

## 서로 다른 위치 규칙성을 가지는 두 개의 Poly(3-hexylthiophene) 공액 고분자를 기반으로 한 고분자 복합 박막의 구조와 전기적 특성에 대한 연구

정강훈<sup>\*§</sup> · Nann Aye Mya Mya Phu<sup>\*§</sup> · 박래수<sup>\*\*</sup> · 윤정우<sup>\*\*\*</sup> · 고영운<sup>\*†</sup> · 장민철<sup>\*†</sup>

## Study on the Morphologies and Electrical Properties in Polymer Blend Thin-Films Based on Two Poly(3-hexylthiophene) Conjugated Polymers with Different Regio-regularities

Ganghoon Jeong<sup>\*§</sup>, Nann Aye Mya Mya Phu<sup>\*§</sup>, Rae-Su Park<sup>\*\*</sup>,  
Jeong Woo Yun<sup>\*\*\*</sup>, Yeongun Ko<sup>\*†</sup>, Mincheol Chang<sup>\*†</sup>

**ABSTRACT:** Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) is a conjugated polymer that is highly soluble in organic solvents and is readily available. However, its electrical properties as an active channel in electronic devices are not enough for practical applications, necessitating further improvement in the properties. In this study, we demonstrate that the blending of two P3HT polymers (i.e., regio-regular (RR) P3HT and regio-random (RRa) P3HT) with different regio-regularities can significantly improve charge transport characteristics of the blend films. The morphological and electrical properties of the blend films were systematically investigated by varying the ratio between two P3HT polymers. Atomic force microscopy (AFM), X-ray diffraction (XRD), and UV-visible absorption spectroscopy (UV-vis) were employed to evaluate the morphological and optoelectronic properties of the blend films. The crystallinity of the blend films increased with increasing the content of RRa-P3HT to 20 wt% and gradually decreased as the content increased to 80%. Consistently, the highest charge carrier mobility was obtained from the blend films containing 20 wt% RRa-P3HT, which value was measured to be  $0.029 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . The values gradually decreased to  $0.0007 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  with increasing the content of RRa-P3HT to 80 wt%.

**초 록:** Poly(3-hexylthiophene) (P3HT)는 유기 용매에서 높은 용해도를 가지고 있으면서 상대적으로 쉽게 구할 수 있는 공액 고분자 중 하나이다. 그러나, 전자소자의 활성 소재로써 전기적 특성은 실제로 응용하기에는 부족하므로 추가 개선이 필요하다. 본 연구에서는, 서로 다른 위치 규칙성 (regio-regularity)을 가지는 두 P3HT 고분자 (즉, regio-regular (RR) P3HT 및 regio-random (RRa) P3HT)를 혼합하여 혼합 박막의 전하 전달 특성을 크게 향상시킬 수 있음을 보여준다. 두 P3HT 고분자 간 비율을 변화시킴으로써 혼합 박막의 구조적 및 전기적 특성을 체계적으로 조사하였으며, 원자 힘 현미경(AFM), X선 회절(XRD) 및 UV-vis 흡수분광법을 사용하여 혼합 필름의 구조 및 광전자적 특성을 평가하였다. 혼합 박막의 결정성은 RRa-P3HT 함량이 20 wt%로 증가함에 따라 증가하였으며, 이후 80%까지 증가함에 따라 감소하였다. 전하 이동도의 경향성 또한 이와 같았으며, 20 wt%의 RRa-P3HT를 포함하는 혼합 박막의 전하 이동도는 가장 높은  $0.029 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 측정되었고 함량이 80 wt%까지 증가함에 따라  $0.0007 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 감소하였다.

