

## 광활성층 모폴로지 제어를 통한 실내광 유기태양전지의 효율 향상 연구

장용찬<sup>1,2</sup> · 김소영<sup>1,2</sup> · 김정아<sup>1,2</sup> · 김종복<sup>2,3</sup> · 이원호<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>금오공과대학교 고분자공학과

<sup>2</sup>금오공과대학교 에너지공학융합전공

<sup>3</sup>금오공과대학교 신소재공학과

(2022년 10월 19일 접수, 2022년 11월 17일 수정, 2022년 11월 21일 채택)

### Morphology Control of Active Layers for Efficient Organic Indoor Photovoltaics

Yongchan Jang<sup>1,2</sup>, Soyoung Kim<sup>1,2</sup>, Jeonga Kim<sup>1,2</sup>, Jongbok Kim<sup>2,3</sup>, Wonho Lee<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Polymer Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology,  
Gumi, Gyeongbuk 39177, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology,  
Gumi, Gyeongbuk 39177, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology,  
Gumi, Gyeongbuk 39177, Republic of Korea

(Received October 19, 2022, Revised November 17, 2022; Accepted November 21, 2022)

**요약:** 실내광 유기태양전지는 기존 실리콘 태양전지 대비 광전변환효율이 높은 특성 때문에 저 전력의 전자기기나 사물 인터넷의 전력원으로 각광받고 있다. 본 논문은 높은 효율을 나타내는 실내광 유기태양전지를 만들기 위해 미디움-밴드갭을 지니는 광활성층(PBTT:PC<sub>71</sub>BM)을 합성하고 이의 모폴로지를 제어하고자 하였다. 그 중 하나의 방법으로 용액 첨가제의 종류와 양(0, 1.5, 3.0 vol% DIO, 0.5 vol% CN, 1.5 vol% DIO + 0.5 vol% CN)을 달리해 실험을 진행하여 유기태양전지에 대한 특성을 조사하였다. 그 결과 1.5 vol% DIO + 0.5 vol% CN의 이중 첨가제 시스템에서 최고 효율인 11.31%이 관찰되었다.

**Abstract:** Recently, organic semiconductor based indoor photovoltaics have gained attention since they exhibit excellent photovoltaic performance than that of conventional Si-based photovoltaics. In this study, we synthesize the medium bandgap polymer of PBTT and optimize PBTT:PC<sub>71</sub>BM blend films by introducing solvent additives. To this end, we select DIO and CN solvent additives and vary their contents from 0 to 3 vol%. As a result, we produce the highest power conversion efficiency of 11.31% under LED 1000 lx conditions with DIO (1.5 vol%) + CN (0.5 vol%)

**Keywords:** Organic photovoltaics, Indoor photovoltaics, Solvent additives, Control of morphologies

† Corresponding author: Wonho Lee (1holee@kumoh.ac.kr)

## 1. 서론

최근 스마트 디바이스, 센서의 발전이 이루어지면서 디바이스 간 커뮤니케이션이 가능한 사물 인터넷에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 디바이스는 전력원으로 배터리의 주기적인 충전, 유지 및 보수가 지속적으로 필요하기 때문에 실내에서 전력을 손쉽게 생성가능하고 이용 가능한 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다[1-4]. 그 중 하나로 유기 반도체를 광활성층으로 이용하는 유기태양전지가 각광받고 있는데, 그 이유는 손쉬운 유기물의 밴드갭 조절, 유연한 디바이스로의 적용, 용액 공정을 이용한 값 싼 공정 비용 등의 장점이 있기 때문이다[5]. 또한, 유기태양전지는 저조도 조건에서 실리콘 태양전지 대비 광전변환효율(power conversion efficiency, PCE)이 우수한 것으로 알려져 있다[6-7].

실내광은 발광 다이오드(LEDs), 형광 램프(FL), 할로겐(halogen) 램프 등이 있는데 상대적으로 1-sun AM 1.5G, 100 mW cm<sup>-2</sup>의 조도(irradiance) 세기에 비해 상당히 약한 빛을 지니고 있다(0.1-1 mW cm<sup>-2</sup>). 또한, 1-sun의 경우 가시광선 영역을 포함한 파장 범위가 매우 넓은 반면에, 실내광은 대부분의 빛이 가시광선 영역대를 이루고 있다[8-9]. 그러므로 유기 반도체를 이용한 유기태양전지의 경우 실외 보다는 실내에서 보다 더 적합하다고 볼 수 있다. 실내광 유기태양전지에 적합한 유기 반도체를 개발하기 위해서는 적외선 영역을 포함하는 밴드갭이 좁은 물질 보다는 가시광선 영역까지만 흡수를 하는 미디움-밴드갭 소재에 대한 연구가 필요하다. 하지만 최근 10년간 유기태양전지에 대한 연구는 1-sun 조건에서 최대의 효율을 이루기 위한 밴드갭이 좁은 물질에 초점을 맞추고 이루어졌으며, 실내광에 적합한 미디움-밴드갭 소재에 대한 관심은 비교적 덜한 상황이다[10-11].

