

- 우수성과**

건설회사 소재 및 공정을 통한 페로브스카이트 대면적 태양전지 상용화 제작 기술
- 연구자**

전남중 (한국화학연구원 광에너지연구센터 센터장)

한국의 태양전지, 마의 20%를 넘기다



▲ 토마스 에디슨. 위키미디어.

I'd put my money on the sun and solar energy. What a source of power!

(나는 태양과 태양 에너지에 돈을 걸겠네! 이 얼마나 강력한 에너지원인가!)

- 토마스 에디슨

지식의 독점에서 에너지 독점으로

중세 유럽에서 지식은 비싸고 무가했다. 책 한 권을 만들기 위해 필경사들은 양피지 위에 몇 달, 길게는 몇 년씩 엮드려 한 글자 한 글자를 필사해야 했다. 책은 보석만큼 귀했고, 지식은 소수의 성직자와 귀족만이 독점하는 전유물이었다. 하지만 1450년쯤, 독일 마인츠의 금세공업자 요하네스 구텐베르크가 포도주 압착기에서 영감을 받아 한 기계를 만들면서 상황은 달라지기 시작했다. 금속활자와 압착기를 활용한 인쇄기의 등장은 책을 예술품의 영역에서 공산품의 영역으로 끌어내렸다. 그 결과 지식은 폭발적으로 복제돼 전 유럽으로 퍼져나갔다.

21세기, 인류는 또 다른 독점과 싸우고 있다. 바로 '에너지'다. 일부 국가만이 화석연료를 갖고 있어 에너지를 독점하고 있기 때문이다. 게다가 이마저도 점점 고갈되고 있고, 설상가상으로 기후 위기도 심해지고 있다. 돌파구를 찾기 위해 인류는 무한한 태양 에너지를 활용할 방법을 고민했지만, 이를 포집하는 기술은 여전히 '필사' 수준에 머물러 있었다. 기존의 실리콘 태양전지는 모래에서 규소를 추출해 1000°C 이상의 고열로 녹이고, 덩어리로 만든 뒤 얇게 썰어내는 복잡한 공정을 거친다. 즉, 양피지를 다듬고 글씨를 쓰는 것처럼 에너지가 많이 들고, 무겁고, 설치 장소도 제한적이다. 인류에게는 에너지를 더 쉽고, 가볍고, 저렴하게 생산할 새로운 '인쇄술'이 필요한 순간이 찾아왔다.

'기적의 소재'의 등장과 혁신

그렇게 등장한 것이 '페로브스카이트'다. 1839년 러시아의 광물학자 레프 페로브스키의 이름을 딴 페로브스카이트는 발견된 지 170년이 지난 2009년에야 태양전지 소재로 처음 빛을 보았다. 하지만 일본의 미야사가 교수가 처음 태양전지에 적용했을 때 그 효율은 고작 3.8%에 불과했다. 게다가 액체 전해질을 사용해 몇 분 만에 녹아버리는 내구성 문제까지 안고 있었다.

페로브스카이트 태양전지의 원리는 샌드위치와 비슷하다. 빛을 흡수하는 페로브스카이트 층을 가운데 두고 전자를 나르는 층과 정공을 나르는 층이 양옆을 감싸고 있다. 빛이 들어오면 흥분한 전자와 정공이 페로브스카이트 안에서 튀어나와 샌드위치 양쪽으로 빠르게 이동하며 전기를 만든다. 이때 페로브스카이트의 독특한 결정 구조는 전자가 막힘없이 달릴 수 있는 일종의 고속도로 역할을 한다.



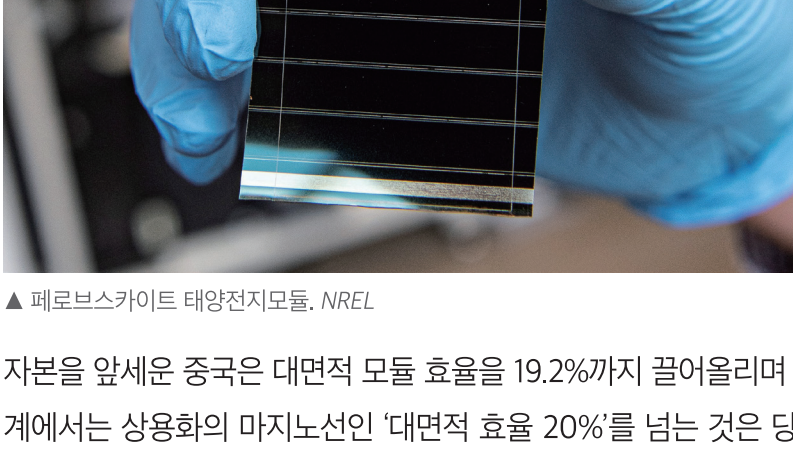
▲ 페로브스카이트 광물. 위키미디어

▲ 페로브스카이트 태양전지의 구조와 원리. 한국화학연구원

그러나 여기서 변수는 페로브스카이트가 액체 상태에서 고체 결정으로 변하는 '결정화 과정'이다. 잉크처럼 바른 용액이 마르면서 결정이 만들어질 때, 균일하고 치밀한 박막 형성이 어려워 섬 형태로 결정이 자란다. 이렇게 제작된 페로브스카이트 필름은 전자의 흐름을 방해하고, 결국 발전 효율을 급격히 떨어뜨린다.