Received 25 August 2023, received in revised form 25 September 2023, accepted 10 October 2023

<sup>\*</sup>Department of Polymer Engineering, Graduate School, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Chemical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

<sup>\*\*\*</sup>School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

<sup>†</sup>Corresponding authors (E-mail: yeongunko@jnu.ac.kr, mchang35@jnu.ac.kr)

<sup>§</sup>Co-first author

**Key Words:** 공액 고분자(Conjugated polymer), Poly(3-hexylthiophene), 위치 규칙성(Regio-regularity), 유기 전계효과 트랜지스터(Organic field-effect transistor), 자기조립(Self-assembly)

## 1. 서 론

공액 고분자(conjugated polymer)는 유기물 반도체의 일종으로, 무기물 반도체에서 얻기 어려운 다양한 장점을 가지고 있다[1]. 이러한 공액 고분자는 합성에 따라 물성을 조절할 수 있으며, 고가의 설비나 고온 공정 없이도 상온에서 박막을 형성하는 등 비교적 낮은 비용으로 공정을 진행할 수 있다[2]. 이러한 이점과 소재의 특성으로 인해 공액 고분자는 전자 소자에 유연성을 부여하고 경량화 및 대면적화를 가능하게 한다[1]. Poly(3-hexylthiophene)(P3HT)는 p-type 반도체인 공액 고분자로, 상업적으로 생산되어 비교적 쉽게 구할 수 있으며, 유기 용매에 대해 높은 용해도를 가지고 있어 용액 공정에 유리하다[3]. 또한, P3HT는 유기 전계효과 트랜지스터(organic field-effect transistor, OFET)와 같은 전자 소자에 적용할 때 적절한 성능을 나타낸다[4]. 그럼에도 불구하고, OFET의 상용화를 이루기 위해서는 P3HT의 전기적 성능 개선이 필요하다.

본 연구에서는 P3HT 소재의 전기적 성능을 향상시키기 위해 위치 규칙성(regio-regularity)이 우수한 P3HT와 낮은 위치 규칙성을 가진 P3HT의 혼합을 통한 P3HT 혼합 박막의 결정성 향상법을 제안한다. 고분자의 단위체는 단위체 간 결합하는 방향에 따라 Head-to-Tail 혹은 Head-to-Head 방식으로 결합할 수 있다[5]. P3HT의 경우, 단위체 간 결합의 대다수가 Head-to-Tail 방식으로 이루어져 알킬 측쇄의 배열이 규칙적일 경우 regio-regular 타입의 P3HT (RR-P3HT)로 분류되고, 결합 방식이 무작위로 발생하여 알킬 측쇄의 배열이 규칙적이지 않다면 regio-random 타입의 P3HT (RRa-P3HT)로 분류된다[5]. 일반적으로, 전자 소자에 적용되는 P3HT는 RR-P3HT이며, RRa-P3HT는 낮은 결정성으로 인해 전기적 특성이 좋지 않아 전자 소자에 적용이 어렵다[5]. 두 고분자를 혼합한 경우, 순수한 RR-P3HT 박막보다 더 향상된 자기조립 현상이 나타났으며, 전하 캐리어의 이동도가 향상되었다. 이를 체계적으로 분석하기 위해, 두 P3HT 고분자 간의 비율 변화를 통해 혼합 박막의 전기적 특성을 조사하였으며, 원자 힘 현미경(AFM), X선 회절(XRD) 및 UV-vis 흡수분광법을 사용하여 혼합 필름의 형태학적 및 광전 자적 특성을 평가하였다.

## 2. 이론 전개

### 2.1 재료

본 연구에서는 RR-P3HT(위치 규칙성 96% 이상, 평균 분

자량( $M_w$ )  $\approx$  69 kDa) 및 RRa-P3HT(위치 규칙성  $\approx$  58%, 평균 분자량  $\approx$  60-95 kDa)을 사용하여 샘플을 제작하였다. 이때, 위치 규칙성은 단위체 간 결합이 Head-to-Tail 방식인 결합의 비율로 정의된다[6]. 이러한 물질들은 Rieke Metals Inc.에서 구매하여 별도의 정제없이 사용하였다. 클로로포름(anhydrous 등급, 순도 99% 이상)은 Sigma-Aldrich에서 구입하여 사용하였다.

