JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(4) : 365-372 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.365

태양전지용 계면소재의 방사선 영향 평가

윤진문[1], 임윤묵[1], 김희수[1], 김병남[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Radiation Effects of Photovoltaic Interfacial Materials

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 interfacial materials widely used in next generation photovoltaic cells. To evaluate film morphology, atomic contents, work-function values and charge carrier mobility of PEDOT:PSS, PrGO and SrGO-based hole transport interfacial materials, we conducted AFM, TEM, XPS, UPS and SCLC analyses, respectively. As a result, we found that film morphologies of the above interfacial materials showed a similar RMS roughness values regardless of gamma irradiation up to 20 kGy. In addition, work-function values of PEDOT:PSS was increased with an increase in gamma irradiation due to the destruction of aromatic structure of PEDOT segments. The work-function value of PrGO was increased when irradiated up to 10 kGy gamma irradiation, however; further gamma irradiation to 20 kGy leads to decrease in work-function of PrGO due to reduction reaction of PrGO material. On the other hands, there was a similar work-function values for the SrGO interfacial material with and without gamma irradiation. To evaluate charge carrier mobility of PEDOT:PSS, PrGO and SrGO, we fabricated hole-only devices. As a result, carrier mobility of PEDOT:PSS material was gradually decreased with increasing gamma irradiation dose due to destruction of resonance structure of PEDOT segments. On the other hands, carrier mobility values of PrGO and SrGO-based hole-only devices had very similar values regardless of gamma irradiation.

Key words: Photovoltaic cells, Interfacial materials, Gamma irradiation, Radiation effect

1. 서 론

계면층 소재는 유기 및 유무기 하이브리드 기반의 차세대 태양전지의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있고 캐리어 이동 특성에 따라 정공수송층과 전자전달층으로 크게 구분할 수 있다[1]. 그중에서 정공수송 역할을 하는 계면소재는 태양전지의 전극으로 사용되는 ITO의 일함수를 tuning하고 광활성층 중 donor 물질의 HOMO (highest occupied molecular orbital)와의 ohmic contact를 형성하게 하여 광활성층에서 형성된 정공이 양극으로 원활하게 이동할 수 있도록 하는 역할을 하기에 태양전지의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2]. 일반적으로 상용화된 정공전달 계면소재로는 PEDOT:PSS를 들 수 있으며 그 외에는 금속산화물, 유기반도체, 그래핀 기반 소재 등이 사용될 수 있다고 알려져 있다[2]. 이 중에서 그래핀 기반 계면소재는 PEDOT:PSS와 달리 태양전지에서 정공

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

전달층으로 이용되었을 때, 하부전극인 ITO를 부식시키지 않기 때문에 공기 중에서의 장기 안정성이 높다는 장점이 있어 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다[2].

현재 차세대 태양전지는 경량화, 용액공정 가능성의 장점으로 인하여 기존의 실리콘 태양전지의 대체제로서의 가능성이 크기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 페로브스카이트 태양전지는 실리콘 태양전지와 달리 초경량화, 높은 광전변환효율, 롤투롤 용액공정 적용 가능으로 인한 제조비용 절감의 장점을 갖기 때문에 우주용 태양전지로서의 적용 가능성에 대한 관심이 높다[3]. 하지만 우주용 태양전지로 이용하기 위해서는 태양전지를 구성하는 계면소재, 광활성층 재료, 기판 등에 대한 방사선 영향 평가가 선행되어야 하나 관련 연구는 전무한 실정이다. 따라서 방사선 환경하에서 태양전지를 구성하는 소재의 전기/전자, 광학 특성 변화, 원소조성 변화 등에 대한 분석이 무엇보다 시급히 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 차세대 태양전지에 널리 사용되는 정공전달소재인 PEDOT:PSS 및 그래핀 기반의 계면소재(PrGO, SrGO)에 대한 방사선 영향평가를 수행하였으며 그 결과를 바탕으로 그래핀 기반의 계면소재의 특성 변화를 reference 정공전달 소재인 PEDOT:PSS 소재와 비교 분석을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 계면층 소재인 PrGO와 SrGO는 기존 문헌을 참고하여 제조되었다[2,4]. 제조과정은 먼저 흑연을 98% 황산에 분산한 후, 과망간산칼륨을 산화제로 사용하여 산화반응을 실시하여 산화그래핀을 제조하였다. 그 후에 dialysis를 통하여 황산 및 과망간산칼륨 제거를 실시하여 산화그래핀을 얻을 수 있었다. 산화그래핀의 환원을 위해서 p-toluenesulfonyl hydrazide와 p-hydrazine benzene sulfonic acid를 이용하여 각각 PrGO와 SrGO 환원그래핀을 제조하였다.

