

2 페로브스카이트 광전지용 공액고분자 정공수송층 소재 연구동향

글_ 조제웅 교수 | 동국대학교 융합에너지신소재공학과

1. 서론

전통적으로 절연체로 알려져 있던 고분자 소재는 π -오비탈 연결에 기반한 공액구조의 구현을 통해 전기적으로 반도체 특성을 발현 가능하다는 점이 알려진 후, 태양전지, 트랜지스터, 발광다이오드 등을 포함하는 다양한 전자소자 분야에서 그 활용 가능성을 검증받고 있다. 특히, 공액고분자 반도체 소재들은 화학 구조 디자인 및 제어를 통하여 응용 소자에 최적화된 반도체적 특성을 구현 가능하며, 기계적 유연성 및 가벼운 중량으로 인하여 미래 휴대용, 웨어러블 전자 분야에서의 유망한 소재로 인식되고 있다. 초기 연구 단계에서는 공액고분자 소재는 활성층으로 적용되어 고분자 태양전지, 고분자 발광다이오드 등 유기전자 분야에서 주로 연구되어 왔으나 최근에는

소재 개발 및 전하수송 특성에 대한 이해의 증대로 인하여 다양한 유무기 소재와의 접합구조를 이용하고자 하는 연구가 증가하고 있다. 새로운 공액고분자의 대표적인 적용분야는 페로브스카이트 광전지용 정공수송층 소재이다 [1-3].

페로브스카이트 광전지는 높은 광흡수, 성분엔지니어링을 통한 광특성 제어 가능성, 저온 용액공정 가능성으로 인하여 현재 태양전지, 광센서 등 수광소자 영역에서 집중적으로 연구가 진행되고 있다 [4,5]. 최근에는 소재, 공정, 계면 부분에서의 혁신적인 발전으로 인하여 실리콘 태양전지에 비교 가능한 수준인 25% 이상의 national renewable energy laboratory (NREL) 인증 페로브스카이트 태양전지

효율이 보고된 바 있다 [6]. 페로브스카이트 광전지는 두 전극 사이에 페로브스카이트 광활성층이 끼어 있는 샌드위치 구조로 인하여 전극과 페로브스카이트를 이어주는 계면소재들에 의하여 성능 및 안정성이 크게 영향을 받는다. 또한 페로브스카이트는 용액공정을 통해 다결정 박막형성을 형성하는 과정에서 표면 및 계면에 많은 양의 결함을 형성하는데 광전소자 내의 계면소재가 전하의 추출 및 수송에 영향을 주는 결함 패시베이션을 결정하는 중요한 요인으로 알려져 있다. 나아가 기존에 널리 사용되고 있는 2,2',7,7'-tetrakis(N,N-dimethoxy-phenyl-amine)9,9'-spirobifluorene (Spiro-OMeTAD) 소재가 제한적인 수분 및 열안정성으로 인하여 페로브스카이트 광전소자의 상용화에 걸림돌이 되고 있음에 따라 새로운 계면 소재에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 페로브스카이트로 광전지용 계면소재로 적용되기 위해서는 페로브스카이트 광활성층으로부터 전하를 효율적으로 추출하기 위한 에너지 레벨, 필름형성 과정에서 페로브스카이트의 분해를 야기하지 않는 공정성, 높은 대기 및 열 안정성, 대면적 및 균일한 박막 형성 가능성 등의 조건들이 요구된다. 공액고분자는 위의 조건들을 만족시킬 수 있는 소재로 알려짐에 따라 페로브스카이트 광전소자 작동에 최적화하기 위하여 활발하게 연구가 진행되고 있다 [7,8].

반도체 소재로써 공액고분자의 전기적 특성을 향상시키기 위해서 우선적으로 연구되어 온 방법은 고분자 주사슬의 평면도 증가 및

사슬간의 상호작용 향상을 통한 분자 적층의 개선이다. 향상된 분자 배열은 전하의 고분자 사슬 내부의 움직임 및 다른 고분자로 전달되는 현상을 강화하여 고분자 박막에서의 전하수송도를 향상시키는 작용을 한다. 현재까지 fused ring 구조, 전자주개-전자받개 교차중합, intermolecular locking 등과 같은 분자 구조 전략이 적층 구조가 개선된 공액고분자 개발을 위해 연구가 되어 왔다. 하지만 이러한 전략들을 통해 개발된 소재들은 공액고분자 소재 자체의 전하수송도를 향상시키는 관점에서 기존 유기전자 분야에서 우수한 연구성과를 보이고 있으나, 직접적으로 페로브스카이트 광전지용 계면소재로 적용 시 제한적인 성능을 보임이 관측이 되었다 [9,10]. 이는 공액고분자 소재를 페로브스카이트 광전지에 전하수송층으로 사용하기 위해서는 페로브스카이트 소자의 구조 및 특징에 기인한 새로운 디자인의 공액고분자 분자구조가 필요함을 의미한다.

