

## 에어로졸 기술로 제작된 은 나노 입자를 활용한 페로브스카이트 태양전지 성능 향상 연구

박수아<sup>1)</sup> · 박인용<sup>2)</sup> · 박대훈<sup>2)</sup> · 한방우<sup>2)</sup> · 이건희<sup>2)\*</sup> · 김민철<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 기계공학부

<sup>2)</sup>한국기계연구원 지속가능환경연구실

(투고: 2023년 5월 25일 수정: 2023년 6월 17일 게재확정: 2023년 6월 20일)

## Performance enhancement of perovskite solar cells using Ag nanoparticles via aerosol technology

Sua Park<sup>1)</sup>, Inyong Park<sup>2)</sup>, Dae Hoon Park<sup>2)</sup>, Bangwoo Han<sup>2)</sup>, Gunhee Lee<sup>2)</sup>, Min-cheol Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>*School of Mechanical Engineering, Pusan National University*

<sup>2)</sup>*Department of Sustainable Environment Research, Korea Institute of Machinery & Materials*

(Received May 25 2023; Revised June 17 2023; Accepted June 20 2023)

### Abstract

Solar cells, converting abundant solar energy into electrical energy, are considered crucial for sustainable energy generation. Recent advancements focus on nanoparticle-enhanced solar cells to overcome limitations and improve efficiency. These cells offer two potential efficiency enhancements. Firstly, plasmonic effects through nanoparticles can improve optical performance by enhancing absorption. Secondly, nanoparticles can improve charge transport and reduce recombination losses, enhancing electrical performance. However, factors like nanoparticle size, placement, and solar cell structure influence the overall performance. This study evaluates the performance of silver nanoparticles incorporated in a p-i-n structure of perovskite solar cells, generated via aerosol state by the evaporation and condensation system. The silver nanoparticles deposited between the hole transport layer and transparent electrode form nanoparticle embedded transport layer (NETL). The evaluation of the optoelectronic properties of perovskite devices using NETL demonstrates their potential for improving efficiency. The findings highlight the possibility of nanoparticle incorporation in perovskite solar cells, providing insights for sustainable energy generation.

**Keywords:** Aerosol, Nanoparticle, Plasmonics, Perovskite, Solarcell

\* Corresponding author.

Tel : +82-51-510-2315

E-mail : gunhee@kimm.re.kr, mckim90@pusan.ac.kr

## 1. 서론

태양전지는 풍부한 광 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기술로, 지속 가능한 에너지 발전의 중요한 축으로 간주되고 있다. 효율적이고 경제적인 태양전지 기술의 개발은 재생 에너지의 사용과 환경 보호에 매우 중요한 역할을 한다. 이 중 유기기 할라이드 페로브스카이트 기반의 태양전지는 높은 흡광 계수(Park, 2015), 긴 전하 확산 거리(Stranks et al., 2013), 높은 전하이동도(Oga et al., 2014), 낮은 전하 결합 에너지(Galkowski et al., 2016) 등의 우수한 광전자 특성으로 최근 태양전지 개발 동향에서 가장 큰 관심을 받고 있으며, 10여 년간의 활발한 연구 결과 25.8%의 높은 전력 변환 효율을 달성했다(Park et al., 2023). 이는 50여 년의 발전과 함께 현재 주류를 이루고 있으며, 26.1%의 전력 변환 효율을 가지고 있는 실리콘 태양전지에 비해 높은 잠재력을 보여주고 있는 것으로, 앞으로 지속 가능한 에너지 발전을 위해 페로브스카이트 태양전지의 효율 및 안정성 개선은 필수적이라 할 수 있다.

최근 연구들은 나노입자가 도입된 태양전지 개발을 통해 기존 태양전지의 한계를 극복하고 효율성을 향상시키는 방법을 모색하고 있다(Jung et al., 2014; Carretero-Palacios et al., 2016). 나노입자가 도입된 태양전지는 두 가지 방향으로 효율 증가가 있을 수 있다. 첫째로, 나노 입자가 도입된 태양전지에서는 플라즈모닉(Plasmonic) 효과를 통한 흡광도 향상 등의 광학적 성능 향상이 관찰될 수 있다(Catchpole and Polman, 2008). 플라즈모닉 효과는 금속 나노 입자나 구조물에 플라즈몬(plasmon)이라고 불리는 표면 전자파의 상호작용으로 발생하는 현상으로, 금속 표면에서 자유 전자와 광자 간의 공명 현상이 발생하여 금속 입자의 크기, 형상 등의 조건에 따라 특정 파장의 빛을 흡수하거나 증폭시키는 현상을 말한다. 플라즈모닉 효과를 이용하면 태양전지와 같은 광전자 소자의 특정 파장의 흡수를 증폭하여 태양전지의 효율을 향상시킬 수 있다.

둘째로, 나노입자가 도입되면 태양전지 내부에서의 전하의 이동 경로를 개선하거나(Omrani, 2021), 투명전극에서의 면저항을 감소시켜 전하의 이동도를 증가시키고 재결합 손실을 감소시키는 등의 전기적 성능 향상을 기대할 수 있다(Lu, 2014). 나노입자가 도입되어

태양전지의 광전기적 특성이 향상되면, 태양전지가 빛을 흡수하여 전류를 생산하는 일련의 변환 과정의 성능이 증대되어 높은 효율의 태양전지 제작이 가능해진다.