ITO/glass 기판에 PEDOT:PSS 스핀코팅을 5,000 rpm 40 s^{-1} 조건으로 실시한 후, 120도에서 10분간 공기 중에서 열처리를 실시하고 각 분석을 실시하였다. PrGO와 SrGO의 경우, 관련 문헌을 참고하여 박막코팅을 공기 중에서 실시하였다[2,4]. SCLC (space charge limited current) 분석을 위해서 ITO/HTL/P3HT:PCBM/MoO_3/Au 구조의 hole-only device를 제작하였고 캐리어 이동도를 측정하였다.

감마선 조사는 첨단방사선연구소의 감마선 조사시설(dose rate: 10 kGy hr^{-1})을 이용하여 실시하였고, 조사선량 변화에 따른 변화를 관찰하기 위해서 20 kGy까지 변화를 준 후 각 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. AFM 분석 결과

차세대 태양전지인 유기, 유무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지의 경우 계면층을 구성하는 소재의 full-coverage, RMS roughness 값이 전체적인 소자 성능 및 셀 파라미터인 shunt resistance, fill factor, open circuit voltage에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2]. 따라서 ITO/glass 기판 위에 형성되는 계면층의 필름 모폴로지를 감마선 조사 선량을 변화시키면서 원자힘현미경(atomic force microscopy, AFM)을 이용하여 분석을 실시하였다. 먼저 가장 일반적으로 태양전지의 정공전달층으로 사용되는 reference 물질인 PEDOT:PSS 필름에 대한 AFM 분석을 위하여 스핀코팅을 통하여 박막을 형성하였고, 5, 10, 20 kGy로 각각 감마선 조사를 실시하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 Pristine PEDOT:PSS 필름의 AFM 분석 결과, PEDOT:PSS가 기판인 ITO/glass 상부에 균일하게 형성되었음을 알 수 있었고 RMS roughness 값은 기존 문헌과 유사한 값을 얻음을 확인할 수 있었다(Table 1). 그리고 조사 선량이 20 kGy까지 증가시킬 경우, PEDOT:PSS의 박막 모폴로지는 크게 변화하지 않으며, RMS roughness 값도 유사한 수준임을 확인할 수 있었다. 즉, PEDOT:PSS 계면필름에 감마선 조사를 20 kGy까지 실시하여도 필름의 모폴로지는 크게 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다.

다음으로 이차원나노소재인 PrGO 및 SrGO에 대해서도 PEDOT:PSS와 동일한 방법으로 AFM 분석을 실시한 결과 Sr-GO는 방사선 조사 전후 큰 모폴로지 변화를 찾기 힘들었다. 다만 PrGO의 경우, 분산용매인 dimethylformamide (DMF)에 낮은 분산도(1 mg mL^{-1} 이하)를 갖기 때문에 전반적인 필름 모폴로지가 SrGO에 비해 ITO/glass 상부에 코팅되지 않은 부분이 일부 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 용액공정을 통하여 차세대 태양전지를 제

