

ISSN 2734-1437(오프라인)
ISSN 2765-1851(온 라 인)



2022
Vol.3 No.3

GTC FOCUS

태양전지 혁신기술개발 전략과 방향

: 탄소중립 이행을 위한 태양전지 R&D 동향과 연구방향

하수진, 신현우

태양전지 혁신기술개발 전략과 방향

: 탄소중립 이행을 위한 태양전지 R&D 동향과 연구방향

하수진, 신현우

탄소중립, 탄소저감, 태양전지, R&D 전략, 혁신기술

1	서론	05
2	국내·외 환경변화와 태양전지 R&D 동향	07
3	R&D 전략 이행을 위한 주요 태양전지 기술	17
4	결론 및 시사점	33
■	참고문헌	34

요약



1. 개요

- 최근 더욱 심각해지고 있는 기후위기 대응을 위하여 주요 국가들은 탄소중립을 선언하고 경제·산업 구조의 변화와 함께 기후기술 R&D에서 해법을 찾기 위한 도전적 탄소중립 추진전략 발표
- 우리나라는 2050 국가 탄소중립 실현을 위하여 “탄소중립 기술혁신 추진전략(‘21.3)”의 10대 기술에 대하여 중장기 추진 전략을 도출하고 미래 유망 기술들을 제시함
 - 본 연구는 제시된 10대 기술 중, 에너지 전환의 핵심 분야인 태양전지 기술에 대하여 국내·외 연구동향과 국가 R&D 과제 현황 등을 살펴보고 추진전략 이행을 위하여 필요한 기술개발 방향과 주요 이슈들을 분석
- 특히, 태양전지 6대 핵심 기술 개발 방향과 관련하여, 탄소중립 전문가협의체에 참여하였던 태양전지 전문가들의 기술별 구체적인 연구개발 내용과 제언 등을 포함하였음

2. 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 국내·외 태양전지 R&D 동향과 시사점

- 글로벌 탄소중립을 위하여 탄소배출 규제가 강화되고 에너지 전환에 대한 요구가 높아지면서 태양광 발전 비중은 지속적으로 확대되고 있으며 고효율 태양전지에 대한 기술 수요가 더욱 높아짐
 - 세계 태양광 시장의 약 95%를 점유하고 있는 상업용 실리콘계 태양전지의 효율을 뛰어넘을 수 있는 차세대 태양전지 시장을 선점하기 위한 연구개발 추진
 - 국내 2050년 태양광 발전량 목표를 달성하기 위해서는 450GW 수준의 설비가 필요하며, 설치면적을 감소시키기 위하여 보다 높은 효율을 낼 수 있는 태양전지 기술 개발이 더욱 중요
- 차세대 단일접합 태양전지 부문은 20% 중반에 정체되어있는 변환 효율 향상을 목표로 한 고효율 실리콘 태양전지 연구와 함께 페로브스카이트 소재를 활용한 고효율 페로브스카이트 태양전지 연구가 활발히 진행
 - 페로브스카이트 태양전지는 단위 소자 수준에서 25% 이상의 높은 효율을 보이고 있으나 상용화에 진입하기 위해서는 장기 안정성 특성을 조속히 확보하는 것이 필요
- 단일접합 태양전지의 이론적 효율을 초과하는 초고효율 태양전지는 광흡수층을 적층한 탠덤 태양전지 구조를 통하여 구현할 수 있으며 2022년 31.25%(스위스, EPFL 및 CSEM) 효율을 달성한 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 연구가 많은 주목을 받고 있음
 - 다중접합 태양전지는 페로브스카이트-실리콘 탠덤 이외에도 페로브스카이트-무기박막 탠덤과 페로브스카이트 소재만으로 구성된 Si-페로브스카이트 탠덤 태양전지가 차세대 고효율 태양전지의 대안으로 연구되고 있음

- 전 세계 인구의 55%(2018년 기준)가 거주하고 있는 도시의 에너지 사용이 더욱 증가함에 따라, 소비지 인근의 태양광 기반 소규모 분산형 발전 비중을 확대하고 전력 프로슈머 활성화 추진
 - 도심 건물과 차량 등에 적용 가능한 차세대 태양전지 연구가 진행되고 있으며, 유연·경량·투명·다색 등의 특성과 디자인적 요소를 가미한 다기능 신개념의 도시형 태양전지 수요가 증가

3. 태양전지 R&D 추진전략 이행을 위한 기술 개발 방향과 제언

- 차세대 태양전지 R&D의 핵심 추진전략은 기술과 가격 경쟁력에서 우위를 갖기 위한 '초고효율화 달성' 과 신산업 활성화를 위한 '적용처 확대'임
 - 2050 탄소중립이라는 도전적 목표의 이행을 위하여 단기(~'25), 중기(~'30), 장기(~'50)별 추진전략을 수립하고 2030년 탠덤 셀 효율 30%, 2050년 탠덤 셀 효율 40% 이상의 초고효율 달성을 목표로 하고 있음
- 고효율-고안정성 페로브스카이트 태양전지 기술은 세계 최고 수준의 태양전지 기술우위를 지속적으로 유지하고 신시장 기술경쟁력을 확보할 수 있는 상용화 기술개발을 목표로 함
 - 페로브스카이트 소재의 안정성을 향상시키기 위하여 소재의 전자구조 및 에너지 준위를 제어하거나 이종 소재를 활용한 계면 안정화 기술 개발을 집중 추진하는 것이 필요
- 초고성능 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 기술은 이종 소재를 접합한 다중접합 구조로서 실리콘 태양전지의 이론적 효율을 뛰어넘는 30% 이상의 효율과 대면적 상용화 공정 개발을 확보하는 것임
 - 초고효율화를 위하여 소재 밴드갭 및 셀 구조 제어 연구가 중점적으로 추진되고 있으며, 고안정화를 위해서 소재 자체의 안정화 및 봉지 소재 기술 확보가 요구됨
- 초고성능 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지 기술은 다른 다중접합 태양전지와 유사한 수준의 초고효율과 함께 투명성 및 유연성 등의 특성을 갖는 다기능 태양전지를 개발하기 위한 것임
 - 초고효율화를 위하여 밴드갭이 제어된 소재를 합성하거나 계면특성을 제어하는 연구가 추진되고 있으며, 투명성과 유연성을 구현하기 위하여 박막 두께 및 CIGS 구조 제어 연구와 함께 유연기판을 활용한 저온 공정 기술 개발이 필요함
- All-페로브스카이트 탠덤 태양전지 기술은 다양한 밴드갭을 가진 여러 종류의 페로브스카이트 소재를 다중접합하는 공정을 단순화하고 저비용의 초고효율 all-페로브스카이트 태양전지를 개발하는 것임
 - 다양한 밴드갭을 갖는 페로브스카이트 광흡수 박막을 제작하기 위하여 소재 내 원소 조성 변화를 통하여 밴드갭을 제어하고 매칭시키는 공정 개발 필요
- 도시형 태양전지 기술은 설치공간의 제약이 많은 도시환경에 적합한 건물일체형(BIPV), 자동차 일체형(VIPV) 및 소자일체형(DIPV) 등을 중심으로 주요 연구들이 추진되고 있음
 - 유연기판 및 박막 미세공정을 적용하여 유연하면서 투명한 태양전지 모듈을 개발하기 위한 연구들이 추진되고 있으며, 염료감응형 태양전지 이외에도 반투명한 페로브스카이트 및 CIGS 태양전지 등을 적용하는 연구들이 추진

- 탄소배출 저감형 태양전지 소재-공정 기술은 전과정평가(LCA) 관점에서 기존대비 탄소배출을 최소화할 수 있는 소재 공정 기술을 의미하며, 인쇄, 용액 및 저온 공정을 기반으로 한 원천기술 확보를 목표로 함
 - 기존 소자 제작과정에서 에너지 소비가 많은 고온 공정을 줄이면서 쉽게 제작이 가능한 인쇄 및 프린팅을 활용하고자 하고 있으며, 이를 위하여 유·무기 태양전지 소재의 용액 제조 및 코팅 기술 확보가 필요함

4. 결론

- 탄소중립 기술혁신 추진전략의 에너지 전환기술인 태양전지 기술에 대하여 6대 주요 기술별 세부 개발방향을 도출하고 주요 현안에 대하여 고찰하였음
- 세계 최고 기술수준의 고효율 페로브스카이트 태양전지 기술을 상용화하여 기존 상용 실리콘 태양전지의 한계 효율을 극복하고 다양한 구조 및 기능의 태양전지 등에 적용·확대하는 것이 시급함
- 다양한 광흡수층으로 구성된 다중접합 태양전지의 기술개발을 통하여 단일접합 태양전지가 가진 이론적 효율 한계를 극복하고 2050년 40% 이상의 초고효율 탠덤 태양전지 개발하기 위하여 초고효율 및 고안정성이 확보된 최적의 다중접합 탠덤 태양전지 연구 필요
- 에너지 사용이 많은 도시지역에 다양한 기능과 구조를 갖는 신개념 태양전지를 확대·적용하기 위하여 경량·유연 기판의 건물 일체형, 자동차 일체형 및 전기소자 일체형 태양전지 개발을 신속하게 추진하는 것 필요

1

서론

1.1 연구의 배경

▶ 우리나라는 2050년 탄소중립*을 선언하고, '2050 탄소중립 추진전략'을 확정·발표함

* 탄소중립(Carbon Neutrality)은 인간 활동에 의한 온실가스 배출을 최대한 줄이고 남은 온실가스는 흡수·제거해서 실질적인 배출량인 '순배출'이 0이 되는 것을 의미

- 지구 온난화로 폭염, 폭설 등 이상기후가 세계 곳곳에서 나타나고 있으며, 우리나라도 최근 30년 사이에 평균 온도가 1.4°C 상승하여 기후위기 대응 필요성이 더욱 높아지고 있음
- EU를 포함한 세계 약 120여 국가들이 탄소중립을 선언하거나 추진 중이며, 미국도 조 바이든 대통령 취임 직후 파리협정에 재가입하고 2050년 탄소중립을 선언
- 우리나라는 2021년 9월 세계에서 14번째로 탄소중립을 법제화하고 국제사회의 책임있는 일원으로서 탄소중립이라는 세계적 흐름에 동참하고, 기후위기 대응에 적극 참여

▶ 탄소중립 목표 이행은 매우 도전적이며, 우리나라 경제·산업 구조의 특성상 탄소중립 이행을 위한 구조적 변화는 불가피함¹⁾

- 국제사회는 탄소중립 이행을 위해 탄소국경세* 도입, 자동차 배출규제 상향, 탄소세** 인상 등 환경규제를 강화하고 있음
 - * 탄소국경세(Carbon Border Tax)는 온실가스 배출량이 많은 국가에서 적은 국가로 상품·서비스를 수출할 때 추가로 적용되는 무역 관세
 - ** 탄소세(Carbon Tax)는 제품이나 제조 공정 중 탄소를 배출하는 탄소량에 따라 부과하는 세금
- 글로벌 기업·금융사는 RE100*, ESG** 등을 고려한 경영·투자 전략을 확대하고 있음
 - * RE100(Renewable Energy 100%)은 2050년까지 기업이 사용하는 전력량 100%를 태양광·풍력 등 재생에너지 전력으로 충당하고자 하는 글로벌 캠페인
 - ** ESG는 환경(Environment), 사회(Social), 지배구조(Governance)의 약자로, 기업 투자 의사 결정에 사회적·윤리적 가치, 지속가능 투자 등 기업의 비재무적 요소를 함께 고려하는 것
- 우리나라의 2018년 온실가스 배출량인 6억 8,630만 톤을 2050년 0으로 줄이기 위해서는 에너지뿐만 아니라 경제·사회 전 분야에 많은 변화가 불가피하며 매우 도전적 목표임

▶ 탄소중립이라는 도전적 목표의 실질적인 이행을 위해서 주요 기후기술에 대한 중장기 R&D 연구 방향과 추진전략을 수립하는 것이 필요

1) 2050 탄소중립 추진전략, 관계부처 합동(2020)

1.2 연구의 목적 및 범위

▶ 본 포커스에서는 온실가스 감축에 기여하는 주요 유망 기후기술 중 태양전지 분야에 대한 국내·외 R&D 동향을 살펴보고, 향후 기대가 되는 주요 연구주제 및 개발 방향을 고찰

- 국내·외 태양전지 분야의 주요 기술별 환경변화와 기술개발 트렌드를 살펴보고, 국내 기술개발 수준 및 이슈를 분석하고자 함
- 국내 기술 수준 및 주요 이슈를 고려한 태양전지 R&D 전략 및 유망 기술을 제시하고자 함
- 현재 중점 추진되고 있는 국가 R&D 과제들의 연구목표들과 연계하여, 향후 주요 기술별 R&D 과제의 기대성과와 방향성을 고찰하고자 함