이 한계를 극복하기 위한 지난 10년은 그야말로 전쟁터였다. 한국의 한국화학연구원, UNIST, 스위스의 로잔연방공대(EPFL), 미국 메사추세츠공대(MIT) 등의 연구팀들이 엮여락뒤희하며 효율 경쟁을 벌였다. 국내 연구진도 이 전쟁의 가장 선두에서 참여했다. 2014년, 한국화학연구원 석상일 박사팀이 코팅 중에 특수 용매를 한 방울 떨어뜨려 결정을 순식간에 치밀하고 매끄럽게 만드는 '용매 공학' 기술을 개발했다. 결정화 과정의 고질적인 결함 문제를 해결한 셈이다. 이 기술은 전 세계 페로브스카이트 제조의 표준이 됐고, 단위소자의 효율을 20%를 넘어 25% 이상으로 끌어올리는 결정적 계기가 됐다.

마의 20%를 넘어라



▲ 페로브스카이트 태양전지모듈. NREL

하지만 이 모든 결과는 어디까지나 실험실의 비커 속, 즉 손톱만 한 '단위소자'에만 적용됐다. 실험실 밖으로 나가는 순간, 다른 세상이 기다리고 있었다. 바로 '대면적화 난제'였다. 페로브스카이트는 작게 만들면 세계 최고지만, 크기를 키우면 효율이 급격히 떨어지는 치명적인 딜레마를 안고 있었다. 넓은 면적에 잉크를 균일하게 코팅하기 어렵고, 면적이 커질수록 저항도 커져서 전력 손실이 발생하기 때문이다. 이는 마치 최고의 100m 달리기 선수를 데려다가 마라톤을 시키는 것과 같다.

실제로 많은 연구팀이 A4 용지 크기 이상의 모듈 제작에서 좌절을 겪었다. 그 사이 막대한 자본을 앞세운 중국은 대면적 모듈 효율을 19.2%까지 끌어올리며 상용화 주도권을 잡으려 했다. 한편 학계와 산업계에서는 상용화의 마지막 선인 '대면적 효율 20%'를 넘는 것은 당분간 불가능할 것이라는 비관론까지 나왔다. 하지만 우리나라 연구진이 이 높은 장벽을 세계 최초로, 그것도 압도적인 '초격차'로 무너뜨렸다. 바로 한국화학연구원 광에너지연구센터 전남중 박사팀이 그 주인공이다.

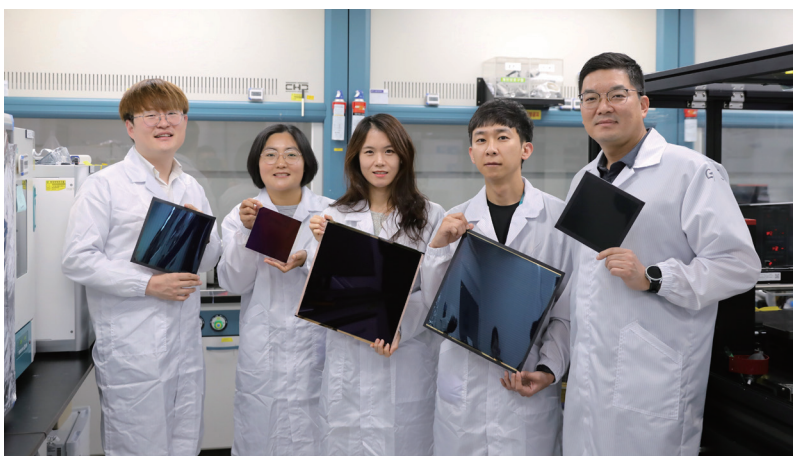
연구팀은 이미 단위소자로 세계 최고 효율 기록을 7회나 경신하며 기초 체력을 다져오고 있었다. 이번에는 이를 바탕으로 프린팅 과정에 해당하는 '습식 공정'의 한계를 극복하기 위해 소재부터 다시 설계했다. 전자가 잘 흐르도록 돕는 새로운 전자수송 소재를 개발하고, 잉크가 넓은 면적에 고르게 퍼지도록 하는 정교한 코팅 기술과 레이저 식각 공정을 최적화한 것이다. 계속된 연구에서 수천 번의 시행착오를 겪은 끝에 2024년 6월, 연구팀은 드디어 마의 20%를 넘기는 데 성공할 수 있었다. 유효면적 200cm²에 해당하는 크기의 대면적 페로브스카이트 태양전지 모듈에서 20.6%의 광전변환효율을 달성한 것이다.