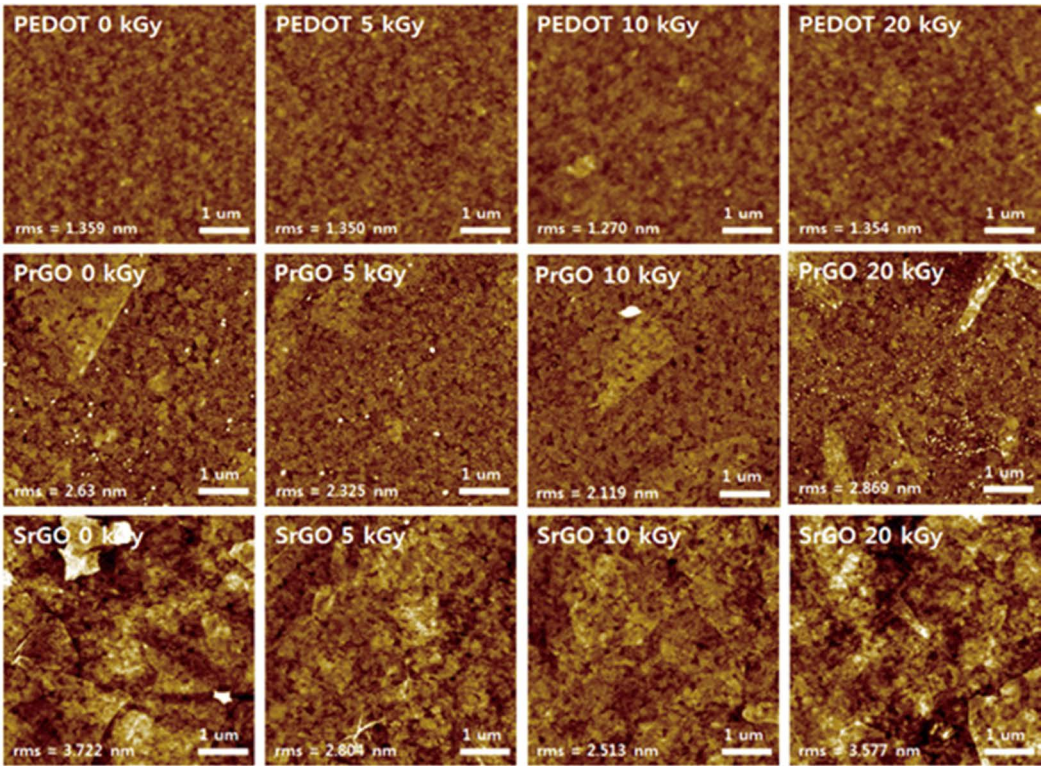

Fig. 1. AFM images of PEDOT : PSS, PrGO and SrGO interfacial layers with and without gamma irradiation.

Table 1. RMS roughness values of PEDOT:PSS, PrGO and SrGO measured with and without gamma irradiation

	0 kGy	5 kGy	10 kGy	20 kGy
PEDOT : PSS	1.359 nm	1.350 nm	1.270 nm	1.354 nm
PrGO	2.630 nm	2.325 nm	2.119 nm	2.869 nm
SrGO	3.722 nm	2.804 nm	2.513 nm	3.577 nm

작할 때 높은 분산도(deionized water, 20 mg mL^{-1} 이상)를 갖고 균일한 박막 형성이 가능하며 방사선 조사에 모폴로지 변화가 없는 SrGO가 PrGO보다 적절할 것으로 판단된다.

Table 1에서와 같이 RMS roughness 값 분석에서도 PrGO 및 SrGO가 PEDOT : PSS보다 높지만 태양전지 계면층으로 사용되는 데 무리가 없는 수준임을 확인할 수 있었고 다만 SrGO가 높은 분산도를 갖기 때문에 ITO/glass 기판 상부에 필름이 형성될 때 그래핀 시트의 적층이 이루어지게 되고 이로 인하여 PrGO에 비해서 RMS roughness 값이 약간 높음을 확인할 수 있었다.

3.2. 나노소재의 TEM 분석 결과

이차원 나노소재인 그래핀의 경우, 투과전자현미경(transmittance electron microscopy, TEM) 분석을 통하여 시트 중첩 및 graphitic structure 파괴 유무를 확인할 수 있다. 본 연구에 사용된 그래핀 소재의 경우, defect-free 그래핀이 아닌 화학적 산화박리 및 환원방법에 의해서 제조된 것으로서 결함이 없는 그래핀과 달리 graphitic structure를 관찰하기 힘들다고 알려져 있다. 그 이유로는 환원그래핀을 제조하는 과정 중 산화그래핀을 일차적으로 만드는 과정에서 이미 그래핀 특유의 honeycomb lattice structure가 너무 많이 파괴되어 산화그래핀의 환원반응에 의해서 그래핀 격자를 어느 정도 회복하더라도 비정질 영역이 너무 많이 존재하기 때문이다[5]. 따라서 화학적으로 제조된 그래핀의 경우, single layer로 잘 분리가 되었는지 여부가 중요하다고 판단된다.

이를 확인하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 PrGO 및 SrGO 나노소재에 대한 TEM 분석을 실시하였고, 그 결과 감마선 조사 여부에 상관없이 single layer로 박리가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있었지만 명확한 honeycomb lattice structure

