JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(4) : 357-364 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.357

유무기 페로브스카이트 태양전지의 방사선 영향 평가

윤진문[1], 임윤묵[1], 김희수[1], 김병남[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Radiation Effects of Organic/Inorganic Perovskite Photovoltaic Cells

Jin-Mun Yun[1], Youn-Mook Lim[1], Huisu Kim[1] and Byungnam Kim[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup 56212, Republic of Korea

Abstract This study was to investigate the radiation effects of perovskite photoactive layers and unit cells. To evaluate morphological, electrical and long-term air-stability of three kinds of perovskite photoactive materials, we conducted SEM, J-V and ambient endurance analyses. There were no morphological changes of perovskite active layers after gamma irradiation up to 50 kGy compared to those of pristine perovskite active layers. However, cell-performances were gradually decreased with increasing gamma irradiation doses due to the reduction of transmittance values of glass/ITO substrates. Among the three kinds of perovskite active materials, higher methylammonium (MA) contents showed more reduced power conversion efficiency and lower air-stability with increasing gamma irradiation doses.

Key words: Perovskite photovoltaic cells, Active layer, Gamma irradiation, Radiation effect, Long-term stability

1. 서 론

태양전지는 광전효과를 이용하여 태양에너지를 전기에너지로 전환하는 장치로서 유가급등, 이산화탄소 배출규제 등으로 인해 친환경 에너지 기술로서 큰 관심을 받고 있다[1-3]. 태양전지는 빛을 흡수하는 소재의 종류에 따라서 실리콘계, 화합물 반도체계, 유기계, 유무기 혼성계 등으로 분류를 할 수 있다. 이 중에서 1세대에 해당하는 실리콘계 태양전지는 가장 상용화가 빨리 되었으며, 현재 시장의 대부분을 차지하고 있다. 특히 안정성이 뛰어나므로 고고도 무인항공기 등의 전력원으로 대부분 사용되고 있으나 무겁기 때문에 경량화 필요성도 존재한다. 화합물 반도체계의 경우, CIGS를 대표적으로 들 수 있으며, 성능면에서 실리콘 태양전지에 비해 상대적으로 낮지만 박막제조가 가능하다는 장점으로 인하여 태양전지의 경량화 장점이 있다. 다음으로 유기계의 경우, 고분자로 이루어진 유기반도체를 이용하기 때문에 박막화, 초경량화, 롤투롤 용액공정 가능의 장점이 있으나 낮은 carrier diffusion length 문제로 인한 낮은 광전변환 효율의 문제점이 있다[4-7].

많은 연구자들은 실리콘 태양전지의 안정성 및 높은 광전변환효율을 보이면서도 롤투롤 용액공정이 가능하면서도 초박막형 초경량 특성을 보이는 새로운 태양전지를 개발하고자 노력하였다. 그중에서 페로브스카이트 태양전지는 유무기 혼성 구조를 갖기 때문에 용액공정이 가능하며 유기 태양전지와 달리 긴 carrier diffusion length를 갖기 때문에 높은 광전변환효율을 갖음을 확인하였다[8-10]. 무엇

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Byungnam Kim
Tel. +82-63-570-3432 Fax. +82-63-570-3068 E-mail. bnkim@kaeri.re.kr

Received 4 October 2022 **Revised** 12 October 2022 **Accepted** 7 November 2022

보다 실리콘 태양전지보다 높은 광전변환효율을 갖는 페로브스카이트 태양전지 제작이 가능하고, 플라스틱 기판에 용액공정이 가능하여 초경량, 박막형 태양전지 제작이 가능함을 많은 문헌에서 보고하였다[8-10].

이와 같은 장점을 기반으로 본 연구에서는 페로브스카이트 태양전지를 고고도 무인항공기의 동력원이나 우주용 태양전지로서 활용이 가능한지에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 페로브스카이트 태양전지를 상기 환경하에서 동력원으로 사용이 가능한지에 대해 판단하기 위해서는 방사선 환경에서 페로브스카이트 태양전지의 영향 평가가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 페로브스카이트 태양전지 광활성층이 감마선 조사에 따른 모폴로지 변화, 단위소자의 solar cell 파라미터의 변화 및 감마선 조사 후 단위소자의 장기 안정성 평가를 실시하였다. 이를 통하여 광활성 소재 및 단위소자의 감마선 영향인자 분석 실시 후, 고고도 동력원 및 우주용 태양전지로 활용이 가능하기 위하여 개선하여야 할 인자를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 페로브스카이트 태양전지 3가지 종류로서 각 구성물질인 methylammonium iodide (MAI), lead iodide (PbI_2), lead bromide ($PbBr_2$), formamidinum iodide (FAI), cesium iodide (CsI)를 유기용매인 dimethylformamide (DMF)에 녹여서 3가지 종류의 페로브스카이트 광활성층 용액 ($MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$)를 기존 선행 논문을 참고하여 제조하였다[11-13]. 제조된 페로브스카이트 용액을 이용하여 태양전지 단위소자를 glass/ITO/NiO_x/광활성층/Phenyl-C_{61}-butyric acid methyl-ester (PCBM)/ZnO/BCP/Ag configuration과 같이 glove box 내에서 제작하였다. 모폴로지 분석의 경우, glass/ITO/NiO_x 상부에 페로브스카이트 태양전지를 단위소자 제작과 동일한 공정으로 광활성층을 만든 후에 SEM 분석을 실시하였다. Glass 투과도 분석의 경우, 페로브스카이트 광활성층을 glass/ITO 상부에 스핀코팅을 단위소자 제작 공정과 동일하게 하여 분석을 실시하였다.