2

국내·외 환경변화와 R&D 동향

2.1 글로벌 환경변화와 기술개발 동향

- ▶ 그동안 태양전지는 실리콘 태양전지, 화합물반도체 태양전지, 유기 및 페로브스카이트 태양전지를 중심으로 연구개발 되어왔으며, 효율과 가격경쟁력이 우수한 실리콘 태양전지가 시장의 약 95% 차지
- ▶ 최근 가격과 이론적 효율 한계에 근접한 상용 실리콘 태양전지의 한계를 극복하고 다양한 응용 분야에서 높은 광전 효율을 나타내는 차세대 태양전지 R&D가 활발히 진행
 - (차세대 단일접합 태양전지) 실리콘 태양전지의 구조변화를 통한 모듈의 고효율화 연구와 함께 고효율 페로브스카이트 태양전지의 대면적화 및 장기 안정성 개선을 통한 상용화 추진
 - (초고효율 탠덤 태양전지) 단일접합 태양전지의 이론적 효율 한계를 극복하기 위하여 다른 에너지 흡수대를 가진 다중접합 구조의 초고효율 탠덤 태양전지 연구가 중점적으로 추진
 - (다기능 태양전지) 탄소중립 달성을 위하여 에너지가 필요한 도시 건물, 자동차, 상업 시설 등에 다양한 구조와 형태의 다기능 태양전지를 확대·적용하기 위한 연구 진행

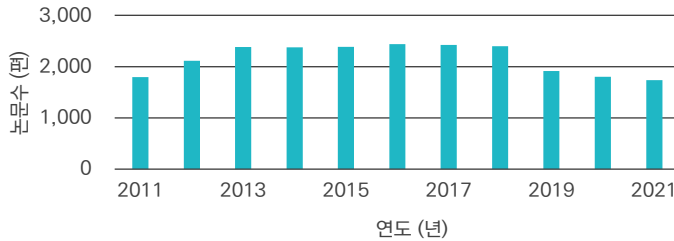
2.2 차세대 단일접합 태양전지

2.2.1 고효율 실리콘 태양전지

- ▶ 1950년대 벨연구소에서 개발된 실리콘 태양전지는 1990년대 중반 이후 머물러있는 20% 중반의 변환효율 향상을 주목적으로 한 고효율 실리콘 태양전지 R&D 추진
- ▶ 그러나 R&D 주요 지표인 논문 게재 편수를 살펴보면, 2013년부터 2018년까지 실리콘 태양전지 관련 논문 게재 편수는 비슷한 수준을 유지하였으나, 2019년부터 최근 3년 동안은 지속적인 감소 추세임²⁾

2) Web of Science에서 Topic:[Silicon solar cell*]로 검색한 결과

[그림 2-1] '실리콘 태양전지'로 검색한 논문 발간 현황('22년 4월 기준)



▶ 실리콘 태양전지의 고효율화 연구는 주로 셀 구조변화를 중심으로 주요국가에서 수행되고 있으며, 제조·생산 비용 절감 및 다기능 관련 연구도 기업과 대학을 중심으로 진행되고 있음

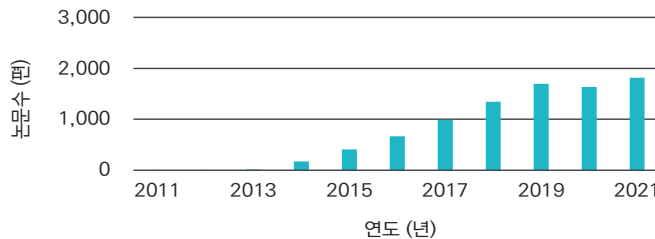
- (일본) Kaneka사 연구소는 고품질의 패시베이션 및 저저항 전극을 개발하고, 전·후면 아키텍처 추가 도입을 통해 결정질 실리콘 태양전지 효율 26.3%를 달성하였고³⁾ 이종접합 후면 전극형 실리콘 태양전지에서는 최고 효율 26.7% 기록을 보유
- (중국) N형 단결정 TOPCon 구조 태양전지를 개발하여 태양전지 효율 25.7%를 달성함⁴⁾
- (독일) ISFH 연구소는 PERC(Passivated Emitter Rear Cell) 구조의 고효율 단결정 실리콘 태양전지의 효율 26.1%를 달성함⁵⁾
- (한국) 박막 실리콘에 미세구멍을 도입하여 유연성과 투명성을 동시에 가지고 있는 실리콘 태양전지를 개발하였으며, 미세구멍에 착색된 고분자 도입을 통해 다색 구현도 가능함⁶⁾

2.2.2 고효율 페로브스카이트 태양전지

▶ 페로브스카이트 태양전지는 연구가 시작된 지 10년 내외의 비교적 신생 연구 분야임에도 불구하고, 소재의 우수한 광전기적 특성으로 인해 단기간에 효율이 크게 향상되는 등 가장 활발히 연구가 진행 중임

▶ 2014년부터 2019년까지 고효율 페로브스카이트 관련 논문 게재 건수가 지속적으로 증가하였으나, 최근 3년 동안은 큰 증감없이 일정한 수준을 유지하고 있음⁷⁾

[그림 2-2] '고효율 페로브스카이트'로 검색한 논문 발간 현황('22년 4월 기준)



3) Nature Energy, Vol 2, Issue 5, p17032 (2017)

4) <https://www.pv-magazine.com/2022/04/27/jinkosolar-achieves-25-7-efficiency-for-n-type-topcon-solar-cell/>

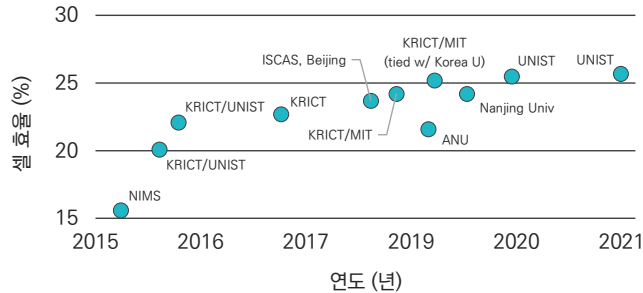
5) Germany's ISFH announces 26.1% efficiency for p-type crystalline cells, PV magazine(2018)

6) 고무수준으로 유연한 컬러 투명태양전지 나왔다, 인더스트리뉴스(2021)

7) Web of Science에서 Topic:[(Perovskite solar cell*) AND (high* near/3 efficiency*)]로 검색한 결과

- ▶ 2019년 페로브스카이트 셀 최고효율이 25%를 달성한 이후 효율 증가폭은 다소 감소하였으나 세계 최고 효율 갱신 주기가 짧고 국내 연구진들에 의하여 최고 효율이 지속적으로 갱신되고 있음

[그림 2-3] 페로브스카이트 태양전지 셀 최고효율 갱신 추이('22년 4월 기준)



출처: NREL(National Renewable Energy Laboratory)

- (중국) 불소 화합물로 처리된 페로브스카이트 소재를 도입하여, 최고 21.5%(면적: 0.09cm²) 셀 효율을 달성함⁸⁾
- (호주) 나노 크기 수준의 패턴이 적용된 전자전달층을 도입하여, 최고 21.6%(면적: 1cm²) 셀 효율을 달성함⁹⁾
- (한국, 미국) KRICT-MIT 공동연구팀은 산화주석을 도입한 전자전달층 및 손실제어 기술을 통해, 최고 25.2%(면적: 0.10cm²) 셀 효율을 달성함¹⁰⁾
- (한국) UNIST 연구팀은 전자전달층과 광흡수층 사이 층간소재를 도입하여 전하·전공 이동도 증가시키고, 최고 25.8%, 공인효율 25.5%(면적: 1cm²) 셀 효율을 달성함¹¹⁾
- (한국) UNIST 연구팀은 전자전달층을 양자점 소재로 대체하여 전자전달층과 페로브스카이트 계면의 전자 손실을 감소하고, 25.7%(면적: 0.08cm²) 셀 효율을 달성함¹²⁾

2.2.3 고안정 페로브스카이트 태양전지

- ▶ 페로브스카이트 태양전지는 단위 소자에서 25% 이상의 높은 효율을 보이거나 상용화에 진입하기 위하여 소재 장기안정성 연구가 중점 추진되고 있음¹³⁾

- 고효율 페로브스카이트 태양전지를 상용화하기 위해서는 태양전지가 설치되는 실외 환경 조건에서 장기적인 효율 안정성을 달성하는 것이 필요
- 페로브스카이트 태양전지의 장기안정성을 저해하는 요인들로는 빛, 열, 수분, 산소 등인 것으로 알려져 있으나, 각 해당 요인들의 작용 메커니즘은 아직 명확히 밝혀지지 않은 상태임¹⁴⁾

8) Nature Energy, Vol 4, Issue 5, p408 (2019)

9) Science, Vol 371, Issue 6527, p390 (2021)

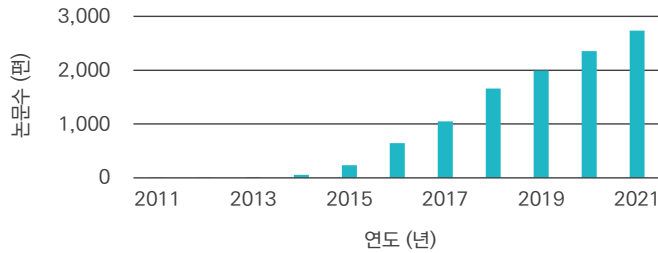
10) Nature, Vol 590, Issue 7847, p587 (2021)

11) Nature, Vol 598, Issue 7881, p444 (2021)

12) Science, Vol 375, Issue 6578, p302 (2022)

13) Web of Science에서 Topic:[(Perovskite solar cell*) AND (stability*)]로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

[그림 2-4] '페로브스카이트 안정화'로 검색한 논문 발간 현황('22년 4월 기준)



▶ 페로브스카이트 소재의 안정성을 향상하기 위하여 소재 및 격자 구조, 신규 층간 소재 개발 등의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내 연구진의 연구가 가장 활발한 분야임

- (중국) 2D 구조의 페로브스카이트 소재를 개발하여 70% RH 조건에서 1,512h, 85°C 고온 조건에서 375h 초기효율을 유지하고, 연속 광조사 1,000h 동안 초기효율 대비 85% 수준의 안정성을 유지함¹⁵⁾
- (유럽) 양이온을 도입하여 페로브스카이트 소재의 결정을 안정화하고, 광 조사 조건 700h 동안 95%, 80°C 고온의 최대 전력 조건에서 500h 동안 84% 안정성을 유지함¹⁶⁾
- (한국, 유럽) 할로겐화 음이온을 도입하여 페로브스카이트 소재 결정성을 향상시키고, 25.6% 소자 효율에서 450시간 안정화 성능을 달성함¹⁷⁾
- (한국) 신규 유기반도체 소재를 개발하여 500h 고습도 조건에서 초기효율 대비 87% 이상의 안정성을 유지함¹⁸⁾
- (한국) 열적 안정성 높은 신규 고분자 전해질을 도입하여 페로브스카이트 박막 표면 및 내부의 이온 결합을 향상시켜 1,000h 동안 85°C 고온 조건, 350h 광 조사 조건, 공기 중 1,500h 노출 조건 등에서 초기 성능을 유지하는 우수한 특성을 나타냄¹⁹⁾

2.3 초고효율 탠덤 태양전지

2.3.1 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지

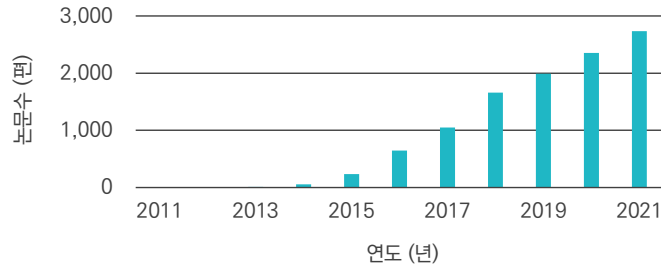
▶ 기존 단일접합 태양전지의 이론적 효율 한계를 극복하기 위해 다중접합 태양전지 연구가 증가하고 있으며, 특히 페로브스카이트-실리콘 탠덤의 이종접합이 최적의 초고효율 탠덤 태양전지 후보로 주목받고 있음²⁰⁾

- 실리콘 태양전지의 광전 효율은 지속적으로 향상되어 26% 이상의 효율 특성을 나타내고 있으나 지난 수년간 노력에도 불구하고 효율을 높이거나 제조 비용을 낮추는 부분에는 한계치에 도달한 상태임²¹⁾

14) Journal of Physics D: Applied Physics, Vol 53, Issue 49, No.493001 (2020)
 15) Nature Photonics, Vol 14, Issue 3, p154 (2020)
 16) Angewandte Chemie-International Edition, Vol 59, Issue 36, p15688 (2020)
 17) Nature, Vol 592, Issue 7854, p381 (2021)
 18) 양창덕 UNIST 교수, 태양전지 상용화 걸림돌 '안정·효율성' 해결, 서울경제(2021)Science, Vol 369, Issue 6511, p1615 (2020)
 19) 페로브스카이트 태양전지 안정성 높였다, 지디넷코리아(2022)Journal of Materials Chemistry A, Vol 10, Issue 7, p3321 (2022)
 20) Web of Science에서 Topic:[(tandem* OR *junction*) AND (solar cell*) AND (perovskite* near/5 Silicon*)]로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)
 21) J. Microelectron. Packag. Soc., Vol 28, Issue 3, p17 (2021)

