

유기 태양전지에서 P3HT:PC₇₀BM/overlay 광활성층의 계면 제어를 통한 균일한 전하 분포

경규민¹, 강호승², 홍순호³, 손선영^{1,3,4} 

¹ 상지대학교 반도체·에너지공학과

² 상지대학교 신에너지자원공학과

³ 상지대학교 반도체물리전자학과

⁴ 상지대학교 전기전자공학과

Balanced Charge Distribution by the Interface Controls of P3HT:PC₇₀BM/Overlay Active-layers in Organic Photovoltaics

Gyumin Kyung¹, Hoseung Kang², Soonho Hong³, and Sunyoung Sohn^{1,3,4}

¹ Department of Semiconductor Energy Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

² Department of New Energy and Mining Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

³ Department of Semiconductor Physics Electronics, Sangji University, Wonju 26339, Korea

⁴ Department of Electrical and Electronic Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

(Received August 27, 2025; Revised September 28, 2025; Accepted November 10, 2025)

Abstract: Organic photovoltaics (OPVs) are attractive candidates for sustainable energy conversion due to their flexibility, low-cost processing, and compatibility with large-area fabrication. However, their efficiency is hindered by interfacial defects and vertical phase separation in the active layer, which induce charge imbalance and recombination losses. This work presents an interfacial engineering approach to overcome these limitations in P3HT:PC₇₀BM-based OPVs. Two key strategies were employed: (i) reducing the post-deposition annealing time of the active layer to suppress PC₇₀BM accumulation at the bottom electrode, and (ii) using a DCB:DCM mixed solvent system to regulate solvent evaporation, thereby promoting uniform film formation during PC₇₀BM overlay deposition. Devices fabricated with these optimizations exhibited notable enhancements, achieving short-circuit current density up to 15.83 mA/cm² and a 58.1% increase in power conversion efficiency compared to control devices. X-ray photoelectron spectroscopy confirmed reduced surface aggregation of PC₇₀BM, while X-ray diffraction indicated improved P3HT crystallinity and molecular ordering. These results highlight the critical role of interfacial and morphological control in enhancing charge separation and transport, offering a practical route toward efficient, reproducible, and stable OPVs.

Keywords: Organic photovoltaics, PC₇₀BM overlay, Orthogonal solvent, Vertical phase separation, Surface morphology

✉ Sunyoung Sohn; sysohn@sangji.ac.kr

Copyright ©2026 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기후 변화와 자원 고갈에 대응하기 위한 에너지 전환의 흐름 속에서, 태양광 기술은 환경적 지속 가능성과 기술적 실현 가능성을 모두 갖춘 유망한 대안으로 평가받고 있다 [1,2]. 특히, Si 태양전지는 25% 이상의 높은 전력변환효율(power conversion efficiency, PCE)과 약 20-25년의 보증기간(warranty)으로 상용화가 활발하게 이루어지고 있다 [3,4]. 최근, copper-indium-gallium-diselenide $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) 또는 cadmium telluride (CdTe)와 같은 무기물(inorganic) 기반의 태양전지도 상업화 단계에 진입하면서 기술 성숙도를 높여가고 있으나 이러한 소자들은 높은 단가, 복잡한 제조공정, 고온의 후열처리(post-annealing) 공정, 그리고 긴 제조 시간 등 공정상 한계를 가지고 있다 [4]. 반면, 유기태양전지(organic photovoltaics, OPV)는 간단한 제조공정과 상대적으로 낮은 열처리 온도와 플렉서블 및 스트레처블 기판 위에도 구현할 수 있다 [5-7]. 이러한 이유로 차세대 전자기기, 웨어러블 센서, 반투명 창호형 에너지 소자 등 다양한 응용 분야에 적용이 가능하다 [8,9]. 유기태양전지의 광활성층(active layer)은 전자 도너(donor)와 엑셉터(acceptor)가 혼합(blend) 또는 적층(stack) 형태를 갖는 벌크 이종 접합(bulk heterojunction, BHJ)이 나노미터 수준의 상 분리(phase separation) 구조를 형성함으로써 엑시톤(exciton) 분리 및 전하 수송에 유리한 경로를 제공해 효율 향상에 기여한다. 광활성 물질로는 대표적으로 poly(3-hexylthiophene) (P3HT) donor와 phenyl C70-butyric acid methyl ester (PC₇₀BM) acceptor는 우수한 용해성(solubility), 대기중에서 안정성과 초 박형(약 100 nm)의 박막 두께로 인해 많이 연구되지만 이를 상용화하기 위해서는 PCE 향상이 필요하다 [10,11]. OPV 소자의 효율과 수명 특성은 공정 조건 및 재료 특성에 민감하게 영향을 받기 때문에 Si 태양전지와 비교해 상용화 기준에는 매우 제한적이다. 특히 중요한 요소는 donor와 acceptor로 구성된 광활성층의 결정성과 나노 구조는 엑시톤을 효율적으로 분리하고 전하가 빠르게 이동할 수 있는 경로를 형성하여 재결합 손실을 줄임으로써 최종 PCE 값을 향상시키는 결정적 요인이다 [12]. 이는 후열처리 조건, 재료 순도(purity), 전하 수송 층(electron/hole transport layer, ETL/HTL) 및 계면 층(interlayer)의 도입, 표면 처리(surface treatment) 등 여러 공정 변수들을 제어함으로써 구조적 특성이 달라질 수 있다 [13]. 일반적으로 P3HT 도너와 PC₇₀BM 엑셉터 구조의 광활성층은 후열처리 온도 및 시간 제어를 통해 결정성을 제어하거나 도너의 침투 경로(percolation path)를 확보함으로써 전하 이동 특성을 개선함으로써 성능을 향상시킬 수 있다 [14]. 하지만 이러