### 2.2 혼합 고분자 박막 제조 및 OFET 소자 제작

혼합 박막을 제조하기 위하여 용액 공정을 사용하였으며, 두 고분자를 각각 5 mg 당 클로로포름 용매 1 ml의 비율로 55°C에서 최소 30분 이상 교반하여 용액을 제조하였다. 그 후, 두 용액을 상온으로 냉각하여 RR-P3HT 및 RRa-P3HT의 비율이 각각 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80이 되도록 혼합하였다. 혼합된 용액은 2000 rpm, 1분 조건으로 유리 및 트랜지스터 소자용 기판 위에 스핀 코팅되었다.

유리 기판은  $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$  크기로 절단한 슬라이드 글라스를 아세톤을 이용한 초음파 세척 및 아세톤, 메탄올, 이소프로필 알코올을 통한 행균 과정을 거쳐 UV-ozone 처리 장치를 통해 완전히 세척하여 준비하였다. 트랜지스터 소자용 기판은 기존 보고된 방식을 따라 제조되었으며[7], 전극은 하나의 기판에 3 쌍의 전극이 1 mm의 간격을 두고 배치되도록 열증착 되었다. 전극은  $2 \times 5 \text{ mm}^2$  크기로, 한 쌍의 전극 사이에 너비 2 mm, 길이 50  $\mu\text{m}$ 의 채널이 형성되도록 배치되었다. 기판을 전극이 손상되지 않도록 약  $1.4 \times 1.4 \text{ cm}^2$  크기로 자른 후 유리 기판과 동일한 방식으로 세척하였다. 자른 후 유리 기판과 동일한 방식으로 세척하였다.

박막을 증착한 기판은 측정 전 안정화를 위해 아르곤 가스 조성의 글러브 박스 안에서 130°C에서 30분간 열처리 과정을 거친 뒤 상온으로 다시 냉각하여 전기적 특성을 평가하였다.

### 2.3 전기적 특성 평가

트랜지스터 소자용 기판에 코팅된 고분자 혼합 박막의 전기적 특성을 평가하기 위해 반도체 분석장비 Keithley 4200-SCS를 사용하였다. 평가를 위해 일정한 드레인 전압( $V_{DS}$ ) 조건 하에서 게이트 전압( $V_{GS}$ )의 변화에 따른 드레인 전류( $I_{DS}$ )를 측정하여 전달 곡선(Transfer curve)을 얻었다.  $V_{DS}$ 의 크기는 -80 V이고,  $V_{GS}$ 는 80 V에서 -80 V까지의 범위로 주어졌으므로 전달 곡선은 포화 영역(Saturation region)에 해당하며, 전달 곡선 상의  $I_{DS}$ 와  $V_{GS}$ 의 관계는 아래의 식으로 표현된다[8].

$$I_{DS} = \left(\frac{W}{2L}\right) \mu_{sat} C_s (V_{GS} - V_T)^2 \quad (1)$$

$$\mu_{sat} = \left(\frac{\Delta(I_{DS}^{1/2})}{\Delta(V_{GS})}\right)^2 \frac{2L}{WC_s} \quad (2)$$

여기서  $W$ 는 채널에서의 전극의 너비,  $L$ 은 채널에서 전극과 전극 사이의 간격,  $C_s$ 는 트랜지스터 소자에 적용된 유전층의 유전율,  $V_T$ 는 해당 소자의 문턱 전압(Threshold voltage)을 나타낸다. 마지막으로,  $\mu_{sat}$ 는 포화 영역에서 측정된 소자의 전하 캐리어 이동도를 나타낸다[8].

## 2.4 광학적 특성 및 형태학적 특성 평가

제조된 박막의 광학적 특성과 형태학적 특성을 분석하기 위해, 혼합 박막이 코팅된 유리 기판을 이용하여 UV-vis 흡수 스펙트럼 분석, XRD 분석, AFM 분석을 실시하였다. UV-vis 흡수 스펙트럼 분석은 Thermo Scientific™의 Evolution 201/220 UV-Vis Spectrophotometer를 사용하여 수행되었다. 분석을 위해 박막에 조사된 빛의 파장 범위는 300~900 nm이며, 파장에 따른 박막의 빛 흡수율의 크기를 측정하였다. P3HT 박막에 대해 자외선-가시광선 범위의 빛이 투과되었을 때, 550~620 nm 범위의 파장대를 가지는 빛의 흡수율을 계산하여 박막내 P3HT 분자 간 및 분자 내 상호작용의 크기를 비교할 수 있다[9,10].