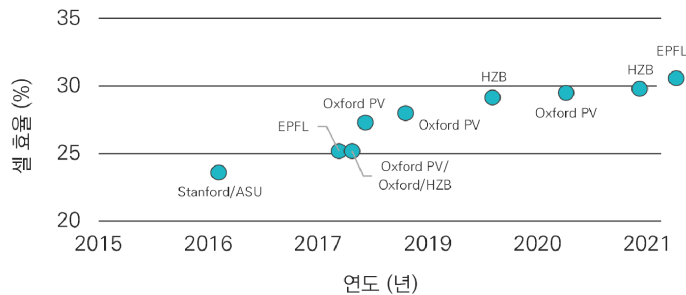
- 효율 한계 극복을 위하여 빛 에너지 흡수대가 다른 페로브스카이트와 실리콘의 광흡수층을 적층하는 탠덤 태양전지의 상업화는 현재 실리콘 태양전지 생산기반을 활용할 수 있어 유리함
- 특히, 탠덤 태양전지의 광흡수층을 구성하는 페로브스카이트 소재는 원소 조성 제어를 통한 밴드갭 조절이 가능하고 저가 공정이 가능한 장점이 있어 많은 연구가 추진되고 있음²²⁾

[그림 2-5] '페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지'로 검색한 논문 발간 현황('22년 4월 기준)



- ▶ 페로브스카이트-실리콘으로 구성된 이중접합 태양전지는 비교적 신생 연구 분야임에도 불구하고, 2016년 23.6% 소자 효율을 달성한 이후 빠른 속도로 효율이 향상되어 2022년에는 31.25% 효율을 달성함

[그림 2-6] 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 셀 최고효율 갱신 추이('22년 4월 기준)



출처: NREL(National Renewable Energy Laboratory)

- (한국) 서울대-NREL-세종대-KAIST 공동연구팀은 페로브스카이트 원소 조성을 제어하여, 26.2% (면적: 1cm²) 셀 효율을 달성함²³⁾
- (중국, 미국) USTC-Colorado 공동연구팀은 페로브스카이트 원소 조성을 제어하여 1.67eV의 와이드 밴드갭 페로브스카이트 소재를 제작하고, 최종 27%(면적: 1cm²) 셀 효율을 달성함²⁴⁾
- (영국) Oxford PV 연구팀은 페로브스카이트 박막 코팅 기술을 활용하여 광전자 활용도를 향상하고, 공인효율 29.5%(면적: 1.1cm²) 셀 효율을 달성함²⁵⁾

22) Bulletin of the Korea photovoltaic Society, Vol 3, No.2, p6 (2017)

23) Science, Vol 368, Issue 6487, p155 (2020)

24) Science, Vol 367, Issue 6482, p1097 (2020)

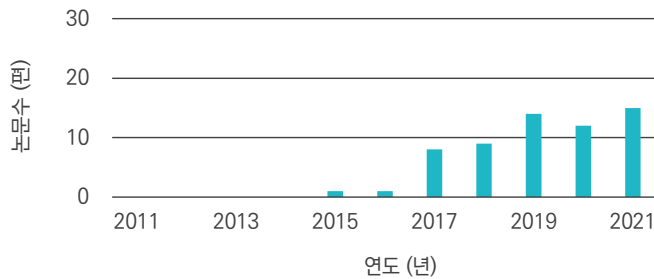
25) Oxford PV's new record efficiency of 29.52% for perovskite silicon tandem solar cell, MERCOM(2021)

- (독일) HZB 연구팀은 나노 패턴이 도입된 전·후면 박막을 도입하여 광전류 및 페로브스카이트 박막 품질을 향상하고, 29.8%(면적: 1cm²) 셀 효율을 달성함²⁶⁾
- (스위스) EPFL과 CSEM 공동연구팀은 페로브스카이트를 질감있는 실리콘 표면에 증착하는 하이브리드 증기 및 액상 용액 기술을 사용하여 1cm² 전지 효율 31.25%를 달성함²⁷⁾

2.3.2 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지

- ▶ 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지는, 유연성, 투광성 및 제조공정 등에서 장점을 가지고 있는 무기박막 태양전지 기반의 이중접합 태양전지로서 향후 다양한 응용분야에서 활용될 것으로 기대됨²⁸⁾
- ▶ 최근 5년간 무기박막 태양전지 상부에 페로브스카이트 태양전지를 접합한 형태의 탠덤 태양전지 논문 총 발간 수는 상대적으로 적은 편이나 점차 증가하고 있는 경향을 보임²⁹⁾

[그림 2-기] '페로브스카이트-CIGS 탠덤 태양전지'로 검색한 논문 발간 현황('22년 4월 기준)



- ▶ 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지의 무기박막으로는 주로 CIGS(Cu(In, Ga)Se₂) 계열의 화합물이 광흡수층으로 사용되고 있으며 물질 조성을 변화시켜 흡수대를 조절하는 연구들이 추진됨
 - Chalcopyrite(CIGS) 화합물은 23% 이상의 효율로 상용화된 고효율 소자 중 하나이나, 지난 몇 년간 소자 효율은 한계에 도달한 것으로 보임³⁰⁾
 - CIGS 및 페로브스카이트 소재는 모두 밴드갭 조절이 가능하여 더 많은 빛을 흡수할 수 있으므로 다중접합 탠덤 태양전지 구현에 적합한 후보군이나, 현재까지 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 대비 효율이 낮음³¹⁾

26) Helmholtz Center achieves 29.80% efficiency for perovskite/silicon tandem solar cell, PV Magazine(2021)
 27) <https://www.pv-magazine.com/2022/07/07/csem-epfl-achieve-31-25-efficiency-for-tandem-perovskite-silicon-solar-cell/>
 28) Bulletin of the Korea photovoltaic Society, Vol 3, No.1, p42 (2017)
 29) Web of Science에서 Topic:[(perovskite* near/5 (cigs* OR Culn* OR In,Ga* OR Se,S*)) AND ((tandem* OR (multi* near/5 *junction*)) AND ((solar cell*) OR photovoltaic*))]로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)
 30) Best Research-Cell Efficiency Chart, NREL (검색일:2020.04.)
 31) Bulletin of the Korea Photovoltaic Society, Vol 3, No. 1, p42 (2017)

▶ **고품질 페로브스카이트 소재 형성 및 층간 소재를 도입하는 기술 등을 통해서, 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지 효율을 향상하기 위한 연구가 수행되고 있음**

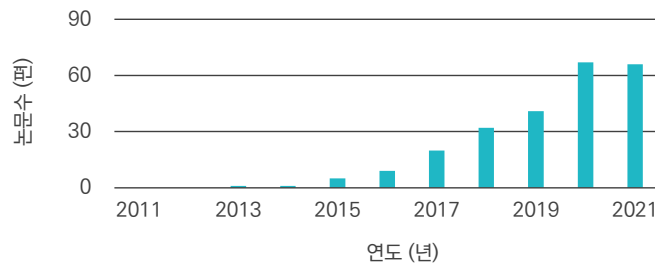
- (미국) UCLA 연구팀은 페로브스카이트 스프레이 분사 공정을 활용하여 박막 페로브스카이트를 포함하는 탠덤 태양전지를 제작하고, 22.4%(면적: 0.04cm²) 셀 효율을 달성함³²⁾
- (독일) HZB 연구팀은 CIGS와 페로브스카이트 소재 사이에 투명한 전도성 소재를 추가 도입하여, 24.2%(면적: 0.7cm²)의 셀 효율을 달성함³³⁾

2.3.3 Si-페로브스카이트 탠덤 태양전지

▶ **페로브스카이트 소재의 조성 제어에 따른 밴드갭 조정 및 박막 증착 기술의 향상으로, 페로브스카이트 소재만으로 이루어진 탠덤 태양전지 연구가 차세대 고효율 태양전지의 또 다른 대안으로 대두되고 있음³⁴⁾**

▶ **Si-페로브스카이트 탠덤 태양전지 연구는 탠덤 태양전지로 대표되는 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 대비 논문 발간 수는 적지만, 2015년부터 지속적으로 논문 발간수가 증가세를 보임³⁵⁾**

[그림 2-8] 'Si-페로브스카이트 탠덤 태양전지'로 검색한 논문 발간 현황('22년 4월 기준)



▶ **밴드갭이 다른 다층 페로브스카이트 박막을 제작하기 위하여 페로브스카이트 소재의 조성 제어 및 이종 소재를 도입하고 있으며, 이를 통해 Si-페로브스카이트 탠덤 소자 효율 향상 및 안정화를 구현하고 있음**

- (중국) 난징대 연구팀은 원소 조성 제어를 통해 전하 확산 길이를 향상시킨 좁은 밴드갭의 페로브스카이트 소재를 도입하여, 24.8%(면적: 0.05cm²) 셀 효율을 달성함³⁶⁾
- (중국) 난징대 연구팀은 이종 소재 도입을 통해 하부 페로브스카이트 태양전지를 안정화하고, 20.7% 셀 효율과 500h 동안 초기효율 대비 88% 수준의 소자 안정성을 달성함³⁷⁾
- (미국) UNC-ASU 공동연구팀은 탄소로 구성된 이종 소재를 전자전달층에 도입하고, 24.4% 셀 효율과 1,000h 동안 초기효율 대비 94% 수준의 소자 안정성을 달성함³⁸⁾

32) CIGS/perovskite solar cell by UCLA reaches 22.4% efficiency, Perovskite-info(2018)

33) New record efficiency for CIGS tandem solar cells, STROM-FORSCHUNG(2020)

34) Bulletin of the Korea Photovoltaic Society, Vol 3, No. 1, p42 (2017)

35) Web of Science에서 Topic:([all* near/5 perovskit*] AND ((tandem* OR (multi* near/5 *junction*)) AND ((solar cell*) OR photovoltaic*)))로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

36) Nature Energy, Vol 4, Issue 10, p864 (2019)

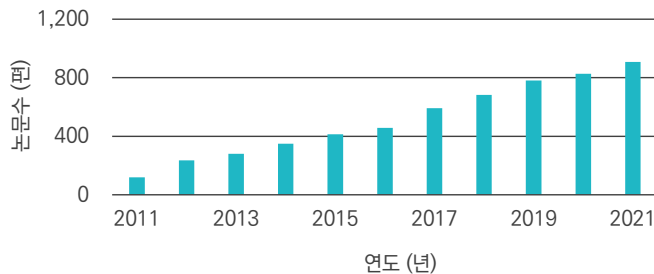
37) Nature Energy, Vol 5, Issue 11, p870 (2020)

38) Nature Energy, Vol 5, Issue 9, p657 (2020)

2.4 다기능 태양전지

- ▶ 신재생에너지 생산이라는 고유의 기능 이외에 단열, 디자인 등의 특성이 향상된 다기능 태양전지들의 적용분야가 점차 확대될 것으로 예상됨
- ▶ 특히, 인구 및 건물이 밀집되어 에너지 수요가 높은 도심 지역을 중심으로 친환경 에너지원인 도시형 태양전지를 확대 활용하고자 하는 많은 시도가 이루어지고 있음
- ▶ 도시형 태양전지로 대표되는 건물형, 자동차형 태양전지로 검색한 논문을 살펴보면, 2011년부터 다른 태양전지 대비 비교적 오랫동안 꾸준한 연구 활동 증가세를 보임³⁹⁾

[그림 2-9] ‘건물형 태양전지’, ‘자동차형 태양전지’로 검색한 논문 발간 현황(‘22년 4월 기준)



- ▶ 건물과 차량에 적용할 수 있는 유연·경량 소재, 투명·다색 소재의 기술을 개발하거나, 섬유와 직물 등의 형태로 태양전지로 구현하는 등 다양한 기능과 특성을 나타내는 다기능 태양전지 기술개발이 이뤄지고 있음
 - (미국) 페로브스카이트 박막에 마이크로 수준의 기공을 도입하여 다양한 색상을 가지면서도 투명한 페로브스카이트 태양전지 소재를 개발함⁴⁰⁾
 - (중국) 이종 소재를 도입하여 페로브스카이트 결정화 속도 및 결정 입자 크기를 조절하여 유연 페로브스카이트 태양전지 효율을 향상하는 기술을 개발함⁴¹⁾
 - (중국) 스탬핑 방식으로 패터화된 페로브스카이트 소재를 기반으로 다양한 색상의 페로브스카이트 태양전지 기술을 개발함⁴²⁾
 - (중국) 섬유 형태의 전극을 엮은 직물 구조물의 유연 전극에 페로브스카이트를 증착하여, 입을 수 있는 직물 형태의 유연 태양전지를 개발⁴³⁾