이처럼 나노입자는 태양전지에 도입하면 성능 향상을 기대할 수 있어, 높은 광변환 효율이 필요한 페로브스카이트 태양전지에도 나노입자가 활용될 수 있다. 그러나 나노 입자의 크기, 도입 위치, 태양전지의 구조 등이 앞서 논의한 광전기적 특성 향상 여부에 영향을 미치게 되며, 페로브스카이트 태양전지에 적용할 때 해당 사항들을 면밀히 고려해야 한다.

예를 들어, 플라즈모닉 효과를 고려하기 위해선 불균일한 표면 보다는 균일한 박막이 필요하며, 이는 표면이 거친 전자전달층 위에 광 흡수층을 코팅하는 n-i-p 구조의 페로브스카이트 태양전지보다는, 얇은 박막의 정공전달층 위에 광 흡수층을 코팅하는 p-i-n 구조가 바람직할 것이다(Sun, 2015). 또한, 나노 입자를 통한 면저항 개선을 활용하기 위해서는 나노 입자가 투명전극 위에 도포되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 p-i-n 구조의 페로브스카이트 태양전지의 투명전극과 정공전달층 사이에 증발 응축 장치를 이용하여 에어로졸 방식으로 제작된 수십 nm의 은 나노 입자를 도입하여, 페로브스카이트 태양전지의 성능 향상 여부를 파악하였다. 또한, 제작된 나노 입자가 도입된 페로브스카이트 태양전지의 광전기적 특성을 평가하여, 성능 향상의 원인을 파악하고, 이를 기반으로 페로브스카이트 태양전지에 은 나노 입자 도입의 가능성을 확인하였다.

## 2. 실험장치 및 연구방법

### 2.1 증발 응축 방식의 나노 입자 제작

기존 연구 (Jung et al., 2014)에 따르면 20-40 nm의 입자를 제작하여 태양전지에 도입하였다. 하지만, 본 연구에서는 페로브스카이트 태양전지의 구조 특성상 정공 전달층의 두께보다 작은 크기이지만, 빛 산란 효과를 가질 수 있는 적절한 크기를 도입하여야 하기에, 30 nm의 입자 크기를 도입하였다. 또한, 다양한 금속 나노 입자가 플라즈모닉 효과를 유도할 수 있으나, 본 연구에서는 가시광선 범위에서의 흡광도 증가 효과가 우수하고, 비저항이 낮아 전기적 특성 향상이 기대되는 은 나노 입자를 도입하였다 (Wang, Dong Hwan et al. 2011; Lee et al., 2021). 기판에 에어로졸 방식으로 해당 크기의 은 나노 입자를 도입하기 위해, 증발 응축 장치를 이용하였다

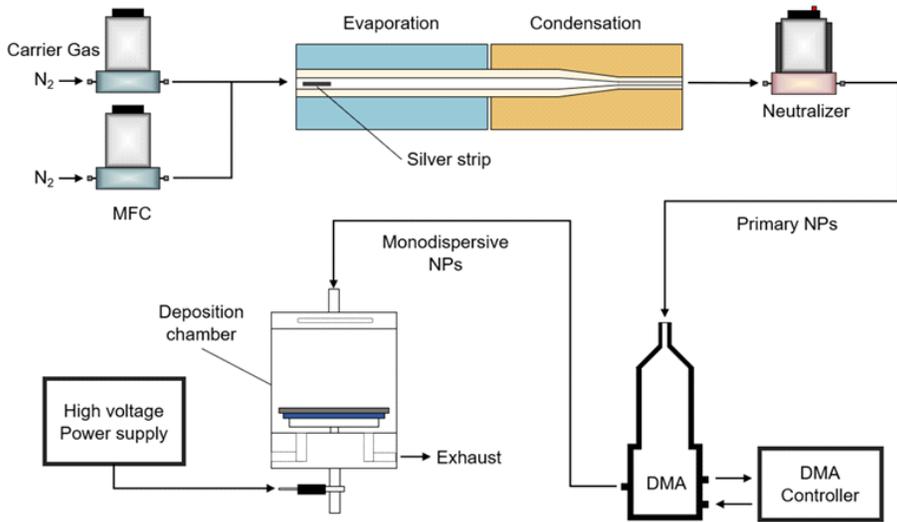


Figure 1. Experimental setup of evaporation and condensation instrument for nano particle generation.

(Jung et al., 2014). 그림 1은 증발 응축 장치의 개략도를 나타내며, 은(Ag) pellet (Alfa Aesar)을 석영관 끝에 배치하고, MFC (Tylan FC280S)를 이용하여 99.999%의 질소 캐리어 기체를 분당 1.5 L (LPM)으로 공급하였다. 관형 가열로는 1150 °C 조건에서 은 pellet을 용융시켜 은 흡을 만든다. 생성된 흡은 냉각 구간을 거치며 응축과 응고(coagulation) 과정을 거치며 나노 입자로 생성된다.