제작된 페로브스카이트 태양전지의 방사선 조사는 첨단방사선연구소의 감마선 조사시설 (dose rate: 10 kGy hr^{-1})을 이용하여 실시하였고, 조사선량 변화에 따른 변화를 관찰하기 위해서 1~50 kGy까지 변화를 준 후 각 분석을 실시하였다. 페로브스카이트 태양전지 단위소자의 공기 중 수명 평가를 위해서 상기 단위소자 제작공정과 동일하게 태양전지를 제작한 후, 감마선 조사를 각 선량별로 실시하였고, 조사 후 공기 중에서 시간별로 성능 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 페로브스카이트 태양전지 광활성층 필름의 SEM 분석 결과

페로브스카이트 태양전지의 광전변환효율에 큰 영향을 미치는 요인으로는 페로브스카이트 광활성층 필름의 모폴로지를 들 수 있다. 특히 페로브스카이트 광활성층 필름의 결정크기 변화는 입사된 광자에 의해 생성된 캐리어의 diffusion length에 큰 영향을 미치게 되므로 crystalline domain size 변화를 분석하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 먼저 3가지 종류의 페로브스카이트 광활성 필름 $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$를 스핀코팅을 통하여 ITO/Glass/NiO_x 기판 상부에 형성하였다. 형성된 각 필름을 고준위 감마선 조사설비를 이용하여 1, 5, 10, 20, 50 kGy (rate: 10 kGy hr^{-1})로 각각 조사를 실시한 후 Fig. 1과 같이 필름 모폴로지 분석을 SEM을 이용하여 실시하였다.

일반적으로 페로브스카이트는 ABX_3 (A: 유기 또는 무기 양이온, B: 전이금속, X: 음이온 halide) 결정 구조로 이루어져 있으며, A-, B-, X-side 물질들은 소자 성능에 큰 영향을 미치며, 더 나아가 온도, 습도, 방사선 등과 같은 환경에 대한 내성 또는 안정성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[14]. 이에 내방사선 특성을 가지는 페로브스카이트 개발을 위해 A와 X 물질을 조절하였고, 서로 다른 물질 구성의 페로브스카이트 박막 표면을 SEM을 통해 분석하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 methylammonium (MA), 납 (lead, Pb), 아이오딘 (iodine, I)으로 이루어진 $MAPbI_3$ 구조의 페로브스카이트 태양전지에 경우 SEM으로 표면을 확인하였고, 결함 없이 평균 300~400 nm 크기의 결정으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 감마선 조사 전후 광활성층 필름의 모폴로지에 큰 변화가 없음을 확인할 수 있었고, 특히 carrier diffusion length에 큰 영향을 미치는 페로브스카이트 광활성층 소재의 crystalline