한 광활성층의 구조적 특성 향상을 위한 공정변수 제어 시 과도한 상분리가 발생해 엑시톤의 분리(separation)가 아닌 재결합(recombination)을 유도해 전류밀도 감소로 인한 효율 저하로 이어질 수 있다. 또한 박막 형성 과정에서 전자 엑셉터인 PC₇₀BM이 광활성 층의 상부 또는 하부 쪽으로 확산(diffusion)되면서 광활성층의 구성이 불균일해지고, 이로 인해 응집(aggregation) 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상들은 전하 수송을 방해하고, 전하 추출(charge extraction)을 비효율적으로 만들어 결과적으로 PCE를 저해하는 요인으로 작용할 수 있다. 특히, 버퍼층과 광활성층 간의 계면 접촉이 불안정할 경우, 소자의 전류-전압 특성에서 비이상적(non-ideal)인 S-curve와 같은 전기적 결함이 나타나며, 이는 전하 추출 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 전하 불균형을 초래하게 된다 [15,16]. 이러한 확산 또는 계면 문제를 해결하기 위한 방안으로 전극과 벌크 이종 접합 계면 사이에 추가되는 층(additional layer)인 적층(overlay)하는 방법이 제안되고 있다. 이와 같은 적층(overlay) 방식은 전하 수송 경로를 안정화하고 계면 정합성을 향상시키는 데 도움을 줄 수 있다 [17,18]. 하지만, 적층(overlay) 공정은 아래층의 광활성층과 반응하지 않는 공정을 위해 직교성 용매(orthogonal solvent), 건조 속도, 열처리 조건 등 여러 공정 제어가 최적화되지 않을 경우 박막 표면에 잔류 자국(residual marks)이 남거나, 박리(Peel-off) 현상이 발생할 수 있다. 이러한 결함은 소자의 재현성(reproducibility)을 떨어뜨리고, 장기적인 소자 안정성과 효율 확보에 큰 장애 요소로 작용한다 [19]. 이에 본 연구에서는 P3HT:PC₇₀BM 기반 BHJ구조의 광활성층 위에 PC₇₀BM 적층(overlay) 공정을 도입하고, 용매 조성, 건조 거동, 열처리 조건을 최적화함으로써 계면 결함을 최소화하고 전하 추출을 활성화함으로써 OPV 소자의 효율을 향상시키고자 한다 [20,21]. 또한 한가지의 단일 용매만을 사용한 제작공정에서는 열처리 시간을 제어함으로써 박막의 표면 거칠기와 결정화 크기 및 속도를 제어함으로써 공정 후 박막 표면의 자국이나 박리형성을 억제하고 효율을 확보하였다. 특히, 혼합 용매를 사용한 공정에서는 용매별 증발 속도 차이에 의한 확산 효과와 적층(overlay) 공정을 이용해 박막내 물질들의 조성을 조절함으로써 박리형성을 억제하고 소자의 효율을 확보하고자 하였다 [22].

유기 태양전지의 소자 구조는 그림 1(a)에서와 같이 ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PC₇₀BM/PC₇₀BM/LiF/Al로 제작되었으며, 그림 1(b)에 에너지밴드 다이어그램의 모식도를 나타내었다. 광활성층은 P3HT와 PC₇₀BM을(1:1) 비율로 혼합한 후 P3HT와 PC₇₀BM에 대한 용해도가 높은 유기 용매인 dichlorobenzene (DCB)에 dichloromethane (DCM)

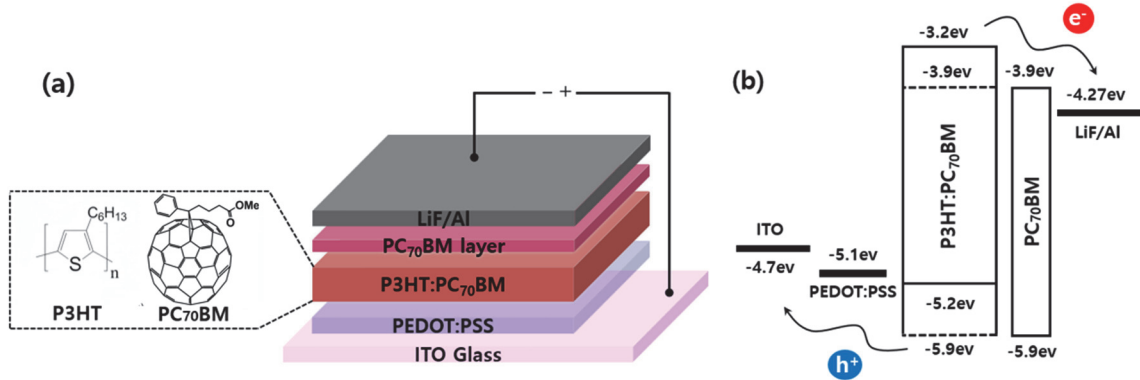


Fig. 1. Schematic of (a) the OPV device structure and (b) the energy-band diagram.