유기태양전지의 효율을 최적화하기 위해서는 벌크 이종접합 광활성층의 모폴로지 제어가 필수적이며 여러 가지 방법들이 시도가 되었다. 특히 분자간 재배열(molecular arrangement), 분자 간 상호작용(intermolecular interaction)을 원활하게 해주기 위해 높은 끓는 점을 가지는 DIO(1,8-diiodooctane) 및 CN (1-chloronaphthalene)와 같은 용액 첨가제를 첨가하여 모폴로지를 제어하는 연구가 초창기부터 지금까지 1-sun에서 활발하게 진행되고 있다[12-13]. 하지만, 실내광 조건에서 이러한 용액 첨가제가 어떻게 효율에 영향을 미치는지에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 논문에서는 기존에 발표되었던 미디움-밴드갭을 지니는 benzothiadiazole 기반의 PTBT를 합성하여 실내광용 태양전지를 제작하였다[14]. 효율을 최적화하기

위해 용액 첨가제를 도입하여 광활성층의 모폴로지를 조절하고자 하였으며, 다른 종류의 용액 첨가제가 1-sun 및 실내광 조건에서 효율에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위해 용액 첨가제인 DIO 및 CN의 종류와 양을 0, 1.5, 3.0 vol% DIO, 0.5 vol% CN, 1.5 vol% DIO + 0.5 vol% CN 총 5개의 조건으로 달리하였다. 이렇게 제작된 유기태양전지의 PCE는 전류밀도-전압(current density-voltage, J-V)특성 곡선으로 분석하였으며, 광흡수도는 UV-Vis spectroscopy를 이용하여 측정하였다. 마지막으로 표면 및 모폴로지에 대한 특성은 atomic force microscope (AFM)을 이용하여 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. PTBT 합성

반응용기에 2,5-bis(trimethylstannyl)thiophene (0.200 g, 0.488 mmol), 4,7-dibromo-5,6-bis(octyloxy)-2,1,3-benzothiadiazole (0.269 g, 0.488 mmol), Pd<sub>2</sub>(dba)<sub>3</sub> (0.02 mmol), tri(o-tolyl)phosphine (0.04 mmol)을 정제된 chlorobenzene (15 mL)에 녹인 후 110°C에서 6시간 microwave reactor를 이용해 교반하였다. 반응 종료 후 상온에 충분히 식혀 둔 뒤 methanol (400 mL)에 침전시킨 후 여과해 생성물을 회수하였다. 회수한 생성물을 methanol, acetone, hexane, chloroform 순으로 Soxhlet 추출을 각각 12시간 진행하였으며, 최종적으로 얻어진 고체 생성물을 다시 메탄올에 침전시킨 후 상온에서 진공 건조하였다. 수율: 84%. Gel permeation chromatography (GPC)를 이용하여 분자량 측정을 진행하였으며 이때 유출 용매로 tetrahydrofuran (THF)를 사용하였고, 단 분산 polystyrene을 표준 분자량으로 사용하여 검정하였다.

### 2.2. 디바이스 제작 및 측정

ITO/PEDOT:PSS/active layer/PDINN/Ag 구조로 디바이스를 제작하였다. 먼저 ITO 기판을 acetone, deionized water (D.I. water), isopropyl alcohol 순으로 초음파 세척기를 이용하여 세정을 진행하였다. 세척된 ITO 기판을 100 °C의 진공오븐에 12시간동안 건조한 뒤 O<sub>2</sub> 플라즈마 처리를 20분 동안 진행하였다. 이렇게 표면처리가 완료된 ITO위에 PEDOT:PSS용액을 3000 rpm으로 40초간 스핀 코팅한 후 가열기 위에서 150 °C의 온도로 20분간 열처리를 하였다. Active layer는 PTBT:PC<sub>71</sub>BM = 1:2 중량 비율로 chloroform에 용해 시켰으며(PTBT 농도 기준 10 mg mL<sup>-1</sup>), 용액 첨가제의 효과를 보기 위해서 첨가제를 첨가하지 않은 것, DIO 1.5 vol%, DIO 3 vol%, CN 0.5 vol%, 마지막으로 DIO