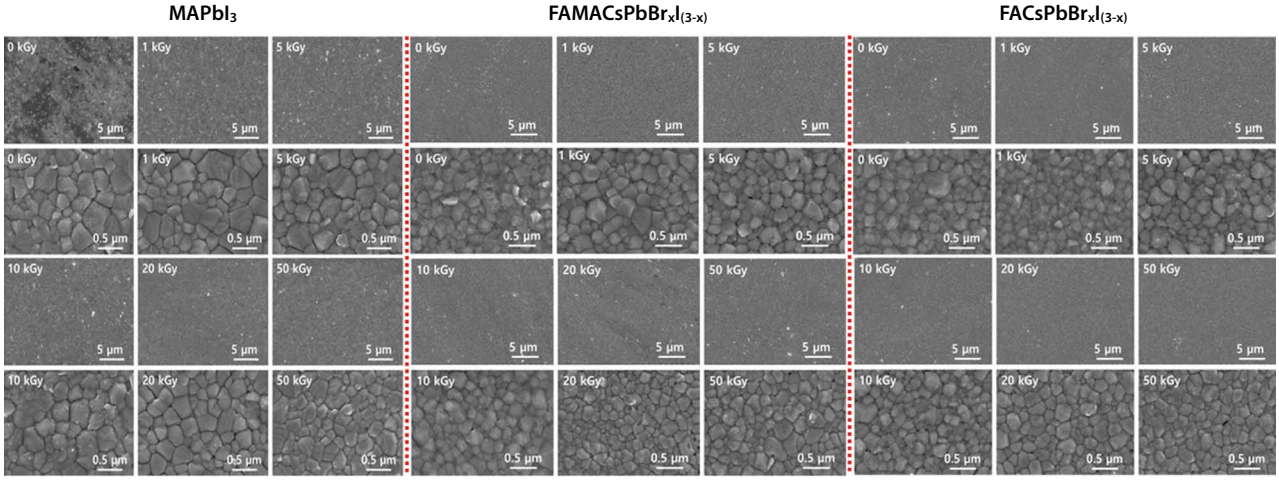

Fig. 1. SEM images of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ photoactive layers before and after gamma irradiation.

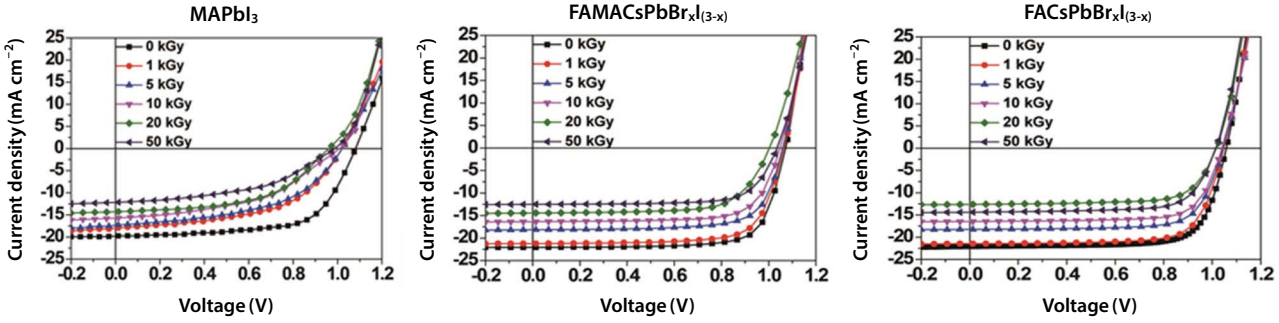

Fig. 2. J-V curves of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ photovoltaic cells with a different gamma irradiation.

domain size에도 50 kGy까지의 감마선 조사에 의해 큰 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었다.

그 다음으로 A-side로는 MA보다 분자 구조가 상대적으로 큰 formamidinium (FA)과 무기물인 세슘(cesium, Cs)을 X-side로는 I와 브로민(Bromine, Br)을 사용한 $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 구조의 페로브스카이트 필름을 제조한 후 SEM 분석을 실시하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 구조의 페로브스카이트 필름 표면을 SEM으로 분석한 결과 200~300 nm 크기의 결정으로 구성된 것을 확인하였으며, 1~50 kGy까지 감마선 조사를 실시하여도 표면 모폴로지 및 domain size 변화에 큰 영향이 없음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 MA를 제외한 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 구조의 페로브스카이트 필름을 제조하여 표면을 SEM 분석을 실시하였다. MA가 포함되지 않은 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 구조의 페로브스카이트 필름에 경우 $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$와 유사하게 결함 없이 200~300 nm 크기의 결정으로 구성된 것을 확인할 수 있고, 감마선 처리에 따라 표면이 크게 변화지 않는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 페로브스카이트 태양전지 광활성층 필름의 J-V 분석 결과

$MAPbI_3$ 박막을 광활성층으로 사용한 페로브스카이트 태양전지의 개방전압(open circuit voltage, Voc), 단락전류(short circuit current density, Jsc), 충전률(fill factor, FF), 광변환효율(power conversion efficiency, PCE)을 단위소자 제작을 통하여 분석하였고 그 결과는 Fig. 2와 같다. 감마선을 처리하지 않은 소자의 경우 13.93%의 소자 효율이 확인되는 반면 감마선 조사량이 증가함에 따라 J-V curve가 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 기반으로 소자 PCE를 계산하였을 때 감마선 조사선량이 50 kGy까지 증가되면 단위소자의 PCE가 5.716%까지 감소하는 것을 확인할 수

있었다. 또한 조사선량이 증가할수록 광전변환효율은 점진적으로 감소함을 확인할 수 있었고, 무엇보다 Jsc 및 FF의 감소가 Voc 감소보다 두드러짐을 확인할 수 있었다.