본 기고에서는 결정배향 조절, 도핑, 페로브스카이트와 상호작용 가능한 결사슬 도입 등 최근에 시도되고 있는 분자 구조 설계 전략들을 통하여 페로브스카이트/고분자 계면 특성을 이해하고, 고성능, 고안정성 페로브스카이트 광전지용 정공수송층 소재로써 공액고분자 설계 시 고려해야할 부분들에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 페로브스카이트 광전지용 정공수송층 공액고분자 소재 연구동향

2.1 공액고분자 결정 배향 방향 제어 연구

페로브스카이트 광전지는 기판을 기준으로 수직방향으로 각각의 층들이 적층이 된 소자 구조를 가지고 있다. 따라서 계면소재들도 수직방향으로의 전하수송능력이 우수하여야 광전지 내에서 효율적인 전하추출을 구현할 수 있다. 공액고분자는 구성하는 화학구조가 동일하거나 유사할 경우, 기판을 기준으로 주사슬의 면이 out-of-plane 방향으로 배향하는 face-on 분자 배열 구조가 박막 내에서 잘 발달할 시 높은 수직방향 전하 수송 능력을 보인 것으로 보고되고 있다. 하지만 현재까지 화학 구조와 face-on 결정 배향간의 상관관계는 불분명한 상태이며, 고분자 사슬간의 상호작용을 강화시켜 배열을 향상시키는 전략들은 많은 경우 수평방향의 전하수송에 도움이 되는 edge-on 결정 성장에 도움이 됨이 밝혀져 있다 [11,12].

이러한 상황 속에서 최근에 보고된 공액고분자의 face-on 결정 배향을 강화하는 주목할 만한 새로운 방향성 및 전략은 비대칭성, 비규칙성이다. 대표적인 예로 고분자 태양전지 분야에서 널리 이용되는 PTB7-Th이다. PTB7-Th는 thienothiophene 유닛에 치환된 불소그룹을 화학적으로 선택하여 regioregular 구조를 구현 시 오히려 불소그룹이 비규칙적으로

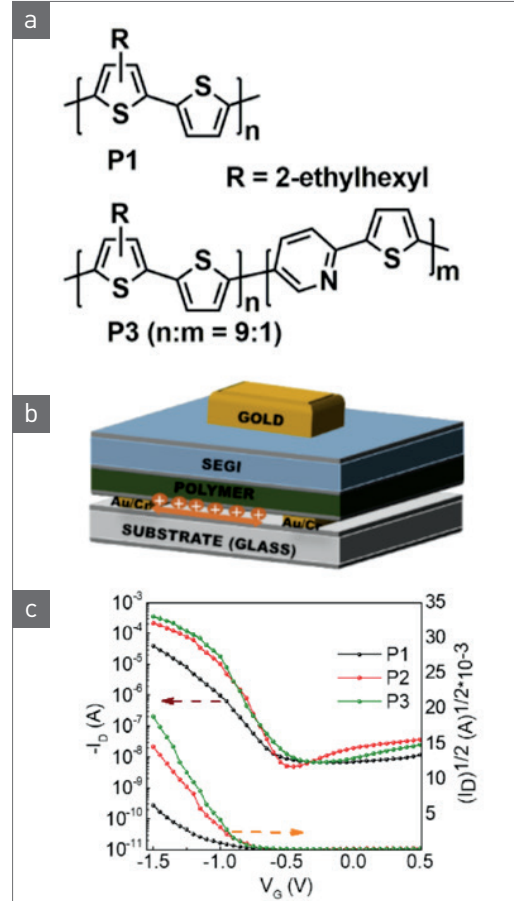


그림 1 ▶ (a) 랜덤공중합체 polythiophene 기반 P1과 P3 고분자. (b) 합성된 고분자를 활성층으로 도입한 이온젤 게이트 유기트랜지스터 소자의 구조 및 (c) 운반곡선 [15].

