

고효율 플렉서블 페로브스카이트 태양전지를 위한 전하 수송층의 개발

Development of Charge Transporting Layers for Highly Efficient and Flexible Perovskite Solar Cells

박민우 | Minwoo Park

Department of Chemical and Biological Engineering, Sookmyung Women's University
Cheongpa-ro 47-gil 100, Yongsan-Gu, Seoul 04310, Korea
E-mail: mwpark@sm.ac.kr

1. 서론

최근 유-무기 페로브스카이트(organic-inorganic perovskite) 태양전지에 대한 관심이 뜨겁다. 기존의 3원계의 금속 산화물에 기반한 전통적인 페로브스카이트 물질은 에너지 분야에서 강유전성 소재로 주로 활용이 되었으나 유기물과 금속할로젠이 공존하는 하이브리드 형태의 페로브스카이트 소재는 광전변환 특성이 기존의 CuInGaSe 화합물이나 비정질 실리콘, GaAs, CdTe와 거의 유사한 수준이다.¹ 특히 높은 광전압, 0에 가까운 여기자 결합 에너지, 높은 전하 이동도, 가시광선 영역대의 빛을 대부분 흡수 할 수 있는 광흡수 계수와 더불어 밴드갭을 미세하게 조절할 수 있다는 장점 등을 가지고 있어서 차세대 태양전지의 흡광층이나 발광다이오드의 발광층으로 사용하기에 물질의 특성이 최적화되어 있다고 볼 수 있다.² 또한, 페로브스카이트 박막의 제조 공정은 용액 및 저온 공정에 기반하기 때문에 향후 대면적 프린팅을 위한 롤투롤(roll-to-roll) 공정을 적용할 수 있다.³

이러한 페로브스카이트가 갖는 공정상의 장점을 활용하여 플라스틱 기반의 고효율 플렉서블 태양전지 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 기존의 유기 태양전지나 염료감응형 태양전지의 전하 수송층으로 사용되는 소재를 페로브스카이트 태양전지에도 그대로 적용할 수 있다는 점이 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 효율 개선 속도를 크게 끌어 올리는 데 주요한 역할을 했다. 2013년 2~6%의 광전변환 효율을 내던 플렉서블 페로브스카이트 태양전지는 2016년 현재 16% 이상의 높은 효율을 기록했으며 제조 방식이나 사용 되는 소재들이 점차 다양해지고 있는 추세이다.⁴⁻⁹

모든 태양전지에서 적용되는 부분이지만, 특히 플렉서블 태양전지에서는 전하 수송층의 성능이 매우 중요하다. 유리 기반의 태양전지는 고온 열처리 공정이 가능하기 때문에 전하 수송층으로 사용되는 금속 산화물(대표적인 예로 TiO₂)은 전구체(precursor)를 완전히 소결하여 산화물 형태로 만들거나 이미 합성되어 있는 산화물 나노 구조체를 증착 후 남아 있는 부산물들을 소결하여 순수한 산화물만 남길 수 있다. 이에 따라 페로브스카이트가 빛을 받아 형성된 전하는 상대전극으로 원활하게 이동할 수 있다. 그러나 폴리이미드(polyimide) 기판을 제외한 플라스틱 기판을 기반으로 하는 태양전지의 경우 200 °C 이상의 열처리 공정이 불가능하기 때문에 저온 공정만 적용이 가능하며, 따라서 관건은 고온 공정에서 얻어지는 금속 산화물의 전기적, 광학적 특성이 저온 공

Author



박민우

2008 연세대학교 금속시스템공학 (학사)
2014 연세대학교 신소재공학 (박사)
2016-현재 숙명여자대학교 화공생명공학부 조교수

정에서도 유사하게 재연이 될 수 있는가 하는 것이다. 이런 점 때문에 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 연구 초기에는 유기 태양전지의 구조가 주로 적용 되었고 전하 수송층도 PEDOT:PSS(poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate)나 PCBM(phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester)과 같은 유기 태양전지에서 사용되는 유기 반도체 소재들이 많이 사용 되었다.⁶

그러나 페로브스카이트가 수분에 대한 안정성이 매우 취약한 것으로 확인이 되면서 이를 수분으로부터 보호해 줄 수 있는 금속 산화물이 전하 수송층으로 사용 되는 것을 더 선호하는 추세이고 최근에는 저온 공정으로도 고온 공정에서 만들어진 금속 산화물을 능가하는 뛰어난 전기적, 광학적 특성을 갖는 금속 산화물 층이 개발 되면서 유기 반도체를 사용한 것보다 높은 효율을 갖게 되었다.^{10,11}

본 글에서는 고효율 플렉서블 페로브스카이트 태양전지를 구현하기 위한 무기 전하 수송층의 개발 동향에 대해서 소개하고자 한다. 저온 및 용액 공정에 기반한 고성능의 전하 수송층 제조 방법과 이들이 갖는 전기적, 광학적 특성에 대해서 소개하고 향후 효율과 안정성이라는 두 가지 사안에 대해서 어떤 방향으로 연구가 진행 되어야 하는지를 간략하게 논의하고자 한다.