을 8:2 wt.%의 30 mg/ml 농도로 사용하였다. 특히, 광활성층 위에 적층(overlay) 공정에서는 계면 및 하부층에 영향을 주지 않는 직교 용매(orthogonal solvent)로 N,N-Dimethylformamide (DMF)를 사용하여 소자 계면에서 발생할 수 있는 문제점들을 분석하였다 [22,23]. 소자 제작 과정으로는 150 nm 두께의 indium tin oxide (ITO) 유리기판을 양전극(anode)으로 사용하였으며, 기판 세척을 위해 acetone, 2-propanol (IPA), DI Water 순서로 각각 10분씩 초음파 세척을 진행하였다. 세척된 기판은 표면에 남아 있는 잔여물을 제거하기 위해 blowing 후 100°C에서 30분 동안 건조하였다. 스핀 코팅 공정을 진행하기 전에 ITO 유리기판의 친수성(hydrophilicity)을 향상시키기 위해 25분간 UV ozone cleaner를 이용해 표면 처리를 진행하였다. 정공 수송 층(HTL)으로는 poly(3,4 ethylenedioxythio-phenylene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS, Al 4083) 용액을 0.45 μm 의 nylon filter를 이용해 파티클을 제거하였다. 필터링 된 용액은 2,000 rpm으로 50초 동안 스핀 코팅 후 150°C에서 30분 동안 후열처리를 진행하였다. 광활성층으로 사용되는 P3HT:PC₇₀BM 용액은 0.45 μm 의 PTFE filter를 이용해 파티클을 제거한 후 2,000 rpm으로 50초 동안 스핀 코팅을 한 후 150°C에서 5분 동안 열처리 과정을 진행하였다. 적층(overlay) 공정 시 사용되는 PC₇₀BM 용액은 2 mg/ml의 농도로 광활성층 위에 4,000 rpm으로 30초 동안 스핀 코팅 후 150°C에서 20분 동안 열처리 과정을 진행하였다. 이후 LiF 1 nm와 Al 100 nm를 음전극(cathode)으로 각각 열증착 후 보호막을 적용하였다. 제작된 소자의 전기적 특성 분석은 Keithley 2634B source meter를 사용하여 AM 1.5 G, 100 mW/cm² 조건하에서 측정하였다. 그림 2(a)-(d)는 다양한 overlay 공정 조건에 따른 광학 사진을 보여주고 있다. DCB 용매를 사용한 광활성층 위에 DCM에 용

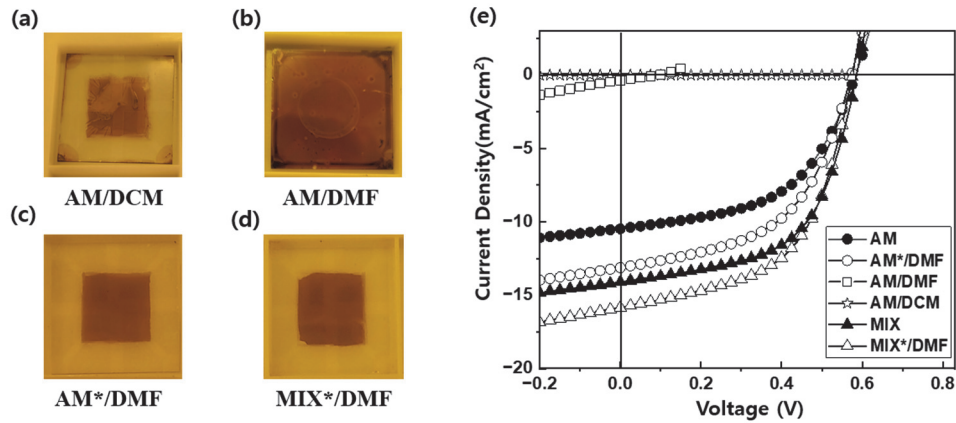
해된 PC₇₀BM을 overlay 했을 때 표면이 박리되었으며, 이는 아래층에 형성된 박막과 overlay 계면 형성이 적절히 이루어지지 않았음을 나타낸다. 일반적으로 overlay 공정 시 용매 종류, 건조 속도, 열처리 조건 등 여러 변수에 의해 공정 제어가 적절히 이루어지지 않을 경우 overlay 표면에 자국이 남거나 박리 현상이 발생할 수 있다. 두번째 광학 사진은 광활성층 위에 DMF에 용해된 PC₇₀BM을 overlay 했을 때 표면에 자국이 발생하였다. 이는 XRD 분석을 통해 극 표면(top surface)에 축적된 PC₇₀BM이 DMF 용액에 의해 용해되면서 표면 결함이 발생할 수 있음을 보여주고 있다 [16,24,25].