이는 당시 중국이 보유하고 있던 세계 최고 기록인 19.2%를 무려 1.4% 포인트나 앞서는 성과였다. 태양전지 효율 경쟁에서 0.1%를 올리기 위해 1년이 걸리기도 한다는 점을 감안하면, 1.4%의 격차는 단순한 경신이 아니라 기술적 차원을 달리한 '초격차'라고 할 수 있다. 이 기록은 세계적인 태양전지 공인 인증기관인 독일 프라운호퍼의 검증을 통과했고, 미국 국립재생에너지연구소(NREL)의 대면적 모듈 최고 효율 차트에도 등재됐다.

▲ 태양전지모듈의 효율을 경신한 사례를 보여주는 차트. 아래쪽 빨간색 그래프가 페로브스카이트 모듈의 효율을 나타낸다. NREL

실험실을 넘어 공장으로 이어진 혁신

연구팀의 혁신은 여기서 멈추지 않았다. 습식 공정은 효율이 높지만, 습도나 온도 같은 외부 환경에 민감해 불량률을 잡는 게 과제였다. 진정한 상용화를 위해서는 언제, 어디서든 만들든 똑같은 성능이 나오는 '재현성'이 필요했다.



▲ 실험실에서 페로브스카이트 태양전지 모듈을 들고 있는 연구진. 한국화학연구원

이 기술은 논문 속에만 머물지 않았다. 한국화학연구원은 대면적 고효율 소자 기술과 소재 합성 기술을 포함한 패키징 기술을 ㈜유니테스트, ㈜셀코스, ㈜엘케이엠 등 국내 기업에 기술이전했다. 총 계약금만 111억 7500만 원에 달하는 대규모 계약이었다. 이는 공공 연구기관의 원천 기술이 산업계로 흘러 들어가 실제 사용될 수 있는 기술이 되는 사례가 됐다.

기술을 이전받은 기업들은 곧바로 상용화에 돌입했다. 특히 ㈜유니테스트는 한국화학연구원의 기술을 바탕으로 실내의 희미한 조명 아래서도 작동하는 사물인터넷(IoT) 센서용 페로브스카이트 태양전지를 만들어내는 데 성공했다. 이는 국내 페로브스카이트 태양전지 분야에서 거둔 최초의 상업화 성공 사례다.

이제 태양전지는 건물의 지붕 위에만 있지 않다. 연구팀이 개발한 기술은 '독립형' 에너지원으로 진화하고 있다. 흐린 날이나 그늘진 곳, 형광등 불빛 아래에서도 전기를 만들어내는 이 기술은 스마트 윈도우, 자동차의 섀루프, 건물의 외벽, 그리고 우리가 입는 옷이나 가방에까지 적용될 수 있다. 전력망에 연결되지 않아도 스스로 에너지를 생산하고 소비하는 '에너지 독립'의 시대가 열리는 셈이다.

에너지 시장조사기관 SNE 리서치에 따르면, 세계 태양광 신규 설치량은 2035년쯤엔 996GW(기가와트)에 달할 것으로 보인다. 또 시장 규모는 약 123조 원에 이를 것으로 전망된다. 그만큼 한국화학연구원의 기술이 이 거대한 시장을 선점할 수 있는 가장 강력한 무기가 될 수 있다는 뜻이다. 또, 연구팀은 "국가 태양광 보급 계획에 따라 매년 4GW 이상의 신규 모듈이 설치되는 국내 시장에도, 이 기술로 50%만 수입을 대체해도 연간 약 2400억 원 이상의 경제적 효과를 거둘 수 있다"고 설명하고 있다.

탄소중립과 RE100 달성을 위해 획기적인 재생에너지 확대가 필수인 지금, 이번 연구성과는 더욱 주목받고 있다. 이미 기존 실리콘 태양전지의 효율 한계를 뛰어넘기 위해 실리콘 위에 페로브스카이트를 얹는 '탠덤 태양전지' 개발 경쟁이 치열해지고 있기 때문이다. 이번 연구성과는 차세대 태양전지 패권 경쟁에 있어서 우리나라의 주요한 전략 발판을 마련하는 계기가 될 것으로 기대된다.



▲ 네덜란드 전기차 스타트업 '라이트이어'가 공개한 태양광 자동차 컨셉 사진. Lightyear

《Q》미니 인터뷰

Q 이번 연구성과가 갖는 가장 큰 의미는 무엇인가요?