1.5 vol% + CN 0.5 vol%로 총 5개의 서로 다른 blend를 제작하였다. 이 blend 용액을 2000 rpm으로 30초간 스핀 코팅한 후 methanol에 미리 녹여 둔  $1 \text{ mg mL}^{-1}$ 의 PDINN 용액을 3000 rpm으로 40초간 스핀 코팅하였으며 thermal evaporator를 이용하여  $1 \times 10^{-6}$  torr의 고진공 상태에서 열 증착(thermal evaporation)방식으로 Ag를 100 nm로 깔아주었다. 디바이스의 J-V 특성의 경우 AM 1.5G ( $100 \text{ mW cm}^{-2}$ , ORIEL LCS-100, Newport)와 Indoor LED 1000 lx ( $0.3277 \text{ mW cm}^{-2}$ , K3000 LED100, McScience) 조건에서 Keithley 2400 Source Meter를 통해 측정하였다.

### 2.3. 분광학 및 전기화학적 특성 측정

UV-Vis absorptions spectroscopy 측정을 위해 유리 기판 위에 광활성층 fresh 혹은 blend용액을 2000 rpm으로 60초간 스핀 코팅하여 박막을 만들었다. 측정은 UV-1900 (Shimadzu)으로 진행하였다. 전기화학적 특성 측정의 경우 electrochemical cyclic voltammetry (CV)를 사용했으며 WisEIS-1200Premium (Wizmac)을 통해 측정하였다. The highest occupied molecular orbital (HOMO) level의 경우 다음과 같은 식(1)으로 측정하였으며,

$$E_{\text{HOMO}} = (-4.80 + E_{1/2}(\text{ferrocene}) - E_{\text{onset}}) \text{ eV} \quad (1)$$

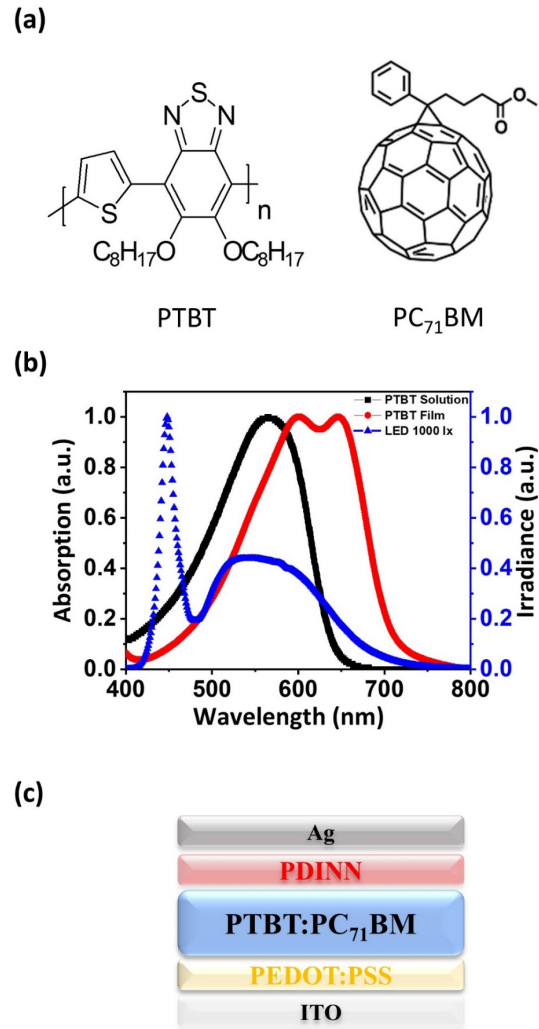
The lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) level의 경우 fresh 박막 흡수 피크의 onset point( $\lambda_{\text{onset}}^{\text{neat}}$ )를 통해 광학적 밴드갭을 구하여 더하였다.

### 2.4. 표면 및 모폴로지 특성

ITO/PEDOT:PSS/active layer 구조로 앞의 제작방법에 따라 박막을 제작한 뒤 여분의 용액 첨가제 제거를 위해 thermal evaporator를 이용해 고진공상태로 만들어 준 뒤 1시간 후 꺼냈다. AFM image를 보기위해 tapping mode를 이용하였으며 Park SYSTEMS model XE-100를 사용하여 관찰하였다.