다분산(polydisperse) 에어로졸 상태인 은 나노 입자들은 nano-DMA (TSI 308500)와 DMA 컨트롤러(AERIS)를 통해 30 nm의 특정 크기의 단분산(monodisperse) 에어로졸 입자로 분류하였다. 분류된 단분산 은 나노 입자는 에어로졸 상태로 ITO 기판 위에 증착하였다.

그림 2는 ITO 기판 위에 은 나노 입자가 증착된 것을 전자 주사 현미경 (SEM)으로 확인한 결과이다. 30 nm 크기의 나노 입자는 그림 2a에서 확인할 수 있듯이 10분간의 증착 시간으로도 입자가 증착된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 충분한 양의 은 나노 입자를 확보하기 위해서 그림 2b와 같이 30 nm의 입자를 20분간 증착한 샘플을 이용하여 페로브스카이트 태양전지를 제작하였다.

제조에 필요한 용질과 용매는 Lead (II) iodide ( $PbI_2$ ; 99.999%, Sigma-Aldrich), Methylammonium iodide (MAI; Greatcell solar), N,N-Dimethylformamide (DMF; 99.8%, Sigma-Aldrich), Dimethyl sulfoxide

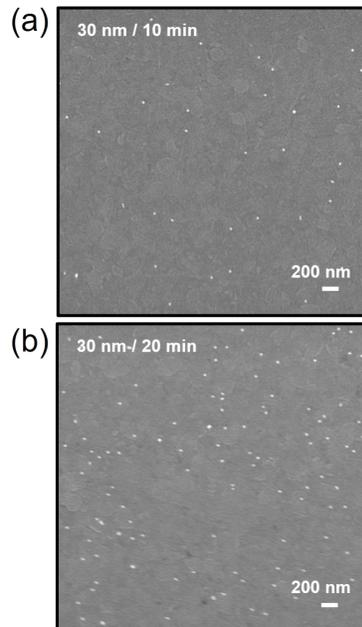


Figure 2. SEM images for Ag nanoparticles deposited on the ITO substrate (a) 30 nm / 10 min, (b) 30 nm / 20 min.

## 2.2 페로브스카이트 태양전지 제작

본 실험에 사용한 페로브스카이트 용액은  $MAPbI_3$  ( $CH_3NH_3PbI_3$ ) 용액으로 제조되었다(Lee, 2019). 용액

(DMSO;  $\geq 99.9\%$ )을 이용하였다. 용액 제조는 질소 분위기의 글로브박스(glove box)에서 진행하였으며, 용액은  $\text{PbI}_2$  461 mg, MAI 158 mg을 DMSO 75  $\mu\text{L}$ , DMF 550  $\mu\text{L}$ 에 녹여 제조하였다. 본 실험에 사용된 정공전달층 용액은 PEDOT:PSS (Clevios, Heraeus)를 DI에 2:1 부피비로 녹여 제작하였다(Kim, 2019).

소자 제작 전, Indium tin oxide(ITO) 기판을 Acetone, Isopropyl alcohol, DI water 순으로 각각 10분씩 초음파세척기로 세척하였다. 세척된 ITO 기판 위에 앞서 언급한 증발 응축 장치를 이용하여 30 nm 은 나노 입자를 증착하였다. PEDOT:PSS 용액을 5000 rpm 40초간 스핀 코팅한 후, 130  $^{\circ}\text{C}$ 에서 30분간 열처리하였다. 페로브스카이트 용액은 4000 rpm 20초간 스핀 코팅하였고, 시작 8초 후 Diethyl ether (Sigma Aldrich) 0.3 mL를 적하하였다. 그 후 65  $^{\circ}\text{C}$ 에서 1분, 100  $^{\circ}\text{C}$ 에서 4분 동안의 열처리를 거쳐 노란색의 페로브스카이트 중간상이 어두운 갈색으로 변하며  $\text{MAPbI}_3$ 가 형성된다. 마지막으로, 진공 열 증착기를 이용하여  $10^{-7}$  bar 이상의 압력에서  $\text{C}_{60}$ , BCP, Cu 순으로 각각 20 nm, 10 nm, 100 nm 증착하였다.

에어로졸 방식의 나노 입자는 모든 층 사이에 적용될 수 있지만, 광전기적 성능 향상을 극대화하기 위해 그림 3과 같이 ITO 투명전극과 정공전달층인 PEDOT:PSS층

사이에 도입하였다. 이렇게 두 층 사이에 도입된 나노 입자는 플라즈모닉 효과 혹은 전기적 성능 향상을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 나노입자가 도입된 전달층을 Nanoparticle Embedded Transport Layer (NETL)이라고 정의하였다.

### 3. 실험결과

그림 4는 NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지와 그렇지 않은 레퍼런스 페로브스카이트 태양전지의 광전 변환 성능을 비교한 결과이다. 그림 4a에서 확인할 수 있듯이, NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지는 그렇지 않은 태양전지에 비해 성능이 우수한 전류 밀도-전압 곡선을 보임을 확인할 수 있다. 본 전류밀도-전압 곡선에서 확인할 수 있는 각 태양전지 특성 인자(개로 전압; 전류가 흐르지 않을 때의 전압, 단락 전류 밀도; 단락 조건에서의 최대 전류값, 충전율; 이론 최대 전력 대비 발생하는 전력량, 광전 변환 효율; 태양광 에너지에 대한 전력 변환 효율)를 비교함으로써 그 성능을 파악할 수 있다.

