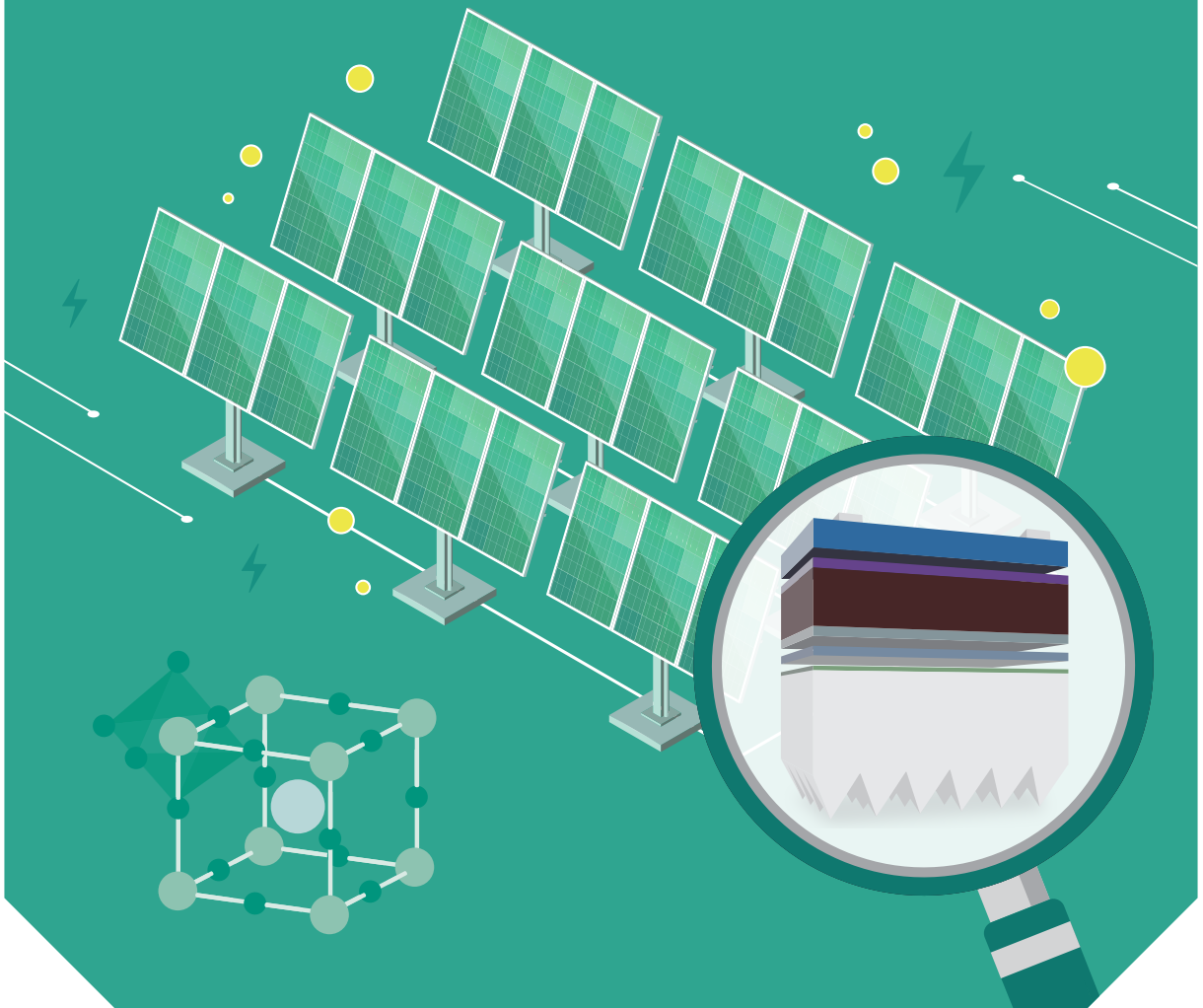


2023 Vol.01

차세대리포트

...

한계 돌파형 차세대 랜덤 태양전지 기술 : K-Solar



펴낸곳

한국과학기술한림원
031)726-7900

펴낸이

유 욱 준

발행연월

2023년 8월

홈페이지

www.kast.or.kr

기획·편집

한국과학기술한림원 정책연구팀

컨텐츠

김준래 과학기술분야 전문 작가

디자인·인쇄

경성문화사
02)786-2999

이 보고서는 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통해 제작되었으며,
모든 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.

‘대한민국의 미래를 이끌어갈 젊은 과학자들의 지식과 경험을 활용하여 과학기술 분야의 발전, 그리고 국가와 사회의 미래를 위해 기여할 수 있는 방법은 없을까?’ 지난 2018년부터 발간되고 있는 한국과학기술한림원의 차세대리포트는 이러한 고민으로부터 시작된 노력의 결과물이다.

우수한 젊은 과학기술인 그룹인 ‘한국차세대과학기술한림원(Young Korean Academy of Science and Technology, Y-KAST)’ 회원들과 연구 현장 최일선에서 활약하고 있는 최고의 젊은 과학자들이 중심이 되어 발간하고 있는 차세대리포트는 그동안 ‘양자기술’이나 ‘수소사회’와 같은 최신 과학기술 관련 이슈는 물론 ‘젊은 과학자를 위한 R&D 정책’, ‘과학자가 되고 싶은 나라를 만드는 방법’, ‘대학의 미래’ 같이 과학기술과 관련된 다양한 주제를 다루어 왔다.

올해로 벌써 발간 5주년을 맞이한 차세대리포트는 다양한 이슈에 대해 새로운 시각과 신선한 의견을 전하고자 노력해 왔으며, ‘과학기술 분야 최신 동향’과 ‘사회적 이슈 및 현안’이라는 두 마리 토끼를 잡기 위해 주제의 선정에서부터 발간에 이르기까지의 모든 과정을 치열한 고민을 통해 진행하고 있다. 특히 과학기술 강국이 되기 위해서는 어떠한 정책적 지원이 필요한지 제시하고, 미래의 인재들이 진로를 선택하는 데 도움이 될 수 있는 생생한 정보도 빠짐없이 전달하기 위하여 진지하게 고민하고 있다.

이러한 과정을 통해 올해 차세대리포트 주제 가운데 하나로 선정된 것은 바로 ‘태양전지’다. 최근 태양광 에너지가 각광받게 되면서 태양전지의 효율성 향상과 생산비용 절감을 위한 노력이 계속되고 있는데, 차세대 태양전지가 바로 그 중심에 있다. 끊임없는 연구와 혁신적 아이디어를 통해 개발된 차세대 태양전지 기술은 기존의 태양전지가 가진 한계의 극복, 성능과 효율 향상에 크게 기여하고 있다.

차세대 태양전지 기술의 발전은 지속 가능한 에너지원 확보를 위한 핵심적인 과정이라 할 수 있다. 특히 차세대 태양전지 기술이 상용화된다면 태양광은 보다 효율적이며, 저렴하고 환경친화적인 에너지원으로 자리매김하게 될 것이 분명하다.

이번 차세대리포트를 통해 전문가들이 바라보는 차세대 태양전지 기술의 혁신성과 잠재력에 대해 살펴보고, 태양전지 기술의 동향과 차세대 기술로서의 미래 가능성을 예측해 봄으로써 지속 가능한 에너지원 확보와 친환경적 미래로 도약을 위한 발판 마련에 기여할 수 있기를 기대해 본다.

2023년 8월
한국과학기술한림원 원장
유 욱 준

함께해주신 분들



김진영 | 서울대학교 재료공학부 교수

서울대학교 태양에너지재료 연구실에서 차세대 태양전지 및 전기화학촉매 연구를 수행하고 있다. 특히, 이론적 한계 효율 극복을 위한 페로브스카이트 기반 초고효율 탠덤 태양전지 연구를 중점적으로 진행 중이며, 태양전지와 전기화학촉매가 연계된 그린 전기화학촉매를 활용한 수전해 및 수처리 연구도 활발히 수행 중이다.



노준홍 | 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

재생전기로의 에너지 전환을 위한 차세대 태양전지 연구를 수행하고 있다. 이를 위해 에너지 전환 소재의 고성능화를 위한 소재의 설계, 합성, 그리고 이들의 상호 집합을 통한 소자화 기술과 성능 분석 연구를 진행 중이다.



박익재 | 숙명여자대학교 첨단소재·전자융합공학부 교수

화석 연료를 대체할 수 있는 지속 가능한 차세대 재생에너지 분야에 활용이 가능한 기능성 유/무기 나노 재료를 설계하고, 재료의 물성을 개선하여 친환경 태양광 발전 등의 미래 지향적 고성능 디바이스를 구현하는 연구를 수행하고 있다.



이윤석 | 서울대학교 기계공학부 교수

화합물 반도체를 이용한 차세대 태양전지 및 에너지 변환 디바이스 연구를 수행하고 있다. 마이크로-나노스케일 역학, 나노스케일 공정기술을 이용한 에너지 디바이스의 고성능화 및 차세대 공정기술 연구를 진행 중이다.



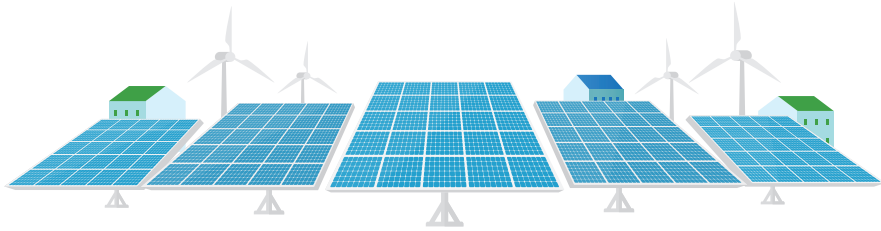
이진욱 | 성균관대학교 성균나노과학기술원 교수

유무기 복합 결정소재를 활용한 광전자소자를 연구하고 있다. 최근 페로브스카이트 태양전지 상용화를 위한 수명향상 기술 및 대면적화 생산 기술을 연구하고 있으며, 2021년, 2022년 Clarivate Analytics에 의해 논문 인용 지수 세계 상위 1% 연구자(HCR)로 선정되었다.