39) Web of Science에서 Topic:[(building* near/1 integrat*) AND ((solar near/1 cell*) OR photovoltaic*)] OR bipv*] 또는 Topic:[(vehicl* OR automobil* near/1 integrat*) AND ((solar near/1 cell*) OR photovoltaic*)] OR vipv*]로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

40) Journal of Materials Chemistry C, Vol 3, Issue 21, p5377 (2015)

41) Advanced Materials, Vol 30, No. 1801418 (2018)

42) Advanced Materials, Vol 33, No. 2008091 (2021)

43) Nano Energy, Vol 71, No. 104609 (2020)

- (한국) 페로브스카이트 박막에 나노 수준의 구조체를 도입하여 투명도가 조절된 페로브스카이트 태양전지 기술을 개발함⁴⁴⁾
- (한국) 두께가 매우 얇은 유리 기판을 도입하여, 유연성과 투광성을 동시에 가지는 양면수광형 CIGS 박막 태양전지 기술을 개발함⁴⁵⁾

2.5 국내 태양전지 R&D 주요 이슈 및 시사점

▶ 국내 2050년 탄소중립 목표 달성을 위한 태양광 발전 비중 확대 목표는 매우 도전적임

- 2050년 탄소중립 시나리오 최종안의 발전원별 발전량에 따르면, 재생에너지 발전량은 736~890TWh으로 예상되며, 전체 전력 발전량의 61~71%를 차지하는 매우 높은 수준임⁴⁶⁾
- 2050년 태양광 발전량 목표를 달성하려면 450GW 수준에 달하는 설비가 필요하나⁴⁷⁾ 이는 30년간 현재 설비 용량(2020년 기준 15.9GW) 수준의 태양광 설비를 매년 설치하는 수준임⁴⁸⁾
- 태양광 기술개발 측면에서, 설비의 설치면적을 감소하면서 높은 효율을 낼 수 있는 태양전지 기술에 대한 중요성이 더욱 높아질 것으로 전망됨
- 전 세계 탄소배출 규제와 에너지 전환에 대한 요구가 높아지면서 기업의 생존을 위해 ESG 경영 및 RE100 참여가 확대되고 있음

▶ 중앙집중식 전력공급 시스템의 불필요한 사회적 비용을 줄이고 소비지 인근의 소규모 분산형 발전 비중을 확대하여 전력 프로슈머의 활성화 추진

- 한계에 다다른 중앙집중식 전력공급 송전망의 추가 설치 없이 전력 소비지 지역단위에서 태양광 기반의 소규모 분산형 발전을 확대·공급하여 전력 자급률을 개선해나고 있음
- 신재생에너지 기반의 전력 프로슈머 확대를 위하여 가정·건물용 태양전지 보급 확대, 차량 및 생활밀착형 태양광 발전 도입, 전력중개시장 활성화 등의 추진 필요
- 태양광 발전의 간헐성에 따른 전력공급 시스템 불안정성 문제와 전기요금 추가 인상에 대한 개선 방안 마련 필요

▶ 현재 세계 태양광 시장은 실리콘계 태양전지의 점유율이 약 95% 수준이나, 중국의 실리콘 소재 및 모듈의 저가 공세로 인하여 국내 기업의 가격경쟁력은 더욱 낮아지고 시장경쟁력 감소 위험에 직면

- 가격경쟁력 측면에서 어려움에 직면한 단일접합 실리콘 태양전지 분야를 벗어나, 기술경쟁력 기반의 신규 고효율 태양전지 신시장을 개척·선점할 필요가 있음
- 향후 국내 태양광 기업은 기존 실리콘 제조 인프라를 활용할 수 있는 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지를 우선으로 한 다중접합 태양전지 기술개발에 집중할 것으로 전망됨

44) Advanced Energy Materials, Vol 6, No. 1601055 (2016)

45) KIER, 차세대 차호용 태양전지 기술로 그린 뉴딜의 방향 제시, 한국에너지기술연구원 공식블로그(2020)

46) 2050 탄소중립 시나리오, 2050 탄소중립위원회(2021)

47) 2050년엔 무탄소 사회 목표, 태양광·풍력 3%→50%, 조선일보(2021)

48) Renewables 2021 Global Status Report, REN21(2020)

- 장기적으로 고안정성 페로브스카이트 소재 기반의 태양전지 생산 및 가격경쟁력 확보가 중요할 것으로 예상됨

▶ **페로브스카이트 태양전지, 탠덤 태양전지 등 차세대 태양전지 연구개발에 투자 중이나, 상용화를 위하여 필요한 기술 미확보**

- 국내 페로브스카이트 태양전지 분야 기술수준은 세계 최고 수준으로 매우 높으나, 상용화를 위한 대면적화 및 안정화 기술의 성능 향상이 필요함
- 초고효율 탠덤 태양전지 분야는 국외 주요국 대비 핵심 원천기술의 확보가 미흡한 편임

▶ **전력 소비가 큰 도심 지역을 중심으로 다기능 신개념의 도시형 태양광 발전 수요 증가**

- 기존 실리콘 태양전지의 색상, 형태, 무게 등의 단점을 극복할 수 있는 다기능·다목적의 태양전지 기술 수요가 점차 증가
- 특히, 도심 건물, 차량, 생활건축물 등의 유휴공간에 적용하기 위해 디자인적 요소가 고려된 투명, 다색, 경량, 유연한 특성의 태양전지 기술 확보가 더욱 중요해짐
- 장기적으로는 저탄소 LCA를 달성할 수 있는 신규 태양광 소재 및 신개념 제조공정에 대한 선제적인 R&D 투자 필요

3

R&D 전략 이행을 위한 주요 태양전지 기술

3.1 R&D 전략 방향

- ▶ 최근 글로벌 기후위기 문제에 공동 대응하고 2050 탄소중립 이행을 위하여 정부는 10대 핵심 기술을 선정하고 기술개발 달성 전략⁴⁹⁾을 마련함
 - 10대 핵심기술 분야에는 태양광 및 풍력, 수소, 바이오에너지, 철강·시멘트, 석유화학, 산업공정 고도화, 수송 효율, 건물 효율, 디지털화 및 CCUS 등이 포함
 - 차세대 태양전지 R&D는 에너지 전환 부문의 큰 축을 담당하고 있는 태양광 분야의 핵심 기술개발 분야로서 탄소배출을 크게 저감 할 수 있는 기술경쟁력 확보와 신산업도출을 목표로 함
- ▶ 2021년 ‘탄소중립 연구개발 투자전략’에서는 기술과 가격 경쟁력에서 앞서 나가기 위하여 차세대 태양전지의 ‘초고효율화’ 및 신산업 활성화를 위한 ‘적용처 확대’를 주요 R&D 추진 전략으로 계획함

[그림 3-1] 탄소중립 기술혁신 추진전략의 태양광 기술개발 전략

태양광 기술개발 전략					
중분류	현 수준	단기(~'25)	중기(~'30)	장기(~'50)	목표
초고효율 태양전지	태양전지 효율 ~26.7%	탠덤 셀 초격차화	탠덤 셀 초고효율화		(30) 탠덤 셀 효율 35%, 고출력·고내구성 대면적 모듈
	모듈 효율 ~21%	모듈 장기안정성/고내구성 확보		상용화 적용	(50) 탠덤 셀 효율 40% 이상
태양광 시스템	수상태양광 시스템 설치단가 13.5억 원/MW	수상/해상 태양광 시스템	내구성 및 경제성 확보		(30) 수상태양광 설치단가 4억 원/MW (50) 수상태양광 설치단가 2.7억 원/MW
탄소중립 도시형 태양광	유연 태양전지 효율 ~20%	경량/유연/다색/반투명/고감도 태양전지 고효율화 (무기박막, 유무기 페로브스카이트, 유기 등)			(30) 초경량 유연 탠덤 셀 효율 30%
		고집적 기능성 모듈 개발	사업화		(40) 초경량 유연 탠덤 셀 효율 35% (40) 고집적 고내구성 모듈

■ 정부의 집중지원이 필요한 기간

49) 탄소중립 기술혁신 추진전략, 과학기술정보통신부(2021)

- ▶ 2050 탄소중립이라는 도전적 목표의 이행을 위하여 단기, 중기, 장기별 추진전략을 수립하고 특히 기술경쟁력이 우수한 차세대 태양전지 소재 및 탠덤 구조의 신규 공정 개발에 집중함
- ▶ 세계 최고 수준의 페로브스카이트 태양전지 기술우위를 지속적으로 유지하고, 이를 바탕으로 신시장 기술경쟁력을 확보할 수 있는 상용화 기술개발을 추진
 - 기존 실리콘 태양전지의 한계 효율을 뛰어넘는 페로브스카이트 소재 기반의 태양전지 공정기술을 개발하여 고효율과 장기 안정성을 갖는 대면적 페로브스카이트 태양전지 상용화 달성
- ▶ 단일접합 태양전지의 이론적 효율 한계를 극복하고 빛의 다양한 파장을 활용하기 위해서 다양한 밴드갭을 가지는 흡수층 소재연구를 포함한 다중접합 태양전지 연구개발이 필수적임
 - 국내 우수한 페로브스카이트 태양전지 기술력을 바탕으로 다중접합용 다양한 밴드갭을 갖는 상·하부셀 소재, 층간 소재, 다중접합 공정기술, 소자 장기안정성 구현 등 원천기술 확보 추진
- ▶ 신재생에너지 기반의 에너지 생산 확대를 위하여 전력 수요가 많고, 설치공간의 제약이 많은 도시 지역의 도시형 태양광 기술개발 및 실증 연구 확대 필요
 - 다양한 흡수층(유기박막, 무기박막, 페로브스카이트 등)을 기반으로 다목적·다기능(경량, 유연, 투명, 다색, 디자인 등) 태양전지 개발과 함께 적용 분야 확대를 위한 소자, 모듈, 시스템 개발 필요
- ▶ 탄소중립과 태양광 기술혁신 추진전략의 이행을 위한 주요 차세대 태양전지 기술 개발 방향은 크게 6가지 분야로 나누어짐(기존 단일접합 실리콘 태양전지의 고효율화 기술 미포함)
 - (1) 고효율-고안정성 페로브스카이트 태양전지 기술
 - (2) 초고성능 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 기술
 - (3) 초고성능 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지 기술
 - (4) AI-페로브스카이트 탠덤 태양전지 기술
 - (5) 도시형 태양전지 기술
 - (6) 탄소배출 저감형 태양전지 소재·공정 기술

3.2 주요 태양전지 기술

3.2.1 고효율-고안정성 페로브스카이트 태양전지 기술

3.2.1.1 기술 정의

- ▶ 기존대비 우수한 효율과 열·빛·습도·산도 등 외부환경에서 장기안정성을 동시에 갖는 페로브스카이트 태양전지 및 이와 관련된 기술

3.2.1.2 R&D 추진전략

- ▶ (고효율) 세계 최고 수준의 고효율 페로브스카이트 태양전지 기술을 상용화하여 이론적 효율 한계치에 다다른 기존 상용 실리콘 태양전지의 효율 한계를 극복
- ▶ (고안정성) 페로브스카이트 소재의 안정성과 내구성 문제를 개선하고 대면적에서 균일한 특성을 갖는 최적화 페로브스카이트 제조 공정 개발

3.2.1.3 추진전략 관련 국내 연구개발 현황

- ▶ 2022년 4월 기준 고효율 페로브스카이트 태양전지 기술 관련 연구개발과제는 과기부(과학기술정보통신부) 개인기초연구를 통해 5개 내외의 과제가 지원되고 있음⁵⁰⁾
- ▶ 페로브스카이트 태양전지의 고효율화를 위한 연구개발 방향은 소재 자체의 물성을 개선하거나 물질 간 계면특성을 제어함으로써 특성 향상을 목적으로 함
 - (울산과학기술원) 페로브스카이트 소재의 구조·결함·조성 제어, 전자 및 홀 전달체와의 계면 제어를 통해 최종 25% 이상의 셀 효율 달성을 목표로 함
 - (한밭대학교) 페로브스카이트 소재의 상전이 현상을 분석하고, 고효율-고내구성 모델을 수립 및 소재 개발을 목표로 함
 - (성균관대학교) 페로브스카이트 소재의 다양한 결함 원인을 규명·제어하여 소재 한계 물성을 구현하고, 최고 23% 수준의 셀 효율 달성을 목표로 함
 - (상명대학교) 신규의 정공 전달층 및 2D 물질 개발을 통해 24%(면적: 0.5cm² 이하) 셀 효율 달성을 목표로 함
- ▶ 고안정성 페로브스카이트 태양전지 관련 과제는 과기부의 개인기초연구를 통해 다수 지원되고 있음⁵¹⁾

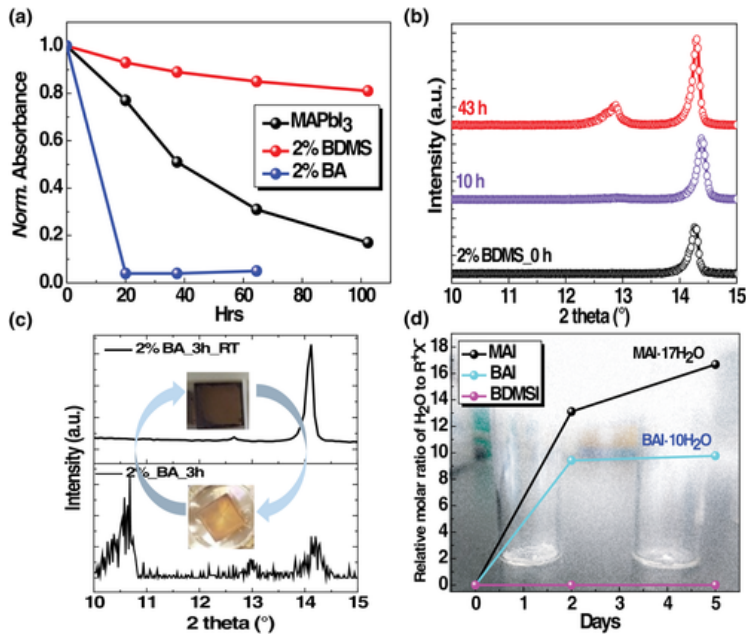
50) NTIS(국가과학기술지식정보서비스)에서 기준년도 2020년~2022년, 과제규모 1억원 이상으로 검색한 결과 (검색일:2022.04.)