최댓값의 셀을 비교하였을 때, NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지는 개로 전압( $V_{oc}$ ) 1.07 V, 단락 전류 밀도( $J_{sc}$ ) 22.52  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 충전율 (Fill factor,

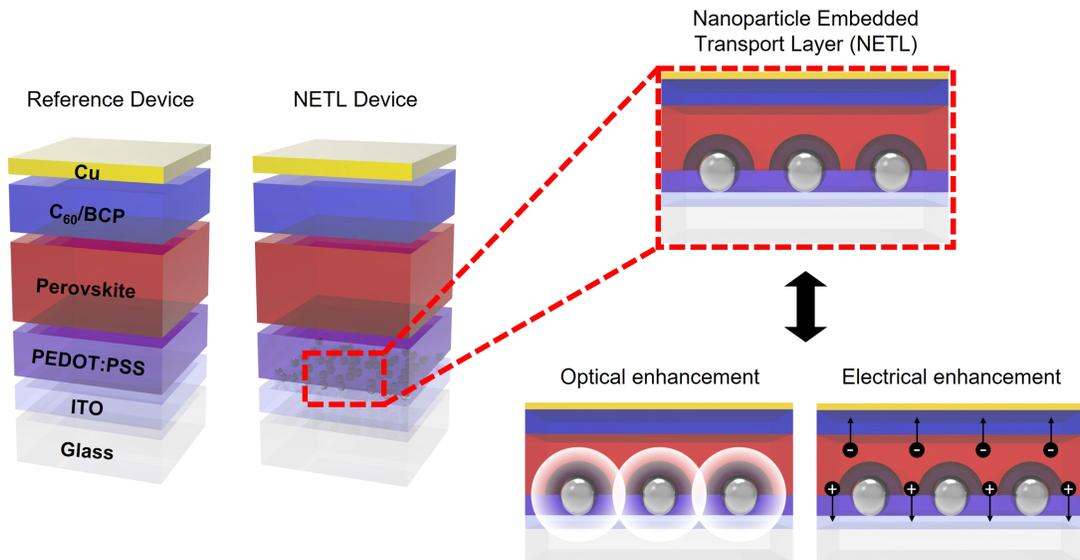


Figure 3. Schematics for reference perovskite solar cell and nanoparticle embedded transport layer (NETL) perovskite solar cells.

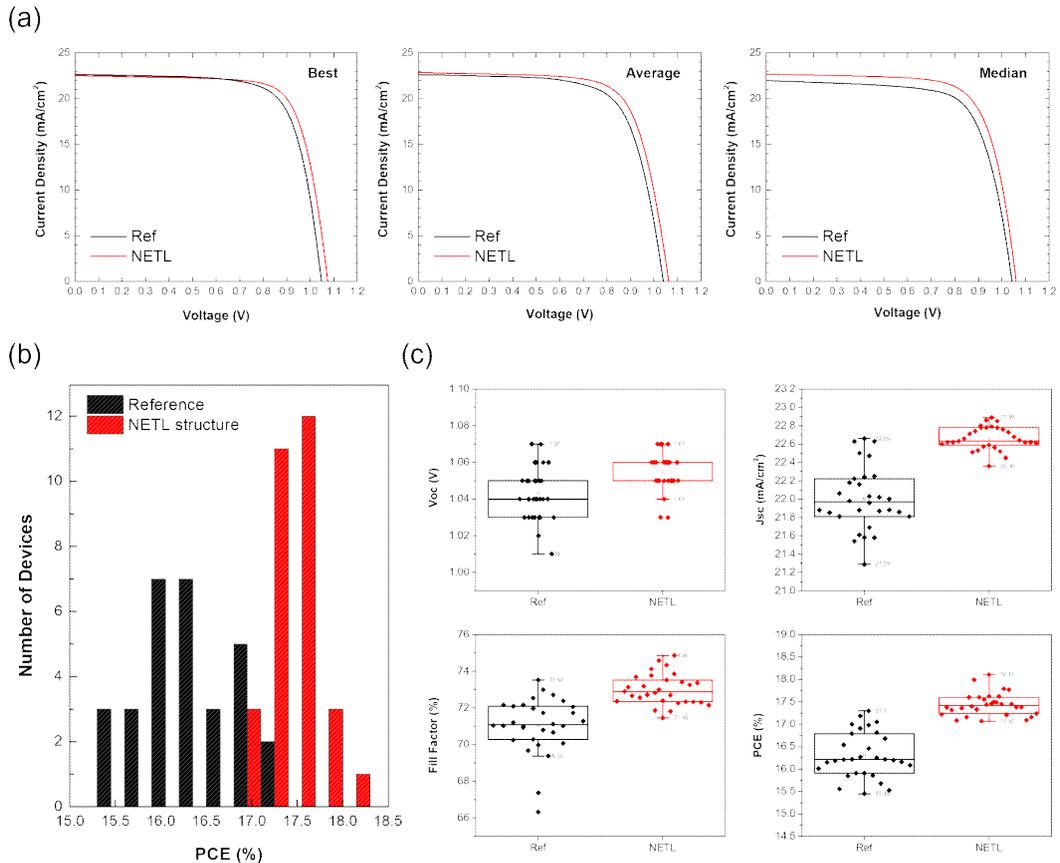


Figure 4. (a) Current density–Voltage curves for reference (Ref) and NETL perovskite devices for the best devices, average devices, and median devices. (b) PCE histogram and (c) box charts of Voc, Jsc, FF, and PCE for reference and NETL perovskite devices.