## 3. 결과 및 토론

실내광 유기태양전지의 효율 향상을 위해서는 실내광에 적합한 광활성층을 개발하고 모폴로지 특성을 최적화하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 넓은 밴드갭을 지니는 PTBT를 합성하여 유기태양전지를 제작하였다(Fig. 1a). 합성된 PTBT는 수평균 분자량 (Mn)  $9.5 \text{ kg mol}^{-1}$  및 1.29의 좁은 분산도( $\text{Đ}$ )를 보였다(Table 1). PTBT가 실내광 유기태양전지에 적합한 물질인지 알아보기 위하여 UV-vis absorption spectroscopy



**Figure 1.** (a) Chemical structures, (b) UV-vis absorption spectra of PTBT in chlorobenzene solution and the corresponding neat film with irradiance of LED, and (c) device architecture.

를 측정하였다. Fig. 1b에서 볼 수 있듯이, PTBT 박막은 601, 646 nm의  $\lambda_{\text{max}}$ 를 지니면서 705 nm에서 흡수를 시작하였다. 본 연구에서 사용한 LED 1000 lx의 irradiance와 겹쳐서 그렸을 때 PTBT가 LED 광원의 500~700 nm광원을 효과적으로 흡수하며, 단파장 영역은 흡수하지 못하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 단파장을 주로 흡수하는 PC<sub>71</sub>BM을 사용하였으므로, 상보적 흡수에 의해서 LED 광원 전 영역을 효과적으로 흡수할 것임을 추측할 수 있다.

다음으로, PTBT와 PC<sub>71</sub>BM 광활성층을 지니는 유기태양전지 디바이스를 제작하였다. Fig. 1c에 디바이스 구조를 도시하였다. 유기태양전지의 효율 향상을 위해서는 광활성층내 효율적인 전하 생성과 적절한 전하 이동 통로를 제공하는 것이 중요한데, 이는 적절한 상

**Table 1.** Molecular weight, electrochemical, and optical properties of the polymer donor

Polymer donor	$M_n$ (kg mol <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	$\bar{D}$ ( $M_w/M_n$ ) <sup>a</sup>	HOMO (eV) <sup>b</sup>	LUMO (eV) <sup>c</sup>	$\lambda_{max}^{onset}$ (nm) <sup>d</sup>	$\lambda_{onset}^{onset}$ (nm) <sup>d</sup>	$E_g^{opt}$ (eV) <sup>e</sup>
PTBT	9.5	1.29	-5.30	-3.54	601, 646	705	1.76

<sup>a</sup> determined from GPC with polystyrene standard; <sup>b</sup> determined from CV; <sup>c</sup> LUMO = HOMO +  $E_g^{opt}$ ; <sup>d</sup> measured using polymer thin films on a glass plate by spin casting from a chlorobenzene solution at 2000 rpm for 60 s; <sup>e</sup> calculated from the absorption edge in films

분리를 가지는 모폴로지를 구현하는 것이 핵심이다. 모폴로지 조절을 위해서는 용액 첨가제를 첨가하는 것이 효과적이라도 알려져 있다[15]. 본 연구에서는 이를 위해 DIO 및 CN을 선택하였으며, 종류 및 양에 따라 태양전지의 효율이 1-sun과 실내광 조건(LED 광원)에서 어떻게 달라지는지 확인하고자 하였다. 또한, 광활성층의 두께가 유기태양전지의 효율에 크게 영향을 미치므로, 두께에 따른 변수를 제어하고자 모든 태양전지의 광활성층 용액의 농도를 일정하게 유지해 주었다. 자세한 조건은 실험방법에 서술하였다.