51) NTIS에서 기준년도 2020년~2022년, 과제규모 1억원 이상으로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

▶ 페로브스카이트 태양전지 안정성을 향상시키기 위한 주요 연구 방향 중 하나는 페로브스카이트 소재 자체의 전자구조 및 에너지 준위 제어를 통해 안정화 특성 개선임

- (울산과학기술원) 양이온으로 안정화된 페로브스카이트 소재를 도입하여 밴드갭 및 격자 변형을 제어함. 이에 85°C 온도 조건에서 1,300h 동안 초기효율 대비 80% 안정화 성능을 달성함

[그림 3-2] Sulfonium 양이온이 도입된 페로브스카이트 수분 안정성 시험 결과



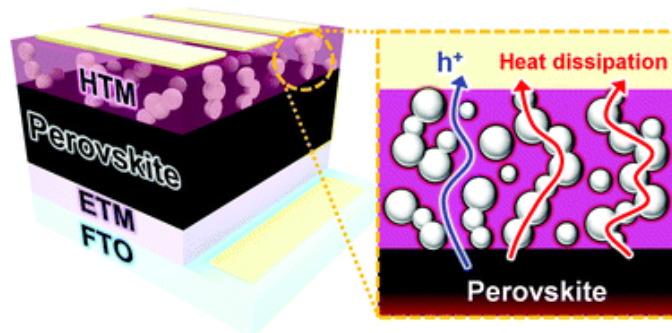
출처: 페로브스카이트 태양전지의 고신뢰성 확보를 위한 요소기술 개발 최종보고서, 울산과학기술원(2020)

- (성균관대학교) 도핑, 결정립, 에너지 밴드 제어 등의 기술 적용을 통해 85°C/85% RH 환경 테스트 및 소자 안정성(1,000h 광 조사 조건, 초기효율 대비 95% 유지) 성능 달성을 목표로 함
- (인하대학교) 격자 스트레인 제어를 통해 24% 이상의 셀 효율을 가지면서, 태양전지 구동 조건 기준 1,000h 동안 초기효율을 유지할 수 있는 고안정성 달성을 목표로 함
- (경희대학교) 페로브스카이트 박막의 전자구조 및 에너지 준위 제어, 산화 방지 기술 등을 통해 대기조건 및 고습도(~60%RH) 조건에서 제작 가능한 페로브스카이트 박막 조성 및 공정 조건 개발을 목표로 함

▶ **안정화와 관련하여, 또 다른 연구개발 방향은 페로브스카이트 소재 외 고안정성 소재를 개발·도입하거나, 이종 소재의 계면 안정화 기술개발임**

- (포항공과대학교) 고이동-고안정 정공전달층 도입을 통해 1,000h 광조사 조건에서 초기효율 대비 80% 안정화 성능을 달성함

[그림 3-3] 열전도 소재를 도입한 페로브스카이트 태양전지 모식도



출처: Energy Environ. Sci., Vol 13, p5059 (2020)

- (서울대학교) 전자전달층과 페로브스카이트 계면의 결합 제어, 고안정성 정공전달층 개발, 페로브스카이트-정공전달층 계면 열화 제어 등을 통해 고효율 및 고안정성을 동시 확보하는 소자 개발을 목표로 함
- (울산과학기술원) 패시베이션 및 건식증착 기술 적용, 전자전달층 개발 등을 통하여 고안정성 소재 및 소자 제작을 목표로 함
- (광주과학기술원) 금속접착층을 도입하여 전자전달층과 전극 사이의 전기적 결합을 향상해 소자 수분안정성을 증대함. 이에 대기(25°C/20~40% RH) 조건에서 200일 동안 초기효율 대비 90% 성능을 달성함
- (한국과학기술원) 소자 구성에 활용되는 이종 소재의 접합 계면 안정화를 통해 열적-기계적, 광안정성을 지는 고성능 페로브스카이트 태양전지 개발을 목표로 함
- (한밭대학교) 광흡수층 안정화 인자를 도출하고, 관련 모델링 플랫폼 및 코팅 기술을 개발함

3.2.1.4 추진전략 이행을 위한 연구 방향 및 제언

▶ **페로브스카이트 태양전지 고효율화 연구**

- 밴드갭 제어를 통하여 광흡수를 최대화할 수 있는 최적의 페로브스카이트 박막 개발
- 고효율 광흡수막 형성을 위한 패시베이션 및 첨가제 개발

▶ **페로브스카이트 태양전지의 안정성 향상**

- 소재 자체의 안정성 개선 및 소자 제조 공정에서 유발되는 박막 및 계면 결함 최소화

- 결함 유형별 패시베이션 개선 및 관련 메커니즘 확보
- IEC 61646 및 실외환경 조건에서 대면적 서브모듈의 장기 안정성 확보

▶ 페로브스카이트 태양전지의 대면적화

- 소재의 조성, 차원 및 결정성 제어 기반의 대면적 건식 및 습식 공정 개발
- 대면적 박막 형성 시 핀홀 등의 결함 최소화 및 고품질 박막 형성 기술

▶ 페로브스카이트 박막의 결함과 효율과의 상관관계 도출

- 박막 코팅 및 레이저 식각 공정 등에서 발생하는 페로브스카이트 결함 측정·분석 및 진단
- 페로브스카이트 소자 내 결함 여부와 효율간의 상관관계 수치화

▶ 고효율-고안정성 페로브스카이트 모듈 개발

- 모듈화 공정에서 발생하는 효율 저하 요인을 파악하고 열화 최소화 및 모듈 최적화 공정 개발
- 단위 소자 고효율화 및 계면 안정화 기술을 기반으로 대면적 모듈 제작

▶ 외부 요인에 의한 페로브스카이트 태양전지의 열화 가속화 메커니즘 확립

- 실제 가동 환경에서의 열화 여부 관찰을 통한 모듈 안정성 연구
- 외부요인 별 열화 가속화 여부 관찰 및 분석

3.2.2 초고성능 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 기술

3.2.2.1 기술 정의

- ▶ 페로브스카이트와 실리콘 태양전지를 각각 상·하부 셀로 포함하는 소자 효율 30% 이상의 초고효율 다중접합 태양전지 및 이와 관련된 기술

3.2.2.2 R&D 추진전략

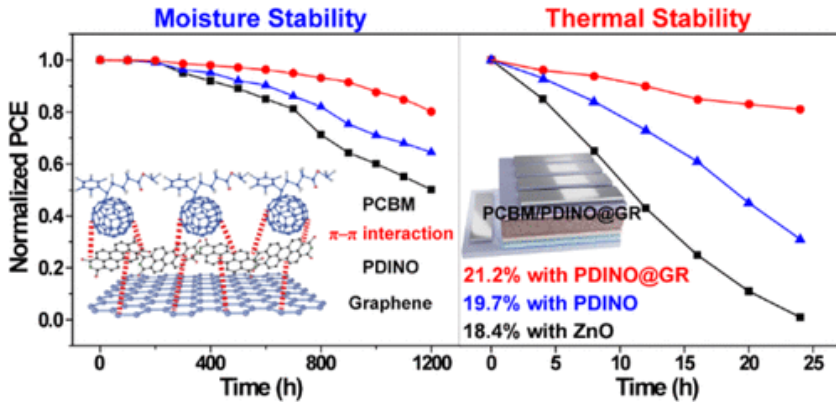
- ▶ (초고효율) 페로브스카이트와 실리콘 태양전지를 접합한 태양전지를 개발하여, 기존 실리콘 태양전지의 효율 한계를 극복하고 실리콘 태양전지 주도의 시장에 새롭게 진입할 수 있는 초고효율 기술 확보
- ▶ (고안정성) 기존 실리콘 태양전지와 유사한 수준의 장기안정성을 갖는 탠덤용 페로브스카이트 소재를 개발하고, 이를 상용화하기 위한 제조 공정을 개발
- ▶ (대면적화) 기존 실리콘 태양전지와 유사한 크기의 대면적으로 제조 가능한 탠덤용 페로브스카이트 소재를 개발하고 실리콘 태양전지 생산 기반을 활용한 대면적 다중접합 태양전지 공정기술 개발

3.2.2.3 추진전략 관련 국내 연구개발 현황

- ▶ **초고성능 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 관련 과제는 산업통상자원부(산업부)의 신재생에너지핵심 기술개발사업 및 과기부의 기후변화대응기술개발사업을 통해 다수 지원되고 있음⁵²⁾**
- ▶ **상기 탠덤 태양전지의 초고효율 구현을 위한 주요 연구 방향들에는 탠덤 태양전지 자체 구조 개선, 탠덤용 페로브스카이트 밴드갭 제어, 탠덤용 하부셀 구조 제어, 상·하부셀의 공정기술 개발 등임**
 - (한국에너지기술연구원) 양면수광형 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지를 개발하고, 최고 32% 소자 효율 달성을 목표로 함
 - (서울대학교) 이중 소재의 투명 전극층을 페로브스카이트 상부셀에 도입하여, 25.6%(면적: 1cm²)의 소자 효율을 달성함
 - (울산과학기술원) 탠덤 지하 페로브스카이트 밴드갭 제어, 하부 실리콘 셀 기술 및 장비 개발 등을 통해, 최종 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 효율 35%를 구현하는 것을 목표로 함
 - (한화솔루션) 실리콘 하부셀 요소기술, 와이드 밴드갭 페로브스카이트 소재 개발 등을 통해, 최종 26% 효율의 6inch 대면적 탠덤 소자 개발을 목표로 함
 - (한국과학기술원) 페로브스카이트 상부셀 공정에 박막 전사 기술을 도입하여 공정 및 물질의 제한을 개선하고, 최종 30% 이상의 소자 효율 달성을 목표로 함
- ▶ **고안정화를 위한 주요 연구개발 방향은 와이드 밴드갭 페로브스카이트 소재 자체의 안정화 기술 또는 봉지 소재 개발이며, 대체로 소재 안정화 기술과 대면 증착 가능한 공정 개발이 함께 이뤄짐**
 - (한양대학교) 페로브스카이트-실리콘, 페로브스카이트-페로브스카이트 탠덤 층을 접합할 수 있는 기술 및 상부형 페로브스카이트 소재 안정화 기술개발을 목표로 함
 - (고려대학교) 와이드 밴드갭 페로브스카이트 소재 및 안정화 기술, 소자 내구성 향상 기술, 대면적 소자 구현 기술 등을 개발하고, 최종 25% 효율을 갖는 4-inch 대면적 탠덤 태양전지 구현을 목표로 함
 - (서울대학교) 고품질의 와이드 밴드갭 페로브스카이트 소재, 대면적 코팅 기술개발 등을 통해 최종 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지 효율 29%를 구현하고, 가속 환경에서 장기안정성 향상 기술개발을 목표로 함
 - (울산과학기술원) 진공 증착 공정기술을 기반으로, 최종 26%(면적: 0.25cm²), 24%(면적 25cm²) 탠덤 소자를 구현하고, 상부 페로브스카이트 셀의 고온·고습 및 광조사 500h 동안 초기대비 90% 수준의 장기안정성 구현을 목표로 함

52) NTIS에서 기준년도 2020년~2022년, 과제규모 1억원 이상으로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

[그림 3-4] Sulfonium 양이온이 도입된 페로브스카이트 수분 안정성 시험 결과



출처: Chem. Mater. Vol 33, p5563 (2021)