기존 P3HT:PCBM, PM6:Y6, 등 고분자계 유기 태양전지 연구에서 보고된 overlay 공정은 계면 안정성 확보와 효율 향상을 위해 두께변화 및 후열처리 온도에 따른 실험이 주로 진행되었다 [19,20]. 반면, 본 연구에서는 P3HT:PC₇₀BM 표면위에 PC₇₀BM overlay공정시 광활성층의 박리 현상을 방지하기 위해 후열처리 시간을 기존 문헌들에 보고된 시간보다 짧게 조절함으로써 광활성층과 PC₇₀BM 계면의 PC₇₀BM 축적되는 문제를 개선함으로써 균일한 박막을 형성하였다. 추가적으로 이러한 계면에서의 PC₇₀BM이 축적되는 문제를 개선하기 위해 광활성층 용매로 DCB:DCM 혼합 용매를 적용함으로써 증발 속도 제어를 통해 overlay 공정 시 발생하던 표면 결함 문제를 개선했다. 그림 2(e)는 단일 용매 공정과 혼합 용매 공정을 적용한 소자들의 전기적 특성을 비교한 전류밀도(current-density, J) 대비 전압(voltage, V) 곡선을 나타내고 있다. J - V 특성 분석 결과, PC₇₀BM overlay 공정이 없는 기본 소자 대비 짧은 열처리 시간을 적용한 overlay 소자는 단락 전류밀도(short-circuit current-density, J_{sc})가 약 3.41 mA/cm² 증가되었으며, 혼합 용매 기반 overlay 소자의 경우에도 기본 소자 대비 약 5.36 mA/cm² 증가되었다

[23]. 또한 짧은 열처리 시간을 적용한 overlay 소자와 DCB:DCM 혼합 용매 기반 overlay 소자 모두 광활성층 위에 overlay 공정을 적용함으로써 PC₇₀BM의 광활성층 내 적절한 분포로 인한 donor/acceptor의 균일한 상분리가 이루어졌음을 의미한다. 광활성층 위에 overlay를 적용함에 따른 전자 또는 정공의 이동 거동을 분석하기 위해 그림 3(a)와 (c)의 소자구조에서 볼 수 있듯이 electron-only device (EOD) 및 hole-only device (HOD)를 제작하였다. 그림 3(b)와 (d)에서 혼합 용매 조건에서 overlay가 적용된 소자가 그렇지 않은 소자에 비해 동일 전압에서 더 높

은 전자 및 정공 전류밀도를 나타낸다.

이는 전자와 정공 모두의 이동도가 상대적으로 증가했음을 의미하며, overlay 공정이 전하 수송 경로를 개선하고 계면 트랩에 의한 손실을 줄여 전하 추출 효율을 향상시켰음을 보여준다. 즉, 혼합 용매 기반 overlay 공정은 전자 및 정공 이동 특성을 동시에 개선하여 전하 이동 균형을 보다 유리하게 조정할 수 있음을 확인할 수 있다 [17,18]. 따라서 효율적인 전하 분리를 통해 전력 변환 효율(power conversion efficiency, PCE)은 기본소자 대비 각각 약 24% 및 58.1% 향상되었다. 그림 4는 DCB:DCM 혼합 용



※ABBS

AM*, Active Material, P3HT:PC₇₀BM (short annealing time at the DCB solvent)

AM, Active Material, P3HT:PC₇₀BM (long annealing time at the DCB solvent)

MIX*, Mixed Solvent, P3HT:PC₇₀BM (at the DCB:DCM mixed solvents and short annealing time)

MIX, Mixed Solvent, P3HT:PC₇₀BM (at the DCB:DCM mixed solvents)

AM/DCM, PC₇₀BM overlay at DCM solvent on AM

AM/DMF, PC₇₀BM overlay at DMF solvent on AM

Fig. 2. Optical images of the active materials with various organic solvents and annealing times. (a) AM/DCM, (b) AM/DMF, (c) AM*/DMF, and (d) MIX*/DMF. (e) Current-density versus voltage (J - V) characteristics of the OPV devices fabricated with various organic solvents.

Table 1. Electrical parameters of the OPV devices with various solvent processes.

	V_{oc} [V] ^{a)}	J_{sc} [mA/cm ²] ^{b)}	FF [%] ^{c)}	PCE [%] ^{d)}
AM	0.583	10.47	0.52	3.17
AM*/DCM	NA	0.355	NA	NA
AM/DMF	0.079	0.001	0.0467	2.05×10^{-8}
AM*/DMF	0.5857	13.88	0.48	3.93
MIX	0.5857	14.101	0.571	4.72
MIX*/DMF	0.5775	15.83	0.55	5.02

^{a)} V_{oc} (open circuit voltage), ^{b)} J_{sc} (short circuit current density), ^{c)} FF (fill factor), ^{d)} PCE (power conversion efficiency)

매 조건에서 열처리 시간에 따른 소자의 광전 특성을 비교한 결과이다. 5분 열처리 조건에서 소자는 가장 높은 단락 전류밀도($J_{sc} = 15.83 \text{ mA/cm}^2$)와 전력변환효율($PCE = 5.02\%$)을 나타냈다. 이는 짧은 열처리로 인해 활성층의 적절한 상분리와 적절한 결정성이 확보되어 전하 수송 및 추출이 원활히 이루어진 결과로 해석된다 [26]. 반면, 열처리 시간이 10분 이상으로 길어질 경우 J_{sc} 와 PCE 가 점차 감소하였는데, 이는 과도한 결정화로 인한 상 분리 확대 및 계면 결함 증가가 전하 수송을 저해한 것으로 판단된다 [27]. 이러한 결과는 적절히 제한된 열처리 시간이 광활성

층의 미세 구조를 최적화하여 소자 성능을 극대화하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 보여주고 있다.