CONTENTS



•	들어가기	04
•	차세대 태양전지 기술개발 현황 및 향후 전망	
	1. 태양전지 개요	07
	가. 태양전지의 필요성	
	나. 태양전지의 원리 및 기술 소개	
	2. 태양전지 개발 현황	11
	가. 소재별 태양전지 종류	
	나. 태양전지 산업 동향	
	3. 차세대 탠덤 태양전지 개발	16
	가. 탠덤 태양전지 기술개발 현황	
	나. 탠덤 태양전지 기술개발 동향	
	4. 차세대 태양전지의 미래 예측	26
	5. 차세대 태양전지 분야 성장을 위한 정책 제언	30
	가. 태양광 발전 중심의 탄소중립 추진 기조 확대	
	나. 탠덤 태양전지 기술 투자 확대	
	다. “K-Solar” 산업 육성 지원	
•	맺음말	33



전 세계적으로 지속 가능한 에너지 생산과 탄소중립에 대한 관심이 높아지면서 태양광 에너지의 중요성이 부각되고 있다. 기후변화 위기로 인해 전 세계적으로 청정한 재생에너지가 주목받고 있는 것이다.

재생에너지를 활용한 에너지 생산이 얼마나 많은 주목을 받고 있는지는 지금도 계속되고 있는 러시아와 우크라이나 간의 전쟁 상황을 보면 알 수 있다. 양국 간 전쟁으로 인해 러시아로부터 유럽연합으로 수출되는 천연가스 공급이 불안정해지면서 에너지 안보 강화 차원에서 유럽연합에서의 태양광 발전이 크게 증가할 것으로 예상되고 있다.

유럽의 선도 국가인 독일은 또 어떠한가? 유럽에서 에너지전환에 가장 속도를 내고 있는 독일은 최근 공식적인 탈원전을 선언하는 등 태양광과 풍력같은 재생에너지 사용을 범정부 차원에서 강하게 주도하고 있다. 그 결과 지난해 독일의 재생에너지 생산 비중은 전체 에너지 생산 중 47%까지 올라갔다.

이와 같이 전쟁의 영향을 받고 있는 지역의 국가나 탈원전을 목표로 하고 있는 국가들이 모두 태양광을 중심으로 하는 재생에너지에 집중하고 있는 이유는 에너지 고갈을 염려할 필요가 없고, 대규모 원료 이송이나 송전이 불필요하며, 기후변화를 늦출 수 있는 대안적 에너지로 여겨지고 있기 때문이다.

특히 태양전지는 태양광 에너지를 전기 에너지로 변환하는 데 있어 핵심적인 역할을 하는 장치다. 태양전지는 발전량과 효율성 향상에 있어 많은 영향을 미치기 때문에 많은 선진 국가들과 기업들이 태양전지 기술 고도화에 열을 올리고 있다.



물론 태양전지가 보다 광범위한 분야에서 활용되기 위해서는 기술적으로 많은 과제가 남아 있는 것이 사실이다. 원료 이송, 집중형 대량 발전 및 송전의 구조를 가지는 기존의 화석연료 기반 발전 생태계와는 다른 새로운 시스템을 필요로 하기 때문이다.

그럼에도 불구하고 친환경성과 안전성, 그리고 탄소 중립성 측면에서 볼 때 태양전지 기반의 태양광 에너지가 다른 에너지들에 비해 월등한 장점을 갖고 있는 만큼 인류의 지속 가능한 미래를 위해서라도 반드시 산적한 과제들을 해결하고 상용화에 성공해야만 한다.

친환경성과 안전성의 측면에서 볼때 기존의 발전 방식과는 달리 냉각수가 필요 없기 때문에 해양이나 주변 환경에 영향을 줄 위험이 없다. 또한 방사성 폐기물과 같은 부산물도 발생하지 않는다.

탄소 중립의 관점에서 봐도 태양광 발전은 국제적으로 탄소 발생 저감을 위한 가장 효과적인 방법으로 인정받고 있다. 태양전지는 깨끗한 에너지인 태양광을 사용하므로 전기를 생산하는 과정에서 탄소 배출이 전혀 없기 때문에 탄소중립이 가능한 것이다. 실제로 국제에너지기구(IEA) 보고서에 따르면 2021년과 2022년 사이 전 세계 탄소배출 감소량의 33%가 태양광 발전에 의해 감소한 것으로 나타났다.

현재 태양전지는 실리콘 소재 기반의 1세대 기술에 머무르고 있다. 대부분의 태양전지 패널이 1세대 기술로 제작되었는데, 저렴하고 생산성이 높다는 장점을 갖고 있지만 현재의 구조 및 기술수준으로는 더 이상의 효율 향상이 어려워 단위 면적당 에너지 생산량인 에너지 밀도가 낮은 한계를 가지고 있다.

따라서 차세대 태양전지 연구는 실리콘이 아닌 페로브스카이트(perovskite) 같은 새로운 소재를 사용하거나 탠덤(tandem) 형태의 새로운 구조로 개발하는 차세대 기술이 주류를 이루고 있다. 차세대 기술은 주어진 면적에서 태양광을 전기에너지로 변환하는 데 있어 1세대 기술에 비해 상대적으로 효율적이기 때문에 경제성이 기존 기술보다 우수하다.

이뿐만이 아니다. 차세대 기술은 얇은 태양전지나 휘어지는 태양전지, 또는 빛을 투과시키는 태양전지 등 디자인 측면에서 볼 때도 1세대보다 더 다양한 제품을 만들 수 있다. 따라서 휴대용 태양전지나 건물 및 자동차에 적용하는 태양전지 등 활용처가 훨씬 더 광범위하다.

이번 차세대리포트는 이처럼 태양전지 기술이 1세대에서 차세대로 넘어가는 과도기 상황에서 발간됐다. 전 세계적으로 진행되고 있는 태양전지 기술 개발의 최신 동향과 각 기술의 장단점, 그리고 이를 바탕으로 예측되는 향후 태양전지 산업의 변화와 발전 방향을 분석하여 제시하는 내용이 담겨있다.

보고서는 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. 첫 번째 장에서는 태양전지에 대한 개요와 필요성에 대해 다루었으며 두 번째 장에서는 태양전지 기술의 현재 상황과 동향, 그리고 장단점을 살펴보았다. 그리고 세 번째와 네 번째 장에서는 차세대 태양전지 기술의 연구 방향과 응용 분야에 대해 예측했고, 마지막으로 다섯 번째 장에서는 태양전지 산업의 발전을 위한 방향과 그에 따른 정책적 개선 방안을 제시해 보았다.



1 태양전지 개요



가. 태양전지의 필요성

인류의 역사는 에너지 확보 기술의 역사라고 표현해도 과언이 아닐 정도로 인류는 생존을 위해 끊임없이 에너지를 구하는 노력을 계속해 왔다. 인류가 구한 첫 번째 에너지는 탄소의 연소반응을 통해 이루어졌는데, 바로 나무를 태워 난방을 하거나 음식을 익혀 먹었던 방식이다. 이후 석탄과 석유, 그리고 천연가스처럼 에너지 밀도가 더 높은 탄소 복합체 연료를 연소하는 방식으로 발전했다. 에너지 밀도가 더 높은 탄소 복합체 연료를 연소하며 얻은 에너지를 통해 인류는 더 높은 온도를 내는 것이 가능해졌고, 이는 청동기 및 철기 시대를 여는데 있어 많은 영향을 미쳤다. 그리고 증기기관에 사용된 석탄 기반의 에너지는 산업혁명을 촉발시키는 계기가 되었다.

연료 소재가 다양해지고 연료와 관련된 기술이 개발되면서 인류는 짧은 시간 동안 많은 에너지를 얻을 수 있게 되었으며, 이는 인구의 급격한 증가라는 결과로 이어졌다. 인구 증가는 더 많은 에너지 수요를 발생시켰으며, 다양한 분야의 기술 발전으로 인해 예전보다 더 많은 에너지가 필요해졌다.

실제로 현재의 인류는 천문학적인 규모의 에너지를 소비하고 있는데, 전 세계적으로 1년 동안 사용되는 전체 에너지량이 자그마치 600엑사줄(EJ) 정도에 달하는 것으로 알려져 있다. ‘줄(J)’은 에너지 및 열량을 표시할 때 쓰는 국제단위로서 엑사줄은 1줄의 10억 배의 10억 배에 해당하는 에너지양이다. 이는 1GW급 원자력 발전소 1기를 1년 동안 쉬지 않고 가동하면 생산할 수 있는 에너지양의 약 2백만 배에 해당하는 양으로서 상상조차 하기 어려운 규모의 에너지를 소비하고 있는 셈이다.

문제는 이들 에너지의 80% 정도가 화석연료로부터 얻어지고 있다는 점이다. 화석연료는 탄소의 연소반응에서 발생하는 열에너지를 기반으로 하고 있기 때문에 일반적으로 사용하는 전기에너지로 전환하는 과정에서 많은 양의 에너지가 손실되고 있다. 그리고 이 과정에서 연소가 제대로 이루어지지 않다 보니 이산화탄소가 대량으로 배출되며 기후변화의 주범이 되고 있는 상황이다.

때문에 인류는 화석연료 대신 다른 에너지원으로부터 에너지를 얻을 수 있는 기술개발에 집중하고 있다. 탄소가 아닌 다른 에너지원을 이용하여 우리가 필요로 하는 많은 양의 에너지를 생산할 수 있도록 하는 기술 전환을 집중적으로 연구하고 있는 것이다. 만약 이러한 기술 전환이 성공적으로 이루어진다면 탄소 배출에 따른 문제를 보다 근본적으로 해결할 수 있다. 탄소 배출과 관련된 문제를 해결하는 데는 여러 가지 방법이 있지만 그 중에서도 최적의 방법은 재생에너지를 사용하는 것이다.

탄소를 기반으로 하지 않는 재생 에너지원들 중에서 인류가 사용할 수 있는 무한한 신재생에너지원으로는 △행성의 운동에너지 △지구 내부의 핵 열에너지 △태양광 에너지 등 3가지를 들 수 있다. 행성의 운동에너지로는 대표적으로 지구와 달의 중력에 의해 발생하는 조류를 활용하는 조력 발전이 있다. 그리고 지구핵 열에너지는 지구 내부의 열에너지를 이용하는 재생에너지다. 마지막으로 태양광 에너지는 탄소를 기반으로 하지 않는 청정한 신재생 에너지원 중에서는 가장 효율적 방법으로 여겨지고 있다.