배열되는 랜덤 구조의 공액고분자에 비하여 face-on 결정 배향이 감소됨이 보고된 바 있다 [13]. 또한 thiophene과 불소가 치환된 2,1,3-benzothiadiazole (BT)로 구성된 공액고분자를 합성 시, 불소그룹의 불규칙한 배열을 야기하는 불소가 하나 치환된 BT로 구성된 공액고분자가 불소가 치환되지 않거나 두 개의 불소가 치환된 BT로 구성된 고분자들에 비하여 face-on 결정 배향이 증가됨이 보고된 바 있다. 이러한 연구들은 고분자 주사슬 내의 규

칙적인 배열의 파괴가 일부 고분자 사슬들이 face-on으로 배향하는데 도움이 될 수 있음을 시사한다 [14].

공액고분자의 규칙성을 저하시킬 수 있는 하나의 전략은 3가지 이상의 모노머를 혼합하는 랜덤공중합체이다. 또한 랜덤 공중합체는 에너지레벨, 용해도 등 고분자의 특성을 세밀하게 조정 가능하다는 장점이 있어 공액고분자 정공수송체 개발을 위한 효율적인 전략이라 생각된다.

이에 polythiophene에 랜덤공중합체를 도입하여 페로브스카이트 광전지용 정공수송체 소재를 개발하고자 하는 시도가 보고된 바 있다. 본 연구에서는 그림 1에 도시화된 바와 같이 polythiophene의 주사슬 중 10%를 pyridine 유닛으로 치환하여 랜덤공중합체 P3를 합성하였다. 대조군 P1 고분자에 비하여 P3 고분자는 향상된 평면도 및 강화된 사슬 간의 상호작용을 보이는 것으로 나타났다. 또한 P3 고분자는 감소된 π - π 적층 거리와 증가된 결정크기로 인하여 향상된 정공 수송 능력을 보이는 것으로 관측되었다. 나아가 이온젤 게이트 유기 트랜지스터를 제작 시 P3 고분자는 $5.34 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 높은 정공모빌리티 값을 나타내었으며, 이는 P1 고분자 트랜지스터 대비 2배이상 향상된 값이다. 결과적으로, P1 고분자 대비 P3 고분자는 space charge limited current (SCLC) 모빌리티에서도 25% 이상 증가된 값이 관측되었으며, 페로브스카이트 태양전지의 정공수송층으로 도입 시에도 향상된 전력변환효율인 10.8%를 나타내었다(P1

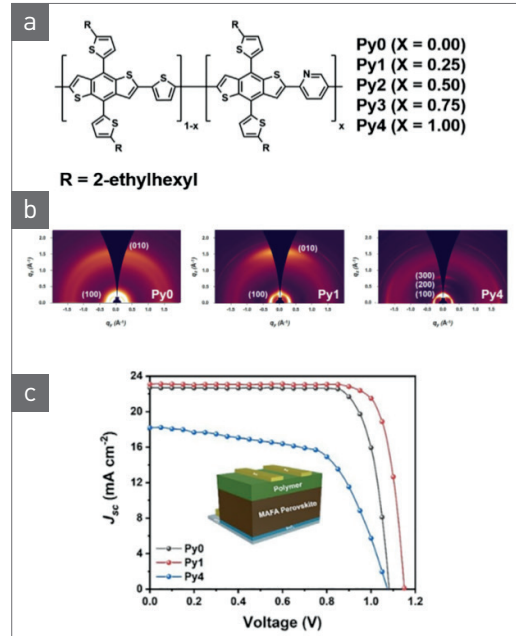


그림 2 ▶ (a) BDT 기반 랜덤공중합체 고분자의 화학구조. (b) 합성된 고분자 필름들의 GIXRD 패턴 이미지. (c) 합성된 고분자들은 정공수송층으로 도입한 페로브스카이트 태양전지의 J-V 곡선 [16].

소자 = 6.2%). 본 연구는 랜덤공중합체를 통해 공액고분자의 수직방향 정공수송도를 개선 가능하다는 점을 보여주었지만 polythiophene 계열의 고분자가 보이는 강한 edge-on 배향성을 극복하지는 못하였다 [15].

최근에는 좀 더 향상된 face-on 배향을 위하여 benzodithiophene (BDT)를 주사슬 유닛으로 하는 랜덤 공액고분자가 보고되었다. 본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 BDT 기반 공액고분자의 상대 유닛으로 thiophene과 pyridine 유닛들을 혼합하여 랜덤 공액고분자를 합성하였다. 합성된 고분자들 중 25%의 pyridine 유닛이 들어간 고분자 Py1은 다른 고분자들에 비해 증가된 face-on 결정

배향성 및 개선된 모폴로지로 인하여 정공 수송 및 페로브스카이트 표면 트랩 패시베이션에서 우수한 특성을 나타내었다. 합성된 고분자들을 도펀트의 도움없이 정공수송층으로 하여 ITO/ SnO₂ / (MA_{0.91}FA_{0.09})Pb(I_{0.94}Br_{0.06}) 페로브스카이트 (MA = methylammonium, FA = formamidinium) / 정공수송층 / Au 구조를 갖는 태양전지를 제작하였을 시, Py2 고분자는 다른 고분자들 대비 향상된 전력변환효율인 21.1%를 기록하였다(Py1 = 19.5%, Py4 = 11.9%) [16].