그림 5(a)는 X선 광전자 분광법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)을 통해 overlay 및 혼합용매에 따른 조성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 적층된 계면 조성을 파악하기 위해 황(sulfur, S) 원소를 포함하는 P3HT와 산소(oxygen, O) 원소를 포함하는 PC₇₀BM의 상대적 분포를 반영하는 S/O 비율을 분석하였다 [28]. 분석 결과, DCB 단일 용매 기반의 기본 소자는 낮은 S/O 비율을 보여 극표면에 PC₇₀BM이 상대적으로 풍부하게 분포함을

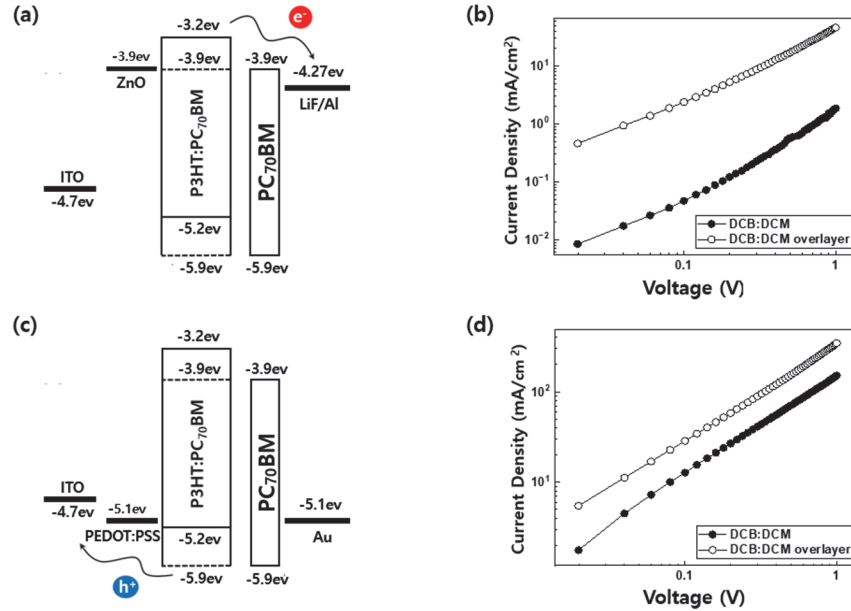


Fig. 3. Energy-band diagram of (a) the electron-only device (EOD) and (c) the hole-only device (HOD). Current density versus applied voltages of the (b) EOD and (d) HOD to analyze the carrier mobility.

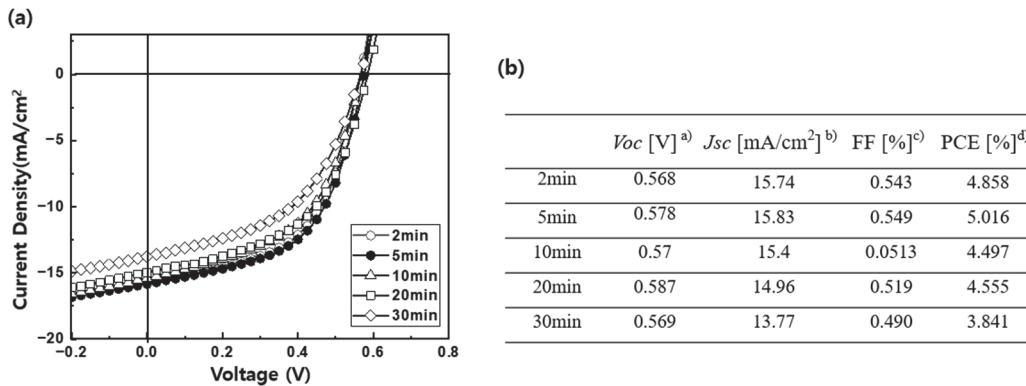


Fig. 4. (a) Current density versus applied voltages and (b) electrical parameters of the OPV devices with various post-annealing times on P3HT:PCBM device performance under DCB:DCM solvent. (a) J–V curves of devices annealed for 2–30 min. (b) Electrical parameters (V_{oc} , J_{sc} , FF, PCE) extracted from J–V curve.

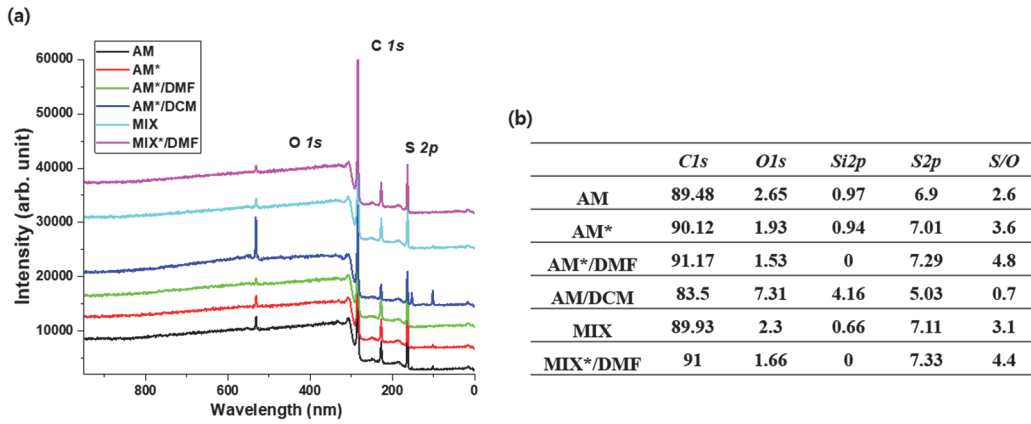


Fig. 5. (a) X-ray photoelectron spectroscopy spectra of survey scan and (b) composition ratio of various active materials.