박막 내부의 형태학적인 특성 및 평균 결정성의 확인을 위해 AFM 및 XRD 측정을 수행하였다. AFM은 시료 표면을 나노 스케일로 측정할 수 있는 장비로, cantilever 끝에 부착된 탐침을 시료 표면에 근접시켜 발생하는 상호작용을 측정하여 시료 표면의 높이와 특성을 이미지화 할 수 있다[11]. XRD는 X-ray를 특정한 각도로 결정성 물질에 입사할 때 발생하는 X-ray의 회절 현상을 분석하는 방법으로, 박막의 평균 결정 크기 및 D-spacing을 측정하여 결정성을 평가할 수 있다[12].

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 RRa-P3HT 혼합에 의한 전기적 특성 변화 및 AFM 이미지 분석

RR-P3HT 및 RRa-P3HT의 혼합 비율에 따른 전달 곡선 및 전하 캐리어 이동도를 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 1 및 2에 나타내었다. 순수한 RR-P3HT로 구성된 박막을 적용한 OFET 소자의 전하 캐리어 이동도는 평균  $0.020 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 측정되었다. RRa-P3HT가 혼합된 박막을 적용한 OFET 소자는 20% 혼합된 경우  $0.029 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 가장 높은 수치를 보였으며, 그 이후 40%, 60%, 80%의 RRa-P3HT가 혼합된 소자는 각각 0.010, 0.002, 0.0007  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 전하 캐리어 이동도를 나타냈다. RRa-P3HT의 전기적 특성이 RR-P3HT에 비해

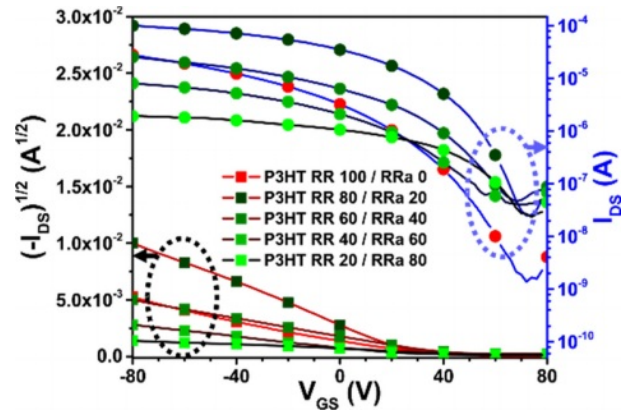


Fig. 1. Transfer curves of OFETs based on RR-P3HT/RRa-P3HT blend films with different ratios of RR-P3HT and RRa-P3HT

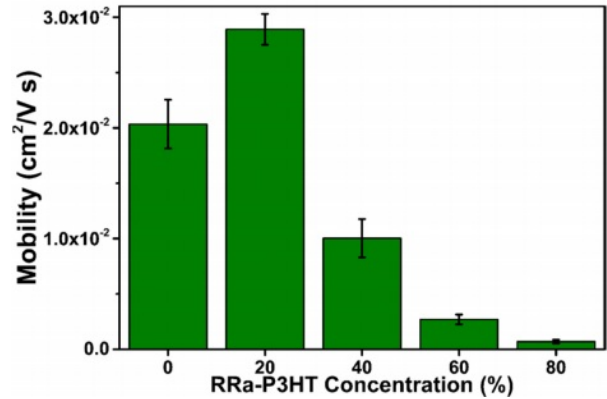


Fig. 2. Charge carrier mobility in RR-P3HT/RRa-P3HT blend films with different RRa-P3HT concentrations

현저히 떨어진다는 것을 고려하면, 전하 캐리어의 향상은 두 고분자의 혼합으로 인한 복합 박막의 결정성 변화에 기인할 수 있다[5,7]. 특히, RR-P3HT의 자기조립이 향상되어 박막의 결정성이 증가하고 전하 캐리어 이동도가 향상될 수 있으므로[7], RRa-P3HT가 20% 혼합되었을 때 전하 캐리어 이동도가 향상되는 현상은 RR-P3HT의 자기조립 현상으로 인한 박막의 결정성 향상에서 기인한 것으로 추측하였다.