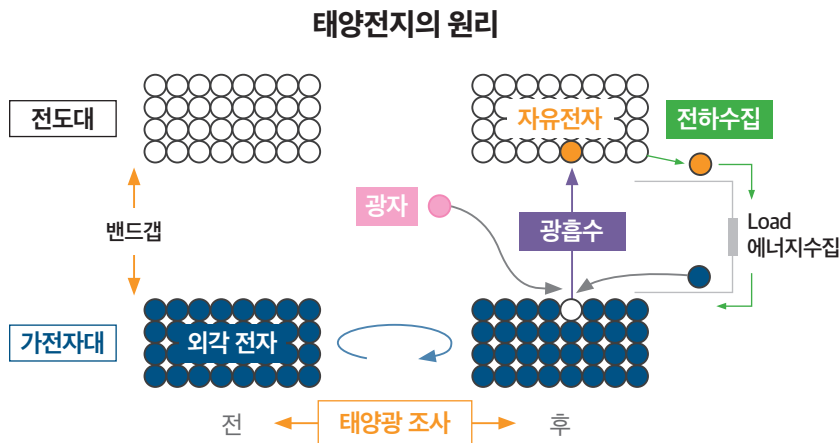
일상생활에서 사용하는 TV나 냉장고 같은 전자제품들 대부분이 전기에너지를 사용하고 있는데, 전기에너지는 다른 에너지들과 달리 전환 시 손실이 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 따라서 에너지 전환 시스템을 성공적으로 구축하기 위해서는 전기에너지의 생산과 저장, 그리고 분배가 매우 중요하다. 특히 탄소 배출이 없는

에너지인 태양광이나 바람에 의해 생산되는 재생전기(renewable electricity)는 탄소중립을 위한 에너지 전환의 핵심이다. 그리고 이런 태양광 에너지를 통해 전기를 만들기 위해서는 태양전지가 필수적인데, 태양전지는 태양에서 나오는 빛을 받아서 전기로 바로 바꿔주는 역할을 한다.

나. 태양전지의 원리 및 기술 소개

태양광은 광자(photon)라는 에너지를 가진 입자로 구성되어 있다. 태양전지는 이 광자를 받아 전자(electron)를 생성하는 장치로 전자의 흐름과 각 전자들이 가진 에너지에 의해 전기에너지가 생성된다. 광자가 전자에 에너지를 전달하면 전자가 자유롭게 이동하여 전류를 생성하는 것이다. 따라서 태양광으로부터 전기를 얻으려면 광자의 수를 가리키는 플럭스(flux)와 각 광자의 에너지가 태양전지 내의 광흡수층에 있는 전자들에게 손실 없이 전달되어야만 한다.

그림 1 태양전지의 원리



(출처 : 고려대학교)

태양전지의 작동 과정은 크게 ‘광흡수 과정’과 ‘전하수집 과정’으로 나뉜다. 광흡수층은 광흡수와 전하수집이 동시에 일어나는 층으로서, 높은 광흡수율과 전하이동도를 갖는 반도체 물질로 만들어진다. 광흡수과정은 광자의 에너지가 광흡수층을 구성하는 원자들의 외각에 있는 전자에게 전달되어 이를 자유 전자로 만드는 과정이다. 이는

광흡수층의 전자 상태를 낮은 에너지 상태인 가전자대(valance band)에서 높은 에너지 상태인 전도대(conduction band)로 전이시키는 것을 의미한다. 이 과정에서 광흡수층의 밴드갭(band gap, E_g)이 중요한 역할을 한다. 밴드갭이란 가전자대와 전도대의 에너지 차이를 뜻하는 것으로, 이보다 높은 에너지의 광자만이 전자를 활성화시킬 수 있으며 낮은 에너지의 광자는 투과되어 지나가게 된다.

이처럼 태양전지는 빛을 전기로 직접 변환해 주기 때문에 직접 방식이라고도 부른다. 직접 방식은 바로 전기를 생산할 수 있어서 효율은 좋지만 면적당 생산되는 전기량이 적어서 넓은 면적이 필요하다는 점이 단점이다. 변환 효율은 좋지만 생산 효율이 떨어지므로 현재로서는 경제성이 낮을 수밖에 없다. 반면에 화석연료는 간접방식으로 전기를 생산한다. 연료를 연소시킨 뒤 이를 터빈 등에 전달해서 운동에너지를 발생시킨 후 전기를 생산하므로 간접방식이라고 한다. 생산 효율은 좋지만 변환 효율이 낮고, 기후변화를 유발하는 온실가스가 지속적으로 발생하는 것이 단점이다.

그렇다면 전기를 만드는 생산 효율이 좋으면서도 온실가스가 발생하지 않는 에너지 시스템을 갖출 수는 없을 것일까? 방법은 있다. 태양전지의 효율을 높이는 기술을 개발하면 된다. 태양전지 효율을 높이면 같은 면적에서 더 많은 전기를 생산할 수 있다. 예를 들어 현재 상용화된 태양전지 효율은 22% 정도에 불과한데, 이를 40% 정도로만 높여도 같은 면적에서 2배의 전기를 생산할 수 있다.

문제는 태양전지의 효율을 어떻게 높일 수 있느냐는 것인데 최근 들어 다중접합 방식을 활용한 기술이 주목을 받고 있다. 탠덤(tandem) 태양전지라는 이름의 이 기술은 여러 개의 전지를 다중적층 형태로 접합하여 전기를 만드는 방식으로서, 현재 사용되고 있는 단일접합 기술보다 효율이 월등하게 높다. 특히 다중접합 태양전지가 상용화되면 국내 환경보전에도 많은 도움을 줄 수 있다. 우리나라 같이 평지가 부족하고 산지 지역이 많은 환경에서는 태양광 발전 면적을 줄여서 자연을 보호하는 것이 중요하기 때문이다.

2 태양전지 개발 현황



가. | 소재별 태양전지 종류

태양전지는 빛을 흡수하는데 사용되는 소재를 기준으로 ‘실리콘계 태양전지’와 ‘무기 화합물계 태양전지’, 그리고 ‘유기 하이브리드계 태양전지’ 등 크게 3가지로 분류할 수 있다.

첫 번째인 실리콘계 태양전지는 빛을 흡수하는 물질로 반도체 칩에도 널리 사용되는 실리콘(silicon)을 사용한다. 1세대 태양전지를 대표하는 실리콘 태양전지는 1900년대 중후반 실리콘 반도체 기술의 발전과 함께 상용화되어 현재 가장 널리 사용되고 있는 태양전지이다. 높은 효율과 우수한 경제성으로 전세계 태양전지 시장의 약 95%를 차지하고 있다.

두 번째는 무기 화합물계 태양전지로서, 두 개 이상의 원소로 구성된 무기 화합물을 빛을 흡수하는 소재로 사용하는 태양전지를 가리킨다. Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) 이나 CdTe 그리고 GaAs와 같은 III-V 화합물 등이 대표적이다. 무기 화합물은 실리콘 소재에 비해 빛을 흡수하는 능력이 우수해 얇은 박막을 활용하여 유연하고 가벼운 태양전지로 제작이 가능하여 휴대용 전자제품이나 인공위성 등에 사용된다. 하지만 실리콘계 태양전지에 비해 상대적으로 가격이 높아 그 사용범위가 제한적이다.

세 번째인 유기 하이브리드계 태양전지는 유기 또는 유기/무기 복합 소재를 빛 흡수층으로 사용한다. 생산 단가가 낮고 유연하며 경량화가 가능하다는 장점을 갖고 있다. 현재까지는 연구개발 단계에 있지만 최근 주목할만한 기술 발전과 함께 상용화를 위한 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다.

특히 페로브스카이트(perovskite) 태양전지는 최근 들어 눈부신 발전을 하고 있는 유기 하이브리드계 태양전지다. 유기 재료와 무기 재료의 특성이 결합되어 있는 유기/무기 복합 페로브스카이트(organic-inorganic hybrid perovskite) 소재를 사용하는 이 태양전지는 최근 10여 년간의 연구로 에너지변환 효율이 상용화된 실리콘계 및 무기화합물계 태양전지와 비슷한 수준으로 높아지면서 최근 국내외에서 상용화를 위한 기술개발이 본격화되고 있다.

 표 1 태양전지 종류별 개발 현황 및 과제

종 류			특 징	에너지 변환효율 (23년 6월 기준)	개 발 단 계
실리콘계	결정계	단결정	• 200μm 정도의 얇은 단결정 Si 기판 이용 • 장점 : 성능, 신뢰성 • 과제 : 저가격화	26.8%	상용화
		다결정	• 작은 결정이 집합된 다결정 기판 이용 • 장점 : 단결정보다 저렴 • 과제 : 단결정보다 낮은 효율	23.3%	상용화
	박막계	비정질	• 비정질 실리콘이나 미세결정 박막을 기판 위에 형성 • 장점 : 대면적으로 양산 가능 • 과제 : 낮은 효율	14.0%	상용화

종류	특징	에너지 변환효율 (23년 6월 기준)	개발 단계
무기 화합물계	CIGS계 • Cu, In, Se 등을 원료로 하는 박막형 • 장점 : 양산가능, 유연화, 경량화 가능 • 과제 : 높은 가격(In,Ga)	23.6%	상용화
	CdTe계 • Cd, Te을 원료로 하는 박막형 • 장점 : 양산가능, 저가격 • 과제 : Cd의 독성	22.3%	상용화
	III-V계 • III족과 V족 원소로 된 화합물 이용 • 장점 : 높은 효율 • 과제 : 저가격화	29.1%	상용화
유기/ 하이브리드계	페로브스카이트 • 유·무기 복합 페로브스카이트박막 이용 • 장점 : 고효율화, 경량화, 저가격화 • 과제 : 양산화, 낮은 수명	26.0%	연구 단계
	염료감응 • TiO₂에 흡착된 염료가 광을 흡수하여 발전 • 장점 : 다양한 색 구현, 실내광 발전 가능 • 과제 : 고효율화, 낮은 수명	13.0%	연구 단계
	유기박막 • 유기반도체를 이용하는 박막형 • 장점 : 저가격화 가능성, 유연화, 경량화 가능 • 과제 : 고효율화, 낮은 수명	19.2%	연구 단계