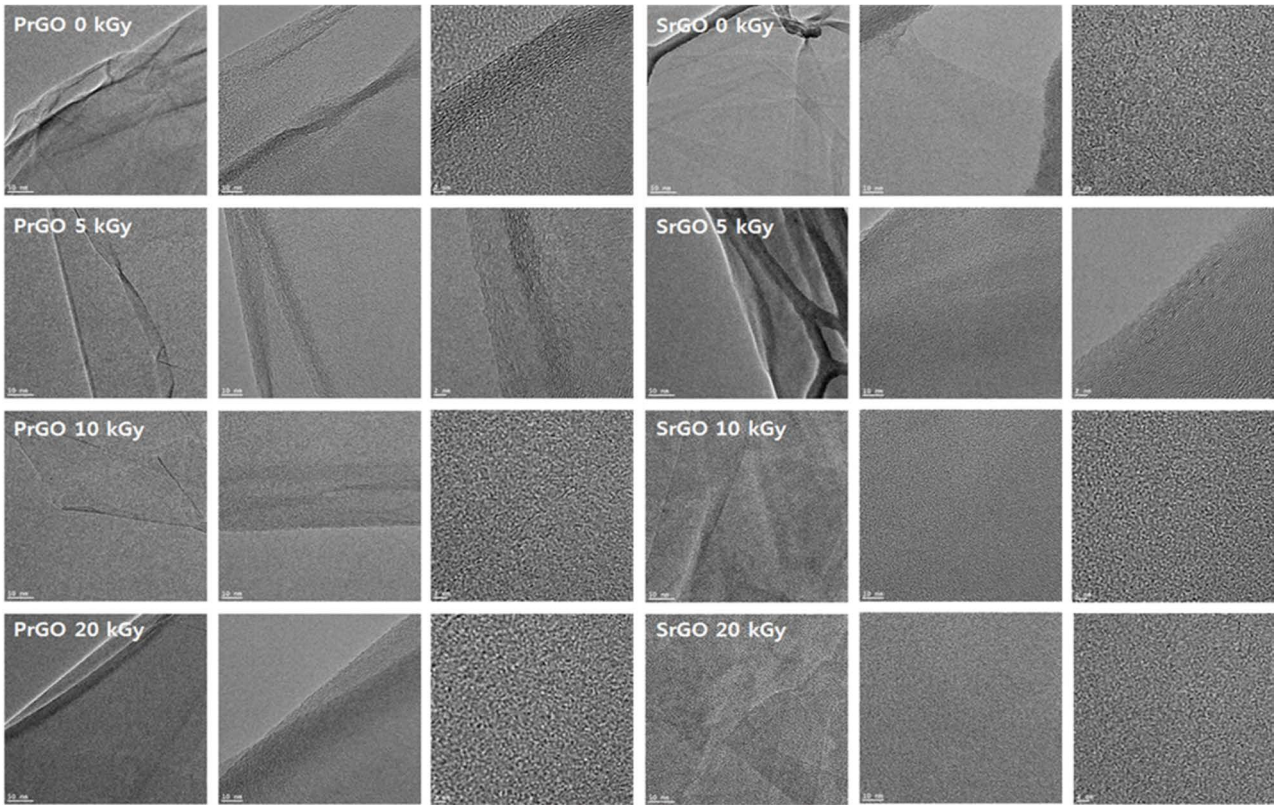

Fig. 2. TEM images of PrGO and SrGO interfacial layers with and without gamma irradiation.

는 관찰하기 힘들었다. 또한 일반적으로 그래핀 또는 화학적으로 합성된 그래핀 유사체에 방사선 조사 시 형성될 수 있는 onion ring 구조 역시 관찰되지 않음을 확인할 수 있었다. 결론적으로 PrGO 및 SrGO에 감마선 조사를 20 kGy까지 실시하더라도 초기에 형성된 single layer의 aggregation이 일어나지 않음을 확인할 수 있었고, 이는 본 소재가 solution-processable 태양전지 제조에 계면층 소재로 적용될 수 있음을 의미한다.

3.3. 일함수 분석 결과

태양전지 성능에 큰 영향을 미치는 다른 인자로는 계면층 소재의 일함수를 들 수 있다. 특히 본 실험에 사용된 계면층 소재는 정공을 전달하는 역할을 하는 정공수송층이며, 정공수송층의 경우, ITO의 일함수를 tuning시켜 광활성층의 HOMO (highest occupied molecular orbital)와 ohmic contact를 형성시키는 역할을 한다. 일반적으로 ITO 자체의 일함수는 ~4.5 eV로 알려져 있고 광활성층 물질의 HOMO와 ohmic contact가 일어나기 위해서는 ITO의 일함수가 보다 낮아져야 한다[2].

이를 확인하기 위해서 Fig. 3에서와 같이 PEDOT:PSS, PrGO, SrGO 계면층 소재에 대한 UPS 분석을 진행하였다. 먼저 PEDOT:PSS는 감마선 조사 선량이 증가함에 따라서 일함수가 약간씩 증가함을 확인할 수 있었다. 그 원인으로는 감마선 조사에 의해서 PEDOT의 conjugation 구조의 파괴에 기인한 것으로 판단된다. 일반적으로 resonance 감소가 일어나게 되면 VB (valence band) 및 CB (conduction band)의 증가가 일어나게 되고 bandgap의 증가를 야기한다. 즉, 반도체 특성을 갖는 PEDOT segment에 존재하는 이중결합이 방사선 조사에 의해서 분해되는 반응이 일어나게 되기 때문으로 판단된다.