$MAPbI_3$ 이외에도 $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 광활성층을 사용한 페로브스카이트 태양전지의 감마선 조사에 따른 소자 성능 변화를 분석하였다. J-V curves를 확인하였을 때, $MAPbI_3$를 사용한 소자에 비해 균일하게 J-V 특성이 변화되는 것을 확인할 수 있었고, 특히 감마선 조사량이 증가함에 따라 Jsc가 21.962 mA cm^{-2}에서 12.519 mA cm^{-2}으로 약 50% 정도까지 감소한 것을 확인할 수 있지만, Voc 변화는 크지 않음을 확인하였다. 이는 SEM 분석에서 살펴보았듯이 감마선 조사선량을 증가시키더라도 핀홀(pinhole) 등과 같은 모폴로지 결함이 발생하지 않았고 이로 인하여 Voc 변화가 미미함을 유추할 수 있을 것이다. 즉 $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$를 광활성층으로 사용한 소자의 Voc와 FF는 큰 변화가 없고 Jsc 수치만 변화된 것을 통해 전극과 계면 소재들은 감마선에 큰 영향을 받지 않은 것이라고 생각할 수 있었다. 반면 $MAPbI_3$에 경우 동일한 전극과 계면을 사용하였음에도 불구하고 Voc와 FF가 상대적으로 크게 감소한 것은 $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$에 비해 더 감마선에 민감하고 큰 영향을 받은 것이라고 추론할 수 있다.

마지막으로 MA가 없는 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$를 광활성층으로 사용한 소자의 감마선 조사량에 따른 소자 성능 변화를 단위소자 제작 및 J-V curve 분석을 통해 확인하였을 때, J-V의 경우 $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$를 사용한 소자와 유사한 그래프 변화를 확인할 수 있었다.

Voc와 FF에 경우 큰 변화가 없는 반면 Jsc는 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$를 사용한 소자에서 역시 22.263 mA cm^{-2}에서 12.65 mA cm^{-2}으로 약 45% 정도 감소한 것을 확인할 수 있고, 결과적으로 소자 성능 역시 17.44%에서 9.369%까지 감소한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 기판으로 사용되는 glass에 경우 감마선 처리를 하였을 때, 갈변되는 특성이 있고 이러한 기판의 광학적 특성 변화는 페로브스카이트 태양전지의 광활성층이 흡수할 수 있는 광자에 영향을 미치며, 결과적으로 소자 성능 감소를 야기할 수 있을 것이다. 이러한 영향은 실제로 감마선에 의한 페로브스카이트 내 계면, 전

Table 1. Photovoltaic parameters of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$-based cells

$MAPbI_3$	Voc (V)	Jsc (mA cm^{-2})	FF (%)	PCE (%)
0 kGy	1.081	19.79	65.14	13.93
1 kGy	1.020	17.97	52.95	9.711
5 kGy	1.021	17.29	51.14	9.038
10 kGy	1.008	15.67	47.32	7.481
20 kGy	0.961	14.24	53.12	7.270
50 kGy	0.983	12.13	47.89	5.716
$FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$	Voc (V)	Jsc (mA cm^{-2})	FF (%)	PCE (%)
0 kGy	1.071	22.07	75.52	17.86
1 kGy	1.064	21.21	73.93	16.68
5 kGy	1.059	18.14	73.15	14.06
10 kGy	1.047	16.36	73.19	12.54
20 kGy	1.003	14.43	69.66	10.08
50 kGy	1.035	12.52	72.00	9.365
$FACsPbBr_xI_{(3-x)}$	Voc (V)	Jsc (mA cm^{-2})	FF (%)	PCE (%)
0 kGy	1.058	22.10	74.85	17.51
1 kGy	1.048	21.46	74.40	16.73
5 kGy	1.045	18.24	74.50	14.20
10 kGy	1.040	16.48	74.70	12.80
20 kGy	1.014	14.39	72.94	10.64
50 kGy	1.017	12.63	73.47	9.508

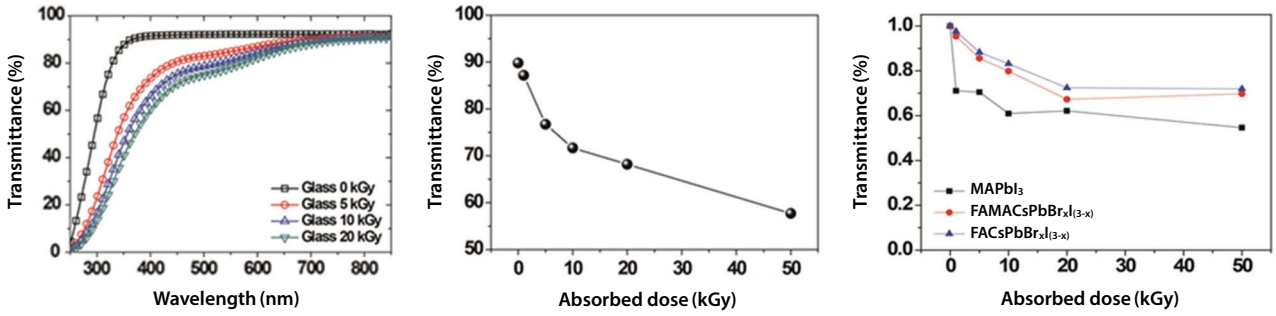

Fig. 3. Changes in transmittance of glass substrates and normalized PCEs with and without gamma irradiation.