2. 본론

2.1 TiO₂ 나노 구조체 기반의 전하 수송층

유리 기판에 만들어지는 페로브스카이트 태양전지 중 20% 이상의 높은 효율을 내는 구조는 그림 1과 같다.¹² 혼합된 할라이드 계열의 페로브스카이트(mixed halide perovskite) 박막이 흡광층으로 사용되고 여기 아래에는 TiO₂ 나노 입자로 이루어진 전자 수송층(electron transporting layer, ETL)

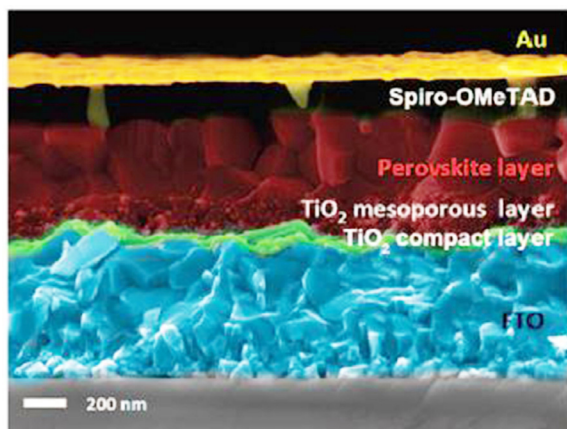


그림 1. 최근 A. Hagfeldt group에서 TiO₂ 나노 입자 층을 적용하여 20.8%의 높은 광전 변환 효율을 기록한 페로브스카이트 태양전지의 단면 현미경 사진.¹² Reproduced with permission of *Sci. Adv.* Copyright (2016) American Association for the Advancement of Science (AAAS).

이 있으며 위에는 spiro-OMeTAD(2,2',7,7'-tetrakis(*N,N*-dimethoxyphenyl)-amine)9,9'-spirobifluorene) 혹은 PTAA (polytriarylamine)와 같은 유기반도체로 이루어진 홀 수송층 (hole transporting layer, HTL)이 있다. 과거 TiO₂가 염료감응형 태양전지에서 가장 핵심으로 사용된 광전극이었고 이미 많은 연구가 된 물질이기 때문에 페로브스카이트 태양전지에 그대로 이용 되면서 효율을 쉽게 끌어 올릴 수 있었다고 생각되고 있다. TiO₂ 활용에 초점을 둔 페로브스카이트 태양전지의 주요 연구 내용은 TiO₂ 나노 구조체의 형태와 크기, 도핑 효과 및 구조체 층의 두께 변화에 의한 전하 수송 메커니즘에 관한 것이었으며 결과적으로는 약 30 nm의 균일한 나노입자를 200 nm 정도의 두께로 층을 이룬 구조가 가장 높은 태양전지의 효율을 보여주었다.¹² 이는 페로브스카이트 박막이 형성될 때 TiO₂ 나노 입자사이의 공극까지 침투하여 TiO₂와 페로브스카이트와의 접촉 면적을 극대화시킴으로써 전자를 최대한 원활하게 투명전극까지 이동시키는 것이 가능하기 때문이다.¹³

따라서 이러한 TiO₂ 나노구조체를 플렉서블 페로브스카이트 태양전지에 적용을 하면 유리기판에 기반한 태양전지와 마찬가지로 높은 광전변환 효율을 보여줄 것으로 기대하였으나 고온 소성이 아닌 Ti 전구체를 열분해하여 만든 박막층이나 TiO₂ 나노 입자가 분산된 용액을 스핀 코팅하여 만들어진 전자 수송층은 TiO₂의 결정성이 매우 좋지 않거나 유기물 및 불순물이 많이 남아 있기 때문에 페로브스카이트에서 형성된 전자를 원활하게 수송시켜 주질 못하였다.⁵ 이를 극복하기 위한 방법으로는 원자층 증착법(atomic layer deposition, ALD)을 이용한 비정질 상태의 TiO_x 박막을 플렉서블 투명전극 위에 증착하는 것이었는데, 페로브스카이트 태양전지로 만들었을 때 약 12~15%의 높은 광전변환 효율을 기록하였다.^{14,15}