다음으로 환원그래핀 소재인 PrGO 및 SrGO의 일함수 분석을 실시하였고 그 결과 PrGO 소재에서 방사선 조사에 의해서 일함수 변화가 발생함을 확인할 수 있었다. PrGO의 경우 전자주개 역할을 하는 산소원자의 결합, 질소 및 벤젠링의 이탈에 의하여 10 kGy까지 감마선 조사를 실시할 때 일함수의 증가가 일어나게 되고, 20 kGy로 감마선 조사를 진행할 경우, electron withdrawing group인 oxygen functional group의 이탈에 의해서 일함수 감소가 일어난

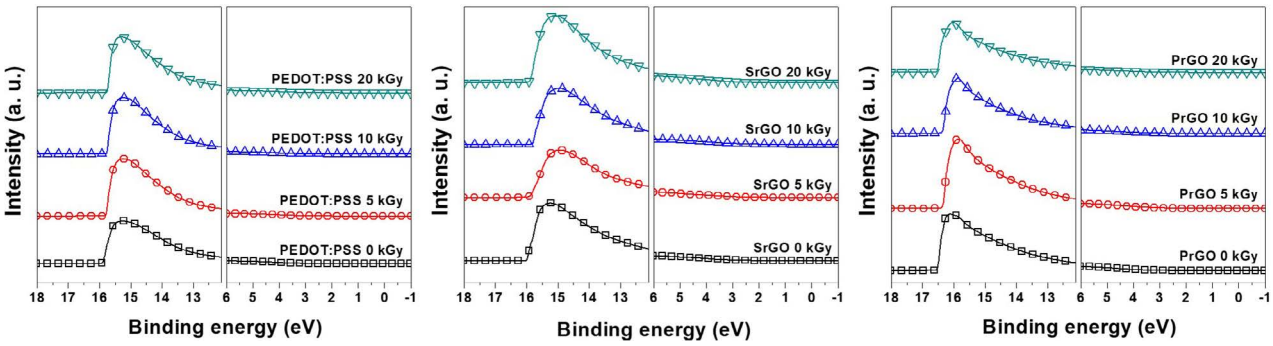

Fig. 3. UPS results of PEDOT : PSS, PrGO and SrGO interfacial layers with and without gamma irradiation.

Table 2. Work-function values of PEDOT : PSS, PrGO and SrGO measured with and without gamma irradiation

	0 kGy	5 kGy	10 kGy	20 kGy
PEDOT : PSS	5.32 eV	5.43 eV	5.50 eV	5.49 eV
PrGO	4.74 eV	4.95 eV	4.91 eV	4.74 eV
SrGO	4.99 eV	4.98 eV	5.01 eV	4.99 eV

것으로 판단된다.

이와 달리 SrGO의 경우 강한 일함수 tuning group인 sulfonic acid 그룹이 ITO의 일함수를 효과적으로 tuning시키므로 20 kGy까지 감마선 조사를 진행하여도 두드러진 일함수 변화가 일어나지 않음을 확인할 수 있었다.

3.4. XPS 분석 결과

감마선 조사 전후 계면소재의 원소조성 변화를 확인하기 위해서 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 분석을 실시하였다. 먼저 reference 계면소재인 PEDOT : PSS의 XPS는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 PEDOT 영역과 PSS 영역으로 구분지을 수 있으며 방사선 조사에 의해서 PEDOT의 PSS 대비 상대적인 양은 증가하지 않음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 이중결합이 단일결합에 비해 방사선에 분해가 쉽게 일어나므로 PEDOT 영역에서 분해가 일어났을 것으로 예측이 가능하나, 본 XPS 분석의 경우 PEDOT의 intensity가 낮아 이와 같은 결과를 확인하는 데 한계가 있었다. 향후 scan량을 증가하여 이와 같은 현상을 관찰하는 것이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

다음으로 SrGO에 대한 XPS 분석을 실시하여 방사선 조사 전후 SrGO를 구성하는 원소조성 변화를 Fig. 5와 같이 분석하였다. Pristine SrGO의 경우, SrGO를 구성하는 C-C, C-S, C-N, C-O, C=O, C-(O)-O 작용기를 Fig. 5에 표현된 binding energy에서 각각 확인할 수 있었다[4]. 감마선 조사를 5, 10, 20 kGy로 조사한 결과, 10 kGy까지는 원소조성에 큰 변화가 없었으나 20 kGy에서 C-O 그룹이 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 방사선 조사에 의해 생성된 산소라디칼 또는 오존에 의해서 SrGO에 산소 그룹이 결합하는 것으로 판단된다.