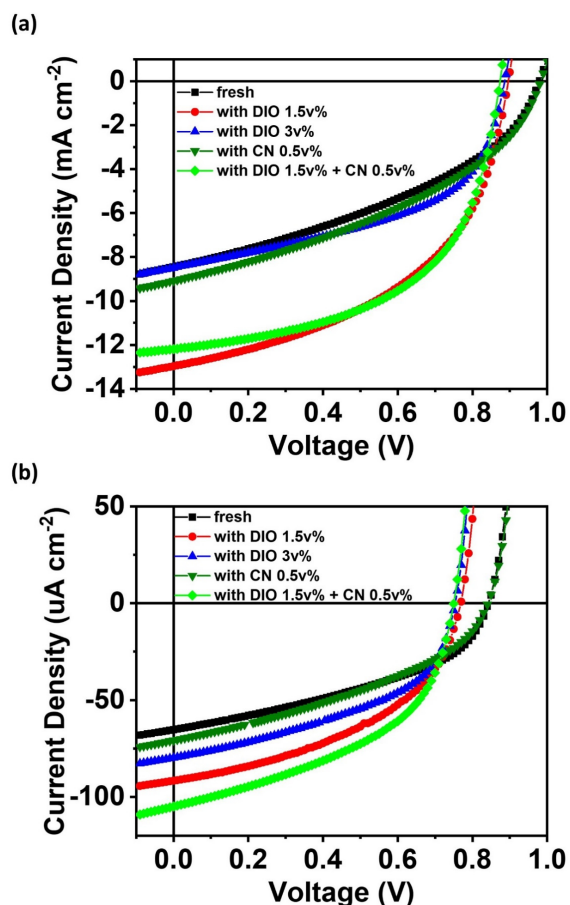
먼저 DIO의 경우 용매인 CB의 양 대비 1.5 vol% 및

3 vol%의 셀을 제작하였고, CN의 경우 0.5 vol%, 추가적으로 DIO 1.5 vol%와 CN 0.5 vol%를 섞은 이중 첨가제 셀을 제작하였다. 비교군으로 용액 첨가제를 넣지 않은 셀도 제작하였다. 편의상 vol%를 v%로 명명하겠다. Fig. 2에 최적화된 유기태양전지 디바이스의 J-V 곡선을 도시하였다. Fig. 2a는 1-sun조건에서, Fig. 2b는 LED 1000 lx에서 측정한 데이터이다. 각 그래프에서 추출된 태양전지 특성은 Table 2와 Table 3에 정리하였다. 먼저 1-sun조건에서 태양전지 효율 변화를 살펴보았을 때 DIO분율을 0 v%, 1.5 v%, 3 v% 순으로 늘려주자  $V_{oc}$  값의 경우 0.98, 0.90, 0.87 V로 감소하는 것으로 나타났다. 반면  $J_{sc}$ 와 FF의 경우 0 v%에서 1.5 v%로 늘려주면 각각 8.14 mA cm<sup>-2</sup>에서 12.66 mA cm<sup>-2</sup>로, 0.38에서 0.46으로 증가하는 것으로 나타났지만 3.0 v%에서는 9.26 mA cm<sup>-2</sup>와 0.45으로 감소하는 결과를 보였다. 이는 모폴로지의 상분리가 지나치게 일어나서 광 흡수, 전하의 이동 및 분리가 효과적으로 일어나지 않았기 때문이다[16-18]. 그 결과 DIO 1.5 v%에서 5.31%의 최고의 PCE를 보였다(Table 2). CN의 경우 0.5 v%를 첨가하였을 때 용액 첨가제를 첨가하지 않은 0 v%와 PCE가 큰 차이가 없는 결과를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로, DIO 1.5 v% + CN 0.5 v%의 이중 첨가제 시스템을 도입했을 때,  $V_{oc}$ 와  $J_{sc}$ 는 0.87 V, 12.36 mA cm<sup>-2</sup>로 DIO 1.5 v% 데이터보다 근소한 차이로 낮게 측정되었지만, FF의 경우 0.50으로 높게 측정되었다. 그 결과 PCE는 5.40%로 가장 우수한 태양전지 특성을 보였다. 이는 이중 첨가제 시스템에서 효율적인 전하의 추출이 일어났음을 추측할 수 있다.

다음으로, LED 1000 lx의 실내광 조건에서 유기태양전지 디바이스를 측정하였다. 일반적으로  $V_{oc}$  및  $J_{sc}$ 는 입사한 빛의 세기에 선형적으로 비례해서 감소하는 것으로 알려져 있다[19]. 특히 실내광 조건에  $V_{oc}$  값이 감소하는 이유는 식(2)로 설명이 가능하다.

$$\Delta V \approx \frac{nKT}{q} \ln \frac{P_{sun}\theta}{P_{room}} \quad (2)$$

$\Delta V$ ( $V_{oc}$ 의 감소폭)은  $P_{sun}$ (1-sun의 빛 세기)와  $\theta$ (적외선 영역을 제외한 빛의 비율)의 곱과  $P_{room}$ (실내광 조건