그러나 이러한 기상증착법은 플렉서블 태양전지 공정에서 궁극적으로는 지양하는 방식이다. 특히 페로브스카이트

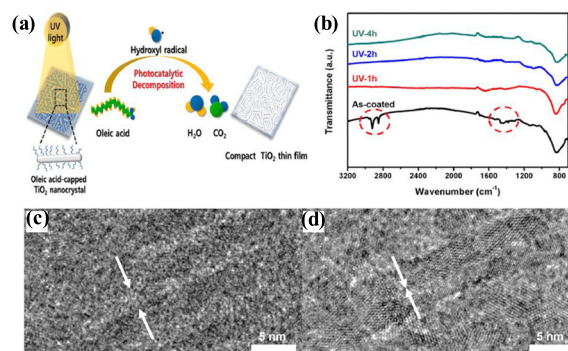


그림 2. (a) 광촉매 효과를 이용한 TiO₂ 박막 형성 과정 모식도. (b) FT-IR 분석을 통한 oleic acid의 제거 확인. (c, d) UV 조사 전/후 TiO₂ 나노 결정의 투과전자현미경 사진.¹⁶ Reproduced with permission of *Nano Energy*. Copyright (2016) Elsevier.

태양전지가 갖는 가장 큰 장점 중의 하나가 바로 거의 대부분의 제조 공정이 용액 공정에 기반을 하고 있다는 것인데 전자 수송층을 기상증착법으로 제조하게 되면 이들의 장점이 퇴색된다고 볼 수 있다. 가장 최근에는 TiO_2 의 광촉매 효과를 적용하여 용액 및 저온 공정으로 약 16%의 매우 높은 효율을 갖는 플렉서블 페로브스카이트 태양전지가 개발되었다.¹¹ 먼저 TiO_2 나노 결정을 용액 공정으로 합성한 후, 이를 투명전극 위에 스핀코팅 한 다음 365 nm에 해당하는 자외선을 조사하게 되면 TiO_2 의 광촉매 효과에 의해서 TiO_2 나노 결정 표면에 붙어 있는 oleic acid 분자들을 전부 제거하게 된다(그림 2a, b). 순수 자외선 조사에 의한 주변 온도가 약 50도 까지 밖에 되지 않음에도 불구하고 양자구속효과(quantum confinement effect)에 의해서 10 nm 이하의 매우 작은 TiO_2 나노 결정들이 소결되면서 구멍없이 균일하고 뾰족한 박막을 형성하게 된다(그림 2c, d).

특히 TiO_2 나노 결정을 합성하는 과정에서 Nb를 도핑하게 되면 TiO_2 층의 전도도가 향상 되고 p형 도핑 효과에 의해 에너지 레벨이 아래로 이동함으로써 TiO_2 의 전도대(conduction band)가 투명전극의 일함수에 가까워지고 이를 통해 페로브스카이트의 전도대에서 TiO_2 전도대로 보다 원활하게 전자가 주입되고 이동할 수 있게 된다(그림 3a, b).¹¹ 이를 각각 유리판과 플라스틱 기판에 적용하였을 때 약 19.6% 및 16%의 높은 광전변환 효율을 기록하였다(그림 3c, d). 비록 이 공정을 적용했을 때 oleic acid를 완전히 제거하는 데는 최소 4 시간이나 필요하다는 단점이 있지만 광 출력을 더 증가시키면 공정 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 생각되며 기존의 TiO_2 나노 구조체를 페로브스카이트 태양전지에 활용하는 또 다른 대안으로 활용 될 수 있을 것이라 생각된다.

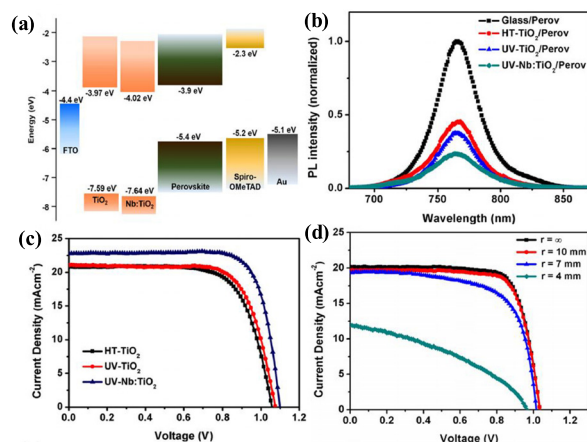


그림 3. (a) TiO_2 나노 결정 기반의 페로브스카이트 태양전지의 에너지 도표. (b) 페로브스카이트의 광발광 퀀칭 특성 그래프. (c) 유리 기반의 페로브스카이트 태양전지의 전류-전압 곡선. (d) 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 벤딩 반지름 (bending radius)에 따른 전류-전압 곡선.¹⁰ Reproduced with permission of *Nano Energy*. Copyright (2016) Elsevier.