박막의 결정성 향상에 따른 박막의 형태학적인 특성을 분석하기 위해 혼합 박막에 대한 AFM 분석을 수행하였다. Fig. 3은 RRa-P3HT의 혼합 비율에 따른 혼합 박막의 AFM Topology 및 Phase 이미지를 나타낸다. RRa-P3HT가 혼합됨에 따라 1차원 구조의 응집체가 혼합 박막 내부에 형성되었으며, 특히 RRa-P3HT가 40% 이상 혼합되었을 때 뚜렷한 1차원 응집체의 모습을 확인할 수 있었다. 이러한 응집체는 RR-P3HT의 분자간 및 분자 내 상호작용의 향상으로 인한 자기조립 현상으로 인해 형성되며, 박막의 결정성을 증가시키는 것으로 알려져 있다[7,13,14]. 또한, RRa-P3HT



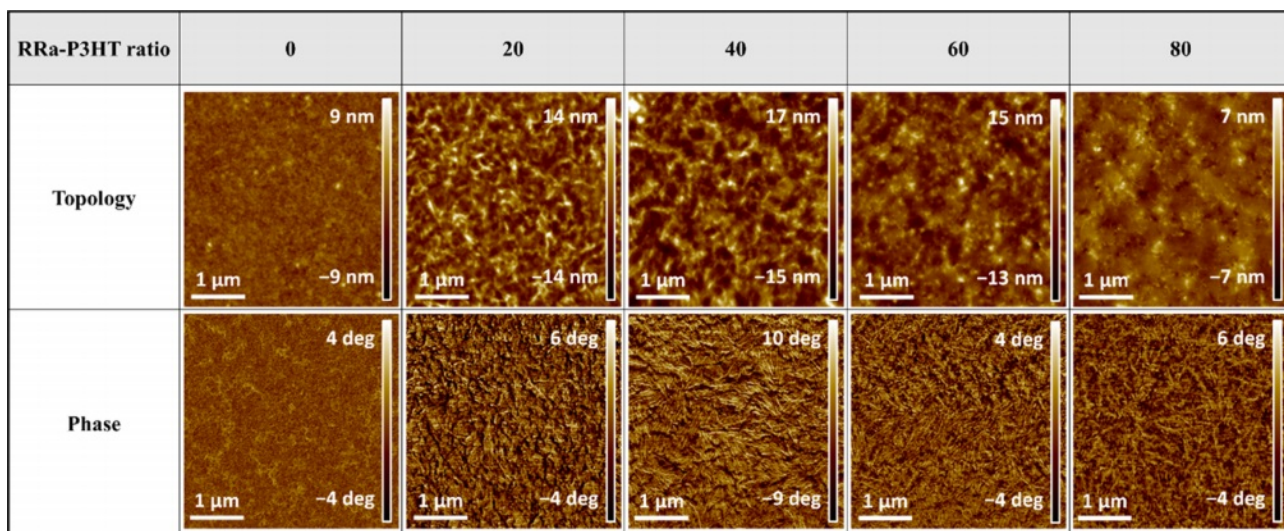


Fig. 3. Topology and Phase AFM images of RR-P3HT/RRa-P3HT blend films with various RRa-P3HT concentrations