**Figure 2.** Photovoltaic performance of devices (a) under AM 1.5G and (b) LED 1000 lx.

**Table 2.** Photovoltaic properties under AM 1.5G.

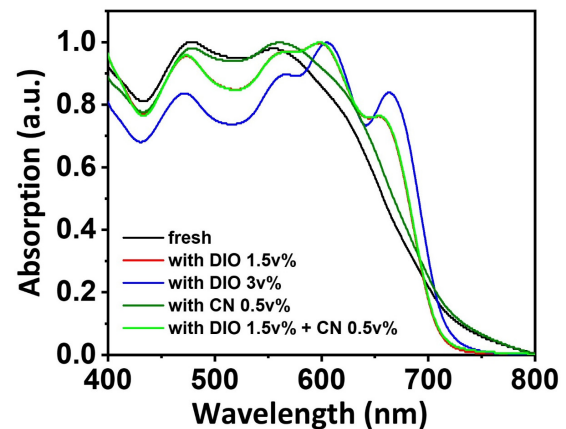
Active layer	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA cm <sup>-2</sup> )	FF	PCE (%)
PTBT/PC <sub>71</sub> BM fresh	0.98±0.01	8.14±0.30	0.38±0.01	3.05±0.17
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with DIO 1.5v %	0.90±0.01	12.66±1.17	0.46±0.04	5.31±0.61
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with DIO 3 v%	0.87±0.02	9.26±0.65	0.45±0.04	3.62±0.33
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with CN 0.5 v%	0.98±0.01	8.91±0.27	0.39±0.01	3.43±0.10
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with DIO 1.5 v% + CN 0.5 v%	0.87±0.00	12.36±0.22	0.50±0.03	5.40±0.03

**Table 3.** Photovoltaic properties under LED 1000 lx illuminations.

Active layer	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (μA cm <sup>-2</sup> )	FF	PCE (%)
PTBT/PC <sub>71</sub> BM fresh	0.84	64.74	0.42	6.92
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with DIO 1.5 v%	0.77	91.60	0.46	9.88
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with DIO 3 v%	0.75	79.76	0.47	8.54
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with CN 0.5 v%	0.84	70.82	0.38	6.96
PTBT/PC <sub>71</sub> BM with DIO 1.5 v% + CN 0.5 v%	0.75	104.39	0.47	11.31

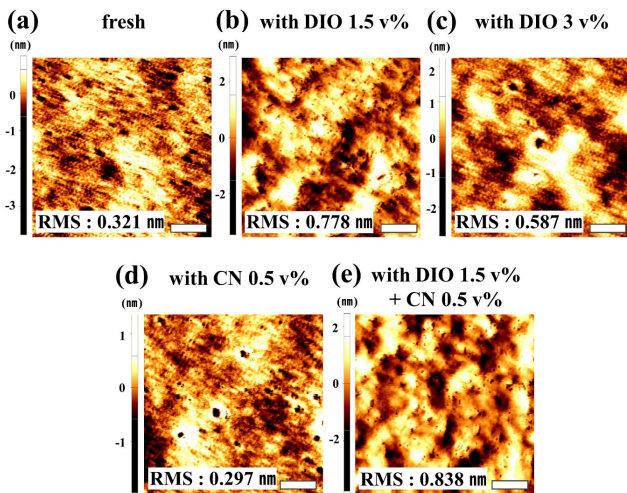
에서 빛 세기)에 영향을 받게 되는데 실내광의 조도가 감소할수록  $\Delta V$ 가 커지게 된다[2]. Fig. 2b 및 Table 3에서 볼 수 있듯이, 1-sun에서 보다  $V_{oc}$  값이 DIO 0 v%, 1.5 v%, 3 v%, CN 0.5 v%, DIO 1.5 v% + CN 0.5 v% 순으로 0.98 V에서 0.84 V, 0.90 V에서 0.77 V, 0.87 V에서 0.75 V, 0.98 V에서 0.84 V, 0.87 V에서 0.75V로 감소하였으며, 그 경향은 0.12-0.14 V로 비슷한 것을 알 수 있다. 즉, LED 1000 lx에서  $V_{oc}$  감소 경향은 첨가제의 종류와 양은 크게 상관없음을 알 수 있다. 그러나  $J_{sc}$ 의 경우 DIO 0 v%, 1.5 v%, 3 v%, CN 0.5 v%에서는 64.74, 91.60, 79.76, 70.82  $\mu\text{A cm}^{-2}$ 로 1-sun과 비교해 감소하는 경향이 비슷한 것을 알 수 있는 반면, DIO 1.5 v% + CN 0.5 v% 이중 첨가제 시스템에서는 104.39  $\mu\text{A cm}^{-2}$ 로 감소폭이 확연하게 줄어든 것을 알 수 있다. 그 결과, 실내광 조건에서 DIO 1.5 v% + CN 0.5 v% 이중 첨가제 시스템에서 PCE가 11.31%로, 단일 첨가제 DIO 1.5 v% (PCE: 9.88%)보다 훨씬 우수한 특성을 보였다.