2.2 Sn 산화물 기반의 전하 수송층

TiO_2 가 비록 페로브스카이트 태양전지에서 광전극의 주요 소재이지만 역설적이게도 자외선을 흡수하면서 발생하는 광촉매 효과에 의하여 페로브스카이트가 손상되는 문제가 보고되고 있다.¹⁰ 따라서 궁극적으로는 TiO_2 를 대체할 수 있는 금속산화물 혹은 유기반도체가 광전극으로 활용 되어야 하는데, n형 금속산화물 중에서는 밴드갭이 큰 SnO_2 나 Zn_2SnO_4 가 적합한 후보로 여겨지고 있다. 순수 한 결정으로만 이루어진 SnO_2 는 TiO_2 에 비해 전기 전도도가 약 100배 이상 높아 전자를 이동시키는 역할을 잘 수행할 수 있으며 밴드갭 역시 3.6-4.0 eV로 TiO_2 보다 0.2~0.4 eV 정도 크기 때문에 300-400 nm 파장대의 자외선을 그대로 투과시킬 수 있다.¹⁰

하지만 TiO_2 에 비해서는 아직까진 SnO_2 나노구조체에 대한 연구가 많이 이루어 지지 않았고 물질 자체가 태양전지 보다는 주로 투명전극이나 가스센서, 트랜지스터 분야에서 많이 활용 되었기 때문에 페로브스카이트 태양전지에 적용된 사례가 많지 않았다. 마찬가지로 Zn_2SnO_4 역시 페로브스카이트 태양전지에 거의 적용된 적이 없다가 플렉서블 페로브스카이트 태양전지에는 2015년에 처음 적용되면서 큰 주목을 받기 시작했다.¹⁶

그림 4a와 4b는 각각 185도 이하의 저온공정에서 만들어

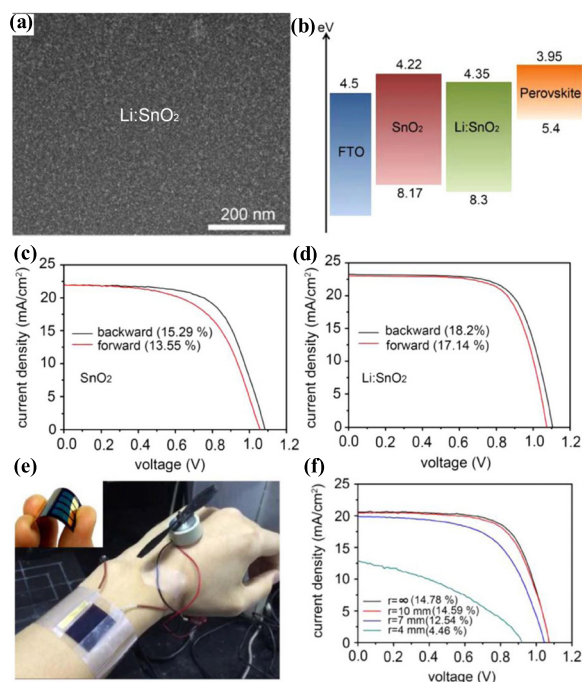


그림 4. (a) 185도에서 형성 된 Li이 도핑된 SnO_2 박막의 투과전자현미경 사진. (b) SnO_2 박막 기반의 페로브스카이트 태양전지의 에너지 도표. (c, d) Li이 도핑 되기 전-후 태양전지의 전류-전압 곡선. (e) SnO_2 박막 기반의 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 실제 사진과 웨어러블 디바이스 모사 사진. (f) 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 벤딩 반지름에 따른 전류-전압 곡선 그래프.¹⁰ Reproduced with permission of *Nano Energy*. Copyright (2016) Elsevier.

진 SnO_2 박막 층의 투과전자현미경 사진과 SnO_2 가 적용된 페로브스카이트 태양전지의 에너지 도표를 보여준다. SnO_2 박막은 간단하게 $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 용액을 스핀코팅 후 공기 중에서 185도로 열처리를 하게 되면 구멍이 없고 균일한 SnO_2 박막이 형성 된다. 기본적으로 SnO_2 의 전도대가 TiO_2 의 전도대 (-4.0 eV)보다 최소 0.1 eV 이상 아래에 있기 때문에 페로브스카이트에서 형성된 전자를 원활하게 투명전극으로 이동시켜줄 수 있다.¹⁰ 비록 SnO_2 가 저온에서도 균일한 박막을 형성하지만 결정성은 400도 이상에서 열처리한 SnO_2 보다 좋지 않기 때문에 전기 전도도는 좋지 않다.