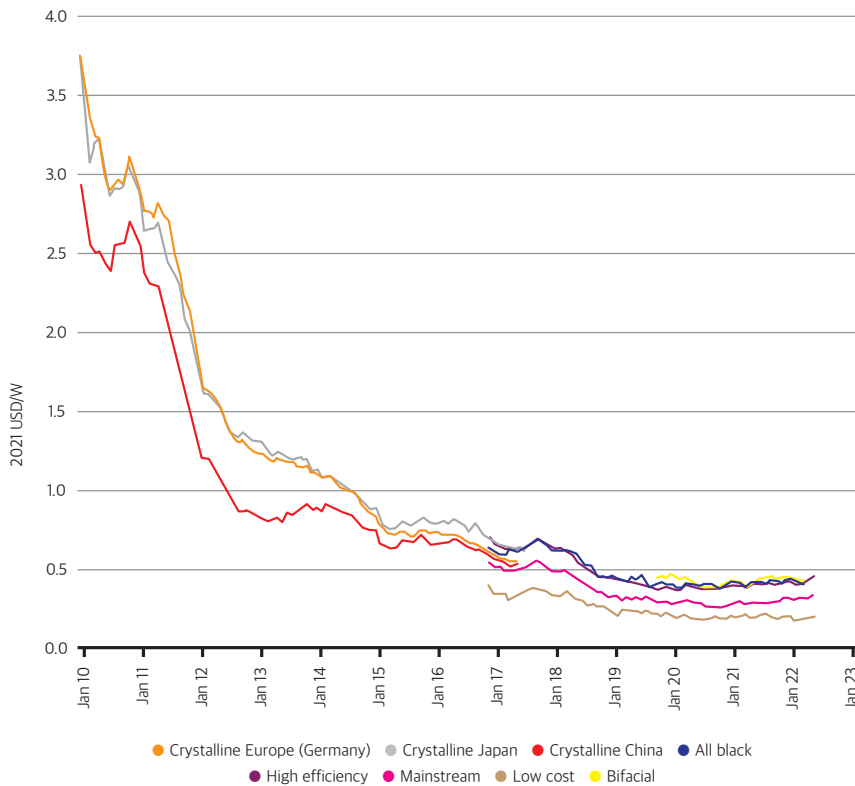
(출처 : 미국 재생에너지연구소 Best Research-Cell Efficiencies)

나. 태양전지 산업 동향

태양전지의 경제성은 1W를 생산하는데 필요한 가격(USD/W), 즉 발전 단가에 의해 결정된다. 이러한 발전 단가는 다양한 요소에 의해 결정되는데 주요 요소로는 태양전지의 에너지 변환 효율과 수명, 그리고 생산가격 등이 있다. 이중 생산가격은 원재료의 수급, 산업 규모 등과 관련이 있는 반면 효율과 수명은 연구개발을 통한 기술개발과 밀접하게 관련되어 있다. 따라서 태양전지의 경제성을 개선하기 위해 효율과 수명을 개선하기 위한 연구개발이 꾸준히 수행되고 있다. 이미 상용화된 실리콘 태양전지의 경우 에너지변환 효율이 1%만 향상되어도 경제성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 실제로 한화큐셀의 보고서에 따르면 태양전지의 발전효율을 1%만 향상시켜도 1천억 원 이상의 비용 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

실리콘계 태양전지는 산업 규모가 성장하고 지속적인 기술개발이 이루어지면서 최근 에너지 변환 효율이 26.8%에 이르렀고, 이에 따라 발전 단가도 지속적으로 감소해 왔다. 하지만 산업규모가 성숙하고 기술적으로는 에너지변환 효율이 하나의 빛 흡수층으로 현실적으로 달성 가능한 28% 수준에 근접한 상황이어서 추가적인 발전 단가 개선은 2019년 이후로 정체된 상태다.

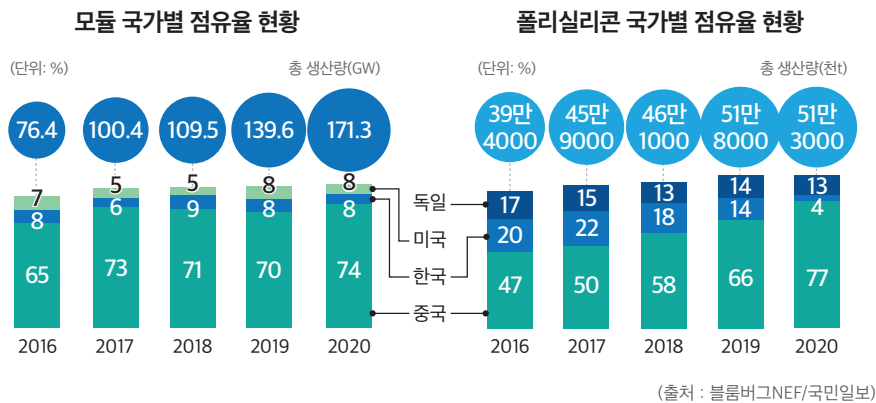
그림 2 실리콘 태양전지 발전 단가 변화 동향



(출처 : Renewable Power Generation Cost in 2021, IRENA)

또한, 실리콘계 태양전지 시장은 중국 정부의 적극적인 지원 정책으로 인해 원재료인 폴리실리콘 뿐만 아니라 모듈 시장을 중국이 전세계 시장의 70% 이상을 점유하고 있는 상황이어서 이를 극복하기 위한 차세대 태양전지 기술개발의 필요성이 대두되고 있다.

그림 3 실리콘 태양광 모듈 및 폴리실리콘 원재료 국가별 시장 점유율 현황



기후변화 대응을 위한 탄소중립의 중요성이 전 세계적으로 부각되고 있는 상황에서 태양광 산업이 신재생 에너지 발전에서 가장 큰 비중을 차지함에 따라 태양광 산업의 해외 의존도가 점차 커지는 상황은 경계할 필요가 있다는 것이 전문가들의 의견이다. 특히 최근 들어서는 국제 정세 변화에 따른 에너지 안보 문제가 대두됨에 따라 각국에서 에너지 생산 기술의 내재화를 위한 정치적, 경제적 노력이 이루어지고 있는데, 이러한 추세로 인해 태양광 산업을 비롯한 다양한 분야에서 기술 개발과 경쟁이 치열해지고 있다.



3 차세대 탠덤 태양전지 개발



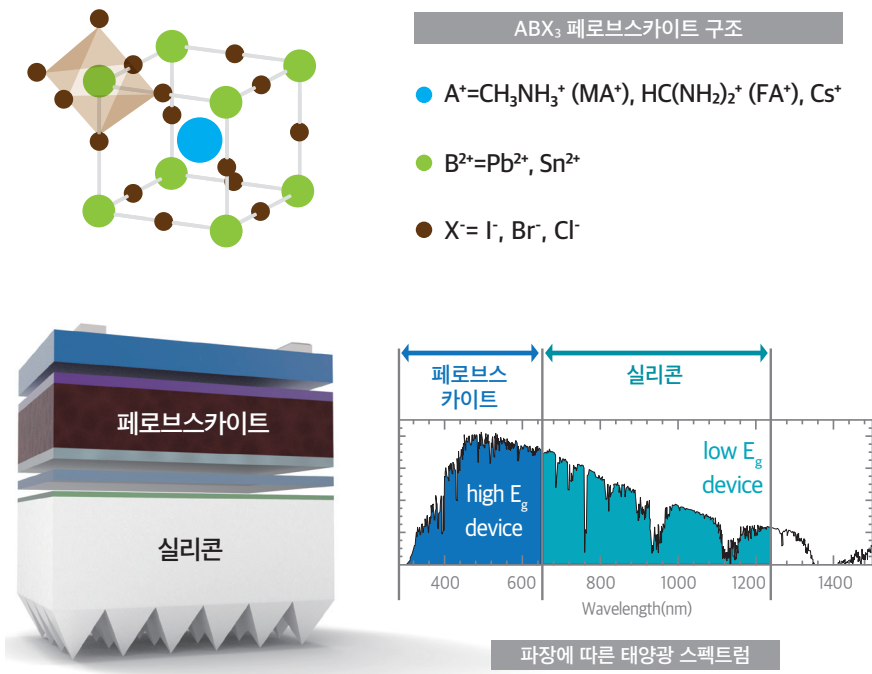
가. 탠덤 태양전지 기술개발 현황

(1) 구조 및 원리

탠덤 태양전지는 두 개 이상의 서로 다른 밴드갭 에너지를 가지는 태양전지를 직렬로 쌓아 올린 구조를 가진 태양전지다. 대표적인 예로는 밴드갭이 큰 페로브스카이트 태양전지를 밴드갭이 작은 실리콘 태양전지 위에 쌓아서 제작한 ‘페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지’가 있다.

탠덤 태양전지는 서로 다른 밴드갭을 가진 두 개의 태양전지를 결합하여 더 넓은 파장대의 태양광 스펙트럼을 흡수하여 전기로 바꿀 수 있다. 상단의 태양전지는 높은 밴드갭을 가지고 있어서 태양광 스펙트럼 중 짧은 파장을 흡수한다. 반면에 하단의 태양전지는 낮은 밴드갭을 가지고 있어서 태양광 스펙트럼 중 긴 파장을 흡수하게 되는데, 이렇게 하면 단층 구조의 기존 태양전지보다 더 높은 효율을 가진 태양전지를 만들 수 있다.

그림 4 페로브스카이트 소재 결정 구조, 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지 소자 구조 및 작동원리



•단파장(고에너지): 페로브스카이트 상부셀

•장파장(저에너지): 실리콘 하부셀

» 초고효율(>35%) 소자 구현

(출처 : 서울대학교)

따라서 탠덤 태양전지는 전체적으로 광에너지 손실을 줄일 수 있는 장점을 가진 태양전지라고 할 수 있다. 기존의 태양전지와 비교하여 큰 밴드갭의 태양전지가 큰 에너지의 광자를 흡수하고 작은 밴드갭의 태양전지는 작은 에너지의 광자만 흡수하여 태양전지가 밴드갭에 비해 지나치게 큰 에너지의 광자를 흡수하여 발생하는 에너지 손실을 방지할 수 있기 때문이다.