용액 첨가제의 종류 및 양에 따른 효율 변화 양상을 설명하기 위하여 첫 번째로 blend film의 UV-Vis absorption spectroscopy를 측정하였다. Fig. 3은 용액 첨가제의 종류와 양에 따른 유기태양전지의 film상태에서의 광흡수도를 보여준다. DIO를 첨가할 경우 600-700 nm 부근의 파장영역이 오른쪽으로 red-shift하는 것이 관찰되었다. 이는 고분자 도너 사슬의 결정성이 증가하였기 때문이다[20]. 이에 반해, CN의 DIO 대비 큰 변화가 보이지 않았으며, DIO 1.5 v% + CN 0.5 v%의 경우 DIO 1.5 v%의 광 흡수도와 비슷한 경향을 보였다. 결과적으로 1-sun 및 LED 1000 lx에서 DIO 1.5 v% + CN

**Figure 3.** Normalized UV-vis absorption spectra of the PTBT:PC<sub>71</sub>BM blend film processed from chlorobenzene solutions.

0.5 v%가 DIO 1.5 v%보다 PCE가 높은 이유는 광학적 인 특성이 아니라는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 용액 첨가제의 종류와 양에 따른 박막 표면 AFM image이다. 먼저 DIO함량에 따른 image를 살펴 보았을 때 함량을 증가시킬수록 상분리 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 blend film의 흡수 그래프 경향과 일치한다. 즉, DIO가 첨가되면 고분자 사슬의 결정화도가 증가하면서 상분리 현상이 유도된 것으로 추측할 수 있다. 반면에, CN 0.5 v%의 경우 아무것도 넣지 않은 것과 비슷한 이미지를 보이고 있으며, 이는 CN이 고분자의 결정화도에 크게 영향을 미치지 않기



**Figure 4.** AFM topographic images of the PTBT:PC<sub>71</sub>BM blend films with different solvent additives. Scale bars are 200 nm.

때문이다[21,22]. 따라서, DIO 1.5 v% + CN 0.5 v%에서는 적절하게 상분리가 일어나면서 엑시톤 분리와 전하수집에 가장 유리한 모폴로지를 보이는 것을 관찰할 수 있다. 광활성층 모폴로지 최적화의 경우 이중 첨가제를 사용한 경우가 단일 첨가제(DIO 1.5 v%)사용한 것에 비해 1-sun에서 광전변환효율은 큰 차이가 없었지만(5.31%에서 5.4%)로 실내광 조건에서는 크게 달라진다는 것을 확인할 수 있다(9.88%에서 11.31%). 기존 보고에 의하면 실내광 조건에서는 전하의 포획에 의한 재결합 현상(trap-assisted charge recombination)이 1-sun 조건과 비교했을 때 효율에 영향을 매우 크게 미치는 것으로 알려져 있다[23]. 따라서, 본 연구의 이중 첨가제를 사용한 전략이 실내광 조건에서 전하의 포획에 의한 재결합을 현저히 감소시켜  $J_{sc}$ 를 향상시키는 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 간단한 유기물 구조에서 높은 성능을 나타내는 실내광용 태양전지 제작을 위한 하나의 방법을 제시하였다. 먼저 PTBT, PC<sub>71</sub>BM기반의 유기 광활성층의 모폴로지 조절을 위해 서로 다른 두가지의 용액 첨가제 DIO, CN을 첨가하였다. 첫 번째로 DIO의 양을 0v%, 1.5 v%, 3 v%순으로 높여주자 1.5 v%의 첨가제를 첨가한 blend에서 적절한 광 흡수와 상분리 현상이 일어난다는 것을 확인하였다. 두 번째로 CN 0.5v%을 넣어준 경우 첨가제를 첨가하지 않은 것과 별다른 변화가 없는 것을 확인하였다. 마지막으로 이 두가지를 섞은 DIO 1.5 v% + CN 0.5 v%에서 DIO 1.5

v% blend에서 가지는 적절한 흡수와 동시에 DIO 1.5 v% blend 보다 균일한 분포의 상분리 형상을 가지는 것을 확인하였다. 결과적으로 두 가지의 첨가제를 섞은 blend cell에서 가장 높은 효율을 보였으며 LED 1000 lx에서도 높은 효율을 보였다.