이 문제점을 해결하기 위하여 $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 용액에 Li-TFSI (bis(trifluoromethane)sulfonimide lithium salt)를 약 1.7 mM 첨가하여 동일한 과정을 거쳐서 전구체 박막을 만들고 열처리를 하게 되면 Li이 SnO_2 에 도핑되기 때문에 SnO_2 의 전기 전도도를 2배 이상 높여주고 전도대가 0.07 eV 낮아지게 된다. 따라서 태양전지의 효율은 약 15.3%에서 18.2%까지 크게 향상되고 히스테리시스 현상이 완화되었다(그림 4c, d). 또한 SnO_2 를 제조하는 공정이 저온 공정에 기반하고 있으므로 ITO/PEN 기판에 그대로 적용할 수 있으며 약 14.8%의 높은 광전변환 효율을 기록하였다(그림 4e, f). 이 방식은 SnO_2 나노 구조체를 미리 합성하지 않고 간단하게 스핀코팅과 짧은 열처리 공정만 이용하여 고품질의 전자 수송층을 만

들 수 있으며 금속 전구체 박막을 열처리해서 만든 기존의 결과와 비교했을 때 높은 성능의 플렉서블 페로브스카이트 태양전지를 구현할 수 있다는 장점이 있다.

Zn_2SnO_4 는 2014년도에 처음으로 페로브스카이트 태양전지의 전자 수송층으로 사용되었다.¹⁷ ZnCl_2 와 SnCl_2 전구체를 섞은 용액을 스핀코팅하여 350도 고온 열처리를 통해 Zn_2SnO_4 박막을 형성할 수 있다. 그러나 조성비가 불균일하다는 문제점으로 광전변환 효율이 약 7%밖에 나오지 않았다. 그러다 최근 Zn_2SnO_4 나노입자를 용액 공정으로 합성하고 이를 전자 수송층으로 사용하였을 때 최고 16.5%의 높은 광전변환 효율을 갖는 플렉서블 페로브스카이트 태양전지가 개발되었다.⁹ 그림 5a는 Zn_2SnO_4 나노입자를 합성하는 도표를 보여준다. 기존에는 ZnCl_2 와 SnCl_2 을 녹인 수용액에 NaOH나 아민기를 갖는 염기성 성질의 환원제가 합성에 사용되었으나 150 °C 이상의 온도에서 합성이 이루어져야 하고 합성된 입자 크기도 불균일하다는 문제점이 있었다.^{9,16} 그러나 하이드라진 수화물을 ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 사용하면 90 °C 온도에서도 20 nm 이하의 균일한 Zn_2SnO_4 나노입자가 형성되며 그램 단위로 대량으로 합성을 할 수가 있었다(그림 5b, d). 계면활성제가 들어가지 않기 때문에 원심분리를 이용해 순수한 나노입자만 모아 이를 ITO/PEN 기판위에 코팅할 수가 있다. 이렇게 만들어진 플렉서블 페로브스카이트 태양전지는 약 15~16.5%의 높은 광전변환 효율을 보여주었으며 이는 현재까지 보고된 플렉서블 페로브스카이트 태양전지 중에서는 가장 높은 효율이다(그림 5e).^{9,16} Zn_2SnO_4 박막 층의 높은 투과도(95%)와 전기전도도 및 낮은 전도대 (-4.1 eV) 덕분에 페로브스카이트에서 발생한 전자의 원활한 주입과 이동 가능하고 이것이 고효율에 기여한 것으로 생각된다(그림 5f).^{9,16}

2.3 Ni 산화물 기반의 전자 수송층

페로브스카이트 태양전지에서 홀 수송층으로 사용 되는 소재는 주로 p형 특성을 가지는 전도성 저분자나 고분자 재료가 사용된다. P형 유기 반도체에 Li이나 Co를 도핑하면 전기 전도도의 향상과 더불어 HOMO(highest occupied molecular orbital) 레벨을 더 낮춤으로써 태양전지의 광전압을 손쉽게 올릴 수 있기 때문에 고효율 페로브스카이트 태양전지를 구현할 수 있다.¹² 또한 금속산화물 대부분이 n형 특성을 가지기 때문에 상대적으로 접근하기 쉬운 p형 유기 반도체 재료가 선호되어 왔다. 그러나 유기 반도체는 수분 및 자외선에 취약한 치명적인 단점을 가지고 있고, 마찬가지로 수분에 취약한 페로브스카이트를 보호해주는 역할을 할 수 없기 때문에 최근에는 p형 특성을 가지는 금속 산화물 재료가 주목을 받고 있다. 이 중에서 특히 NiO_x 는 밴드갭이 약 3.7 eV로 크고 전기 전도도가 $2.2 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ 로 홀 수송층으로 사용하