탠덤 태양전지에서 쌓아 올리는 이중 태양전지의 수를 늘려감에 따라 이론적으로는 최대 효율이 단일 물질 태양전지의 33%에서 최대 60% 이상까지 증가할 수 있는 것으로 알려져 있다.

(2) 국내외 기술개발 현황

(가) 기술적 태동기(2017년~2019년)

2017년에서 2019년까지의 기간은 기술적 태동기라고 할 수 있다. 미국과 유럽, 그리고 아시아 등을 중심으로 연구 및 개발이 진행되었고, 태양전지에 탑재되는 셀의 프로토타입과 기본 공정 등이 확립되었다.

2017년에는 스탠포드 대학교를 비롯한 아리조나 대학의 공동 연구팀이 용액공정의 페로브스카이트 태양전지와 평탄화된 헤테로접합 실리콘 태양전지를 결합하여 23.6%의 효율을 가진 셀을 최초로 보고했다. 해당 셀은 높은 효율과 함께 기존의 페로브스카이트 태양전지와 비교하여 볼 때 크게 향상된 안정성을 가지고 있어 큰 관심을 받기 시작했다.

2018년에는 스위스 로잔공대를 중심으로 한 연구팀이 진공공정과 용액공정이 결합된 하이브리드 공정을 이용하여 25.2%의 효율을 가진 셀을 개발했다고 보고했다. 이 하이브리드 공정을 통해 헤테로접합 실리콘 하부셀의 피라미드 요철 구조를 그대로 유지하여 높은 광전류를 달성할 수 있었다.

2019년에 접어들며 서울대학교에서는 국내 최초로 용액공정 페로브스카이트 태양전지와 평탄화된 헤테로접합 실리콘 태양전지를 결합한 23.5%의 효율을 가진 페로브스카이트-실리콘 탠덤 태양전지를 보고했다. 또한 중간 재결합층을 보조전극으로 활용하는 3전극 측정 플랫폼을 최초로 제안하여 탠덤 태양전지의 정확한 성능평가 및 최적화가 가능해졌다.

이처럼 학계의 눈부신 연구성과들은 산업계의 주목을 받는 계기로 이어졌다. 결과적으로 우리나라의 LG전자 및 영국의 Oxford PV 등을 포함한 수많은 선도 기업들이 태양전지 연구개발에 참여하게 되었다.

(나) 기술적 성숙기(2020년~2021년)

2020년부터 2021년까지의 기간은 태양전지의 기술적 성숙기였다. 탠덤용 페로브

스카이트 상부셀을 중심으로 많은 연구가 활발히 진행된 시기로서, 특히 2020년에는 사이언스(Science)지에 4편의 우수한 연구 논문이 발표되는 등 많은 성과를 기록했다.

그해 3월에는 콜로라도 대학과 미국 재생에너지연구소(NREL)의 연구팀이 요오드(I)와 브롬(Br), 그리고 염소(Cl)의 3가지 할로젠 원소를 혼합하여 페로브스카이트 상부셀용 고밴드갭 페로브스카이트의 상분리를 억제할 수 있음을 보고했다. 이 연구에서 눈에 띄는 성과는 높은 안정성과 함께 25.8%의 인증 효율을 달성했다는 점이다.

또한 같은 달에는 토론토 대학과 KAUST 연구팀이 용액 기반의 프린팅 공정을 이용하여 페로브스카이트 상부셀을 제작했는데, 작은 크기의 요철 구조를 가진 실리콘 하부셀에서도 셀 제작이 가능하다는 사실을 밝혀냈다. 이 기술로 연구팀은 25.7%의 인증 효율을 달성했다.

역시 같은 달에는 KAIST, NREL, 서울대학교 연구팀이 고밴드갭 페로브스카이트 상부셀에 사용되는 2차원 첨가제를 제어함으로써 성능과 안정성을 크게 향상시킬 수 있음을 발표했다. 이 연구에서는 26.2%의 인증 효율을 기록하여 논문으로 보고된 최고 기록을 세웠다.

마지막으로, 2020년 12월에는 헬름홀츠 연구소의 연구팀이 상부셀의 정공 주입층으로 자기조립 분자막을 활용하여 정공 주입 성능을 향상시킬 수 있음을 보고했다. 이 연구에서는 29.15%의 인증 효율을 달성하여 그해 결과들 중 최고 기록을 세우기도 했다.

이렇게 2020년부터 2021년까지의 기간은 태양전지 연구에 있어 절정기라고 할 수 있을 정도로 많은 연구가 이루어지며 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지의 성능과 안정성이 크게 향상되었다.

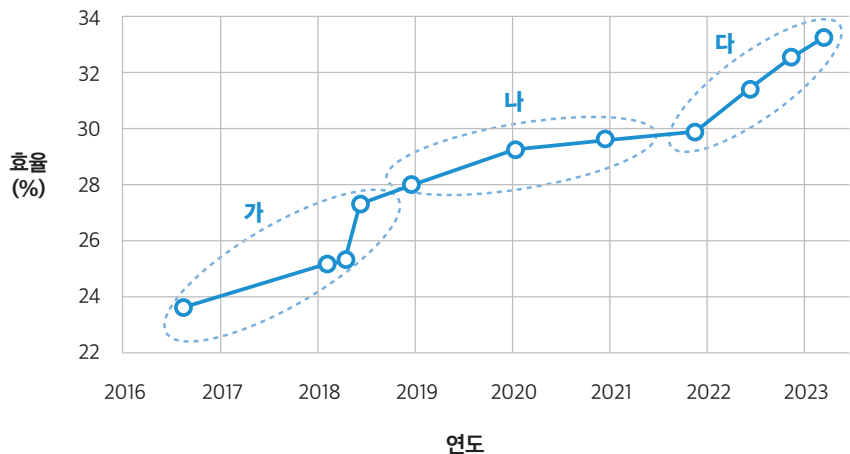
(다) 기술적 재도약기(2022년 이후)

페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지의 효율이 2022년을 기점으로 급격히 향상되면서 재도약기를 맞고 있다. 이같은 성과는 하부 셀 요철 구조의 적극 활용과 기타 광학적 접근을 통해 이루어졌다.

2021년에는 KAUST와 캐나다 토론토 대학의 연구팀이 후면에서도 빛을 조사할 수 있는 양면 수광형 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지를 처음으로 보고하여 25.2%의 인증 효율을 기록했다.

2022년에는 헬름홀츠 연구소가 실리콘 하부 셀 표면에 요철 구조가 아닌 나노광학 구조를 형성하여 29.8%의 인증 효율을 기록했다. 이후에도 스위스의 CSEM과 로잔 공대 연구팀, 헬름홀츠 연구소 연구팀, KAUST 연구팀이 31.25%, 32.5%, 33.2%, 33.7%의 인증 효율을 기록하는 등 효율이 증가하는 추세를 보이고 있다.

그림 5 시기별 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지 효율 증가 추이



(출처 : 서울대학교)

산업계의 관심도 크게 증가하여 우리나라의 한화큐셀은 물론, 스위스의 Meyer Burger와 영국의 Oxford PV, 그리고 미국의 Tandem PV 등 다양한 대기업과 스타트업 기업들이 활발한 연구개발을 수행하고 있다.

나. 탠덤 태양전지 기술개발 동향

(1) 실리콘계 페로브스카이트 탠덤 태양전지 개발 방향

차세대 탠덤 태양전지 기술은 두 개의 광흡수층을 사용하는 이중 접합구조 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 기술은 페로브스카이트 소재를 활용하기 때문에 빛을

흡수하는 파장 대역을 쉽게 조절할 수 있고, 높은 효율과 낮은 공정 가격의 장점을 갖고 있어 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

가장 상용화에 가까운 기술은 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지다. 이미 인증 효율 기준으로 1cm² 면적에서 33%가 넘는 변환 효율을 보여주고 있다. 페로브스카이트와 실리콘 소재를 사용한 태양전지 연구에서 앞으로의 탠덤 태양전지 기술의 개발 방향은 크게 △효율 향상 △장기 안정성 확보 △대면적 셀 공정 개발의 세 가지로 분류할 수 있다.

(가) 효율 향상

❖ 광포집 향상

첫째 개발 목표인 효율 향상은 빛을 더 많이 흡수하도록 하거나, 같은 양의 빛을 흡수했을 때 더 많은 전기를 생산하도록 하는 것이다. 빛을 더 많이 흡수하기 위해서는 소자 상부에서 발생하는 기생흡수와 반사에 의한 손실을 최소화해야 한다. 태양전지에는 광활성층 이외에도 전하 수송층, 전극, 부동화층 등이 존재하므로 이들 층의 광학적 특성을 향상시켜 흡수와 반사 손실을 최소화하는 것이 중요하다. 따라서, 전기적 특성과 광학적 특성이 우수한 소재를 개발하거나 두께 등을 최적화하여 손실을 줄일 수 있다.

또한, 외부 손실 방지 외에 광활성층 소재의 결정성을 향상시켜 같은 두께에서 더 많은 전기를 생산하는 기술도 개발되었다. 이를 위해 소량의 첨가제를 전구체 용액에 첨가하거나 결정 성장을 제어하여 고품질의 광활성층 소재를 합성하기 위한 연구도 진행되고 있다.

❖ 전하 손실 방지

생산된 전기를 전극까지 손실 없이 전달하는 것도 매우 중요하다. 전달 손실은 주로 소재 내부의 결함이나 박막 간 계면에서 발생한다. 탠덤 태양전지는 많은 수의 박막으로 이루어져 있어서 계면이 많고, 계면에 존재하는 결함이 전하 손실을 유발한다. 따라서 전하가 박막에서 박막으로 전달될 때 계면에서의 손실을 최소화하기 위한 기술이 중요하다. 이를 위해 계면의 결함을 감소시켜주는 부동층(passivation layer)을 형성하거나, 전하가 물질 간에 전달될 때 전기적 장벽(barrier)에 방해받지 않도록 에너지 레벨을 제어하는 연구가 수행되었다.