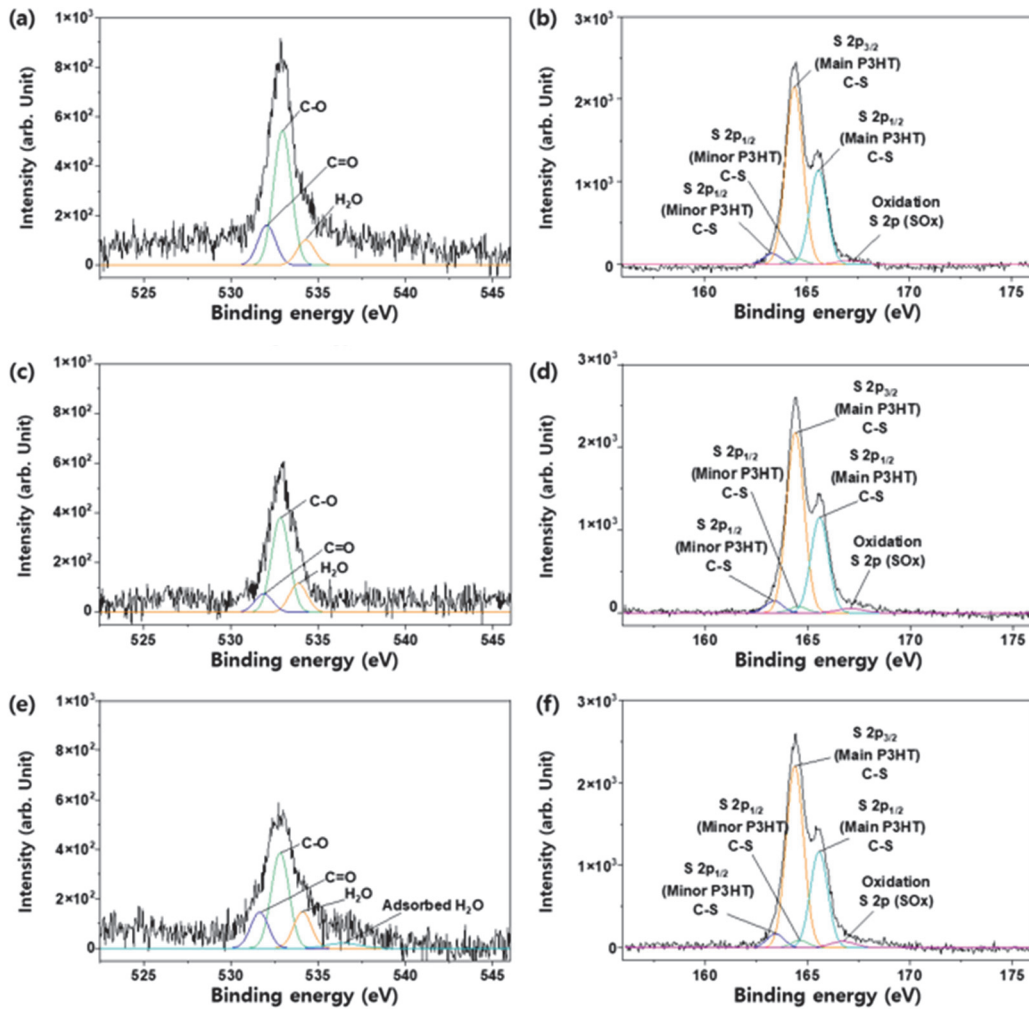


Fig. 6. O 1s deconvolution peaks of (a) AM, (c) AM*, and (e) MIX films. S 2p deconvolution peaks of (b) AM, (d) AM*, and (f) MIX films.

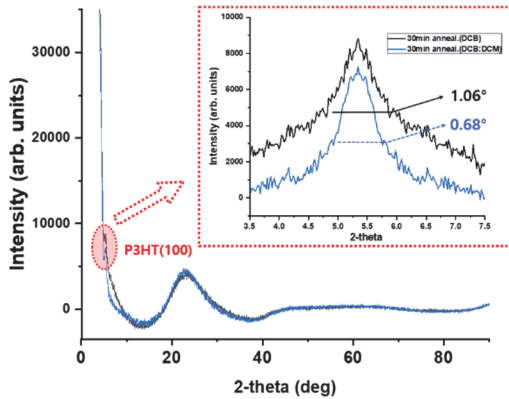


Fig. 7. X-ray diffraction spectra by active materials with single DCB and mixed DCB:DCM solvents (the inset shows the FWHM difference).