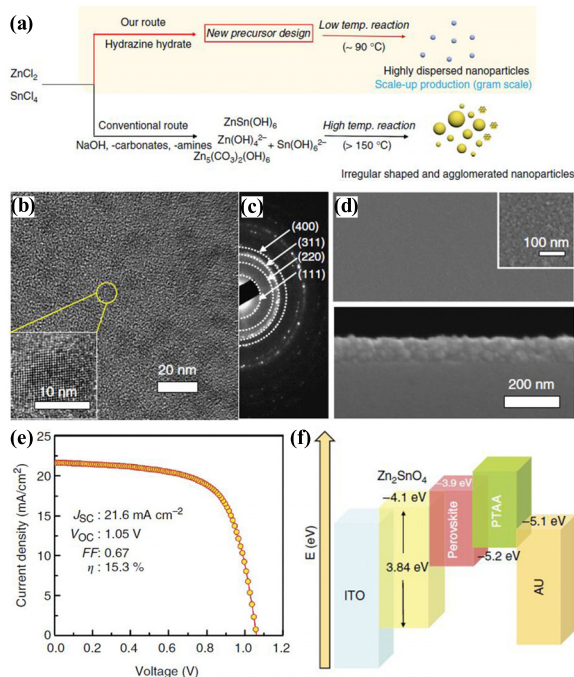


그림 5. (a) Zn_2SnO_4 나노 입자를 용액 공정으로 합성하는 과정을 나타낸 도표. (b) Zn_2SnO_4 나노입자의 투과 전자 현미경 사진. (c) 투과 전자 현미경으로부터 얻은 전자 회절 사진. (d) 스핀코팅으로 증착한 Zn_2SnO_4 박막의 표면 및 단면 사진. (e) Zn_2SnO_4 기반의 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 전류-전압 곡선. (f) 태양전지의 에너지 도표.¹⁶ Reproduced with permission of *Nat. Commun.* Copyright (2016) Nature Publishing Group.

기에 적합한 광학적, 전기적 특성을 지니고 있다.¹⁸ 또한 150도에서 Ni 전구체가 열분해되어 쉽게 산화가 되는 경향이 있기 때문에 전구체 박막 코팅 후 NiO_x 로 변환하는 방법이 많이 사용되었다.¹⁹ 최근에는 앞서 소개한 Zn_2SnO_4 의 예처럼 용액 공정으로 NiO_x 나노 입자를 먼저 합성한 뒤 투명전극 위에 코팅하여 사용하는 경우가 점차 많아지고 있다.^{20,21}

NiO_x 나노 입자 합성법은 매우 간단하다. $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 나 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 를 DI water에 녹인 후 NaOH를 첨가하여 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 를 형성시킨 뒤에 80도에서 지속적인 열처리를 통해 NiO_x 나노 입자를 만든다.^{20,21} 이것을 정제하여 다시 270 °C에서 가열하면 완전한 NiO_x 파우더가 만들어 지는데 이것을 용매에 분산시켜 NiO_x 잉크로 활용할 수 있다(그림 6a, b). NiO_x 잉크를 ITO/유리 기판위에 코팅하면 역구조를 갖는 페로브스카이트 태양전지를 만들 수 있으며(그림 6c), 이때 약 17.6%의 높은 효율을 기록하였다. 구동원리는 앞서 소개한 소자와 반대로 홀은 NiO_x 를 거쳐 투명전극 쪽으로, 전자는 단분자 층을 지나 Ag 전극 쪽으로 이동한다(그림 6d). 이미 합성된 나노 입자를 코팅하는 공정이므로 따로 열처리가 필요없으며 PEDOT:PSS를 적용했을 때보다 훨씬 높은 환경신뢰성을 보여주었다. PEDOT:PSS 기반의 페로브스카이트 태양전지의 경우 보호막(encapsulation layer)까지 있음

에도 불구하고 70시간 이상을 버티지 못하지만 NiO_x 를 적용하면 100시간이 지나도 초기 효율 대비 93% 수준을 유지하였다(그림 6e). 그림 6f는 NiO_x 를 적용한 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 실제 성능을 보여준다. 평균 약 13.3%의 효율을 기록하였으며 140번의 벤딩 테스트 후에도 초기 효율 대비 80% 수준을 기록하였다.²⁰