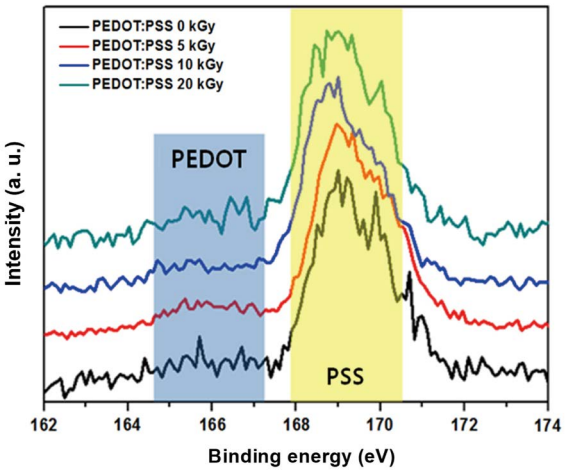

Fig. 4. XPS results of PEDOT : PSS interfacial layers with and without gamma irradiation.

PrGO에 대해서도 SrGO와 유사하게 탄소에 결합된 산소, 질소 그룹을 확인할 수 있었다. Pristine PrGO의 경우, PrGO를 구성하는 C-C, C-N, C-O, C=O, C-(O)-O 작용기를 Fig. 5에 기재된 binding energy에서 확인할 수 있었다[2]. PrGO에서도 방사선 조사에 의해서 10 kGy부터 산소 작용기가 증가함을 확인할 수 있었고, 그 원인은 SrGO와 동일하게 설명이 가능할 것이다. 하지만 PrGO를 구성하는 functional group인 p-toluene sulfonyl hydrazide의 해

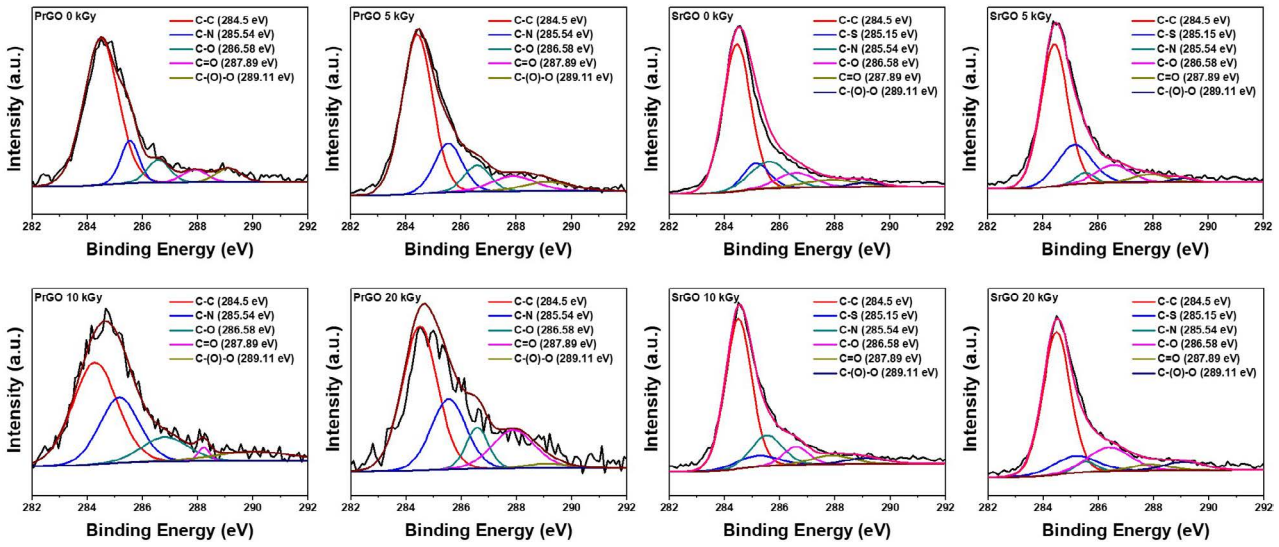

Fig. 5. XPS results of PrGO and SrGO interfacial layers with and without gamma irradiation.