A 무엇보다 상용화의 최전선에 있다는 점이라고 생각합니다. 차세대 태양전지인 페로브스카이트 태양전지가 상용화 된다면 실리콘 태양전지가 적용될 수 없는 공간에 자연스럽게 스며들어 탄소중립 및 온실가스 저감에 실질적 기여할 것으로 보입니다. 특히 미래 모빌리티나 건축 자재 등으로 쓰일 수 있고, 최근에는 우주 태양전지모듈의 가능성도 논의되고 있습니다.

Q 대면적 효율이 20%를 처음 넘긴 결과를 확인했을 때, 당시 기분이 어떠셨나요?

A 우리 연구진의 노력으로 인해 제작된 20% 이상의 효율 경신 결과를 받았을 때 엄청난 희열을 느꼈습니다. 계속된 실패 끝에 이루어낸 성공이라고 할까요. 계속해서 끈임없는 도전을 몸소 실천해 준 우리 연구진을 먼저 돌아보게 됩니다. 저보다는 우리 연구진의 노고에 깊은 감사를 드립니다.

Q 페로브스카이트가 정말 '에너지의 인쇄술'이 되기 위해 앞으로 반드시 넘어야 할 마지막 관문은 무엇이라고 보시나요?

A 안정성 부분입니다. 2012년부터 시작해 현재까지 오랜 기간 동안 페로브스카이트 태양전지 연구를 해 왔고 지속적으로 세계 최고 효율 경신을 해왔지만, 안정성 부분이 아직 해결되지 않은 숙제입니다.

이를 해결하기 위해 우리 연구진들은 밤낮없이 연구에 매진하고 있습니다. 안정성을 해결하는 연구자가 이 분야의 이익을 독차지할 가능성이 있기도 하고, 이 부분이 중국과의 차별성을 가질 수 있는 부분이라고 생각합니다.

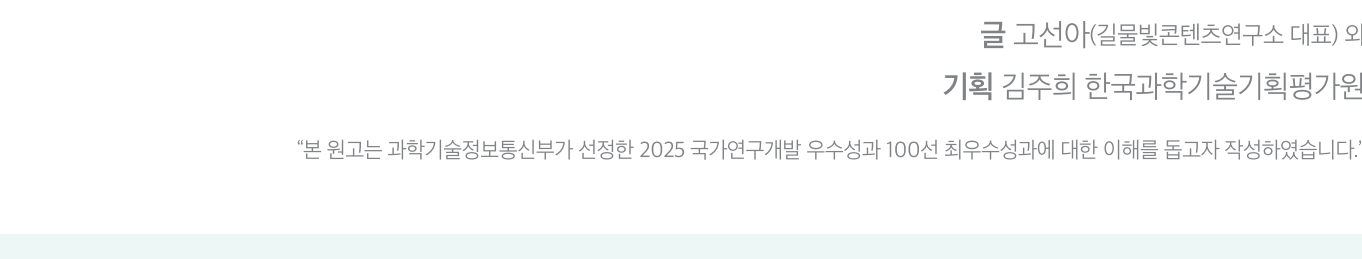
Q 앞으로 어떤 연구를 더 이어가실 계획인가요?

A 한국화학연구원 페로브스카이트 태양전지 연구팀은 2012년부터 페로브스카이트 태양전지 단위소자 연구를 시작했습니다. 2016년 최초로 대면적 연구를 시작했고, 현재까지 페로브스카이트 태양전지 대면적의 고효율 및 고내구성을 위한 연구를 이어가고 있습니다. 이를 통해 학술적으로는 네이처 사이언스지에 다수 게재되었고 상업적으로는 대형 기술 이전 등을 지속적으로 해왔습니다.

앞으로 대면적 안정성을 확보함과 동시에, 미래 초고효율 태양전지 개발을 위한 페로브스카이트 탠덤 태양전지 개발에 관심을 갖고자 합니다.

Q 이번 연구를 진행하는 과정에서 가장 결정적인 순간을 꼽는다면?

A 연구 중에 선임 연구자분들이 많이 이직을 했는데, 국내에 대면적 연구자가 없어서 곤란한 때가 있었습다. 하지만 기존 인력과 신규 인력의 조화 및 융화를 통해 연구를 지속할 수 있었습니다. 그 결과 미국재생에너지연구소(NREL) 세계 최고 대면적 차트 등재하여 기업 기술 이전까지 연결했습니다. 앞으로도 어려움이 있겠지만, 협력과 소통을 바탕으로 국가 전략기술에 꼭 필요한 태양광 전력 자급화에 기여하겠습니다.



▲ 연구에 참여한 연구진들의 모습. 한국화학연구원

글 고산아(길들빛넷츠연구소 대표) 외
기획 김주희(한국과학기술기획평가원)

"본 원고는 과학기술정보통신부가 선정한 2025 국가연구개발 우수성과 100선 최우수성과에 대한 이해를 돕고자 작성하였습니다."