확인하였다. 반면, 열처리 시간을 단축한 조건에서는 S/O 비율이 증가하여 PC₇₀BM의 표면 축적이 억제되었으며, 이로 인해 그림 2(a)-(d)에서 관찰된 것처럼 DCM 및 DMF overlay 공정 시 박막 표면에 얼룩이나 박리 현상이 억제되고 균일한 박막형성이 가능하였다. 또한 DCB:DCM 혼합 용매를 사용한 경우에도 S/O 비율이 증가하여 PC₇₀BM의 극 표면 축적이 완화되었고, 그 결과 PC₇₀BM 적층 (overlay) 공정 후 균일한 박막을 얻을 수 있었다. 그러나, 그림 5(b)에서 제시된 DCB/DCM 조건에서는 광활성층 위의 적층 공정에 직교 용매(orthogonal solvent)인 DMF 대신 DCM을 사용하였다. 이 경우, S/O 비율이 급격히 감소하며 PC₇₀BM이 표면에 과도하게 축적되는 현상이 나타났다. 이는 직교 용매를 사용하지 않아 overlay 과정에서 DCM이 하부층을 부분적으로 용해시키고, 그 결과 PC₇₀BM이 표면에 과도하게 노출되면서 Peel-off가 발생한 것으로 해석된다. 이러한 결과는 overlay 공정 시 사용되는 용매의 특성이 후속 공정의 안정성과 박막 품질에 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다. 그림 4(a)는 활성층의 결정성과 정공 수송 특성을 평가하기 위해 수행한 X선 회절(X-ray diffraction, XRD) 분석 결과를 보여주고 있다. 측정 결과 P3HT donor의 결정성에 해당되는 (100)면의 주요 회절 피크는 약 $2\theta = 5.34^\circ$ 에서 나타났다 [29]. 측정결과를 바탕으로 식 (1)의 Scherrer 식을 적용하여 결정 도메인 크기를 정량적으로 계산하였다 [30]. 분석 결과, 기본소자의 반치 폭(FWHM)은 1.06° 로 계산되어 결정 크기는 약 7.5 nm였으며, 혼합용매 기반 소자의 경우 반치 폭이 0.68° 로 감소하면서 결정 크기가 약 11.7 nm로 증가하였다. 이러한 P3HT 결정 크기 차이는 혼합용매 시스템이 보다 효율적인 분자 정렬과 P3HT 결정 성장을 형성함을 의

미한다. 이러한 결정 크기의 증가는 폴리머 사슬 간 정렬 향상으로 이어지며, 그 결과 전하 수송 경로가 보다 효율적으로 형성된다. 광활성층 내 분자 정렬은 전자 이동 저항을 줄이고 전자 및 정공의 수송 속도를 향상시켜 전류 밀도 (J_{sc})를 증가시킬 수 있다 [31,32]. 따라서, 본 연구에서 기본소자 대비 혼합용매를 사용한 소자는 전류밀도가 10.47 mA/cm²에서 14.01 mA/cm²로 증가하였으며, PCE는 3.17%에서 4.72%로 향상되는 결과를 얻었다. 또한 혼합용매 기반 소자 위에 DMF용매를 이용한 overlay 공정을 적용하여서 J_{sc} 15.83 mA/cm², PCE가 5.02%로 상승되는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 활성층의 미세 구조 제어를 통해 전하 수송 특성을 효과적으로 개선할 수 있음을 보여주며, 용매 조성과 열처리 조건의 정밀한 최적화가 고효율 유기 태양전지 구현에 중요한 구성요소를 알 수 있다.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

(D는 결정 도메인 크기(nm), K는 형상 상수(0.9), λ 는 Cu-K α X선의 파장(1.5406 Å), β 는 반치 폭(full width half maximum, FWHM), θ 는 회절각(rad))

본 연구에서는 P3HT:PC₇₀BM 기반 유기태양전지의 효율 향상을 위한 overlay 공정 시 발생하는 자국 및 박리 현상의 문제를 해결하기 위해 혼합 용매를 이용한 증발 속도를 조절하거나 후열처리 시간을 조절함으로써 계면 특성을 제어하였다. 특히 DCB:DCM 혼합 용매 적용과 광활성층의 짧은 열처리 조건은 XPS 분석을 통해 극표면의 S/O 비율이 증가하여 PC₇₀BM의 과도한 표면 축적을 억제함으로써 극성 용매(DMF)를 이용한 적층(overlay) 공정에서도 자국이나 박리 없이 균일한 박막 형성이 가능함을 확인하였다. 이에 따라 전류 밀도와 전력 변환 효율이 향상된 효과를 얻었다. 또한 XRD 분석 결과, 혼합 용매 조건에서 P3HT 결정 크기가 증가함에 따라 전하 수송 특성이 개선되었으며, 이는 전류 밀도와 전력 변환 효율 향상으로 이어졌다. 따라서 본 연구는 계면 조성 제어와 P3HT 결정 성장을 제어함으로써 소자 효율에 영향을 끼침을 보여준다. 본 연구에서 진행한 P3HT:PC₇₀BM의 광활성층 위에 PC₇₀BM을 overlay 공정 기술은, 향후 다양한 유기 반도체 소자에서 계면 제어 기반의 안정적 박막 공정 설계로 확장 가능할 것으로 기대된다.

ORCID

Sunyoung Sohn

<https://orcid.org/0000-0002-5543-627X>

감사의 글

This research was supported by the Sangji University research grant for the academic year 2023.