3. 결론

지금까지 플렉서블 페로브스카이트 태양전지에 대표적으로 활용되고 있는 금속 산화물 나노 구조체의 최신 연구 동향에 대해서 간략하게 소개하였다. 페로브스카이트 태양전지는 최근 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 22.1%의 광전변환 효율을 인증 받을 정도로 5년 만에 실리콘 태양전지를 위협하는 수준까지 크게 발전해 왔다. 그럼에도 불구하고 페로브스카이트 소재 자체가 가지고 있는 흡습성(hygroscopicity)과 50도 이상에서 상변화가 일어나는 독특한 성질 때문에 열과 수분에 매우 취약하다는 지적을 계속 받을 수 밖에 없는 이상 상용화의 길은 아직도 멀어 보인다.² 게다가 메모리 소자에서 볼 수 있는 히스테리시스 현상이 태양전지 중에서도 페로브스카이트 태양전지에서만 두드러지게 나타나는 것도 상용화에 걸림돌이 된다.² 다행히 뛰어난 광전특성을 가지고 있는 납 할라이드(lead halide) 계열의 페로브스카이트 소재에 여러가지 금속을 첨가하거나 양이온 부분을 다른 작용기로 바꿨을 때 안정성이 개선되는 모습을 보여주고 있고, 히스테리시스 역시 페로브스카이트의 결함 최소화와 전하 수송층의 개질을 통해 크게 감소하고 있다는 점은 매우 고무적이다.¹² 또한 최근에는 페로브스카이트를 둘러 싸고 있는 전하 수송층을 전부 금속 산화물을 적용하였을 때 60일 이상 장기 안정성이 유지 된다는 결과가 보고되었다.²²

플렉서블 태양전지의 안정성과 효율을 개선시키는 부분은 유리 기반의 페로브스카이트 태양전지의 안정성과 효율을 개선시키는 것보다 넘어야 할 장벽이 훨씬 많다. 비록 페로브스카이트의 기계적 성질이 유기 재료와 유사하다는 것이 증명되면서 향후 웨어러블 디바이스와 같은 저전력을 요구하는 플렉서블 디바이스에 적용하기 좋고 매우 높은 잠재력을 갖고 있는 것은 사실이나 페로브스카이트와 전하 수송층 뿐만 아니라 고분자 기판의 연성이나 수분투과율의 개선이 이루어져야만 높은 효율과 기계적 및 환경 안정성이 보장될 수 있다.²³ 안정성 개선 면에서는 현재 플렉서블 디스플레이에 적용되고 있는 봉지기술을 플렉서블 페로브스카이트 태양전지에 적용하는 것도 한 가지 방안이 될 수 있다고 생각해본다.

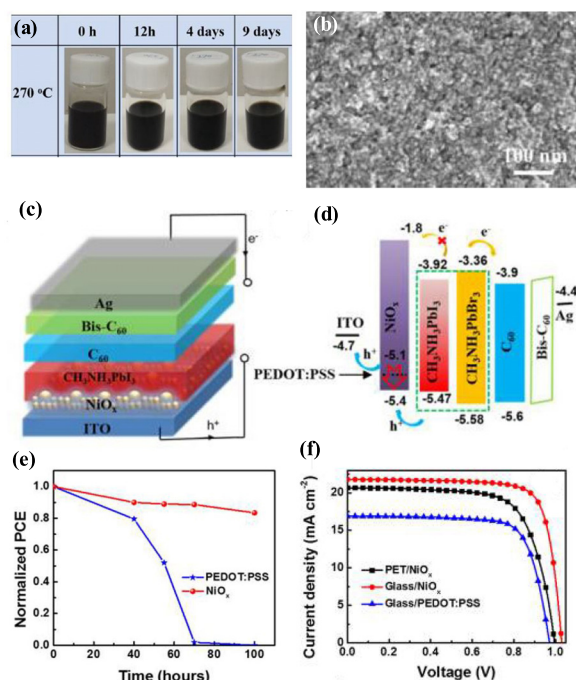


그림 6. (a) 용액 공정을 통해 제조한 NiO_x 잉크. (b) 스핀코팅 후 형성된 NiO_x 나노 입자 층의 전하 현미경 사진.²¹ (c) NiO_x 박막이 수 수송층으로 적용된 페로브스카이트 태양전지의 모식도. (d) NiO_x 기반 태양전지의 에너지 도표. (e) PEDOT:PSS 기반 태양전지와 비교한 안정성 그래프. (f) 유리 기반 및 플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 전류-전압 곡선.²⁰ Reproduced permission of *ACS Nano*. Copyright (2016) American Chemical Society.

