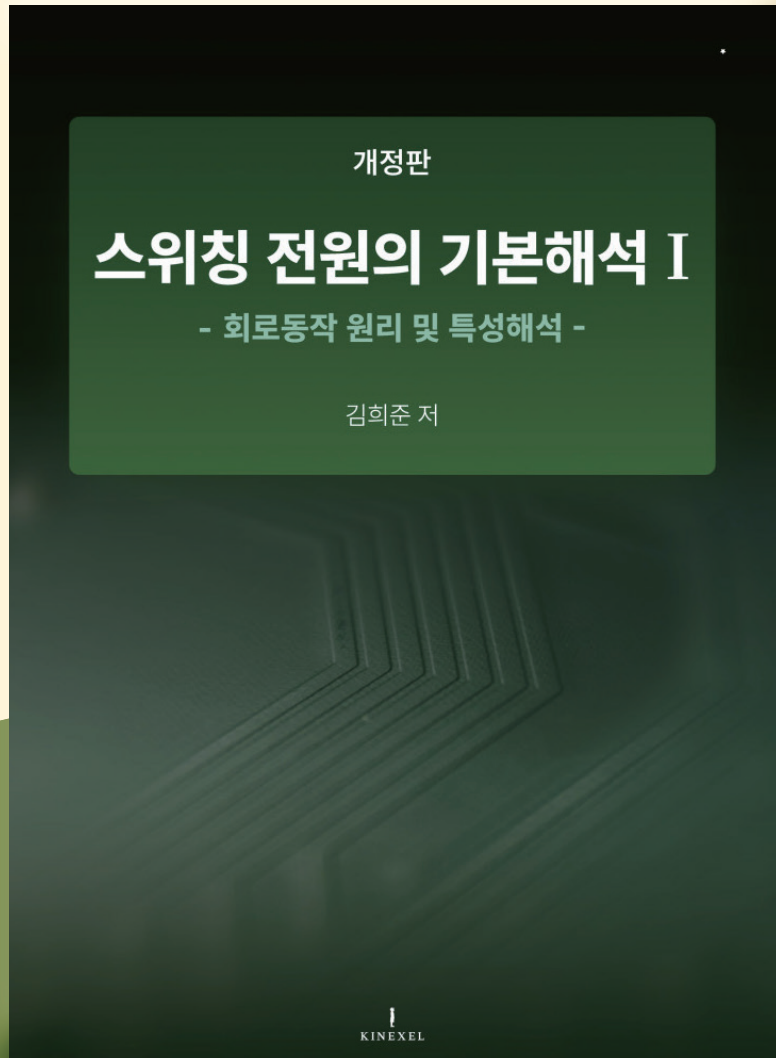
홈페이지 로그인 후 마이페이지에서 입회비 및 연회비 확인 후 결제방법 (카드 또는 무통장) 선택하여 결제 가능

 - ① 카드선택 : 전자결제 등록된 모든 신용카드는 사용가능
 - ② 무통장(온라인 입금) 선택
계좌번호 : 수협은행 1010-2175-5210 / 국민은행 349401-04-009338
예금주 : 대한전기학회
 - ③ 담당 및 문의처 : 경영지원팀 최순례 차장, 02-553-0154, member@kiee.or.kr



학회 소속 è 회원 동정

본회 전임회장이신 김희준 한양대 명예교수님이
“스위칭전원의 기본해석1 개정판”을 출간하셨습니다.
본회 회원님들의 많은 성원과 애독을 부탁드립니다.



자세한 사항은 네이버 검색 창에 “스위칭전원의 기본해석1 개정판”을 입력하면 됩니다.
감사합니다.

NAVER

스위칭전원의 기본해석1 개정판

검색

인간을 중심으로 연구한 공간설계와 최첨단기술,
풍부한 경험을 바탕으로 고객과의 신뢰를 최우선으로 생각하는 기업

(주)진전기엔지니어링 과 함께하십시오

- 전력시설물 종합설계업
- 전력시설물 종합감리업
- 엔지니어링 활동주체 (정보통신)
- 일반소방시설설계업
- 전문소방공사감리업
- ISO9001 인증업체



(주) 진전기엔지니어링
JIN Electrical Engineering Co.,Ltd

04799 서울특별시 성동구 아차산로 17길 49, 데시앙 플렉스 4층 (성수동2가, 280-6)

Tel 02 501 7855 Fax 02 0499 9060

GridSol CUBE

눈에 보여야 개선 할 수 있습니다

- 3D 기반 Digital Twin

설비의 3D 모델링을 통한 가상 현실 구현

- 시스템 통합 관리

각종 설비의 이벤트 감지, 이상 요인 제어, 관리 효율화

- 에너지 관리

에너지 사용 가시화와 낭비 요소의 원인 분석을 통한 최적화

- 중대재해 요소 관리

재난 상황에 대한 스마트 통합 방재 시스템 제공

LSELECTRIC