(나) 장기 안정성 확보

두 번째로 태양전지의 장기 안정성 확보는 상용화를 위해 매우 중요하다. 설치 후 10년 이상은 안정적으로 유지되어야 하는데, 안정성은 주로 열, 수분, 빛에 대한 내구성을 포함해야 가능하다. 문제는 안정성을 확보하기 위한 해결 방향이 각각의 원인에 따라 다르다는 점이다.

❖ 열 안정성

열 안정성은 주로 메틸암모늄(MA)을 포함한 페로브스카이트 조성에서 문제가 된다. MA를 함유한 페로브스카이트는 고품질 소재를 형성하기 쉽지만, 고온 환경에서 MA가 휘발되면서 페로브스카이트 소재가 분해되는 열안정성 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 양이온으로는 열에 강한 포르마미디늄(FA)을 사용하거나 무기 양이온인 세슘(Cs)을 혼합하는 연구가 수행되었다. MA를 완전히 배제하는 것은 결정 성장을 제어하기 어려우므로 이를 극복하기 위한 첨가제 활용이나 용매 혼합비율 조절 등의 연구가 진행되었다.

또한 MA 또는 FA와 같은 유기 양이온을 완전히 배제하고 Cs 양이온만을 사용하는 무기 페로브스카이트도 활발히 연구되고 있다. 높은 농도의 Cs를 함유한 페로브스카이트는 밴드갭이 1.7eV 이상이며, 탠덤 태양전지 상부셀 소재로 매우 적합하므로 큰 관심을 받고 있다.

❖ 수분 안정성

수분 안정성은 페로브스카이트 소재의 이온결합 특성으로 인해 발생한다. 이는 소재의 기본적인 특성에 기인하므로 물리적으로 수분을 차단하여 안정성을 높이는 것이 바람직하다. 일반적으로 공기 중의 수분이 소자의 열화 현상을 유발하므로 다양한 수분 차단막을 페로브스카이트 상부에 형성하여 안정성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 예를 들어 페로브스카이트 상부에 ‘원자층 증착법(atomic layer deposition)’을 이용해 조밀한 산화물 박막을 형성하거나, 봉지재를 사용하여 공기를 완전하게 차단하는 연구가 수행되고 있다.

수분 안정성을 향상시키는 또 다른 방법으로는 화학적으로 안정성이 높은 2D 페로브스카이트에 대한 연구가 있다. 특정 크기 이상의 유기 양이온을 A-site에 첨가하면 3D 구조 대신 2D 구조를 형성한다. 2D 페로브스카이트는 수분 안정성이 우수하지만 전기적 특성은 3D 페로브스카이트에 비해 낮기 때문에 연구진들은 2D와 3D 구조의 페로브스카이트 조성을 혼합하거나 이중층 구조를 통해 우수한 전기적 특성과 수분 안정성을 동시에 달성하기 위한 연구를 수행했다.

❖ 광 안정성

탠덤 태양전지에 사용되는 페로브스카이트는 고에너지의 빛을 흡수하기 위해 X-site의 요오드 음이온을 브롬으로 일부 치환해야 한다. 그러나 고농도의 브롬을 포함한 페로브스카이트 소재는 지속적인 광조사 시 브롬이 이동하여 소재 내에서 요오드가 풍부한 영역과 브롬이 풍부한 영역으로 분리되는 문제가 발생한다. 이는 셀의 효율과 안정성에 부정적인 영향을 미치지만, 캡슐화 등으로는 해결할 수 없으며 근본적인 해결책은 한 가지 할라이드 음이온으로만 이루어진 소재를 개발하는 것이다. 최근 연구에서는 브롬을 첨가하는 대신 A-site의 양이온을 치환하여 탠덤 태양전지에 적합한 밴드갭을 가진 페로브스카이트 소재의 개발에 성공했다.

(다) 대면적 셀 공정

마지막으로 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지의 상용화를 위해서는 대면적 셀 공정 개발이 필요하다. 실리콘 태양전지의 경우 모듈을 이루는 하나의 셀의 크기가 약 6인치로 매우 크기 때문에 페로브스카이트 소재도 6인치 사이즈의 균일한 박막을 형성할 수 있는 기술이 필요하다. 현재 연구실 단계에서는 1인치 이하의 소면적의 페로브스카이트 소재가 주로 사용되고 있다. 소면적 소재는 주로 용액을 이용한 스프인코팅 공정으로 합성되지만, 스프인코팅 공정은 면적이 큰 박막을 형성하는 데에는 적합하지 않다는 문제점을 안고 있다.

따라서 대면적 기판에 균일하게 박막을 형성하기 위해 바(bar)를 이용하여 용액을 펴바르는 바 코팅 기술이나 페로브스카이트 전구체 물질을 기화시켜 대면적 기판에

고르게 형성하는 열증착 기술이 연구되고 있다. 특히, 고품질의 페로브스카이트 박막을 얻기 위해서는 바 코팅에서 적절한 결정화 속도를 유지하는 것이 핵심이다. 그리고 열증착 기술에서는 전구체 간 비율을 정확하게 조절하여 잔여물이 남지 않도록 최적화하는 것이 중요하다.

(2) 비실리콘계 페로브스카이트 탠덤 태양전지 개발 방향

페로브스카이트/페로브스카이트나 페로브스카이트/유기태양전지, 또는 페로브스카이트/박막 태양전지 등 비실리콘계 탠덤 태양전지도 최근 활발히 연구되고 있다. 비실리콘계 탠덤 태양전지는 실리콘계 탠덤 태양전지와 매우 유사한 연구 방향을 갖지만 연구의 진척도는 실리콘계 대비 늦다. 여기에서는 하부셀 소재에 따라 발생하는 문제를 간략하게 소개하고자 한다.

페로브스카이트/페로브스카이트 탠덤 태양전지는 하부셀에 B-site의 Pb 양이온 일부가 Sn으로 치환된 좁은 밴드갭을 가진 페로브스카이트를 사용한다. 하지만 공기 중에 노출 시 소재 내의 Sn^{2+} 이온이 쉽게 Sn^{4+} 로 산화되어 소재가 금속화되고 하부셀의 쇼트를 유발할 수 있다. 따라서 Sn^{2+} 의 산화를 억제하여 셀의 안정성을 향상시키는 연구와 개발이 진행되고 있다. 만약 쇼트가 발생하게 되면 전류가 제한 없이 흐르게 되어 소자가 작동하지 않는 문제가 발생할 수 있다.

페로브스카이트/유기태양전지 탠덤은 유기 소재의 이종접합(bulk heterojunction) 구조의 안정성 향상이 주요 이슈다. 마찬가지로 상용화를 위한 대면적 연구가 필요하나 효율 향상과 안정성 확보가 선행되어야 한다.

페로브스카이트/박막 탠덤 태양전지 연구는 하부셀인 박막 태양전지의 요철이 심한 표면 위에 수백 나노미터 두께의 페로브스카이트 상부셀을 균일하게 형성하는 연구에 주로 집중되고 있다. 이를 위해 하부셀 표면을 물리적 또는 화학적인 방법으로 평탄하게 만들거나 자기조립단층(self-assembled monolayer)을 활용하여 균일한 박막을 형성하는 연구가 진행되고 있다.

표 2 탠덤 태양전지 종류별 개발 방향

	실리콘계			비실리콘계		
셀 분류 (상부셀-하부셀)	페로브스카이트 - 실리콘			페로브-페로브	페로브-유기	페로브-박막*
개발 목표 (주요이슈)	효율 향상	장기 안정성	대면적 공정	장기 안정성	장기 안정성	효율 향상
개발 내용	- 광포집 향상 - 전하 손실 방지	- 메틸암모늄 Free 소재 (열) - 수분 차단막 기술 (수분) - 상분리 억제 (광)	바(Bar)/진공공정 개발	Sn 산화 방지	고안정성 유기소재 개발	균일한 상부셀 형성 기술

* 칼코제나이드계
(출처 : 숙명여자대학교)



4 차세대 태양전지의 미래 예측



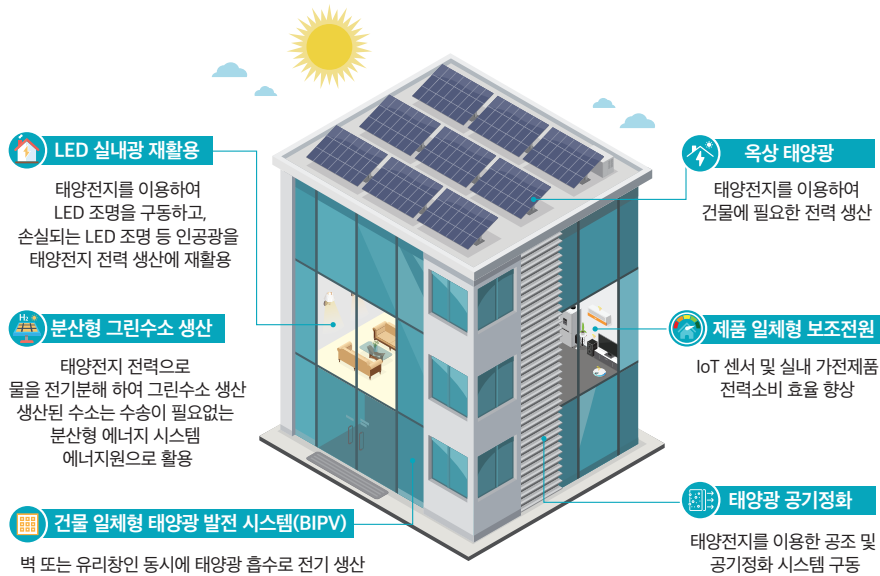
탠덤 태양전지는 일반 태양전지보다 동일한 면적에서 더 높은 전력을 생산할 수 있어서 설치 면적이 제한된 장소라도 효과적으로 적용할 수 있다. 이는 도심이나 소형 건물과 같이 태양전지를 설치할 수 있는 면적이 제한적인 경우에서 유용하게 발휘되는 성능이기 때문에 탠덤 태양전지를 사용하면 더 많은 발전량을 얻을 수 있다. 특히 항공기나 인공위성, 또는 선박이나 자동차처럼 설치 면적이 제한되어 있고 가벼운 무게의 태양전지가 필요한 경우에 탠덤 태양전지를 사용하면 무게당 출력밀도를 향상시킬 수 있다. 이는 이동성이 중요한 분야에서 매우 유용하다.