가 80% 혼합된 박막에서는 1차원 응집체의 수가 줄어든 것으로 나타나며, 이는 1차원 응집체를 형성하는 RR-P3HT의 함량이 감소했기 때문이다. 한편, AFM 이미지에서 고분자 혼합 박막에서 관찰할 수 있는 상 분리 현상은 뚜렷하지 않았다[7]. 이는 RR-P3HT와 RRa-P3HT의 상호작용으로 인해 1차원 응집체를 형성하지 않은 RR-P3HT와 RRa-P3HT의 혼합이 분자 규모로 잘 이루어졌다는 것을 보여준다[7,15]. 1차원 응집체 형성은 RRa-P3HT의 혼합에 의해 발생하는 입체 장애로 인해 촉진되는 RR-P3HT의 자기조립 현상이 원인이다. RRa-P3HT의 낮은 결정성은 불규칙적인 알킬 측쇄의 배열로 인한 고분자 사슬 간 상호작용의 억제 현상에 기인하며, 이로 인해 RRa-P3HT 사슬과 RR-P3HT 사슬 간 상호작용에 비해 RR-P3HT의 분자 간 상호작용이 상대적으로 강화된다[16]. 결과적으로, RRa-P3HT의 혼합으로 인해 RR-P3HT의 자기조립이 촉진되어 1차원 응집체가 형성될 수 있다.

### 3.2 혼합 박막의 광학적 특성 및 결정성 분석

혼합 박막의 광학적 특성 및 결정성 변화를 평가하기 위해 UV-vis 흡수 스펙트럼 분석 및 XRD 스펙트럼 분석을 실시하였다. Fig. 4는 RRa-P3HT의 혼합 비율에 따른 UV-vis 흡수 스펙트럼의 정규화된 그래프이다. RRa-P3HT가 40% 혼합되었을 때 낮은 에너지 영역대에 해당하는 약 608 nm 파장에서 흡수율이 가장 크게 증가한 것을 확인할 수 있었다. Spano 모델에 따르면, 순수한 P3HT의 흡수 스펙트럼에서 낮은 에너지 영역대의 흡수 피크는 약하게 상호 작용하는 H-type의 응집체로 구성된 결정체에서 발생한다고 알려져 있다[7]. 이에 따라, 보고된 방식을 사용하여 실험적으로 얻어진 UV-Vis 흡수 스펙트럼에 대한 Gaussian 피크 피팅을 수행하여 free exciton bandwidth을 얻고, 이를 Fig. 5

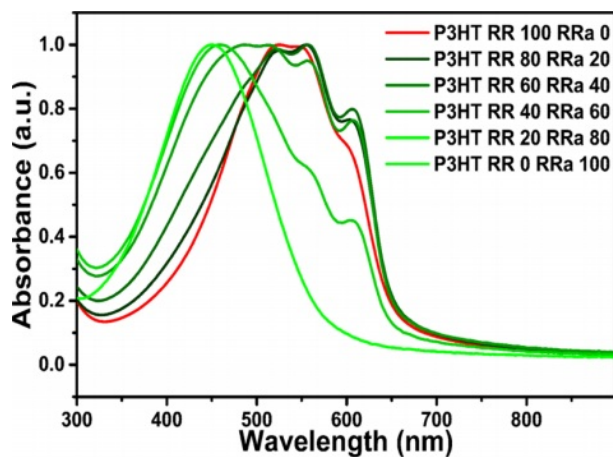


Fig. 4. UV-vis absorbance spectra of RR-P3HT/RRa-P3HT blend films with various ratios of RR- and RRa-P3HT

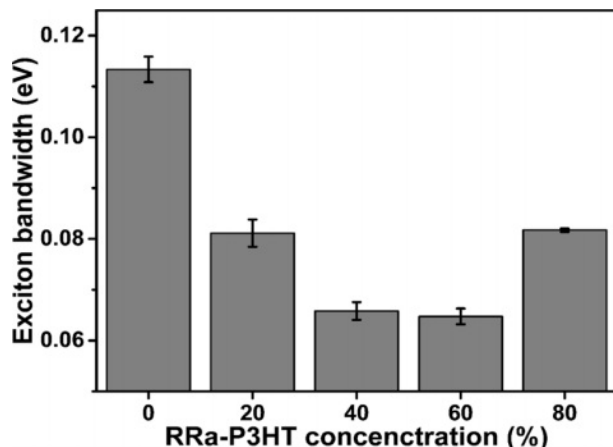


Fig. 5. Exciton bandwidth variation over RRa-P3HT concentration in RR-P3HT/RRa-P3HT blend films