2.2 도핑을 통한 고분자 정공수송능력 향상 연구

반도체 소재의 전기적 특성을 강화하는 중요한 전략으로 도핑을 들 수 있다. 유기반도체 소재들 또한 charge transfer 혹은 redox 반응을 통하여 도핑이 가능하다고 알려져 있다. 실제적으로 현재 페로브스카이트 광전지 분야에서 널리 이용되는 정공수송체인 Spiro-OMeTAD의 경우에도 tert-butylpyridine (tBP), lithium bis (trifluoromethanesulfonyl)-imide (Li-TFSI) 등 첨가제를 통해 도핑을 하여 사용되고 있다 [17].

따라서 이러한 도핑 전략을 도입하여 기존 공액고분자의 전기적 특성을 개선하여 페로브스카이트 소자의 정공수송층으로 활용하고자 하는 연구가 보고된 바 있다. 그림 3은 Co 도핑을 통해 poly(3-hexylthiophene) (P3HT) 공액고분자의 전기적 특성을 향상시키고자 하는 연구를 나타낸다. 본 연구에서

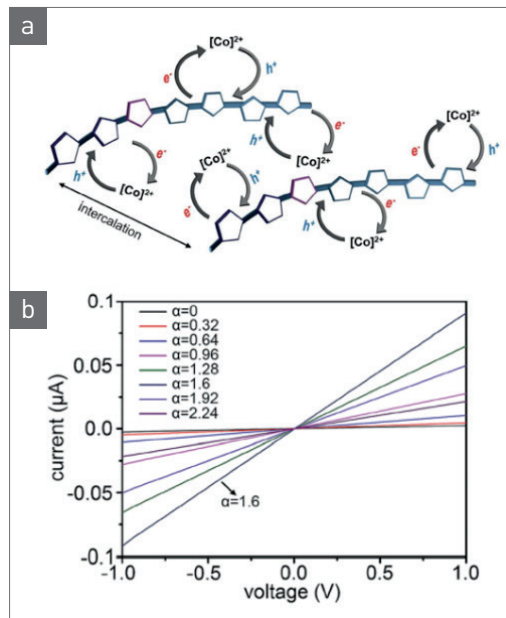


그림 3 ▶ (a) P3HT 공액고분자의 Co 도핑. (b) Co 도핑된 P3HT 고분자의 I-V 곡선 [18].

는 tris (2-(1*H*-pyrazol-1-yl)pyridine) cobalt(II) di[bis(trifluoro-methane)sulfonimide] (Co(II)-TFSI)를 p형 도펀트로 사용하였으며, P3HT 고분자에 첨가 시 코발트 이온이 효과적으로 고분자 내부로 침투하여 P3HT의 highest occupied molecular orbital (HOMO) 에너지 레벨을 -4.94 eV에서 -5.23 eV로 낮춤과 동시에 전기 전도도를 $4.37 \times 10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$ 에서 $1.53 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 로 향상시키는 것으로 관측되었다. 개발된 Co 도핑된 P3HT를 MAPbI₃ 페로브스카이트 태양전지의 정공수송층으로 도입 시 비도핑된 P3HT(6.23%) 대비 비약적으로 향상된 16.28%의 전력변환효율이 관측되었다 [18].