또한 탠덤 태양전지는 높은 전압이 필요한 응용 분야에도 효과적으로 사용될 수 있다. 예를 들어 광수전해 방식으로 수소를 생산하는 경우에는 높은 전압이 필요한데, 탠덤 태양전지를 사용하면 이를 쉽게 구현할 수 있다. 따라서 탠덤 태양전지의 고전압 출력 특성은 다양한 분야에서 높은 전압을 필요로 하는 상황에서 유용하게 사용될 수 있다.

이 외에도 탠덤 태양전지는 다양한 환경에서 효과적으로 사용될 수 있다. 이는 실내와 실외, 그리고 이동수단 및 우주환경 등 다양한 곳에서 활용될 수 있다는 의미다.



그림 6 제로에너지 건축물 관련 다양한 태양전지의 응용 예시



(출처: 제로에너지건축물, 서울대학교)

❖ 실내환경 적용 분야

실내환경의 경우 탠덤 태양전지는 일반적인 태양광보다 훨씬 낮은 세기의 인공 광원만으로도 충분히 작동할 수 있다. 낮은 광량의 빛이라도 좁은 면적에서 효율적으로 변환하는 장점 때문에 탠덤 태양전지는 소형 전자기기나 센서, IoT(Internet of Things) 디바이스 등을 작동시키는 데 사용될 수 있다. 다만, 이를 위해서는 사용하는 광원의 특성에 적합한 밴드갭을 조절해야 하는 조건을 충족해야만 한다.

❖ 건물 통합 시스템 적용 분야

건물의 외벽이나 구조물 등에는 탠덤 태양전지를 적용하여 고효율 BIPV(Building Integrated Photovoltaics) 시스템을 구현할 수 있다. BIPV는 건물 일체형 태양광 발전 시스템으로서, 창문이나 벽면, 발코니 등 건물 외관에 태양광 발전 모듈을 장착하여

자체적으로 전기를 생산할 수 있도록 구축한 시스템이다. 특히 박막 형태의 탠덤 태양전지는 구부릴 수 있는 유연성을 가지고 있어서 접이식 차양막이나 곡면 구조물 등에 설치하기가 용이하다. 이를 통해 건물의 외관을 그대로 유지하면서도 태양전지를 효과적으로 활용할 수 있다. 또한 탠덤 태양전지는 태양빛의 투과율을 조절할 수 있어서 건물의 에너지 손실을 줄이거나 실내 온도를 조절하는 스마트윈도우(smart window)의 통합된 전원으로 활용할 수 있다.

❖ 실외환경 적용 분야

실외 환경에서는 탠덤 태양전지의 장점이 더욱 진가를 발휘할 수 있다. 전력망에 연결되지 않은 오프그리드(off-grid) 상황에서도 쉽게 사용할 수 있는 에너지원이기 때문이다. 무게와 면적이 작을수록 유리하므로 이동식 전원 시스템에서는 탠덤 태양전지를 사용하여 경량이면서도 소형의 고출력 전원 시스템을 구현할 수 있다. 따라서 캠핑 등 레저용 뿐만 아니라 군사용 전원장치로도 활용될 수 있다.

앞에서도 언급한 것처럼 박막 형태의 유연한 탠덤 태양전지는 천막처럼 얇은 직물에 적용하여 사용할 수 있으며, 탠덤 태양전지의 구조적 특성상 신축성이 높으면서도 손상되지 않는 태양전지를 제작할 수도 있다.

❖ 미래 이동수단 적용 분야

한편 자동차나 선박, 또는 항공기 같은 이동 수단은 태양전지를 설치할 수 있는 공간이 제한적이고, 공기저항을 줄이기 위해 곡면 형태로 되어 있는 까다로운 조건으로 이루어져 있다. 하지만 박막 형태의 유연한 탠덤 태양전지를 사용하면 이런 조건을 극복하고 효과적으로 활용할 수 있다. 또한 소형 드론과 같은 무인 비행체의 이동 거리를 향상시키기 위해서는 경량이면서 고출력의 전력원이 필수적인데, 이런 경우에는 페로브스카이트/페로브스카이트 탠덤 태양전지처럼 초경량 태양전지를 사용할 수 있다.

❖ 우주 기술 적용 분야

이 외에도 탠덤 태양전지는 인공위성 및 우주탐사와 같은 응용 분야에서도 사용할 수 있다. 이는 원자력 전지보다 저렴하면서도 반영구적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

우주 환경에서는 내방사선 특성이 우수하며, 낮은 온도에서도 고출력을 유지할 수 있는 페로브스카이트 태양전지가 효과적으로 활용될 수 있다.

그림 7 모빌리티, 항공 및 우주용 태양전지 응용



시간 당 약 12km 연비 향상

방사선 내성 / 고효율

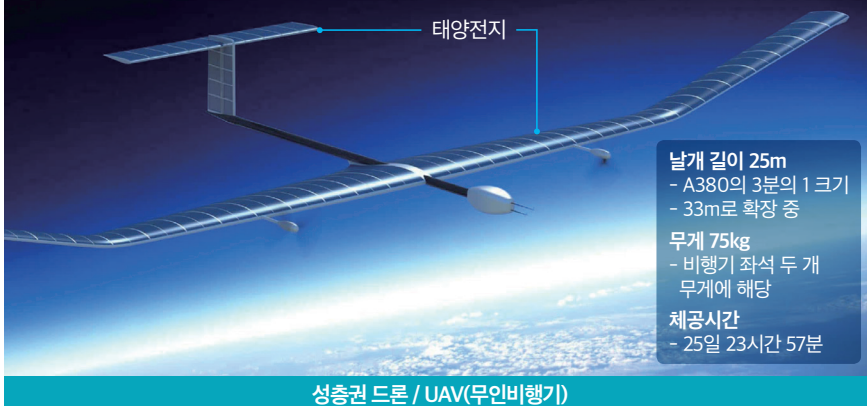
인공위성 대체할 태양전지 드론

지구 상공 20km 성층권에서 활동하는 초대형 드론이 잇따라 개발되고 있다. 인공위성보다 훨씬 지구에 가까워 지상을 더 잘 관측할 수 있으며, 기후 변화가 덜한 성층권에서 활동하여 지구(氣球)나 기존 항공기보다 더 안정적으로 과학 연구나 인터넷 중계 등에 활용할 수 있다는 장점이 있다.



프랑스 에어버스의 제퍼 S (Zephyr S)

2018년 7월 11일 미국 애리조나주에서 이륙해 21km 상공에서 약 26일 체공 기록, 낮에 태양전지로 전기 생산, 배터리 충전해 밤에 사용



(출처: 라이트이어, 서울대학교, 오로라 플라이트 사이언스)

5 차세대 태양전지 분야 성장을 위한 정책 제언



가. 태양광 발전 중심의 탄소중립 추진 기조 확대

올해 열린 주요 7개국(G7) 기후·에너지·환경 장관회의에서는 오는 2030년까지 태양광 발전을 1TW 이상으로 확대하고, 2035년까지 전력부문에서 탈탄소화를 달성하기로 합의했다. 이 합의는 특히 페로브스카이트 탠덤 기술과 같은 혁신적인 기술을 도입하는 것을 명시하고 있어서 현재의 시대적 상황에 부합하는 중요한 결정이다.

특히 미국의 경우 인플레이션 감축법인 IRA 서명 후 총 1500억 달러에 달하는 투자를 적극적으로 유치했는데, 태양광 발전 분야에서는 26개 제조시설을 구축하여 96GW 수준의 생산용량을 계획한다고 발표했다. 이 중에는 우리나라의 한화큐셀이 조지아주에 3조 2천억 원을 투자하여 태양광 생산단지를 구축하는 계획도 포함되어 있다.

글로벌 기업들도 RE100에 대응하기 위해 태양광 발전을 적극적으로 확대하고 있다. 아마존과 메타, 그리고 구글 같은 기업들은 각각 12.4GW, 8.7GW, 6.2GW의 태양전지 및 발전 시설을 구매하여 활용하고 있으며, 국내 대기업인 삼성전자와 SK, 현대자동차, LG, 네이버 등도 RE100 동참을 선언했다. 다만, 예를 들어 삼성전자 단일 기업이 RE100을 달성하기 위해서는 국내에 설치된 태양전지 총량의 12배에 해당하는 설치량이 필요할 정도로 아직 설치량이 부족한 상황이다.



우리나라는 2030년까지 신재생에너지 발전 비중을 22% 이상으로 증가시키는 계획을 발표했지만, 현재의 증가 속도로는 이 목표를 달성하는 것이 어려운 상황이다. 따라서 국내에서는 보다 적극적으로 확대 정책을 추진할 필요가 있으며, 이러한 상황을 고려하여 미래를 대비한 조치도 필요하다.

나. | 탠덤 태양전지 기술 투자 확대

페로브스카이트 기반의 탠덤 태양전지 기술은 혁신적인 신기술로 전 세계에서 인정받고 있으며, 선진국들을 중심으로 공격적인 투자가 진행되고 있다. 유럽연합(EU)은 지난 2022년 11월 ‘페퍼로니(PEPPERONI)’ 프로그램을 시작했다. 이 프로그램은 페로브스카이트 실리콘 탠덤 태양전지 기술에 1500만 달러를 투자하는 계획으로서, 한화큐셀과 헬름홀츠 연구소(HZB) 등이 해당 투자를 받아 연구를 진행하고 있다. 또한 미국은 지난 4월 태양전지 연구개발에 총 8천2백만 달러를 투자하기로 결정했으며, 이 중 1천8백만 달러를 MIT 공대와 미국 재생에너지연구소(NREL) 등에 투자하여 페로브스카이트 실리콘 탠덤 태양전지 기술을 중점적으로 개발한다는 계획을 세웠다.