에 나타냈다[7]. Free exciton bandwidth 수치는 순수한 RR-P3HT 박막에서 0.1133 eV였으며, RRa-P3HT 함량이 20, 40, 60, 80%로 증가함에 따라 각각 0.0811, 0.0658, 0.0647 및 0.0817 eV 순으로 계산되었다. Free exciton bandwidth 수치의 감소는 RR-P3HT 분자 내 상호작용의 강화를 의미하므로[7], RRa-P3HT가 60% 혼합될 때까지 RR-P3HT 분자 내 상호작용이 발달한다고 볼 수 있다. 그러나 RRa-P3HT이 80% 혼합된 박막에서는 free exciton bandwidth가 증가하였는데, 이는 RR-P3HT의 분자 내 상호작용이 약화되었음을 의미한다. 이는 RRa-P3HT 함량 증가로 인해 RR-P3HT와 RRa-P3HT의 상호작용이 변화한 결과로 보인다.

XRD 측정 결과 얻어진 스펙트럼은 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 순수한 RR-P3HT 박막의 XRD 스펙트럼에서 회절 피크는 관찰되지 않았으나, RRa-P3HT가 20% 및 40% 혼합된 박막에서는 5.5° 및 5.4°의 2θ 위치에서 회절 피크를 확인할 수 있었다. 또한 회절 피크는 RRa-P3HT 비율이 20%일 때 강하게 나타났으며, 40%에서 약화되었다. 실험적으로 얻어진 XRD 스펙트럼을 보고된 방식을 사용하여 얻어진 혼

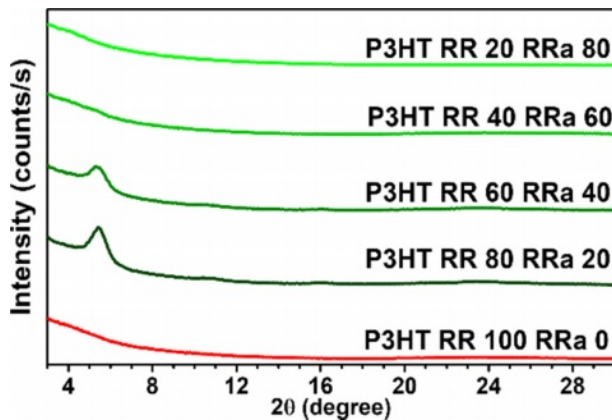


Fig. 6. XRD spectra of RR-P3HT/RRa-P3HT blend films with different ratios of RR-P3HT/RRa-P3HT

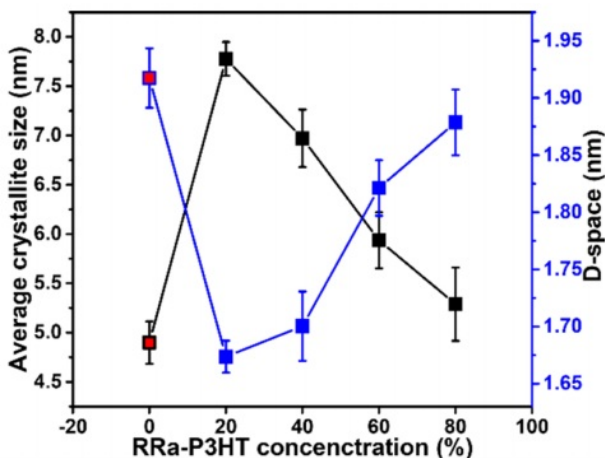


Fig. 7. Average crystallite size and D-space in RR-P3HT/RRa-P3HT blend films with different RRa-P3HT concentrations