FF) 74.86 %, 광전 변환 효율(Power conversion efficiency, PCE) 18.11 %를 나타내었다. 레퍼런스 페로브스카이트 태양전지는 개로 전압 1.04 V, 단락 전류 밀도 22.66 mA/cm<sup>2</sup>, 충전율 72.99 %, 광전 변환 효율 17.30 %를 나타내었다. 효율의 평균값에 해당하는 대표 소자를 비교하였을 때와 (NETL: 개로 전압 1.06 V, 단락 전류 밀도 22.85 mA/cm<sup>2</sup>, 충전율 71.85 %, 광전 변환 효율 17.44 %, Reference: 개로 전압 1.03 V, 단락 전류 밀도 22.62 mA/cm<sup>2</sup>, 충전율 69.98 %, 광전 변환 효율 16.46 %) 효율의 중간값에 해당하는 소자를 비교했을 때 (NETL: 개로 전압 1.06 V, 단락 전류 밀도 22.68 mA/cm<sup>2</sup>, 충전율 72.34 %, 광전 변환 효율 17.40 %, Reference: 개로 전압 1.04 V, 단락 전류 밀도 21.98 mA/cm<sup>2</sup>, 충전율 70.80 %, 광전 변환 효율 16.22 %) NETL이 도입되었

을 때, 더 우수한 광전 변환 효율을 나타냄을 알 수 있었다.

그림 4b는 NETL이 도입된 페로브스카이트와 레퍼런스 페로브스카이트 태양전지의 광전 변환 효율 히스토그램을 나타낸 것이다. NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지는 전반적으로 그렇지 않은 태양전지에 비해 효율이 높음을 확인할 수 있다. 이는 더 자세하게 그림 4c에 나타난 각 태양전지 파라미터 (개로 전압, 단락 전류 밀도, 충전율, 광전 변환 효율)에 대한 박스 차트를 통해 다시 한번 확인할 수 있다. NETL을 도입하는 것이 각 태양전지 파라미터 중 어떤 항목에 가장 큰 향상을 가져오는지 본 박스 차트로 자세히 확인할 수 있다. 개로 전압의 경우 NETL의 도입으로 약간의 향상이 있으나, 최댓값의 경우 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 단락 전류 밀도와 충전율의 경우 최댓값

과 평균값에서 모두 큰 향상이 있으며, 이로 인해 광전 변환 효율에 큰 향상이 있음을 확인할 수 있다. 이는 NETL이 광학적, 전기적 특성 향상을 야기하며, 전류 밀도와 충전을 향상으로 발현됨을 나타낸다. NETL로 인한 광학적 특성 향상은 플라스모닉 효과를 통한 흡광도 향상이 지배적인 이유로 판단되며, 이를 확인하기 위해서는 흡수 영역에서의 흡광도를 비교해 볼 필요가 있다.

따라서, 그림 5에서 NETL이 도입된 페로브스카이트 층과 그렇지 않은 페로브스카이트 층의 흡광도 그래프를 비교하였다. 페로브스카이트 물질의 흡광 영역인 400-800 nm 영역의 빛을 이용하여 흡광도를 비교한 결과, 440-500 nm 영역에서 최대 3.1 %의 흡광도 향상 효과가 있음을 확인하였다. 이는 플라스모닉 효과에 의해 NETL로 인한 빛의 이동 경로가 증가하고, 빛이 광 흡수층에 머무르는 시간이 증가하여 흡광도가 증가한 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 본 결과에서 확인된 것처럼 흡광도의 증가는 더 많은 전하의 생성으로 이어지고, 단락 전류 밀도의 증가로 이어졌음을 예측할 수 있다.

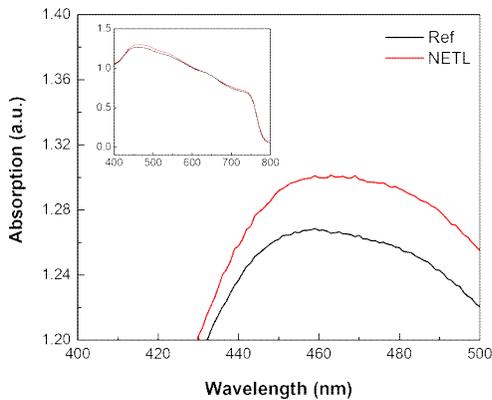


Figure 5. Absorption spectra for reference (Ref) and NETL perovskite film for 400-500 nm wavelength and 400-800 nm wavelength (inset graph).