극, 광활성층의 특성 변화라 보기 어려우므로 이를 보정하고 좀 더 정확한 페로브스카이트 층에 의한 소자 성능 변화를 확인하기 위해 감마선 조사량에 따른 glass 투과도 변화를 추가적으로 검증하였다.

3.3. 조사선량에 따른 성능 변화 요인 분석

Fig. 3에서와 같이 감마선 조사량이 증가함에 따라 가시영역에서 투과도가 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 가시광영역인 300~700 nm까지의 투과도 평균값을 구하였을 때, 감마선 조사량이 0, 1, 5, 10, 20, 50 kGy일 때 각각 89.78, 87.16, 76.69, 71.67, 68.17, 57.69%로 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 기판으로 사용된 glass의 투과도 변하는 페로브스카이트 태양전지 소자 성능 변화에 매우 큰 영향을 미쳤을 것이라고 사료되며, glass 갈변에 따른 투과도 변화를 기반으로 Jsc를 보정하고 이를 바탕으로 소자의 PCE를 다시 계산하였을 때, $MAPbI_3$를 사용한 소자의 경우 감마선 조사를 하지 않은 소자 PCE에 비해 약 63% 정도 단위소자의 PCE가 감소함을 확인할 수 있었다.

하지만, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$와 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 기반 페로브스카이트 태양전지의 경우, 최대 50 kGy로 처리하였을 때도 초기 소자 PCE에 비해 각각 83.5%와 83.8% 정도로 초기성능을 유지함을 확인할 수 있었다. 특히 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 기반 광활성층을 사용한 소자에서는 1 kGy를 조사하였을 때 98~99%, 5 kGy로 조사하였을 때 ~95% 이상의 소자 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로 MA 기반 페로브스카이트 광활성층을 사용한 소자는 감마선을 조사하였을 때, 큰 영향을 받는 것을 확인하였고, 이에 반해 MA가 극소량 또는 포함되지 않은 광활성층에 경우 감마선에 더 안정적인 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Summary of PCEs calculated by 0% color change condition

	$MAPbI_3$	$FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$	$FACsPbBr_xI_{(3-x)}$
0 kGy	13.93%	17.85%	17.50%
1 kGy	9.995%	17.18%	17.23%
5 kGy	10.57%	16.45%	16.62%
10 kGy	9.366%	15.71%	16.04%
20 kGy	9.577%	13.28%	14.02%
50 kGy	8.881%	14.91%	14.67%

3.4. TPC 및 TPV 분석

Transient photocurrent (TPC) 측정 방법은 광 효과에 의해 생성된 전하를 시간에 따라 추출함으로 단락회로 조건에서 전자소자 내 전하 추출 특성을 파악할 수 있는데, 본 측정 방법을 통해 감마선이 조사된 다양한 조합의 페로브스카이트 광활성을 사용한 소자 내 전하 이동 특성을 Fig. 4와 같이 분석하였다[15]. $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 기반 소자들 모두 감마선 조사량이 증가하였을 때도 거의 유사하거나 큰 차이 없는 것을 확인할 수 있는데, 이 같은 결과는 감마선에 의해 페로브스카이트 구조적인 결합이 분리되어 전하 형성에는 영향을 미치지만, 페로브스카이트층 내에서 전하 이동에는 큰 영향이 없는 것을 확인할 수 있었다. 또한, $MAPbI_3$에 비해 $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$와 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$를 사용한 소자에서 약 2배나 빠른 전하 이동 속도를 보이는데, 이는 MA 소량 첨가되거나 없는 페로브스카이트 물질이 전하 이동 특성이 뛰어나다는 것을 확인할 수 있었다.

Transient photovoltage는 개방 회로 상태에서 순간적인 광원에 의해 생성된 전하의 수명을 측정할 수 있으며, 이를 통해 전자소자 내 전하의 재결합 (charge recombination),