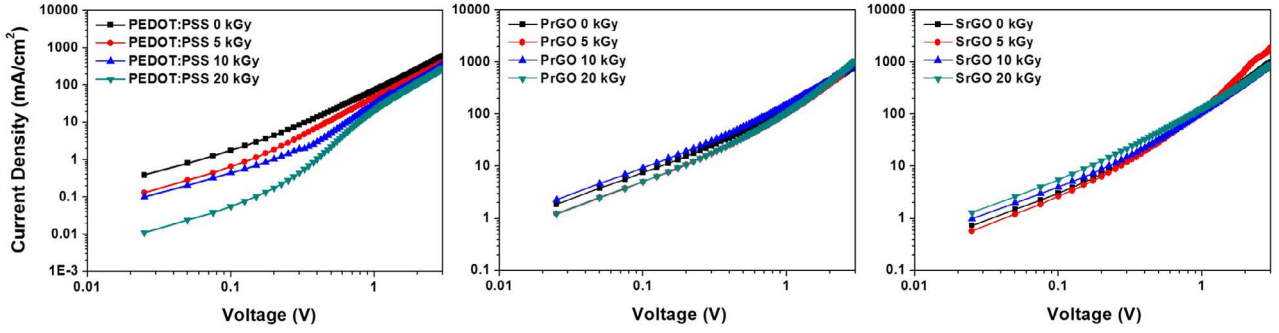

Fig. 6. SCLC results of PEDOT : PSS, PrGO and SrGO interfacial layers before and after gamma irradiation.

리반응이 보다 쉽게 일어날 수 있어 낮은 선량에서도 질소 및 산소 작용기가 증가하였다고 판단된다. 즉, 그래핀 기반 나노소재에 결합되어 있는 작용기의 종류에 의해 환원그래핀에 결합되는 이종원소의 종류나 역치선량값이 다름을 확인할 수 있었고 본 결과는 Fig. 4의 UPS 변화 원인을 설명할 수 있을 것이다.

5. SCLC 분석 결과

방사선 조사에 따른 계면소재의 전기적 특성 변화에 대한 고찰은 차세대 태양전지 성능에 영향을 미칠 수 있는 매우 중요한 인자로 판단되며, 이에 본 연구에서는 감마선 조사량에 따른 계면소재의 전기적 특성 변화를 space charge limited current (SCLC)를 통해 분석하였다. 분석을 위해서 정공수송층인 PEDOT : PSS, PrGO, SrGO를 이용하여 ITO/HTL/P3HT : PCBM/MoO_3/Au 구조의 hole only device를 제작하여 방사선 조사량에 따른 계면소재의 상대적인 전하이동도 변화를 비교하였다.

이에 반해, reference 물질인 PEDOT : PSS의 경우 방사선 조사량이 증가함에 따라 전하이동도가 점차적으로 감소하는 경향성을 확인할 수 있었다. 이러한 원인으로 거시적 관점에서 화학적 구조 변화를 XPS에서 관찰하지는 못하였지만, 방사선 조사로 인해 화학 구조가 파괴되어 PEDOT : PSS 소재의 전기적 특성이 감소되었기 때문으로 판단된다. 이를 통하여 현재 차세대 태양전지의 정공수송층으로 사용되는 PEDOT : PSS보다 그래핀 기반의 정공수송층 재료가 보다 방사선 환경하에서 구동되는 태양전지를 개발할 때 장점이 있을 것으로 판단된다.

그래핀 기반 계면층 소재인 PrGO와 SrGO의 경우, 방사

Table 3. Summary of SCLC analyses of PEDOT:PSS, PrGO and SrGO interfacial layers with and without gamma irradiation

	PEDOT:PSS $\mu\,(cm^2\,V^{-1}\,s^{-1})$	PrGO $\mu\,(cm^2\,V^{-1}\,s^{-1})$	SrGO $\mu\,(cm^2\,V^{-1}\,s^{-1})$
0 kGy	1.842×10^{-3}	2.525×10^{-3}	2.879×10^{-3}
5 kGy	1.217×10^{-3}	2.492×10^{-3}	3.005×10^{-3}
10 kGy	4.951×10^{-4}	2.661×10^{-3}	2.643×10^{-3}
20 kGy	1.176×10^{-4}	2.696×10^{-3}	2.656×10^{-3}