NETL 자체는 페로브스카이트 광 흡수층의 조성이나 특성을 변화시키지 않기 때문에, NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지의 전기적 특성 향상은 주로 계면에서의 전하 이동도 향상과 관련이 있다. 태양전지 계면에서의 전하 전달, 추출을 확인하기 위해서는 임피던스 분석을 통해 각 계면에서의 전하 이동 경로의 저항을 비교하거나, 광발광(Photoluminescence, PL) 분

석을 통해 광전하의 재결합 속도를 분석하여 비교하는 방법을 활용할 수 있다. 첫째로, 그림 6에서와 같이, 임피던스 분석을 수행하여, NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지와 그렇지 않은 태양전지에서 발생하는 전극-페로브스카이트 인터페이스의 저항을 파악해보았다. 전압이 인가되지 않은 경우와 0.8 V의 작동 전압이 인가된 경우를 확인하였으며, 그림 6에 제시된 등가회로로 피팅한 파라미터를 표1에 정리하였다. 작동 전압

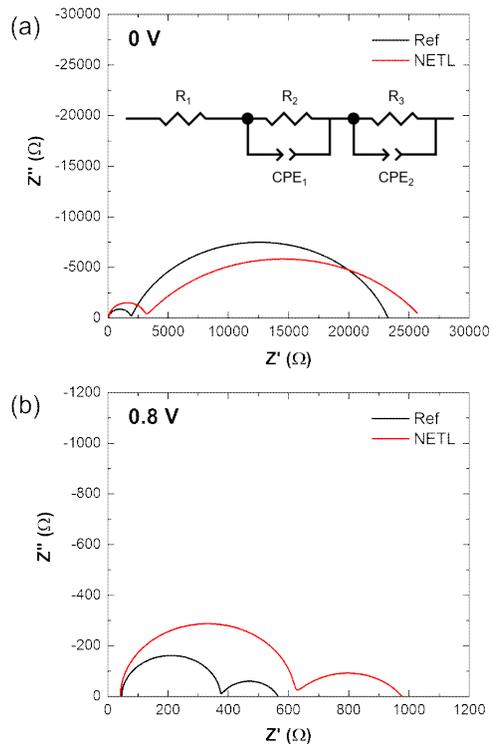


Figure 6. Fitted Nyquist plot for reference (Ref) and NETL perovskite devices by impedance measurement at (a) 0V and (b) 0.8V bias.

Samples	Voltage (V)	R <sub>1</sub> (Ω)	R <sub>2</sub> (Ω)	CPE <sub>1</sub> (F)	R <sub>3</sub> (Ω)	CPE <sub>2</sub> (F)
References	0	47.7	1846	0.9697	21369	0.7793
	0.8	45.3	328	0.9916	192.2	0.7137
NETL	0	44.9	2984	0.9939	23039	0.5978
	0.8	41	575.7	0.9970	360.2	0.6038

Table 1. Fitted parameters of Nyquist plot for reference (Ref) and NETL perovskite devices by impedance measurement at (a) 0V and (b) 0.8V bias.

0.8 V가 인가된 경우에서의 저항값을 비교하면, 레퍼런스 태양전지의  $R_1$ 은 45.3  $\Omega$ ,  $R_2$ 는 328  $\Omega$ ,  $R_3$ 은 192.2  $\Omega$ 을 가졌으며, NETL이 도입된 태양전지의  $R_1$ 은 41  $\Omega$ ,  $R_2$ 는 575.7  $\Omega$ ,  $R_3$ 은 360.2  $\Omega$ 으로,  $R_1$ 은 감소하였고,  $R_2$ 와  $R_3$ 는 증가하였음을 확인할 수 있었다.

임피던스 측정의 Nyquist 플롯에서  $R_1$ 은 접촉 저항으로, 생성된 전하가 전극으로 추출되는 데에 작용하는 저항이라 생각할 수 있다(Contreras-Bernal et al., 2019). 따라서, NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지는 더 작은 접촉 저항을 갖고, 이는 나노 입자로 인한 면저항 개선 효과 때문이라고 추측할 수 있다. 고주파수 영역에서 관측되는 첫 번째 반구의  $R_2$ 는 페로브스카이트 층의 유전반응 (dielectric response)으로 볼 수 있고, 저주파수 영역의  $R_3$ 는 계면에서의 전자 혹은 이온전하의 축적 때문이라 할 수 있으며, 이는 전하의 재결합 저항( $R_{rec}$ )으로 해석될 수 있다(Kim et al., 2018). NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지의  $R_3$ 에 해당하는 재결합 저항은 192.2  $\Omega$ 에서 360.2  $\Omega$ 으로 증가하였고, 이는 NETL의 도입으로 인해 계면에서의 전하 추출 및 이동 속도가 증가하여 전하의 재결합이 저하되었다는 것으로 해석할 수 있다. 즉, NETL의 도입은 계면에서의 전하 추출 성능을 향상시키고, 이는 그림 4c에서도 확인된 것처럼, 페로브스카이트 태양전지의 작동 전압에서의 전류 밀도를 향상시키고 충전을 향상에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