- (한화솔루션) 고성능 페로브스카이트 및 층간 소재, 대면적 투명전극, 봉지 소재 등을 적용하여 고효율·고내구성 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양광 모듈 개발을 목표로 함

3.2.2.4 추진전략 이행을 위한 연구 방향 및 제언

▶ 페로브스카이트-실리콘 다중접합 태양전지 초고효율화 기술 확보

- 상부 태양전지, 하부 태양전지, 인터페이스, 전극 연결 등의 탠덤 구조 집적화 기술
- 광흡수 대역에 따른 페로브스카이트 태양전지 박막 최적화
- 변환 효율 35% 이상 확보를 위한 실리콘/페로브스카이트/페로브스카이트 3중접합 태양전지 개발

▶ 진공 공정기술 기반 페로브스카이트 태양전지 개발 및 이를 활용한 다중접합 태양전지 개발

- 동시 진공증발, 화학기상증착 등 진공증착 기술을 적용한 페로브스카이트 태양전지 개발
- 상업용 실리콘 태양전지 공정과 연계한 페로브스카이트 양산 장비 기술 확보

▶ 소자 안정성 확보를 위한 페로브스카이트-실리콘 태양전지 모듈화 기술 개발

- 다중접합 태양전지 고효율화 및 안정성 확보를 위한 무기 소재 기반 모듈화 소재 및 장비 기술 개발
- 양산 환경 적용이 가능한 페로브스카이트-실리콘 탠덤 모듈 개발 및 실증 연구

▶ 산·학·연 공동 연구를 통한 대면적 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지의 양산 기술 조기 확보

- 대면적 탠덤 태양전지의 양산을 위한 공정, 장비, 소재 기술 확보
- 30~100MW 급 파일럿 라인에서의 소재/소자 양산성 검증을 통한 조기 상용화 추진

▶ 플래그십 프로젝트 집중 수행을 통한 기술경쟁력 확보

- 차세대 태양전지 분야의 소재 및 장비 기술의 선점을 위한 플래그십 형태의 프로젝트 추진
- 집중적인 연구개발 투자를 통한 기술 초격차 달성

3.2.3 초고성능 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지 기술

3.2.3.1 기술 정의

- ▶ 페로브스카이트와 무기박막 태양전지를 각각 상·하부 셀로 포함하는 소자 효율 30% 이상의 초고효율 다중접합 태양전지 및 이와 관련된 기술

3.2.3.2 R&D 추진전략

- ▶ (초고효율) 페로브스카이트와 무기박막 태양전지를 접합한 태양전지를 개발하여, 기존 실리콘 태양전지의 효율 한계를 극복하고 기존 실리콘 태양전지 시장의 일부를 점유할 수 있는 기술 확보
- ▶ (다기능화) 초고효율화와 더불어 투명성, 유연성 등을 필요로 하는 다양한 응용처 활용 기술 확보

3.2.3.3 추진전략 관련 국내 연구개발 현황

- ▶ 초고성능 페로브스카이트-무기박막 탠덤 태양전지 과제는 대부분 과기부 기술개발사업을 통해 지원되고 있으며, 관련 연구는 10개 이내로 비교적 소수임⁵³⁾
- ▶ 탠덤 태양전지의 초고효율화를 위한 연구개발 방향은 소재의 밴드갭을 제어하거나, 물질 간 계면특성을 제어함으로써 특성 향상시키는 것을 목표로 함
 - (전남대학교) 금속이온을 도입하거나 밴드갭 제어된 신규의 페로브스카이트 소재를 합성하고, 이와 밴드갭 제어된 CIGS 또는 CZTS 소재를 활용한 23% 이상의 효율을 갖는 탠덤 소자 구현을 목표로 함
 - (대구경북과학기술원) 페로브스카이트 및 칼코지나이드 소재의 밴드갭을 제어하고, 전기광학적 물성 설계를 통해, 최종 30% 이상의 소자 효율 달성을 목표로 함
 - (한국과학기술연구원) 상·하부셀의 계면제어 최적화, 와이드 밴드갭 페로브스카이트 상부셀 개발, 광손실 시뮬레이션 연구 등을 통해, 최종 25% 이상의 소자 효율 달성을 목표로 함
- ▶ 탠덤 태양전지의 투명화를 위한 연구개발 방향 중 하나는 페로브스카이트 박막의 두께 제어 또는 CIGS 소재의 구조 제어를 통해 투과도 특성 향상 구현임
 - (울산과학기술원) 페로브스카이트 밴드갭 제어 및 두께조절을 통해 투과도를 제어하고, 저굴절률 반사 방지막, 저저항 고투과 전극, 그리드 패턴 등을 도입하여 광학 설계를 최적화
 - (한국과학기술연구원) 정밀 식각 방식을 통하여 투과도가 제어된 반투명 CIGS 모듈화 기술과 이를 기반으로 탠덤 태양전지의 계면 안정화 소재·공정 기술개발을 목표로 함

53) NTIS에서 기준년도 2020년~2022년으로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

▶ **탠덤 태양전지의 유연화를 위한 연구 방향 중 하나는 유연 기판에 소재 증착이 가능한 저온 공정기술 개발임**

- (한국에너지기술연구원) 유연 기판에 저온 공정으로 증착된 CIGS 탠덤 태양전지를 개발하고, 박막의 손상을 최소화하면서 페로브스카이트를 증착하는 기술개발 내용을 포함

3.2.3.4 추진전략 이행을 위한 연구 방향 및 제언

▶ **페로브스카이트 상부셀 최적화 기술 개발**

- 페로브스카이트 밴드갭별(1.6eV) 고품위화 기술 개발
- 페로브스카이트 상부셀의 장파장 투과도 향상
- 광손실 최소화를 위한 전면 투명전극 개선

▶ **다중접합용 무기 박막 하부셀 최적화 기술 개발**

- 무기박막 광흡수층의 밴드갭별(1~1.2eV) 고품위화 기술 개발
- 상부셀 제조를 위한 표면층 구조의 최적화
- 초고효율 다중접합 태양전지용 투명전극 기술 개발

▶ **페로브스카이트-무기 박막 다중접합 태양전지 개발**

- 상·하부셀의 광전류 매칭을 위한 광흡수층의 밴드갭 최적화, 투명전극, 중간층, 광흡수층 광학설계 알고리즘
- 흡수광대역에 따른 최적의 페로브스카이트-무기박막 구조의 탠덤 태양전지 단일집적화
- 변환효율 35% 이상 무기박막/무기박막 or 페로브스카이트/페로브스카이트 3중접합 태양전지 개발

▶ **진공 공정기술 기반 페로브스카이트-무기 박막 공정 기술 확보**

- 다양한 하부층의 표면상태에 대응할 수 있는 상부셀 제조 공정
- 하부셀 손상방지를 위한 상부셀 공정의 기계적/화학적/열적 간섭 방지 기술
- 유연 기판 손상을 최소화할 수 있는 박막 패터닝 기술 확보
- 박막 균질도를 확보한 상·하부층 대면적화 공정 기술

3.2.4 All-페로브스카이트 탠덤 태양전지 기술

3.2.4.1 기술 정의

▶ **태양전지의 모든 광흡수 박막이 페로브스카이트 소재로 구성된 탠덤 태양전지 및 이와 관련된 기술**

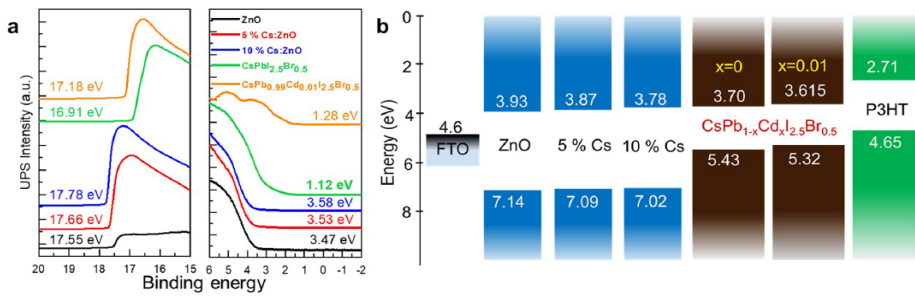
3.2.4.2 R&D 추진전략

▶ **(초고효율) 다양한 밴드갭의 페로브스카이트 소재를 접합한 형태의 다중접합 태양전지를 개발하여, 기존대비 공정이 간단하면서 저비용으로 대량 생산할 수 있는 초고효율 all-페로브스카이트 태양전지 기술 확보**

3.2.4.3 추진전략 관련 국내 연구개발 현황

- ▶ All-페로브스카이트 탠덤 태양전지 과제는 과기부와 교육부에서 5개 이내의 과제가 추진되고 있으며, 모두 기초연구 단계 연구임⁵⁴⁾
- ▶ 상기 탠덤 태양전지의 초고효율화를 위한 주요 연구개발 방향은 탠덤 태양전지에 적합한 페로브스카이트 소재의 밴드갭을 제어하여 다양한 밴드갭을 갖는 페로브스카이트 소자를 구현하는 것임
 - (울산과학기술원) 1.1eV~1.85eV의 다양한 밴드갭을 가지는 페로브스카이트 소자를 결합하여 페로브스카이트-페로브스카이트 탠덤 소자를 제작
 - (전남대학교) 페로브스카이트 소재의 밴드갭 제어 및 매칭을 통해, all-페로브스카이트 탠덤 소자 최종 28% 효율 달성을 목표로 함

[그림 3-5] 원소 조성 변화를 통해 밴드갭 조절된 페로브스카이트



출처: Nano Energy, Vol 90, p106597 (2021)

3.2.4.4 추진전략 이행을 위한 연구 방향 및 제언

- ▶ 광흡수 최적화를 위하여 다양한 밴드갭의 페로브스카이트 소재 조성 개발
 - 하부 셀용 narrow 밴드갭 페로브스카이트의 광전류 최대화
 - 상부 셀용 wide 밴드갭 페로브스카이트의 전압 손실 최소화
 - 광흡수 최적화를 위한 상/하부 페로브스카이트 밴드갭 최적화
- ▶ 상/하부 셀의 광흡수층용 페로브스카이트 박막의 안정성 확보
 - 주석 이온의 산화, 할라이드 축적 등 재료의 불안정 요인 억제를 위한 소재 조성 개발
 - 상/하부 셀 페로브스카이트의 결정성 및 결함 보완 기술 확보
- ▶ 페로브스카이트 조성 맞춤형 계면층 소재 개발
 - 페로브스카이트 밴드갭 별 계면 소재 특성 가변화 및 최적 디자인 도출
 - 이온 침투를 막기 위한 이온 배리어 층 기술의 개발

54) NTIS에서 기준년도 2020년~2022년으로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

▶ All 페로브스카이트 탠덤 구조 및 공정 개발

- 상부 페로브스카이트 셀 형성 시 하부 페로브스카이트 셀의 손상을 막기 위한 공정 및 중간층 개발
- 광, 열 등 외부 안정성을 확보하기 위한 all-페로브스카이트 탠덤 셀 구조 개발

3.2.5 도시형 태양전지 기술

3.2.5.1 기술 정의

- ▶ 도시환경에 적합한 건물일체형(Building-integrated Photovoltaics, BIPV), 자동차일체형(Vehicle-integrated Photovoltaics, VIPV), 전기소자일체형(Device-integrated Photovoltaics, DIPV) 태양전지 및 이와 관련된 모듈, 시스템 기술

3.2.5.2 R&D 추진전략

- ▶ (다기능화) 설치공간의 제약이 많은 도시환경에 적합하면서도 심미성을 해치지 않는 다양한 기능의 태양전지 기술을 상용화하여 기존 실리콘 태양전지를 대체

3.2.5.3 추진전략 관련 국내 연구개발 현황

- ▶ 도시형 태양전지 관련 과제는 과기부 기후변화대응기술개발사업을 통해 다수 지원되고 있으며, 일부는 과기부 개인기초연구와 산업부 신재생에너지핵심기술개발사업 등을 통해 지원되고 있음⁵⁵⁾
- ▶ 도시형 태양전지 기술개발 과제는 초기 투명성을 장점으로 한 염료감응형 태양전지를 기반으로 다수 수행되었고, 현재 장기안정성을 개선한 모듈화 및 시스템 개발이 주요 연구개발 방향임
 - (동국대학교) 염료감응형 태양전지를 기반으로 도심발전용 서브 모듈 구조 최적화를 목표로 함
 - (울산과학기술원) 실내조명에서도 발전이 가능한 염료감응형 태양전지를 기반으로 한 광화학 전원 개발을 연구목표로 함
 - (㈜선우시스) 염료감응형 태양전지 기반 태양광발전 창호시스템을 개발하고 이의 성능분석 추진
- ▶ 도시형 태양전지 기술개발 연구 방향 중 하나는 CIGS 태양전지 기반으로 투명하거나 미세기공을 포함하고 있는 중간층을 도입하여 소자 광흡수층의 투과성 제어임
 - (대구경북과학기술원) TCO 및 금속 반사 전극, ALD 방법을 적용한 고투과층 개발을 통해 반투과 CIGS 태양전지 개발이 목표임
 - (한국과학기술연구원) 유연 기판 및 박막 미세공정 적용을 통해 유연하면서도 투명한 태양전지 모듈을 구현하고, BIPV 등에 적용 가능한 모듈 설계 및 제조기술 개발을 목표로 함

55) NTIS에서 기준연도 2020년~2022년, 과제규모 1억원 이상으로 검색한 결과 (검색일:2020.04.)