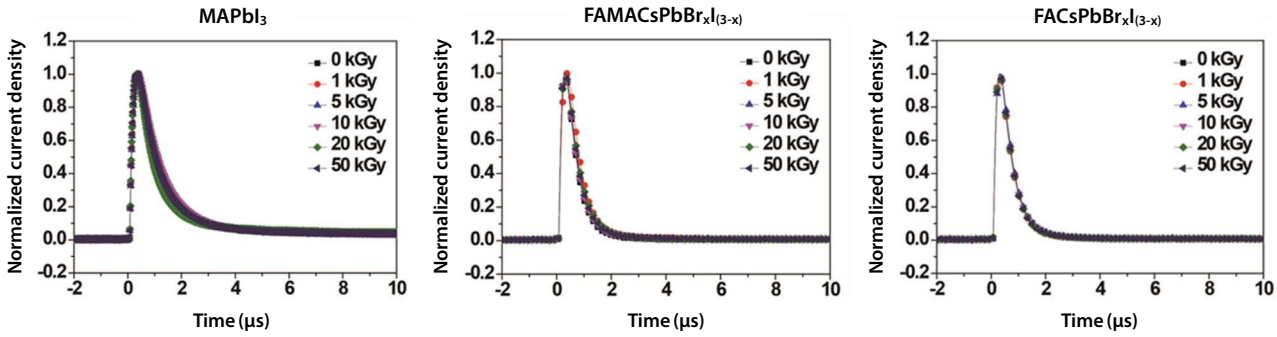

Fig. 4. TPC results of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ and $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$-based cells.

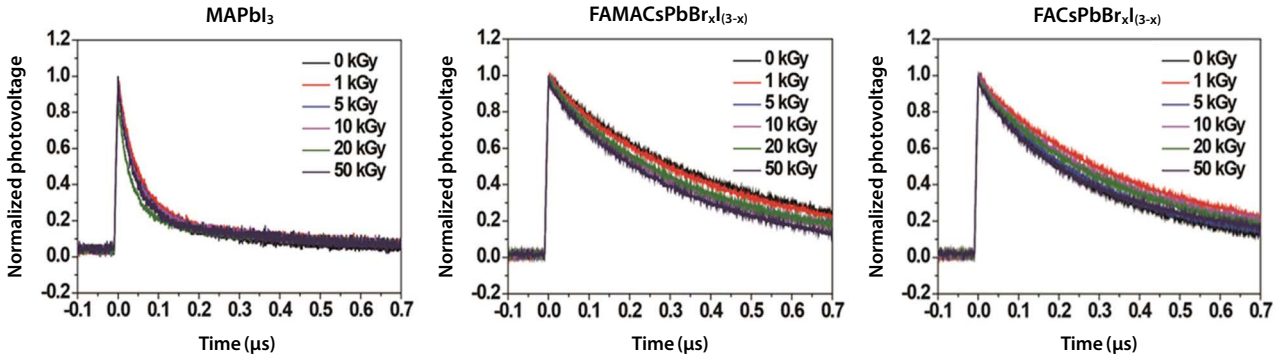

Fig. 5. TPV results of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ and $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$-based cells.

Table 3. Summary of TPC values of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ and $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$-based cells

	$MAPbI_3$	$FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$	$FACsPbBrxI_{(3-x)}$
0 kGy	0.929	0.475	0.509
1 kGy	0.930	0.529	0.505
5 kGy	0.892	0.491	0.508
10 kGy	0.951	0.496	0.519
20 kGy	0.742	0.539	0.506
50 kGy	0.871	0.505	0.500

Table 4. Summary of TPV values of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ and FACsPb $Br_xI_{(3-x)}$-based cells

	$MAPbI_3$ (μs)	$FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ (μs)	$FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ (μs)
0 kGy	0.068	0.389	0.272
1 kGy	0.070	0.371	0.371
5 kGy	0.065	0.305	0.295
10 kGy	0.063	0.325	0.329
20 kGy	0.053	0.346	0.347
50 kGy	0.061	0.314	0.254

트랩(charge trap), 전하 손실 등 전하 거동 특성을 분석할 수 있는 방법이다[16]. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, $MAPbI_3$ 기반 소자의 경우 감마선 조사량이 증가함에 따라 전하 수명이 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 감마선에 의해 $MAPbI_3$ 박막 내부에 구조적인 결함이 발생하고, 이러한 결함이 전하 손실, 트랩, 재결합을 야기하여 시간이 감소한 것이라고 판단된다. 또한, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$와 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 기반 소자들에서도 유사한 변화를 확인할 수 있는데, 이를 통해 감마선을 조사하였을 때, 성능이 감소하는 원인이 광활성층 계면 상부가 아닌 광활성층 내 defect가 발생하여 소자 성능이 감소된 것이라고 추론할 수 있었다.