도핑된 공액고분자 정공수송체를 활용하는 또 다른 방안은 역구조 페로브스카이트 구조를 이용한 유연 광전소자의 구현이다. 공

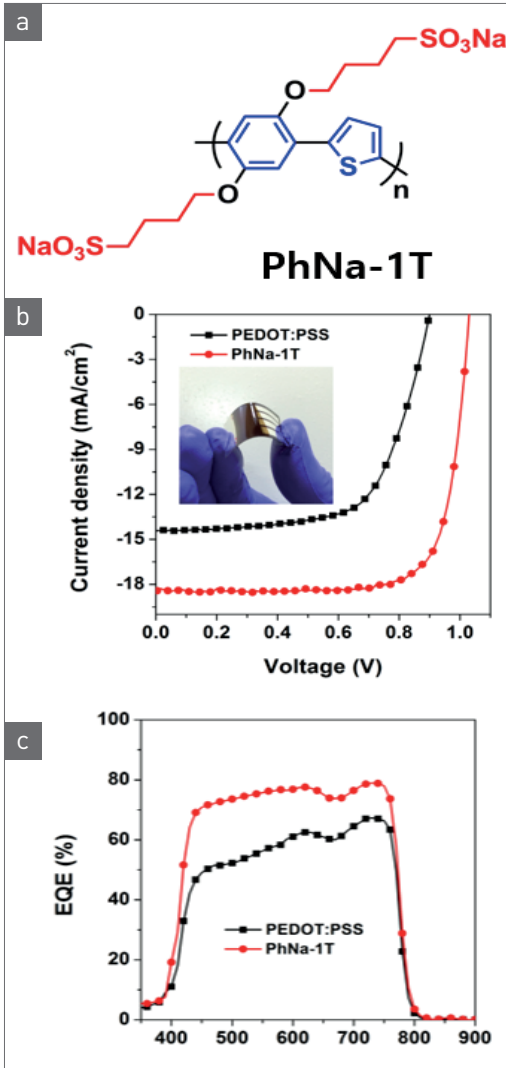


그림 4 ▶ (a) 자가도핑형 PhNa-1T 공액고분자전해질. (b) PEDOT:PSS와 PhNa-1T를 정공수송층으로 하는 페로브스카이트 유연태양전지의 J-V 곡선 및 (c) 외부양자 효율 그래프 [19].

액고분자를 이온성 도펀트를 결합하여 제조할 시 수용액 용매에 대한 높은 용해도로 인하여 페로브스카이트 하부 층 소재로 사용이 가능하다. 페로브스카이트는 저온 용액공정을 통하여 고결정성의 필름을 균일하게 형성할 수 있어 유연태양전지의 광활성층 물질

로써 주목을 받아왔다. 하지만 대부분의 페로브스카이트 태양전지는 고온공정이 요구되는 금속산화물 계면물질을 중점적으로 연구하여 발달해왔으며, 그에 따라 유연소자를 실현화할 수 있는 저온공정성 계면물질에 대한 연구는 저조한 상태이다. 최근 유연소자를 위해 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)를 정공수송층으로 이용한 역구조형 태양전지가 제시되었으나 PEDOT:PSS의 강한 산성, 제한적인 정공수송능력, 그리고 낮은 일함수로 인하여 제한적인 성능이 관측되고 있다. 이에 그림 4에서 도시화된 연구에서는 고성능의 페로브스카이트 유연태양전지를 제작하기 위하여 공액고분자 전해질 구조를 통해 자가도핑이 가능한 신규 정공수송물질인 PhNa-1T를 도입하였다. PhNa-1T는 기존의 PEDOT:PSS (~5.0 eV)보다 큰 일함수 값인 5.2 eV를 가지고 있어 페로브스카이트와 정공수송층 계면에서 효과적으로 포텐셜 에너지 손실을 줄일 수 있었다. 또한, 페로브스카이트 필름 제작 동안 전구체 물질과 반응하여 일함수가 변화하는 PEDOT:PSS와 달리 PhNa-1T는 공정과정 동안 일함수가 일정하게 유지되어 소자 작동 시 균일한 개방전압을 얻는데 도움을 주었다. 나아가 PhNa-1T는 PEDOT:PSS 대비 향상된 계면접합과 발달된 페로브스카이트 모폴로지에 의하여 소자 내에서 강화된 전하추출과 억제된 전하재결합을 나타내었다. 최종적으로 페로브스카이트 유연태양전지를 제작하였을 때, PhNa-1T 소자는 PEDOT:PSS 소자

(전력변환효율 = 8.4%)에 비하여 비약적으로 향상된 14.7%의 전력변환효율을 기록하였다. 더 중요한 점은 안정성 분석에서 PhNa-1T 유연소자는 PEDOT:PSS 유연소자에 비하여 향상된 대기안정성을 나타내었다. 이러한 결과들을 통하여 PhNa-1T이 고성능, 고안정성 유연태양전지 제작을 위한 유망한 물질임을 확인할 수 있었다 [19].

2.3 결사슬 엔지니어링을 통한 페로브스카이트와의 상호작용 개선 연구

페로브스카이트의 표면 결합은 전하의 재결합을 야기하여 광전지 소자의 성능을 저하시키는 주요 요인임이 밝혀짐에 따라 이를 제거하기 위한 결정성장, 표면처리 방법들이 연구되고 있다 [20]. 최근에는 계면소재에 페로브스카이트와 상호작용이 가능한 화학그룹들을 도입 시에도 페로브스카이트 표면 결합을 패시베이션 가능하다는 연구들이 보고되고 있다.