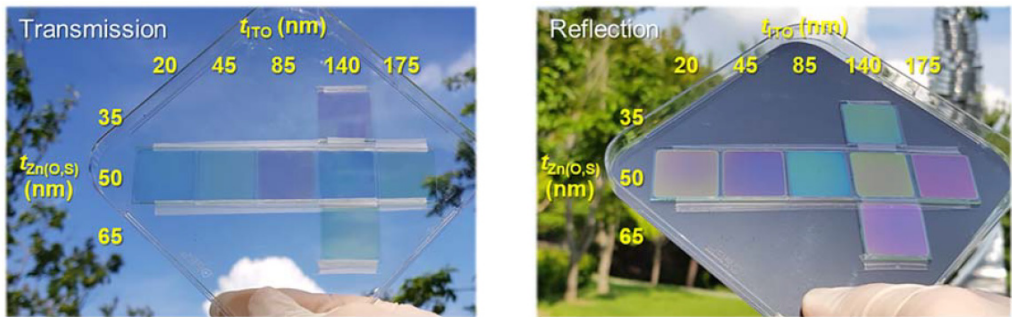
▶ **투명한 페로브스카이트 태양전지를 구현하기 위한 연구개발 방향 중 하나는 특정 영역의 빛 흡수를 제어할 수 있는 3차원 구조체 도입임**

- (청주대학교) 페로브스카이트 및 양자점을 포함하는 광흡수층을 3차원 구조체로 구현하여, 소자의 가시광 투과도를 제어하는 것을 포함
- (중앙대학교) 페로브스카이트 태양전지를 기반으로 나노 크기의 기둥을 갖는 3차원 구조체를 포함한 광흡수층을 도입하여 근적외선 영역의 광흡수도를 제어함

▶ **다양한 색상을 갖는 태양전지 연구개발 방향 중 하나는 특정 파장의 빛의 반사할 수 있는 이종 소재의 박막 또는 필름 도입임**

- (한국전자통신연구원) CIGS 태양전지에 Zn 계열 소재의 원소 조성을 제어한 버퍼층을 도입하고 해당 층의 두께 변화 등을 통하여, 다양한 색상 및 투명 구현 가능한 태양전지 개발을 목표로 함

[그림 3-6] Zn 계열 버퍼층이 도입된 반투명 광흡수층



출처: Prog. Photovolt. Res. Appl., Vol 28, p798 (2020)

- (이화여자대학교) 용액공정 기반의 반사 필름을 개발하고, 이를 활용한 다양한 색상의 CIGS 셀 및 모듈을 구현하는 것이 목표임

▶ **최근에는 페로브스카이트를 기반으로 한 다중접합 태양전지의 투명화 및 유연화 연구과제도 수행됨**

- (울산과학기술원) 투명하고 대면적(100cm²) 페로브스카이트-CIGS 탠덤 태양전지 소자 개발이 연구목표이며, 본 연구에서 개발된 소자는 도심 구조물 활용이 가능함
- (한국과학기술연구원) 반투명한 페로브스카이트 및 CIGS 태양전지를 접합한 탠덤 소자를 구현하고, BIPV, VIPV 등에 적용 용이한 블록형 모듈 기술개발을 목표로 함
- (한국과학기술연구원) 초박형의 실리콘 소재를 활용한 페로브스카이트-실리콘 탠덤 소자를 개발이 연구의 목표이며 초고효율, 경량·유연 장점이 있어 자동차에 적용 가능함
- (한양대학교) 경량·유연한 페로브스카이트-GaAs-Ge 또는 페로브스카이트-페로브스카이트-Ge 탠덤 태양전지 소자 개발이 연구목표이며, 유연 태양전지 관련 시장인 자동차, 모바일, 웨어러블 등에 적용할 수 있을 것으로 기대됨

3.2.5.4 추진전략 이행을 위한 연구 방향 및 제언

▶ 도시 환경에 적용이 가능한 경량/유연 태양전지 및 모듈 기술 개발

- 도시 건물일체형(BIPV) 태양광 창호 및 스마트 윈도 모듈의 신뢰성 확보
- 도시 모빌리티 환경에 적용 가능한 자동차용(VIPV) 유연 태양전지 모듈화 기술
- 도시 실내·외 설치 구조 및 인테리어 적용이 가능한 전기소자용(DIPV) 다기능 태양전지 모듈

▶ 고안정성/고효율 무기박막 기반 반투명 유연 태양전지

- 무기박막 태양전지의 효율한계 극복 셀 공정 및 소재 제어 기술
- 유연기판별 무기박막 태양전지 소재 및 구조의 투광화 제어 기술
- 초유연성 지향 반투명 태양전지의 초박형화를 위한 소재 및 구조 제어 기술
- 투광 선명도 향상을 위한 투명전극소재 및 불투명 소재 제어 기술

▶ 파장별 투과율 선택적 조절 가능한 태양전지의 고효율화 및 장기안정성 향상

- 가시광 선택적 투과율 조절이 용이한 광흡수층 소재의 고품위화
- 고온, 다습 환경에서 광흡수층, 전자/정공수송층 및 전극 소재의 장기안정성 제어 기술
- 습도, 기체침투 차단용 encapsulation 고도화 및 저가화 기술

▶ 다양한 심미적 구현을 위해 투명도 및 컬러 조절이 용이한 유연 태양전지 단일집적모듈 기술

- 저비용 고색순도 컬러 구조체의 대면적화 기술
- 유연기판에 적합한 모듈 및 투광구조 구현을 위한 박막 정밀 패터닝 공정
- 기계적 내구성이 우수한 단위박막소재 기술

3.2.6 탄소배출 저감형 태양전지 소재·공정 기술

3.2.6.1 기술 정의

- ▶ 태양광 소자·모듈을 생산하는 과정에서 기존대비 탄소배출을 저감 할 수 있는 소재·공정 기술로, 전-인쇄(All-printable), 전-용액(All-solution), 저온(Low-temperature) 공정 등을 포함

3.2.6.2 R&D 추진전략

- ▶ (탄소배출 저감형) 에너지 소비와 탄소배출을 저감 할 수 있는 소재·공정 기술을 개발하여, 탄소배출 규제 강화에 대응할 수 있는 기술 확보

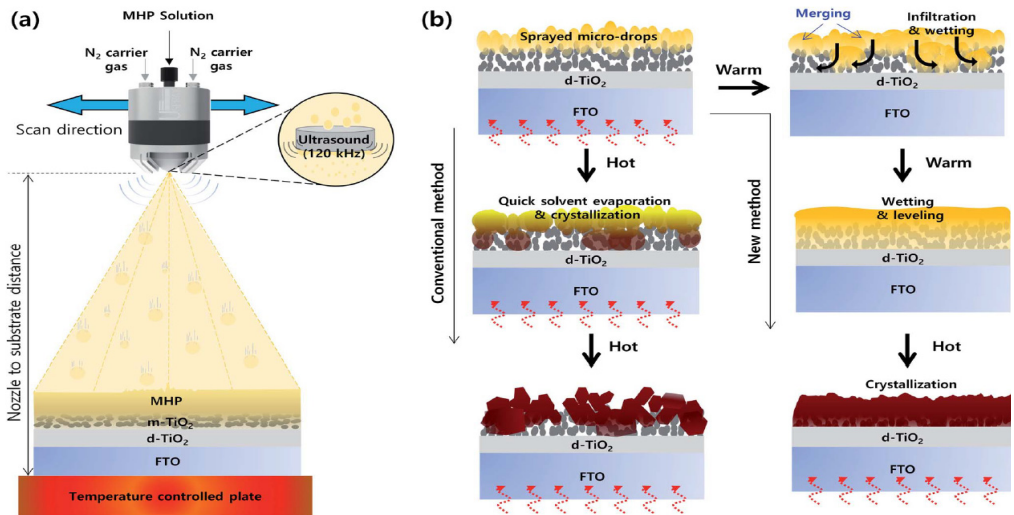
3.2.6.3 추진전략 관련 국내 연구개발 현황

- ▶ 탄소배출 저감형 관련 과제는 과기부 개인기초연구를 통해 다수 지원되고 있으며, 개인기초연구 외에 산업부 신재생에너지핵심기술개발사업의 응용과제가 일부 지원되고 있음⁵⁶⁾

❶ 탄소배출 저감형 태양전지를 구현하기 위한 연구 방향 중 하나는 유기, 무기, 페로브스카이트 등 다양한 종류의 태양전지를 대상으로 소자 구성요소 중 일부를 slot-die 기반 인쇄공정, 3D-Printer 기반 인쇄공정을 통해 구현하는 것임

- (한국화학연구원) 15x15cm² 수준의 대면적 페로브스카이트 태양전지 구현을 위한 Slot-die 기반의 인쇄공정 기술 최적화를 목표로 함

[그림 3-7] 3D-Printer 연결된 스프레이 코팅기 활용한 소자 제작공정



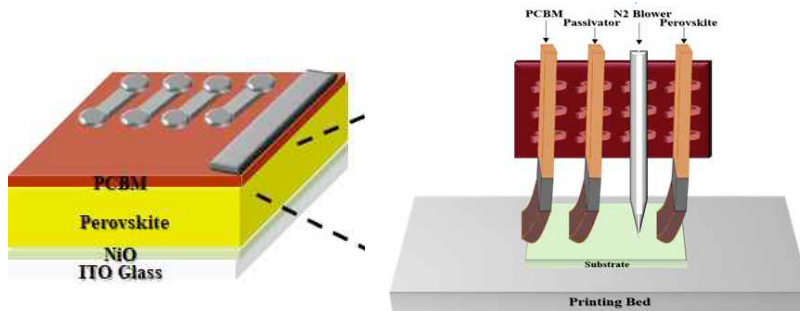
출처: RSC Adv., Vol 10, p33651 (2020)

- (고려대학교) 대면적의 비납계 페로브스카이트 태양전지 제작을 위한 인쇄용 Slot-die 코팅 공정 기법을 연구내용에 포함
- (주)한양솔라에너지) 대면적 페로브스카이트 태양광 모듈 제작을 위해 3D-Printer와 Slot-die 코팅 기술을 접목한 공정기술을 개발을 목표로 함
- (울산과학기술원) 유연한 유기 태양전지 구현을 위해 3D-Printer 기술을 개발하고, 최종 다색 반투명 소자 개발을 목표로 함
- (광주과학기술원) 핀홀 충전재 기술 및 용매 패터닝 기술을 도입한 인쇄 장비를 구축하고, 이를 기반으로 한 인쇄형 유연 유기 태양전지 모듈 구현을 목표로 함
- (광주과학기술원) 인쇄 기반의 광활성층 제작공정을 적용한 투명한 대면적의 윈도우 필름형 태양전지 모듈 개발을 목표로 함
- (전북대학교) 페로브스카이트 태양전지 양산을 위한 인쇄공정용 광활성층, 전하수송층, 소자 및 모듈 구조의 요소기술 개발을 목표로 함
- (광주과학기술원) 건물의 유리창이나 자동차 창에 필름 형태로 부착 가능한 인쇄 기반의 고투명 태양전지 모듈 개발을 목표로 함

▶ 탄소배출 저감을 위한 연구 방향 중 하나는 브러쉬 페인팅 공정이나 저온 용액공정 등을 도입하여, 기존 소자 제작 과정에서 에너지 소비가 많은 고온 공정을 배제하는 것임

- (군산대학교) 브러쉬 페인팅 공정을 활용한 고효율 고안정의 페로브스카이트 기반 탠덤 태양전지 원천기술 개발을 연구목표로 함

[그림 3-8] 브러쉬 페인팅 공정을 활용한 소자 제작공정



출처: 3D 프린터 기반 브러쉬 페인팅을 활용한 유기/페로브스카이트 탠덤 태양전지 개발 최종보고서, 군산대학교(2021)

- (울산과학기술원) 저온 용액공정 기반의 콜로이드 퀀텀닷 소재를 개발하고, 이를 활용한 25% 이상의 효율을 갖는 탠덤 태양전지 개발을 목표로 함
- (울산대학교) 저온 용액공정 기반의 투명전극을 개발하고, 이를 기반으로 한 저온 용액공정의 반투명 유기 태양전지 개발을 목표로 함

3.2.6.4 추진전략 이행을 위한 연구 방향 및 제언

▶ 탄소배출 저감형 태양전지 소자 제작을 위한 전구체 용액 최적화

- 저온(100~150°C 이하) 급속 열처리 공정에 적합한 전구체 용액 설계
- 추가적인 열 공정 없이 광흡수체 형성이 가능한 양자점 태양전지 용액 개발
- 미량의 유기화합물 첨가제를 활용한 물질 안정성 개선