3.5. 단위소자의 장기안정성 분석

시간에 따른 공기 중에서 감마선 조사된 페로브스카이트 태양전지의 성능 변화를 관찰하기 위해서 제작된 단위소자를 1~50 kGy까지 감마선 조사를 실시한 후, 공기 중에

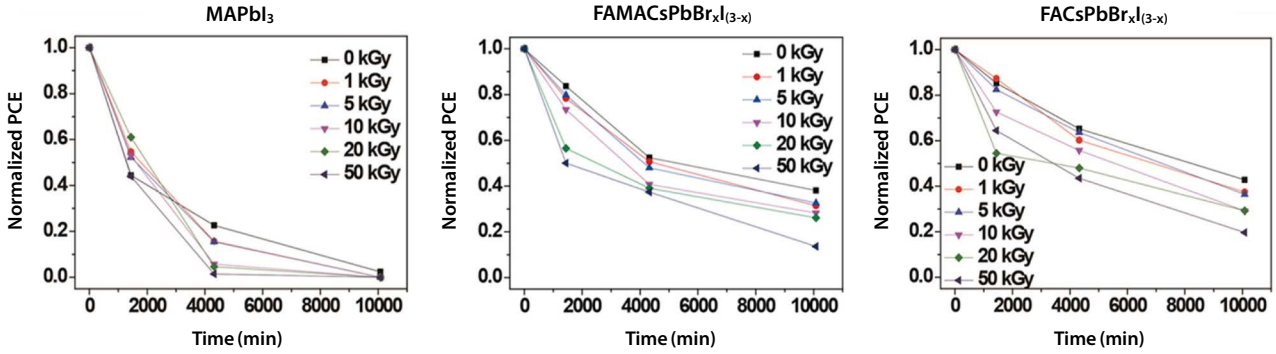

Fig. 6. Changes in air-stability of $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$ and $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$-based cells.

서의 성능 변화를 Fig. 6과 같이 관찰하였다. 먼저 $MAPbI_3$ 기반 소자의 경우 급격하게 소자 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 감마선을 조사한 소자들의 경우도 유사하게 빠르게 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 10,000분 정도 지났을 때 작동하지 않는 것을 확인하였다.

$FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$와 $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 기반 소자들 역시 $MAPbI_3$를 사용한 소자에 비해서는 좀 더 천천히 그리고 10,000분 뒤에도 소자 성능이 확인되지만, 감마선을 조사한 소자의 경우 처리하지 않은 태양전지 대비 초반에 좀 더 급격하게 소자 성능이 감소하고 시간이 지남에 따라 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 앞서 언급한 기판으로 사용된 유리 갈변으로 인한 광원 흡수량을 고려한다면, 거의 유사한 감소 추세를 보일 것이라고 추론할 수 있다. 결과적으로 시간 변화에 따른 공기 중에서의 태양전지 안정성을 평가한 결과 MA가 적게 들어가거나 없는 페로브스카이트 물질이 좀 더 감마선과 공기와 수분에 안정하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 방사선 환경에서 성능이 우수하고 공기 안정성이 높은 페로브스카이트 태양전지를 제작하기 위해서는 MA가 없는 페로브스카이트 광활성 소재를 사용하여야 하고, 방사선 조사로 인한 갈변현상 발생 즉, Jsc 감소 문제를 해결하기 위해서는 갈변현상이 없는 transparent 폴리이미드(polyimide) 소재를 기판으로 사용하여야 함을 알 수 있었다[17].

4. 결 론

본 연구는 페로브스카이트 태양전지를 구성하는 광활성층 소재인 $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$에 대한 방사선 영향 평가에 대한 것으로 상기 3가지 광활성층 필름 모폴로지 변화, 단위소자의 성능 평가, 성능 영향 분석 및 공기 중 수명 평가를 방사선 조사선량을 변화시키면서 실시하였다. $MAPbI_3$, $FAMACsPbBr_xI_{(3-x)}$, $FACsPbBr_xI_{(3-x)}$ 기반 필름 모폴로지를 SEM 분석한 결과, 감마선 조사 전후에 크게 차이가 없음을 확인할 수 있었고 이를 통하여 감마선 조사에 의해 결정크기나 결함이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 감마선 조사에 의한 태양전지 성능 변화 유무를 확인하기 위해서 $MAPbI_3$, $FAMACsPbBrxI_{(3-x)}$, FACsPb $BrxI_{(3-x)}$로 구성된 단위소자를 제작한 후 감마선 조사를 실시한 결과, 조사선량이 높아짐에 따라서 성능이 점진적으로 감소됨을 확인할 수 있었다. 주된 성능감소의 원인으로는 조사선량이 증가됨에 따라서 기판의 투과도 감소가 원인으로 판단된다. 또한 TPC, TPV 분석 결과에서도 조사선량이 증가됨에 따라서 전하 수명 등이 감소함을 확인할 수 있었고 그 원인으로는 광활성층 내 defect가 발생하여 소자 성능이 감소된 것이라고 추론할 수 있었다.