그림 5의 연구에서는 일부 결사슬을 triethylene glycol (TEG) 그룹을 도입하여 polythiophene 랜덤고분자들을 합성하였다. TEG 결사슬이 도입된 랜덤고분자들은 알킬 결사슬만을 같은 고분자에 비하여 페로브스카이트 표면 결합 제거에 효과적임이 관측되었으며, 이는 페로브스카이트 photoluminescence (PL)이 TEG 결사슬의 고분자 도포 시 blue-shift 되는 것으로 검증되었다. TEG 결사슬의 도입은 추가적으로 polythiophene 고분자의 결정 및 박막성장에도 긍정적인 영향을 보임이 확인되었으며, 최적화된 P20 고분자는

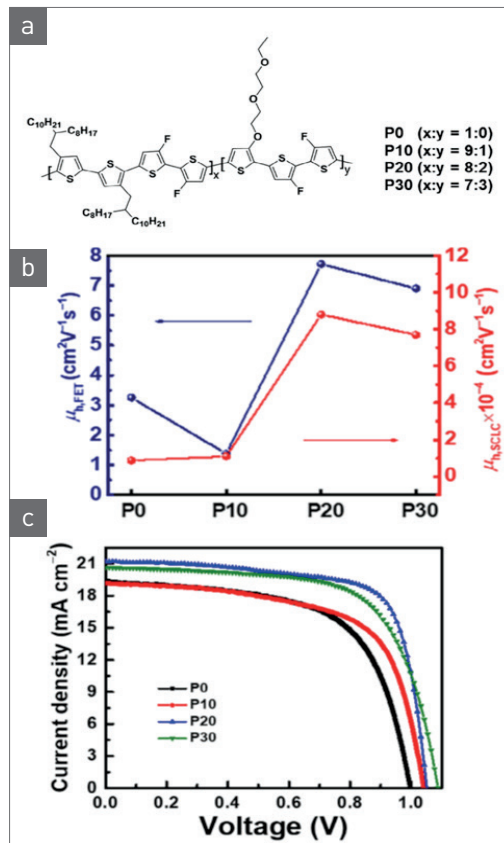


그림 5 ▶ (a) TEG 결사슬이 도입된 polythiophene 고분자 정공수송층 소재. (b) 합성된 고분자들의 유기트랜지스터 및 SCLC 모빌리티. (c) 합성된 고분자를 정공수송층으로 하는 페로브스카이트 태양전지의 J-V 곡선 [21].

다른 고분자들에 비해 더 조밀한 분자배열 및 더욱 균일한 필름 모폴로지 발현하였다. 따라서 P20 고분자는 이온젤 게이트 트랜지스터에서 $7.72 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 그리고 SCLC 소자에서 $8.86 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 높은 정공수송능력을 보여주었으며, 이는 알킬 결사슬로만 구성된 P0 고분자 대비 각각 2.4배 및 10배 향상된 값이다(트랜지스터 = $3.25 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, SCLC = $8.73 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$). 최종적으로 $(\text{Cs}_{0.05}\text{FA}_{0.14}\text{MA}_{0.81})\text{Pb}(\text{I}_{0.86}\text{Br}_{0.14})_3$ 페로브스카이트를 광활