▶ 페로브스카이트 전구체 용액을 활용한 대면적 박막 태양전지 공정 개발

- 경량·유연 태양전지 제작을 위한 저온 열처리 공정 최적화
- 광흡수체 유기소재 용액의 고체화 속도를 제어할 수 있는 고효율 용액공정 태양전지 개발
- 탄소배출 저감을 위한 전구체 소재 재활용 공정 개발
- 태양전지 전극 소재를 Au, Ag에서 저가의 카본 및 Cu-Ni 합금 전극으로 대체할 수 있는 저가 상압 전극 공정 개발
- 유연 소자의 안정성 확보를 위한 베리어 필름 및 유연 봉지막 개발

4

결론 및 시사점

- ▶ 본 연구는 “탄소중립 기술혁신 추진전략”의 10대 기술 중, 에너지 전환 분야의 핵심기술인 태양전지 기술의 추진전략 이행을 위한 6대 주요 기술별 개발방향과 주요 이슈들을 고찰하였음
 - 태양전지 R&D 추진전략의 주요 이슈 키워드들은 세계 최고 수준, 가격 경쟁력, 실리콘 대체, 페로브스카이트, 탠덤, 초고효율, 고안정성, 초고성능, 도시형 및 탄소배출 저감형 등이 포함됨
 - 6대 주요 기술들의 공통적인 핵심 목표는 이론적 효율에 다다른 실리콘 태양전지의 특성을 뛰어넘는 차세대 초고효율 태양전지를 개발하여 탄소중립에 기여하고 미래 신시장을 개척하는 것임
- ▶ (페로브스카이트 소재) 세계 최고 수준의 고효율 페로브스카이트 태양전지 기술을 상용화하여 기존 실리콘 태양전지 시장에 진입하고 다양한 탠덤 구조 및 다기능 태양전지 등에 적용 확대
 - 실리콘 태양전지의 효율과 가격경쟁력을 상회할 수 있는 차세대 소재는 페로브스카이트이며, 조기 상용화에 걸림돌이 되고 있는 소재의 결함을 개선하여 장기 안정성을 개선하는 것이 가장 시급해보임
 - 페로브스카이트 태양전지는 구성 원소의 조성 변화를 통하여 다양한 밴드갭을 나타내므로 이종 소재와 계면접합 제어 등을 통하여 다양한 조합과 구조로 개발하려는 연구가 지속적으로 증가하고 있음
- ▶ (초고효율 탠덤 태양전지) 태양광의 다양한 파장을 최대한 흡수하여 단일접합 태양전지가 가진 이론적 효율을 극복하기 위한 최선의 방법은 다양한 광흡수층으로 구성된 다중접합 태양전지를 개발하는 것임
 - 태양광 기술혁신 추진전략 이행을 위한 태양전지 6대 핵심기술 중, 탠덤 태양전지 기술개발이 반 이상을 차지하고 있는 것은 2050년 40% 이상의 초고효율 달성하기 위한 최적의 구조는 탠덤 형태임
 - 초고효율 태양전지 모듈이 상용화되기 전까지는 다양한 조합의 다중접합 탠덤 태양전지 기술이 경쟁할 것으로 예상되며, 탠덤 구조에 공통적으로 포함되어있는 페로브스카이트 소재의 안정성이 확보될 경우, 그 활용 분야는 더욱 다양해질 것으로 예상됨
- ▶ (도시형 다기능 태양전지) 전 세계 에너지 사용으로 인한 이산화탄소 배출량의 약 75%를 차지하는 도시지역의 탄소중립에 기여하기 위해서는 다양한 기능과 구조를 갖는 태양전지를 개발하고 확대 적용하는 것임
 - 설치공간의 제약이 많은 도시에서 태양전지를 확대 적용하기 위해서는 건물, 자동차, 전기소자 및 실내·외 인테리어 등에 적용할 수 있는 다양한 특성과 기능의 신개념 태양전지를 개발하는 것이 필요함
 - 미래 도시형 태양전지는 경량·유연 기반 기반의 반투명, 투명 및 다양한 색상의 구현이 가능하면서, 온실가스 배출과 에너지 소모가 적은 용액 기반의 저온공정으로 추진되고 있음

참고문헌

- 1) Cho, D.-H. *et al.* Color tuning in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells by controlling optical interference in transparent front layers. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 28, 798–807 (2020)
- 2) Daehan, K. *et al.* Efficient, stable silicon tandem cells enabled by anion-engineered wide-bandgap perovskites. *Science*. 368, 155–160 (2020)
- 3) Feng, J. *et al.* Record Efficiency Stable Flexible Perovskite Solar Cell Using Effective Additive Assistant Strategy. *Adv. Mater.* 30, 1801418 (2018)
- 4) Hatamvand, M. *et al.* Recent advances in fiber-shaped and planar-shaped textile solar cells. *Nano Energy* 71, 104609 (2020)
- 5) Jeong, J. *et al.* Pseudo-halide anion engineering for α -FAPbI₃ perovskite solar cells. *Nature* 592, 381–385 (2021)
- 6) Jixian, X. *et al.* Triple-halide wide-band gap perovskites with suppressed phase segregation for efficient tandems. *Science*. 367, 1097–1104 (2020)
- 7) Jun, P. *et al.* Nanoscale localized contacts for high fill factors in polymer-passivated perovskite solar cells. *Science*. 371
- 8) Kim, S. S. *et al.* Wetting-induced formation of void-free metal halide perovskite films by green ultrasonic spray coating for large-area mesoscopic perovskite solar cells. *RSC Adv.* 10, 33651–33661 (2020)
- 9) Kim, Y. R. *et al.* Conjugated polyelectrolytes for stable perovskite solar cells based on methylammonium lead triiodide. *J. Mater. Chem. A* 10, 3321–3329 (2022)
- 10) Koo, D. *et al.* Graphene-Assisted Zwitterionic Conjugated Polycyclic Molecular Interfacial Layer Enables Highly Efficient and Stable Inverted Perovskite Solar Cells. *Chem. Mater.* 33, 5563–5571 (2021)
- 11) Kwon, H.-C. *et al.* Parallelized Nanopillar Perovskites for Semitransparent Solar Cells Using an Anodized Aluminum Oxide Scaffold. *Adv. Energy M*
- 12) Lee, K.-T. *et al.* Colored, see-through perovskite solar cells employing an optical cavity. *J. Mater. Chem. C* 3, 5377–5382 (2015)
- 13) Li, N. *et al.* Cation and anion immobilization through chemical bonding enhancement with fluorides for stable halide perovskite solar cells. *Nat. Energy* 4, 408–415 (2019)
- 14) Lin, R. *et al.* Monolithic all-perovskite tandem solar cells with 24.8% efficiency exploiting comproportionation to suppress Sn(II) oxidation in precursor ink. *Nat. Energy* 4, 864–873 (2019)

- 15) Liu, Y. *et al.* Stabilization of Highly Efficient and Stable Phase-Pure FAPbI₃ Perovskite Solar Cells by Molecularly Tailored 2D-Overlayers. *Angew. Chemie Int. Ed.* 59, 15688–15694 (2020)
- 16) Mali, S. S. *et al.* Ambient processed and stable all-inorganic lead halide perovskite solar cells with efficiencies nearing 20% using a spray coated Zn_{1-x}Cs_xO electron transport layer. *Nano Energy* 90, 106597 (2021)
- 17) Min, H. *et al.* Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes. *Nature* 598, 444–450 (2021)
- 18) Mingyu, J. *et al.* Stable perovskite solar cells with efficiency exceeding 24.8% and 0.3-V voltage loss. *Science*. 369, 1615–1620 (2020)
- 19) Minjin, K. *et al.* Conformal quantum dot-SnO₂ layers as electron transporters for efficient perovskite solar cells. *Science*. 375, 302–306 (2022)
- 20) Ren, H. *et al.* Efficient and stable Ruddlesden-Popper perovskite solar cell with tailored interlayer molecular interaction. *Nat. Photonics* 14, 154–163 (2020)
- 21) Wang, S. *et al.* Polymeric room-temperature molten salt as a multifunctional additive toward highly efficient and stable inverted planar perovskite solar cells. *Energy Environ. Sci.* 13, 5068–5079 (2020)
- 22) Wang, Y. *et al.* Colorful Efficient Moiré-Perovskite Solar Cells. *Adv. Mater.* 33, 2008091 (2021)
- 23) Wilson, G. M. *et al.* The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 53, 493001 (2020)
- 24) Xiao, K. *et al.* All-perovskite tandem solar cells with 24.2% certified efficiency and area over 1cm² using surface-anchoring zwitterionic antioxidant. *Nat. Energy* 5, 870–880 (2020)
- 25) Yoo, J. J. *et al.* Efficient perovskite solar cells via improved carrier management. *Nature* 590, 587–593 (2021)
- 26) Yoshikawa, K. *et al.* Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nat. Energy* 2, 17032 (2017)
- 27) Yu, Z. *et al.* Simplified interconnection structure based on C₆₀/SnO_{2-x} for all-perovskite tandem solar cells. *Nat. Energy* 5, 657–665 (2020)
- 28) 박민아 & 김진영. 페로브스카이트 기반 탠덤 태양전지 연구 동향. *Bull. Korea Photovolt. Soc.* 3, 42–52 (2017)
- 29) 배미선 *et al.* 물질이동 억제 버퍼층 형성을 통한 페로브스카이트 태양전지 장기 안정성 확보. *J. Microelectron. Packag. Soc.* 28, 17–24 (2021)
- 30) 배수현 *et al.* 실리콘 기반 탠덤 태양전지 연구 동향. *Bull. Korea Photovolt. Soc.* 3, 6–15 (2017)
- 31) 3D 프린터 기반 브러쉬 페인팅을 활용한 유기/페로브스카이트 탠덤 태양전지 개발 최종보고서, 군산대학교 (2021)
- 32) 페로브스카이트 태양전지의 고신뢰성 확보를 위한 요소기술 개발 최종보고서, 울산과학기술원(2020)
- 33) 2050 탄소중립 시나리오, 2050 탄소중립위원회(2021)
- 34) 2050 탄소중립 추진전략, 관계부처합동(2020)

- 35) 2050년엔 무탄소 사회 목표, 태양광·풍력 3%→50%, 조선일보(2021)
- 36) CIGS/perovskite solar cell by UCLA reaches 22.4% efficiency, Perovskite-info(2018)
- 37) Germany's ISFH announces 26.1% efficiency for p-type crystalline cells, PV magazine(2018)
- 38) Helmholtz Center achieves 29.80% efficiency for perovskite/silicon tandem solar cell, PV Magazine(2021)
- 39) KIER, 차세대 차호용 태양전지 기술로 그린 뉴딜의 방향 제시, 한국에너지기술연구원 공식블로그(2020)
- 40) New record efficiency for CIGS tandem solar cells, STROM-FORSCHUNG(2020)
- 41) Oxford PV's new record efficiency of 29.52% for perovskite silicon tandem solar cell, MERCOM(2021)
- 42) Renewables 2021 Global Status Report, REN21(2020)
- 43) 고무수준으로 유연한 컬러 투명태양전지 나왔다!, 인더스트리뉴스(2021)
- 44) 론지솔라, 세계기록 보유한 기술력으로 고효율 니즈 정복 나서, 인더스트리뉴스(2022)
- 45) 양창덕 UNIST 교수, 태양전지 상용화 걸림돌 '안정·효율성' 해결, 서울경제(2021)
- 46) 2050 탄소중립 시나리오, 2050 탄소중립위원회
- 47) 태양전지 제조 단가 절반으로 줄어든다... 국내 연구진, 단결정 실리콘 웨이퍼 제조혁신기술 개발, 인더스트리뉴스(2021)
- 48) 페로브스카이트 태양전지 안정성 높였다, 지디넷코리아(2022)
- 49) 탄소중립 기술혁신 추진전략, 과학기술정보통신부(2021)
- 50) Best Research-Cell Efficiency Chart, NREL(<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>), 검색일: 2020년 4월
- 51) 연구논문 동향 분석 from Web of Science(<https://www.webofscience.com/>), 검색일: 2022년 4월
- 52) 연구과제 동향 분석 from NTIS(<https://www.ntis.go.kr/>), 검색일: 2022년 4월

태양전지 전문가 협의체

위원장 김동환 교수(고려대)

위 원 김기홍 수석부장(한화큐셀) / 서장원 교수(KAIST) / 윤재호 교수(에너지공대) / 정중현 센터장(KIST)
홍근기 상무(프린티어에너지솔루션)



04554 서울특별시 중구 퇴계로173
남산스퀘어 빌딩 17층
Tel. 02.3393.3900
Fax. 02.3393.3919~20
www.gtck.re.kr

* 본 GTC FOCUS의 내용은 필자의 개인적 견해이며, 센터의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.