NETL이 도입된 페로브스카이트 박막의 PL 특성을 레퍼런스 페로브스카이트 박막과 비교하면 광전하의 재결합 특성을 실시간으로 파악해볼 수 있다. PL 특성을 비교하기 위해서는 ITO/AgNP/HTL/Perovskite의 구조를 갖는 반구조 소자를 제작하여 비교한다. 그림 7에서와 같이 페로브스카이트 태양전지에서의 PL 특성은 안정상태에서 발광 세기를 판단하는 안정 상태 광발광도 (steady-state PL)와 광발광의 시간에 따른 특성을 비교하는 시간 분해 광발광도 (time-resolved PL) 분석법으로 비교할 수 있다. 먼저 안정 상태 광발광 특성을 비교하면, NETL이 도입된 페로브스카이트 박막은 레퍼런스 박막에 비해 발광 피크의 강도가 낮게 나오고, 이는 하부의 전극으로 더 많은 전하가 추출되었음을 나타낸다. 따라서, NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지에서 생성된 전하는 더 많은 양이 전류로 전환됨을 알 수 있고, 이는 태양전지 소자의 전류 밀도

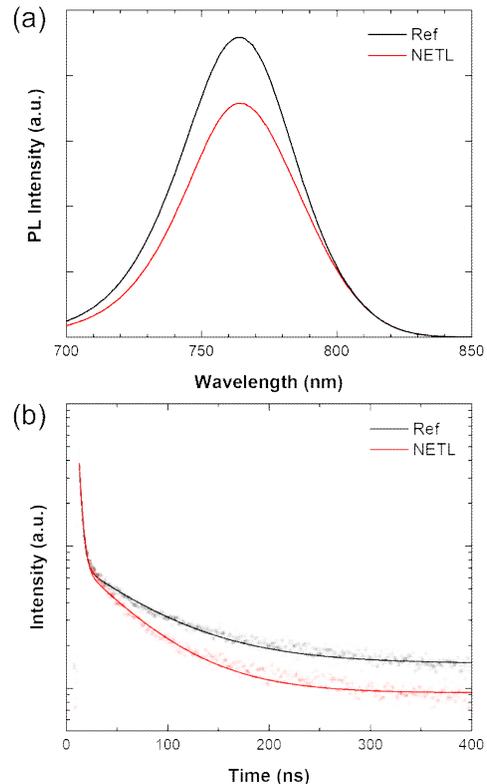


Figure 7. (a) Steady-state and (b) time-resolved photoluminescence for reference (Ref) and NETL perovskite devices.

Samples	$A_1$ (%)	$\tau_1$ (ns)	$A_2$ (%)	$\tau_2$ (ns)	$\tau_{avg}$ (ns)
References	16.18	2.833	83.82	70.740	148.996
NETL	20.42	2.914	79.58	55.665	92.475

Table 2. Fitting parameters of the time-resolved photoluminescence decay for reference and NETL perovskite devices.

및 충전을 향상을 야기한다.

그림 7b에 나타난 시간 분해 광발광도의 경우 페로브스카이트 물질 내에서 일어나는 발광 프로세스의 동적인 특성을 분석하는 것으로, 특히나 내부 전하의 이동도나 재결합 속도를 비교할 수 있다. 페로브스카이트 반구조 소자 내에서 시간 분해 광발광도 특성은 2차 지수 함수 감소 (2nd order exponential decay) 형태로 나타난다. 해당 2차 지수 함수 감소의 fitting 수식은 다음을 이용할 수 있다.

$$I = A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} \quad (1)$$

1차의 빠른 속도의 감소는 생성된 전하가 하부 전극으로 추출되는 것을 나타내며, 2차의 느린 속도의 감소는 생성된 전하의 재결합에 관한 부분을 나타낸다(Wu et al., 2018). NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지의 경우 레퍼런스에 비해 재결합되는 비율( $A_2$ )은 더 낮고, 전극으로 추출되는 비율( $A_1$ )은 더 높았다. 또한, 전하의 생존 시간 역시 92.475 ns로 레퍼런스에 비해 더 짧은 것을 통해, NETL이 도입된 페로브스카이트 태양전지는 더욱 빠른 속도의 전하 추출이 가능하고, 이를 통해 높은 충전율과 광전 변환 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 증발 응축 장치를 활용한 에어로졸 기반의 은 나노 입자를 생성하고, 이를 페로브스카이트 박막 태양전지의 내부에 도입하여 광전기적 성능을 향상시킨 연구를 수행하였다. 투명 하부 전극과 정공전달층 사이에 도입된 은 나노 입자는 NETL을 형성하였고, 이는 플라즈모닉 효과를 일으키고 전하 전달 속도를 향상시켰다. 그 결과 태양전지 광전 변환 효율은 17.30 %에서 18.11 %로 향상되었고, 이는 광흡수도, 임피던스 분석, 광발광 분석 등을 통해 입증되었다. 본 연구를 통해 나노 입자가 도입된 태양전지의 개발 가능성을 보여줄 수 있었다.