선 조사량이 증가함에 따라 그래핀 표면에 hydroxyl, epoxy, carbonyl, carboxylic acid 등의 그룹들이 환원되며, 공액구조의 회복 및 oxygen defect에 의한 charge trap이 감소하여 전기적 특성이 향상될 것이라고 예상하였지만, SCLC를 통한 전하이동도 분석 결과 방사선이 2차원 나노소재의 전기적 특성에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었고, 이는 어느 정도 charge carrier transport pathway가 형성되었기 때문에 추가적인 molecular structure의 변화가 carrier mobility에 영향을 크게 주지 못함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 차세대 태양전지에 널리 사용되는 계면층 소재인 PEDOT:PSS를 기준으로 하여 그래핀 기반 나노소재인 PrGO, SrGO에 대한 모폴로지, 원소조성, 전하이동도 등에 대한 분석을 감마선 조사 선량에 따라 비교 분석하였다. AFM 분석 결과, 감마선 조사를 진행하여도 균일한 박막 모폴로지를 얻을 수 있었다. TEM 분석을 통하여 감마선 조사에 따른 그래핀 소재의 sheet aggregation 유무를 확인한 결과, 감마선 조사를 20 kGy까지 진행하여도 그래핀 single sheet의 뭉침 현상이 발생하지 않음을 확인하였고, 그래핀 특유의 honeycomb lattice structure는 제조 과정 중에 파괴되어 관찰되지 않음을 확인하였다.

UPS 분석을 통하여 일함수를 분석한 결과, PEDOT:PSS는 조사 선량 증가에 따라 aromatic structure의 파괴에 의해서 일함수가 점진적으로 증가함을 확인하였다. 이와 달리 PrGO는 10 kGy까지 일함수가 oxygen functional group의 결합으로 인하여 증가하고, 20 kGy로 감마선 조사를 진행할 경우, functional group의 제거에 의해서 감소하는 경향을 확인하였다. SrGO의 일함수 변화는 거의 없음을 확인할 수 있었는데 그 이유로는 강한 ITO 일함수 변환 그룹인 sulfonic acid가 이미 SrGO에 도입되었기 때문에 조사 과정 중에서 발생할 수 있는 oxygen functionalization 또는 추가적인 환원반응에 SrGO의 일함수가 거의 영향을 받지 않기 때문이며, 이와 같은 감마선 조사에 따른 계면층 소재의 원소조성 변화를 XPS를 통하여 추가적으로 확인할 수 있었다.

전하이동도 분석을 위하여 hole-only device를 제작하여 SCLC 분석을 실시한 결과, reference 물질인 PEDOT:PSS의 경우 방사선 조사량이 증가함에 따라 전하이동도가 점차적으로 감소하는 경향성을 확인할 수 있었다. 이러한 원인으로 방사선 조사로 인해 PEDOT의 resonance 구조가 파괴되어 PEDOT:PSS 소재의 전기적 특성이 감소되었기 때문으로 판단된다. 이와 달리 SrGO 및 PrGO의 carrier mobility는 감마선 조사 유무에 상관없이 유사함을 확인할 수 있었고 이는 그래핀 기반 계면층 소재에 이미 charge carrier transport pathway가 형성되었기 때문에 감마선 조사에 의한 추가적인 graphitic structure의 변화가 carrier mobility에 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있었다. 결론적으로 현재 차세대 태양전지의 정공수송층으로 사용되는 PEDOT:PSS보다 그래핀 기반의 정공수송층 재료가 방사선 환경하에서 보다 안정적으로 구동되는 태양전지를 개발할 때 장점이 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

1. Zhang K, Hu Z, Sun C, Wu Z, Huang F and Cao Y. 2017. Toward Solution-Processed High-Performance Polymer Solar Cells: from Material Design to Device Engineering. *Chem. Mater.* **29**:141-148.
2. Yun JM, Yeo JS, Kim J, Jeong HG, Kim DY, Noh YJ, Kim SS, Ku BC and Na SI. 2011. Solution-Processable Reduced Graphene Oxide as a Novel Alternative to PEDOT:PSS Hole Transport Layers for Highly Efficient and Stable Polymer Solar Cells. *Adv. Mater.*

23:4923-4928.

3. Weiguang C and Sanjay KB. 2021. Stability Improvement of Perovskite Solar Cells by Compositional and Interfacial Engineering. *Chem. Mater*. **33**:1540-1570.
4. Yeo JS, Yun JM, Jung YS, Kim DY, Noh YJ, Kim SS and Na SI. 2014. Sulfonic Acid-functionalized, Reduced Graphene Oxide As an Advanced Interfacial Material Leading to Donor Polymer-independent High-performance Polymer Solar Cells. *J. Mater. Chem. A*. **2**:292-298.
5. Shen J, Hu Y, Shi M, Lu X, Qin C, Li C and Ye M. 2009. Fast and Facile Preparation of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Nanoplatelets. *Chem. Mater*. **21**:3514-3520.