참고문헌

1. A. Polman, M. Knight, E. C. Garnett, B. Ehrler, and W. C. Sinke, *Science*, **352**, 307 (2016).
2. S. D. Stranks, and H. J. Snaith, *Nat. Nanotechnol.*, **10**, 391 (2015).
3. T. M. Schmidt, T. T. Larsen-Olsen, J. E. Carlé, D. Angmo, and F. C. Krebs, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1500569 (2015).
4. M. H. Kumar, N. Yantara, S. Dharani, M. Graetzel, S. Mhaisalkar, P. P. Boix, and N. Mathews, *Chem. Commun.*, **49**, 11089 (2013).
5. P. Docampo, J. M. Ball, M. Darwich, G. E. Eperon, and H. J. Snaith, *Nat. Commun.*, **4**, 2761 (2013).
6. J. You, Z. Hong, Y. M. Yang, Q. Chen, M. Cai, T. -B. Song, C. -C. Chen, S. Lu, Y. Liu, H. Zou, and Y. Yang, *ACS Nano*, **8**, 1674 (2014).
7. J. W. Jo, M. -S. Seo, M. Park, J. -Y. Kim, J. S. Park, I. K. Han, H. Ahn, J. W. Jung, B. -H. Sohn, M. J. Ko, and H. J. Son, *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 4464 (2016).
8. D. Yang, R. Yang, X. Ren, X. Zhu, Z. Yang, C. Li, and S. F. Liu, *Adv. Mater.*, **28**, 5206 (2016).
9. S. S. Shin, W. S. Yang, E. J. Yeom, S. J. Lee, N. J. Jeon, Y. -C. Joo, I. J. Park, J. H. Noh, and S. I. Seok, *J. Phys. Chem. Lett.*, **7**, 1845 (2016).
10. M. Park, J. -Y. Kim, H. J. Son, C. -H. Lee, S. S. Jang, and M. J. Ko, *Nano Energy*, **26**, 208 (2016).
11. I. Jeong, H. Jung, M. Park, J. S. Park, H. J. Son, J. Joo, J. Lee, and M. J. Ko, *Nano Energy*, **28**, 380 (2016).
12. D. Bi, W. Tress, M. I. Dar, P. Gao, J. Luo, C. Renevier, K. Schenk, A. Abate, F. Giordano, J. -P. C. Baena, J. -D. Decoppet, S. M. Zakeeruddin, M. K. Nazeerudin, M. Grätzel, and A. Hagfeldt, *Sci. Adv.*, **2**, e1501170 (2016).
13. J. Burschka, N. Pellet, S. -J. Moon, R. Humphry-Baker, P. Gao, M. K. Nazeerudin, and M. Grätzel, *Nature*, **499**, 316 (2013).
14. D. Yang, R. Yang, J. Zhang, Z. Yang, S. F. Liu, and C. Li, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 3208 (2015).
15. B. J. Kim, D. H. Kim, Y. -Y. Lee, H. -W. Shin, G. S. Han, J. S. Hong, K. Mahmood, T. K. Ahn, Y. -C. Joo, K. S. Hong, N. -G. Park, S. Lee, and H. S. Jung, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 916 (2015).
16. S. S. Shin, W. S. Yang, J. H. Noh, J. H. Suk, N. J. Jeon, J. H. Park, J. S. Kim, W. M. Seong, and S. I. Seok, *Nat. Commun.*, **6**, 7401 (2015).
17. L. S. Oh, D. H. Kim, J. A. Lee, S. S. Shin, J. -W. Lee, I. J. Park, M. J. Ko, N. -G. Park, S. G. Pyo, K. S. Hong, and J. Y. Kim, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 22991 (2014).
18. J. H. Kim, P. -W. Liang, S. T. Williams, N. Cho, C. -C. Chueh, M. S. Glaz, D. S. Ginger, and A. K. -Y. Jen, *Adv. Mater.*, **27**, 695 (2015).
19. J. W. Jung, C. -C. Chueh, and A. K. -Y. Jen, *Adv. Mater.*, **27**, 7874 (2015).
20. H. Zhang, J. Cheng, F. Lin, H. He, J. Mao, K. S. Wong, A. K. -Y. Jen, and W. C. H. Choy, *ACS Nano*, **10**, 1503 (2016).
21. X. Yin, P. Chen, M. Que, Y. Xing, W. Que, C. Niu, and J. Shao, *ACS Nano*, **10**, 3630 (2016).
22. J. You, L. Meng, T. -B. Song, T. -F. Guo, Y. M. Yang, W. -H. Chang, Z. Hong, H. Chen, H. Zhou, Q. Chen, Y. Liu, N. D. Marco, and Y. Yang, *Nat. Nanotechnol.*, **11**, 75 (2016).
23. M. Park, H. J. Kim, I. Jeong, J. Lee, H. Lee, H. J. Son, D. -E. Kim, and M. J. Ko, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1501406 (2015).