#### 감사의 글

이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- Carretero-Palacios, S., Jiménez-Solano, A., & Míguez, H. (2016). Plasmonic nanoparticles as light-harvesting enhancers in perovskite solar cells: a user's guide. *ACS energy letters*, 1(1), 323-331. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00138>
- Catchpole, K. A., & Polman, A. (2008). Plasmonic solar cells. *Optics express*, 16(26), 21793-21800. <https://doi.org/10.1364/OE.16.021793>
- Contreras-Bernal, L., Ramos-Terrón, S., Riquelme, A., Boix, P. P., Idígoras, J., Mora-Seró, I., & Anta, J. A. (2019). Impedance analysis of perovskite solar cells: a case study. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(19), 12191-12200. <https://doi.org/10.1039/c9ta02808k>
- Galkowski, K., Mitioglu, A., Miyata, A., Plochocka, P., Portugall, O., Eperon, G. E., Wang, J. T., Stergiopoulos, T., Stranks, S. D., Snaith, H. J., & Nicholas, R. J. (2016). Determination of the exciton binding energy and effective masses for methylammonium and formamidinium lead tri-halide perovskite semiconductors. *Energy & Environmental Science*, 9(3), 962-970. <https://doi.org/10.1039/c5ee03435c>
- Jung, K., Song, H. J., Lee, G., Ko, Y., Ahn, K., Choi, H., Kim, J. Y., Ha, K., Song, J. Lee, J. K., Lee, C., & Choi, M. (2014). Plasmonic organic solar cells employing nanobump assembly via aerosol-derived nanoparticles. *ACS nano*, 8(3), 2590-2601. <https://doi.org/10.1021/nn500276n>
- Kim, B. J., Kim, M. C., Lee, D. G., Lee, G., Bang, G. J., Jeon, J. B., Choi, M., & Jung, H. S. (2018). Interface design of hybrid electron extraction layer for relieving hysteresis and retarding charge recombination in perovskite solar cells. *Advanced Materials Interfaces*, 5(23), 1800993. <https://doi.org/10.1002/admi.201800993>
- Kim, M. C., Ahn, N., Lim, E., Jin, Y. U., Pikhitsa, P. V., Heo, J., Kim, S. K., Jung, H. S., & Choi, M. (2019). Degradation of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite materials by localized charges and its polarity dependency. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(19), 12075-12085. <https://doi.org/10.1039/c9ta03180d>
- Lee, G., Kim, M. C., Choi, Y. W., Ahn, N., Jang, J., Yoon, J., Kim, S. M., Lee, J. G., Kang, D., Jung, H. S., & Choi, M. (2019). Ultra-flexible perovskite solar cells with crumpling durability: toward a wearable power source. *Energy & Environmental Science*, 12(10), 3182-3191. <https://doi.org/10.1039/c9ee01944h>
- Lee, S. A., & Link, S. (2021). Chemical interface damping of surface plasmon resonances. *Accounts of Chemical Research*, 54(8), 1950-1960. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00872>
- Lu, H., Zhang, D., Ren, X., Liu, J., & Choy, W. C. (2014). Selective growth and integration of silver nanoparticles on silver nanowires at room conditions for transparent nano-network electrode. *Acs Nano*, 8(10), 10980-10987. <https://doi.org/10.1021/nn504969z>
- Oga, H., Saeki, A., Ogomi, Y., Hayase, S., & Seki, S. (2014). Improved understanding of the electronic and energetic landscapes of perovskite solar cells: high local charge carrier mobility, reduced recombination, and extremely shallow traps. *Journal of the American Chemical Society*,

- 136(39), 13818-13825.  
<https://doi.org/10.1021/ja506936f>
- Omrani, M., Fallah, H., Choy, K. L., & Abdi-Jalebi, M. (2021). Impact of hybrid plasmonic nanoparticles on the charge carrier mobility of P3HT: PCBM polymer solar cells. *Scientific reports*, 11(1), 19774.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-99095-1>
- Park, J., Kim, J., Yun, H. S., Paik, M. J., Noh, E., Mun, H. J., Kim, M. G., Shin, T. J., & Seok, S. I. (2023). Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides. *Nature*, 616(7958), 724-730.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05825-y>
- Park, N. G. (2015). Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. *Materials today*, 18(2), 65-72.  
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>
- Stranks, S. D., Eperon, G. E., Grancini, G., Menelaou, C., Alcocer, M. J., Leijtens, T., Herz, L. M., Petrozza, A., & Snaith, H. J. (2013). Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber. *Science*, 342(6156), 341-344.  
<https://doi.org/10.1126/science.1243982>
- Sun, K., Zhang, S., Li, P., Xia, Y., Zhang, X., Du, D., ... & Ouyang, J. (2015). Review on application of PEDOTs and PEDOT: PSS in energy conversion and storage devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 4438-4462.  
<https://doi.org/10.1007/s10854-015-2895-5>
- Wang, D. H., Park, K. H., Seo, J. H., Seifert, J., Jeon, J. H., Kim, J. K., Park, J. H., Park, O. O., & Heeger, A. J. (2011). Enhanced power conversion efficiency in PCDTBT/PC<sub>70</sub>BM bulk heterojunction photovoltaic devices with embedded silver nanoparticle clusters. *Advanced Energy Materials*, 1(5), 766-770  
<https://doi.org/10.1002/aenm.201100347>
- Wu, Z., Raga, S. R., Juarez-Perez, E. J., Yao, X., Jiang, Y., Ono, L. K., Ning, Z., Tian, H., & Qi, Y. (2018). Improved efficiency and stability of perovskite solar cells induced by C=O functionalized hydrophobic ammonium-based additives. *Advanced Materials*, 30(3), 1703670.  
<https://doi.org/10.1002/adma.201703670>