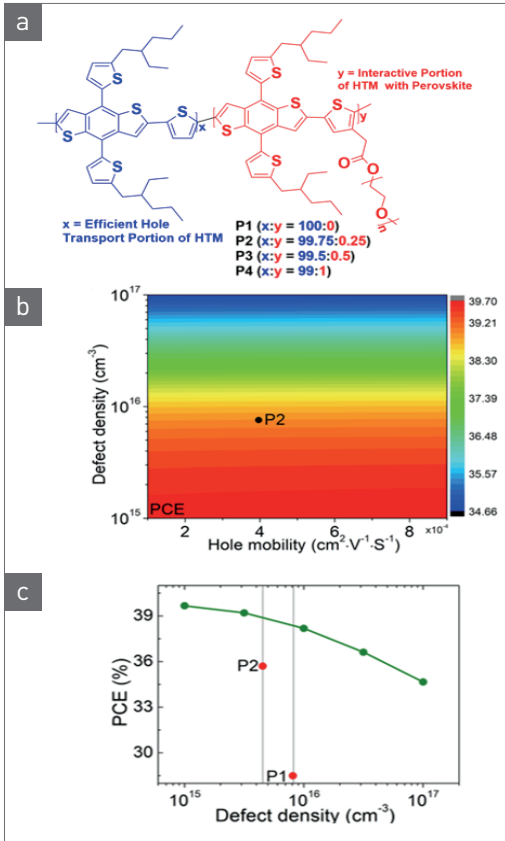


그림 6 ▶ (a) PEG 고분자를 곁사슬로 갖는 BDT 기반 그래프트형 공액고분자. (b) 시뮬레이션을 통해 계산된 1000 lux LED 환경에서의 페로브스카이트 소자의 광전변환효율 및 (c) 결함 밀도에 의한 전력변환효율 변화 [22].

성층으로 하는 태양전지를 제작 시 P20 고분자는 P0 고분자(12.0%) 비해 향상된 16.2%의 전력변환효율을 나타내었다 [21].

최근에는 이러한 곁사슬 엔지니어링 전략을 확장하여 공액고분자를 그래프트형으로 개발하고자 하는 시도가 보고되었다. 그림 6에 도시화되어 있는 연구에서는 효율적인 정공수송을 위하여 BDT 기반의 고분자를 주사슬로 하고 페로브스카이트와 상호작용을 위해 분자량 $\sim 2 \text{ kg mol}^{-1}$ 의 polyethylene glycol (PEG)를

곁사슬로 하는 그래프트형 고분자들을 합성하였다. 비그래프트형 P1 고분자에 비하여 최적화된 그래프트형 고분자인 P2는 face-on 결정배향성의 증가로 인하여 향상된 정공수송도를 보였으며, 페로브스카이트의 표면을 효과적으로 패시베이션하여 전하의 계면 재결합을 상당량 억제함을 확인하였다. 페로브스카이트 광전소자의 결함밀도를 측정하였을 시, P1과 P2 공액고분자 기반 소자들은 각각 $8.09 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 과 $4.51 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 의 값을 나타내었다. 합성된 고분자들을 도펀트의 도움 없이 ($\text{MA}_{0.91}\text{FA}_{0.09}$)Pb($\text{I}_{0.94}\text{Br}_{0.06}$) 페로브스카이트 광전소자의 정공수송층으로 하여 성능을 평가하였을 시, P2 고분자는 1000 lux LED 실내광 환경에서 38.2% 및 AM 1.5G 태양광 환경에서 21.7%의 높은 전력변환효율 값을 나타내었다 (P1 고분자 = 31.0%(1,000 lux LED)). SCAPS-1D 시뮬레이션을 통해 PEG 곁사슬에 의하여 변화된 고분자의 특성이 페로브스카이트 광전지의 성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 고분자의 정공수송도 증가에 비해 페로브스카이트 패시베이션 능력의 향상이 효율 향상에 더 크게 기여한 것으로 밝혀졌다.

3. 맺음말

지금까지 페로브스카이트 광전지용 정공수송층 공액고분자 소재 개발에 관한 연구동향을 간략하게 살펴 보았다. 고성능, 고안정성

페로브스카이트 광전지를 구현하기 위해서는 계면소재와 페로브스카이 광활성층 간의 상호작용 과 전기적 상관관계를 고려하여 계면소재의 특성의 최적화가 필요하다. 공액고분자 계면소재들은 이러한 점에서 화학구조 디자인을 통하여 페로브스카이트 소자에서 요구하는 충족조건들을 만족 가능할 것으로 여겨진다. 본 기고에서는 최근에 연구되고 있는 공액고분자 정공수송층 개발 전략들에 대하여 살펴보았다. 결정의 배향성 조절, 도핑을 이용한 전기적 특성 개선, 결사슬 엔지니어링을 통한 페로브스카이트와의 상호작용 강화 등 대표적인 연구결과들의 정리를 통하여 공액고분자 정공수송층 소재가 페로브스카이트의 핵심소재로써 자리잡을 수 있음을 확인하였다. 하지만 페로브스카이트 광전지의 상용화 관점에서는 아직 공액고분자 정공수송층 소재들이 해결해야 할 과제들이 있다. 먼저 합성 및 정제 과정의 정립을 통하여 고분자 소재의 합성배치에 따른 성능 차이 발생 문제를 해결하여야 한다. 또한 가격경쟁력을 저하시키는 복잡한 화학구조에서 벗어난 합성단계가 적고 구조가 간단한 공액고분자의 개발이 요구된다. 나아가 대면적 코팅기술 및 페로브스카이트와의 강한 접합에 관한 연구들도 수반되어야 한다. 향후 이러한 문제점들을 해결한다면 공액고분자 정공수송층을 통한 페로브스카이의 상용화의 가속화가 가능할 것으로 추측되며, 본 기고가 공액고분자 소재들의 앞으로의 연구방향성을 제시하는 하나의 지표로 활용되기를 기대한다. 🍷