#### 감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었다(202001630001).

#### References

1. A. Tournebize, P. Bussiere, P. Wong-Wah-Chung, S. Therias, A. Rivaton, J. Gardette, S. Beaupre and M. Leclerc, *Advanced Energy Materials*, **3**, 478 (2013).
2. H. Yin, J. K. W. Ho, S. H. Cheung, R. J. Yan, K. L. Chiu, X. Hao and S. K. So, *Journal of Materials Chemistry. A*, **6**, 9111 (2018).
3. H. S. Ryu, S. Y. Park, T. H. Lee, J. Y. Kim and H. Y. Woo, *Nanoscale*, **12**, 5792 (2020).
4. X. Xu, W. Liu, X. Luo, H. Chen, Q. Wei, J. Yuan and Y. Zou, *ChemSusChem*, **14**, 3428 (2021).
5. C. J. Brabec, N. S. Sariciftci and J. C. Hummelen, *Advanced Functional Materials*, **11**, 15 (2001).
6. M. A. Saeed, S. H. Kim, H. Kim, J. Liang, H. Y. Woo, T. G. Kim, H. Yan and J. W. Shim, *Advanced Energy Materials*, **11**, 2003103 (2021).
7. J. Kim, M. A. Saeed, S. H. Kim, D. Lee, Y. Jang, J. S. Park, D. Lee, C. Lee, B. J. Kim, H. Y. Woo, J. W. Shim and W. Lee, *Macromolecular Rapid Communications.*, **43**, 2200279 (2022).
8. F. C. Chen, *Advanced Optical Materials*, **7**, 1800662 (2018).
9. S. Kim, M. Jahandar, J. H. Jeong and D. C. Lim, *Current Alternative Energy*, **2**, 3 (2018).
10. E. Bundgaard and F. C. Krebs, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **91**, 954 (2007).
11. G. Li, R. Zhu and Y. Yang, *Nature Photonics*, **6**, 153 (2012).
12. C. H. Y. Ho, Q. Dong, H. Yin, W. W. K. Leung, Q. Yang, H. K. H. Lee, S. W. Tsang and S. K. So, *Advanced Materials Interfaces*, **2**, 1500166 (2015).
13. E. F. Manley, J. Strzalka, T. J. Fauvell, T. J. Marks and L. X. Chen, *Advanced Energy Materials*, **8**, 1800611 (2018).
14. W. Lee, H. Choi, S. Hwang, J. Y. Kim and H. Y. Woo, *Chemistry A European Journal*, **18**, 2551 (2012).
15. S. Kwon, H. Kang, J. Lee, J. Lee, S. Hong, H.

- Kim and K. Lee, *Advanced Energy Materials*, **7**, 1601496 (2016).
16. C. H. Y. Ho, Q. Dong, H. Yin, W. W. K. Leung, Q. Yang, H. K. H. Lee, S. W. Tsang and S. K. So, *Advanced Materials Interfaces*, **2**, 1500166 (2015).
17. N. Jain, N. Chandrasekaran, A. Sadhanala, R. H. Friend, C. R. McNeill and D. Kabra, *Journal of Materials Chemistry. A*, **5**, 24749 (2017).
18. C. McDowell, M. Abdelsamie, M. F. Toney and G. C. Bazan, *Advanced Materials*, **30**, 1707114 (2018).
19. H. K. H. Lee, Z. Li, J. R. Durrant and W. C. Tsoi, *Applied Physics Letters*, **108**, 253301 (2016).
20. Y. Gu, C. Wang and T. P. Russell, *Advanced Energy Materials*, **2**, 683 (2012).
21. C. Liu, X. Hu, C. Zhong, M. Huang, K. Wang, Z. Zhang, X. Gong, Y. Cao and A. J. Heeger, *Nanoscale*, **6**, 14297 (2014).
22. M. Cui, A. Lv and Z. Ma, *ChemPhysChem*, **23**, 1 (2022).
23. Y. Cui, Y. Wang, J. Bergqvist, H. Yao, Y. Xu, B. Gao, C. Yang, S. Zhang, O. Inganäs, F. Gao and J. Hou, *Nature Energy*, **4**, 768 (2019).