마지막으로 소자의 공기 중에서의 장기 수명 평가를 실시한 결과, 노출 시간이 증가함에 따라서 소자 수명이 감소함을 확인할 수 있었다. 무엇보다 MA 함유량이 증가할수록 소자의 공기 중에서의 수명이 급격히 감소함을 확인할 수 있었고 그 원인으로는 MA가 흡습성 특성이 가장 높기 때문에 광활성층의 degradation이 가장 많이 일어나기 때문으로 판단된다. 상기 결과를 바탕으로 방사선 환경하에서도 높은 효율을 갖고 수명이 높은 페로브스카이트 태양전지를 제작하기 위해서는 MA 함유량이 낮거나 없는 광활성소재를 이용하여야 하며 방사선 조사에 따른 갈변효과/투명도 저하 문제를 해결하기 위해서 방사선 조사에 의한 갈변효과가 매우 낮은 transparent 폴리이미드 필름을 유리 기판 대신 사용하여야 함을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국원자력연구원 연구운영비지원(R&D)(주요사업비) 첨단방사선연구기반 구축 사업 중 전자선실증연구시설 운영 과제(과제고유번호: 1711174161)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Shah A, Torres P, Tscharner R, Wyrsch N and Keppner H. 1999. Photovoltaic Technology: The Case for Thin-film Solar Cells. *Science* **285**:692-698.
2. Saga T. 2010. Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production. *NPG Asia Mater*. **2**:96-102.
3. Günes S, Neugebauer H and Sariciftci NS. 2007. Conjugated Polymer-based Organic Solar Cells. *Chem. Rev*. **107**:1324-1338.
4. Cheng YJ, Yang SH and Hsu CS. 2009. Synthesis of Conjugated Polymers for Organic Solar Cell Applications. *Chem. Rev*. **109**: 5868-5923.
5. Kalowekamo J and Baker E. 2009. Estimating the Manufacturing Cost of Purely Organic Solar Cells. *Sol. Energy* **83**:1224-1231.
6. Lee MM, Teuscher J, Miyasaka T, Murakami TN and Snaith HJ. 2012. Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites. *Science* **338**:643-647.
7. Li Z, Klein TR, Kim DH, Yang M, Berry JJ, van Hest MF and Zhu K. 2018. Scalable Fabrication of Perovskite Solar Cells. *Nat. Rev. Mater*. **3**:18017.
8. Green MA, Dunlop ED, Hohl-Ebinger J, Yoshita M, Kopidakis N and Ho-Baillie AW. 2020. Solar Cell Efficiency Tables (Version 55). *Prog. Photovoltaics* **28**:3-15.
9. Green MA, Hishikawa Y, Dunlop ED, Levi DH, Hohl-Ebinger J, Yoshita M and Ho-Baillie AW. 2019. Solar Cell Efficiency Tables (Version 53). *Prog. Photovoltaics* **27**:3-12.
10. Green MA, Dunlop ED, Levi DH, Hohl-Ebinger J, Yoshita M and Ho-Baillie AW. 2019. Solar Cell Efficiency Tables (Version 54). *Prog. Photovoltaics* **27**:565-575.
11. Cho SP, Han G, Seo YH, Noh YJ, Sohn JY, Hwang IT, Shin JW, Jung CH and Na SI. 2021. Highly-dispersible Reduced Graphene Oxide/Polymer Nanocomposites As Efficient Hole-transporting Materials for Perovskite Solar Cells. *Compos. Sci. Technol*. **201**: 108548.
12. Lee HJ and Na SI. 2022. Investigation of PCBM/ZnO and C60/BCP-based Electron Transport Layer for High-performance p-i-n Perovskite Solar Cells. *J. Alloys Compd*. **921**:166007.
13. Valerio L, Rosa ADL, Rodriguez V, Enriquez C, Telles A, Ramirez Y, Rivera D, Hierro J, Bustamante L, Tong X and Hodges D. 2019. Characterization and Analysis of $FA_xCs_{(1-x)}Pb(I_yBr_{(1-y)})_3$ Perovskite Solar Cells with Thickness Controlled Transport Layers for Performance Optimization. *AIP Advances* **9**:105006.
14. Kim JY, Lee JW, Jung HS, Shin H and Park NG. 2020. High-Efficiency Perovskite Solar Cells. *Chem. Rev*. **120**:7867-7918.
15. Juan B and Mathijs J. 2021. From Frequency Domain to Time Transient Methods for Halide Perovskite Solar Cells: The Connections of IMPS, IMVS, TPC, and TPV. *J. Phys. Chem. Lett*. **12**:7964-7971.
16. Hidayat R, Nurunnizar AA and Fariz A. 2020. Revealing the Charge Carrier Kinetics in Perovskite Solar Cells Affected by Mesoscopic Structures and Defect States from Simple Transient Photovoltage Measurements. *Sci. Rep*. **10**:19197.
17. Sheila D, David JT and John WC. 2001. A Comparative Study of the Radiation Resistance of Four Optically Transparent Polyimides. *Radiat. Phys. Chem*. **62**:189-194.