REFERENCES

- [1] X. Tian, S. D. Stranks, J. Huang, V. M. Fthenakis, Y. Yang, and F. You, *Energy Environ. Sci.*, **18**, 194 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1039/d4ee03956d>
- [2] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K. H. Kim, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **82**, 894 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- [3] C. Ballif, F. J. Haug, M. Boccard, P. J. Verlinden, and G. Hahn, *Nat. Rev. Mater.*, **7**, 597 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>
- [4] J. Li, K. Sun, X. Yuan, J. Huang, M. A. Green, and X. Hao, *npj Flex. Electron.*, **7**, 16 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-023-00250-7>
- [5] M. Kaltenbrunner, M. S. White, E. D. Glowacki, T. Sekitani, T. Someya, N. S. Sariciftci, and S. Bauer, *Nat. Commun.*, **3**, 770 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms1772>
- [6] K. Fukuda, K. Yu, and T. Someya, *Adv. Energy Mater.*, **10**, 2000765 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202000765>
- [7] S. Sohn, *J. Electr. Electron. Mater.*, **38**, 226 (2025).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2025.38.2.15>
- [8] A. G. Tempesta, L. C. Mariano, K. R. M. Pacheco, T. R. C. dos Santos, M. L. M. Rocco, and L. S. Roman, *Braz. J. Phys.*, **52**, 16 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1007/s13538-021-01029-9>
- [9] B. Y. Oh, *J. Electr. Electron. Mater.*, **37**, 494 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.5.4>
- [10] M. C. Scharber and N. S. Sariciftci, *Prog. Polym. Sci.*, **38**, 1929 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.001>
- [11] N. D. Treat and M. L. Chabinye, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **65**, 59 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040513-103712>
- [12] C. W. Chu, H. Yang, W. J. Hou, J. Huang, G. Li, and Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 103306 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2891884>
- [13] S. K. Park, Y. H. Kim, and J. I. Han, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 081505 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1143/jjap.48.081505>
- [14] M. S. Islam, M. E. Islam, A. B. M. Ismail, and H. Baerwolff, *Opt. Photonics J.*, **3**, 28 (2013).
doi: <https://doi.org/10.4236/opj.2013.38a004>
- [15] B. T. de Villers, C. J. Tassone, S. H. Tolbert, and B. J. Schwartz, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 18978 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1021/jp9082163>
- [16] S. Hong, H. Jeong, H. Kang, and S. Sohn, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 451 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.4.14>
- [17] D. Chi, S. Qu, Z. Wang, and J. Wang, *J. Mater. Chem. C*, **2**, 4383 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1039/c4tc00003j>
- [18] T. H. Lee, S. A. J. Hillman, S. Gonzalez-Carrero, A. Difilippo, and J. R. Durrant, *Adv. Energy Mater.*, **13**, 2300400 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202300400>
- [19] C. W. Rochester, S. A. Mauger, and A. J. Moulé, *J. Phys. Chem. C*, **116**, 7287 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1021/jp212341a>
- [20] P. G. Karagiannidis, D. Georgiou, C. Pitsalidis, A. Laskarakis, and S. Logothetidis, *Mater. Chem. Phys.*, **129**, 1207 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.06.007>
- [21] B. Ray, P. R. Nair, and M. A. Alam, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 3287 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.006>
- [22] Y. Xiao, S. Zhou, Y. Su, H. Wang, L. Ye, S. W. Tsang, F. Xie, and J. Xu, *Org. Electron.*, **15**, 2007 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.05.011>
- [23] P. Cheng, Y. Li, and X. Zhan, *Nanotechnology*, **24**, 484008 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/48/484008>
- [24] D. Chen, A. Nakahara, D. Wei, D. Nordlund, and T. P. Russell, *Nano Lett.*, **11**, 561 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl103482n>
- [25] J. Lee, Y. K. Jung, D. Y. Lee, J. W. Jang, S. Cho, S. Son, J. Jeong, and S. H. Park, *Synth. Met.*, **199**, 408 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2014.12.013>
- [26] T. Agostinelli, S. Lilliu, J. G. Labram, M. Campoy-Quiles, M. Hampton, E. Pires, J. Rawle, O. Bikondoa, D. D. C. Bradley, T. D. Anthopoulos, J. Nelson, and J. E. MacDonald, *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 1701 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201002076>
- [27] S. Lilliu, T. Agostinelli, E. Pires, M. Hampton, J. Nelson, and J. E. MacDonald, *Macromolecules*, **44**, 2725 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1021/ma102817z>
- [28] Y. Busby, E. J. W. List-Kratochvil, and J. J. Pireaux, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 3842 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14758>
- [29] D. E. Motaung, G. F. Malgas, C. J. Arendse, and T. Malwela, *Mater. Chem. Phys.*, **124**, 208 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.06.021>
- [30] A. Monshi, M. R. Foroughi, and M. R. Monshi, *World J. Nano Sci. Eng.*, **2**, 154 (2012).
doi: <https://doi.org/10.4236/wjnse.2012.23020>

- [31] T. Wang, A. D. F. Dunbar, P. A. Staniec, A. J. Pearson, P. E. Hopkinson, J. E. MacDonald, S. Lilliu, C. Pizzey, N. J. Terrill, A. M. Donald, A. J. Ryan, R. A. L. Jones, and D. G. Lidzey, *Soft Matter*, **6**, 4128 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1039/c0sm00343c>
- [32] Q. Zhang, Z. Chen, W. Ma, Z. X. Xie, and Y. Han, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 12560 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/c9tc03697k>