우리나라의 경우 산업통상자원부와 과학기술정보통신부를 중심으로 꾸준한 연구개발 지원이 이루어지고 있다. 페로브스카이트 태양전지와 페로브스카이트 실리콘 탠덤 태양전지 분야에서 세계적인 선도 연구 그룹들을 육성해 왔으며, 실제로도 해당 기술들을 선도하고 있다. 문제는 각 부처나 요소 기술별로 투자가 분산되어 진행되어 왔기 때문에 지금까지 구축한 기술적 우위와 초격차를 유지하기 위해서는 타 선진국들의 공격적인 연구개발 투자에 적극적으로 대응할 필요가 있다는 점이다.

따라서 범부처 차원의 지원을 통해 원천기술부터 산업기술까지 포괄하는 체계적이고 통합적인 대규모 연구개발 투자가 시급한 상황이다.

다. | “K-Solar” 산업 육성 지원

지금까지의 태양광 발전 정책은 주로 보급량 확대에 초점을 맞추어 왔다. 태양광 발전 설치를 통해 실질적인 탄소 감소를 이룰 수 있기 때문에 보급 및 발전량 확대는 매우 중요한 요소이다. 따라서 앞으로도 적극적인 확대 정책이 필요한 상황이다.

종종 우리나라의 지형과 기후가 태양광 발전에 최적의 조건이 아니라는 반론이 제기되곤 한다. 하지만 이 과정에서 간과되는 매우 중요한 관점이 있는데, 바로 태양광 발전 분야가 전 세계적으로 약 350조 원에 달하는 막대한 시장을 형성하고 있다는 점이다. 중국 태양광 산업협회에 따르면 지난해 중국의 태양광 발전 관련 수출액은 전년 대비 80.3%가 증가하여 512억 달러(한화로 67조 원)에 이르는 것으로 나타났다. 이는 중국 내수를 제외한 수출액으로서, 지난 2021년의 삼성전자 반도체 사업 전체 매출인 655억 달러와 비슷한 규모다. 최근 들어 약 12조 원 규모의 사우디아라비아 원전 수출 협의에 대한 기사가 보도되어 ‘K-원전’이라는 수식어와 함께 우리 원자력 발전 기술의 산업적 가치가 재조명된 바 있다. 그런데 태양광 발전 분야는 이보다 훨씬 큰 규모의 시장이다.

우리나라 연구자들은 차세대 태양전지 분야에서 높은 연구 역량을 발휘하며 전 세계적으로도 연구를 선도하고 있고, 중국 중심의 태양전지 시장에서 기술력으로 경쟁력을 확보한 국내 기업도 있을 정도로 우리나라는 높은 경쟁력을 확보하고 있다. 따라서 반도체나 원전과 같이 기술적 우월성을 바탕으로 연구개발과 기업 운영에 대한 전폭적인 지원을 통해 ‘한국형 태양전지 시스템(K-Solar)’이라는 또 하나의 성공적인 산업을 육성할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다. 그런 기대가 실제로 이루어진다면 K-Solar를 통해 탄소중립 및 온실가스 감축목표를 달성할 뿐만 아니라 수출을 통해 국익을 창출하면서 두 마리 토끼를 동시에 잡을 수 있을 것으로 전망되고 있다.



불과 얼마 전까지만 하더라도 태양광이 화석연료를 대체할 수 있는 에너지로 발전하리라고 예상한 사람들은 많지 않다. 하지만 유명 SF 소설가인 ‘윌리엄 깁슨(William Gibson)’이 언급했던 ‘미래는 이미 우리 곁에 와 있다. 다만 널리 알려지지 않았을 뿐이다’라는 말처럼 태양광은 어느새 태양전지를 통해 우리에게 꼭 필요한 미래의 에너지로 자리를 잡아가고 있다.

실제로 국제에너지기구(IEA)가 지난해 발표한 자료에 따르면 태양전지 설치 용량이 매년 약 20%씩 빠른 속도로 성장하고 있으며, 오는 2030년 경에는 약 10테라와트(TW)에 달할 것으로 예측됐다. 10TW라고 하면 얼마나 큰 규모인지 선뜻 실감이 나지 않는데, 10조 와트(Watt)의 태양전지가 설치되어 운영된다는 것을 의미한다. 일반 가정용 전구의 전력이 보통 50와트인 것을 감안하면, 10조 와트는 약 2천억 개의 가정용 전구가 동시에 켜져 있는 것과 같고 원자력발전소로 치면 1만 기의 발전소가 동시에 생산하는 전력에 해당하는 양이다.

태양전지 설치 용량이 매년 빠르게 증가하고 있는 이유는 태양전지 가격이 과거에 비해 현저히 낮아졌기 때문이다. 2010년에는 1와트(W)당 약 3.0달러였던 발전 단가가 2022년에는 1W당 0.3달러 수준으로 약 10배 이상 낮아져 화석연료와 비슷한 가격 수준에 도달하였다. 이처럼 지속적인 기술개발로 태양전지 가격이 낮아지고 신재생에너지 산업의 대중화를 가져오게 되면서 사용되는 신재생에너지의 상당 부분이 태양광으로 충족될 수 있을 것으로 전망되고 있다.

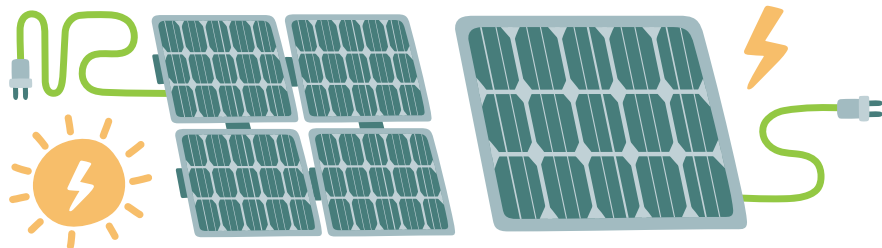
현재 태양전지 시장은 실리콘 태양전지를 중심으로 이루어져 있다. 실리콘 태양전지는 안정성과 신뢰성 측면에서 검증된 기술이지만, 비용과 효율성 측면에서는 여전히 개선의 여지가 있으며, 핵심 에너지 기술 내재화의 측면에서 차세대 기술 개발이 필요하다.

그런 점 때문에 새로운 기술과 소재로 무장한 차세대 태양전지가 많은 관심을 받고 있다. 새로운 기술이 적용된 탠덤 태양전지와 박막 태양전지는 높은 변환효율과

다양한 활용가능성으로 인해 현재 활발하게 연구개발이 진행되고 있다. 특히 새로운 소재 개발이 차세대 태양전지 기술 발전에 커다란 영향을 미치고 있다. 대표적으로, 페로브스카이트 소재를 활용한 단일접합 및 다중접합 탠덤 태양전지 기술이 주목 받고 있으며, 이들은 기존의 실리콘 태양전지와 비교하여 높은 에너지 변환효율을 달성할 수 있다.

물론 차세대 태양전지라고 해서 완벽한 것은 아니다. 실생활에 사용하기에는 아직 부족한 점들이 있다. 따라서 이런 단점을 보완하기 위해 학계와 산업계는 끊임없이 기술개발에 매진해야 한다. 또한 정부는 지속적으로 연구개발을 지원해야 하며, 특히 범정부 차원의 적극적인 투자를 아끼지 말아야 한다. 아울러 국제적 협력과 지식 공유를 통해 태양전지 기술의 글로벌 확산 및 보급을 추진해야 하는 것도 풀어야 할 과제다.

이처럼 해결해야 할 과제들이 많음에도 불구하고 태양전지 기술의 미래는 밝으며, 우리는 태양전지 기술을 통해 만들어질 더 나은 미래에 대한 희망을 가지고 있다. 다양한 분야의 전문가들과 협력하여 태양전지 기술의 진보와 적용을 촉진하며, 에너지 고갈과 기후변화에 대한 해결책을 현실로 이끌어 나가는 데 있어서 이번 차세대리포트가 조금이나마 기여할 수 있기를 기대해 본다.



차세대리포트(최근 3개년)

2020 뉴로모픽칩, 인간의 뇌를 담은 작은 반도체
대학의 미래, 젊은 과학자의 시선으로 바라보다
암과의 전쟁, 암 정복을 향한 꿈의 치료법
디지털 헬스케어, 건강관리의 새로운 패러다임

2021 자율주행, 그 이상의 모빌리티 생각하는 자동차
젊은 과학자의 눈으로 바라보다, 과학기술 2050
학령인구 절벽시대를 마주하다, 대학이 나아갈 길
새로운 팬데믹, 어떻게 준비해야 할까?

2022 우주 개척, 어떻게 해야 할까?
유전체 교정 작물, 식량안보의 대안이 될 수 있을까?
코로나19 엔데믹 전환과 롱코비드 문제 어떻게 대응할 것인가?
책임성 있는 AI를 위한 조건은?

한국과학기술한림원은,

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다. 1,000여 명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며, 각 회원의 지식과 역량을 결집하여 과학기술 발전에 기여하고자 노력해오고 있습니다. 그 일환으로 기초과학연구의 진흥기반 조성, 우수한 과학기술인의 발굴 및 활용 그리고 정책자문 관련 사업과 활동을 펼쳐오고 있습니다.

한림석학정책연구는,

우리나라의 중장기적 과학기술정책 및 과학기술분야 주요 현안에 대한 정책자문 사업으로 한국과학기술한림원 회원들이 직접 참여함으로써 과학기술분야 및 관련분야 전문가들의 식견을 담고 있습니다. 한림연구보고서, 차세대리포트 등 다양한 형태로 이루어지고 있으며 국회, 정부 등 정책 수요자와 국민들에게 필요한 정보와 지식을 전달하기 위하여 꾸준히 노력하고 있습니다.

한국과학기술한림원 더 알아보기

 홈페이지 www.kast.or.kr
 블로그 kast.tistory.com
 포스트 post.naver.com/kast1994
 페이스북 www.facebook.com/kastnews





KAST 한국과학기술원
The Korean Academy of Science and Technology

(13630) 경기도 성남시 분당구 돌마로 42

Tel 031-726-7900 **Fax** 031-726-7909 **E-mail** kast@kast.or.kr