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] L. Lu, T. Zheng, Q. Wu, A. M. Schneider, D. Zhao, and L. Yu, *Chem. Rev.*, 115, 12666 (2015).
- [2] J. W. Jo, J. W. Jung, H. Ahn, M. J. Ko, A. K. Y. Jen, and H. J. Son, *Adv. Energy Mater.*, 7, 1601365 (2017).
- [3] J. W. Jo, S. Bae, F. Liu, T. P. Russell, and W. H. Jo, *Adv. Funct. Mater.*, 25, 120 (2015).
- [4] J. Y. Kim, J. W. Lee, H. S. Jung, H. Shin, and N.-G. Park, *Chem. Rev.*, 120, 7867 (2020).
- [5] S. Bae, J. W. Jo, P. Lee, and M. J. Ko, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 17452 (2019).
- [6] Best Research-Cell Efficiency Chart, NREL, www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html.
- [7] I. Jeong, J. W. Jo, S. Bae, H. J. Son, and M. J. Ko, *Dyes Pigm.*, 164, 1 (2019).
- [8] J. W. Jo, M. S. Seo, J. W. Jung, J. S. Park, B. H. Sohn, M. J. Ko, and H. J. Son, *J. Power Sources*, 98, 378 (2018).
- [9] J. W. Jung, J. W. Jo, E. H. Jung, and W. H. Jo, *Org. Electron.*, 31, 149 (2016).
- [10] H. Huang, L. Yang, A. Facchetti, and T. J. Marks, *Chem. Rev.*, 117, 10291 (2017).
- [11] S. Subramaniyan, H. Xin, F. S. Kim, S. Shoaee, J. R. Durrant, and S. A. Jenekhe, *Adv. Energy Mater.*, 1, 854 (2011).
- [12] V. Vohra, K. Kawashima, T. Kakara, T. Koganezawa, I. Osaka, K. Takimiya, and H. Murata, *Nat. Photon.*, 9, 403 (2015).
- [13] H. Zhong, C. Z. Li, J. Carpenter, H. Ade, and A. K.-Y. Jen, *J. Am. Chem. Soc.*, 137, 7616 (2015).
- [14] J. W. Jo, J. W. Jung, E. H. Jung, H. Ahn, T. J. Shin, and W. H. Jo, *Energy Environ. Sci.*, 8, 2427 (2015).
- [15] H. Opoku, H. Ahn, and J. W. Jo, *Dyes Pigm.*, 185, 108943 (2021).
- [16] H. Opoku, J. H. Lee, B. Nketia-Yawson, H. Ahn, J. J. Lee, and J. W. Jo, *J. Polym. Sci.*
DOI: 10.1002/pol.20210400 (2021).
- [17] W. H. Nguyen, C. D. Bailie, E. L. Unger, and M. D. McGehee, *J. Am. Chem. Soc.*, 136, 10996 (2014).
- [18] J. W. Jung, J. S. Park, I. K. Han, Y. Lee, C. Park, W. Kwon, and M. Park, *J. Mater. Chem. A*, 5, 12158 (2017).
- [19] 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).
- [20] S. Akin, N. Arora, S. M. Zakeeruddin, M. Grätzel, R. H. Friend, and M. I. Dar, *Adv. Energy Mater.*, 10, 1903090 (2020).
- [21] S. Y. Ko, B. Nketia-Yawson, H. Ahn, J. W. Jo, and M. J. Ko, *Int. J. Energy Res.*, 45, 7998 (2021).
- [22] H. Opoku, Y. H. Kim, J. H. Lee, H. Ahn, J. J. Lee, S.-W. Baek, and J. W. Jo, *J. Mater. Chem. A*, 9, 15294 (2021).

저/자/약/력



성명	조 제웅	
학력	2009년	서울대학교 재료공학부 공학사
	2015년	서울대학교 재료공학부 공학박사
경력	2012년 ~ 2013년	UMass Amherst 고분자공학과 방문연구원
	2015년 ~ 2016년	한국과학기술연구원 광전하이브리드센터 박사후연구원
	2016년 ~ 2018년	토론토대학교 전기컴퓨터공학부 박사후연구원
	2018년 ~ 현재	동국대학교 융합에너지신소재공학과 조교수