합 박막의 평균 결정 크기와 D-spacing 수치를 Fig. 7에 나타내었다[7]. 평균 결정 크기는 순수한 RR-P3HT 박막에서 4.90 nm로 측정되었고 이후 RRa-P3HT가 20, 40, 60, 80% 혼합됨에 따라 7.78, 6.97, 5.94 및 5.29 nm 순으로 나타났다. D-spacing 수치는 평균 결정 크기와 반대 경향을 나타내어 순수한 RR-P3HT 박막에서 1.92 nm로 측정되었고 이후 1.67, 1.70, 1.82 및 1.87 nm였다. RRa-P3HT 함량이 40% 이상일 때 발생하는 회절 피크 및 박막의 평균 결정 크기 감소, D-spacing 증가는 결정성이 낮은 RRa-P3HT 함량 증가가 원인으로 생각된다. 박막의 결정 크기 및 D-spacing 수치의 변화로 확인할 수 있는 박막의 결정성은 RRa-P3HT의 함량 변화에 따른 전하 캐리어 이동도의 변화와 같은 경향을 보인다. 이러한 결과는 전하 캐리어 이동도의 변화가 박막의 결정성과 밀접한 관련이 있음을 시사한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 두 가지 서로 다른 위치 규칙성을 가진 공액 고분자인 RR-P3HT와 RRa-P3HT를 혼합하여 제조한 박막의 전기적 특성 향상을 체계적으로 분석하여 입증하였다. RRa-P3HT와 RR-P3HT의 혼합 박막은 RRa-P3HT가 20% 비율로 혼합된 경우 전하 캐리어 이동도가 최대치인 0.029 cm<sup>2</sup>/V·s를 기록하였다. 이러한 전하 캐리어 이동도의 향상은 RRa-P3HT의 혼합에 의한 박막의 결정성 향상에 연관이 있으며 이를 AFM, UV-Vis 흡수 스펙트럼, XRD 분석을 통해 검증하였다. AFM 측정을 통해 혼합 박막의 결정성을 향상시키는 1차원 응집체가 형성되었음을 확인하였으며, UV-Vis 흡수 스펙트럼 분석과 free exciton bandwidth 수치 비교를 통해 RRa-P3HT 함량이 60%까지 증가할 때 RR-P3HT 분자 간 및 분자 내 상호작용의 향상을 확인하였다. 또한 XRD 분석에서는 RRa-P3HT 함량이 20%일 때 혼합 박막의 평균 결정 크기가 7.78 nm로 가장 크며, D-spacing의 평균은 1.67 nm로 가장 작았다. 결과적으로, RR-P3HT 및 RRa-P3HT 비율이 80:20로 혼합된 박막에서 결정성이 가장 크게 향상되었으며, 전하 캐리어 이동도 또한 가장 컸다. 이로써 본 연구는 서로 다른 위치 규칙성을 가진 공액 고분자를 혼합하는 전략이 복합 박막의 결정성 및 전하 캐리어 이동도 향상을 위한 효과적인 전략임을 입증하며, 복합 재료 기반 차세대 고성능 유기 전자 소자 분야의 발전에 기여할 수 있는 중요한 방법론을 제시하였다.

#### 후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2023-00240277), 한국기초과학지원연구원 국가연구시설 장비진흥센터의 지원을 받은 기초과학연구역량강화사업 핵심연구지원센터 조성 지원 과

제에서 에너지융복합전문핵심연구지원센터를 조성하여 진행된 연구과제(과제번호: 2019R1A61010024) 및 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(과제번호: 00155172)에 의해 수행된 것이며, 지원에 대해 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Folorunso, O., Olukanmi, P., and Thokozani, S., "Conductive Polymers' Electronic Structure Modification for Multifunctional Applications," *Materials Today Communications*, Vol. 35, 2023, 106308.
2. Sharma, S., Sudhakara, P., Omran, A.A.B., Singh, J., and Ilyas, R., "Recent Trends and Developments in Conducting Polymer Nanocomposites for Multifunctional Applications," *Polymers* Vol. 13, 2021, 2898.
3. Parmeggiani, M., Verna, A., Ballesio, A., Cocuzza, M., Piatti, E., Fra, V., Pirri, C.F., and Marasso, S.L., "P3HT Processing Study for In-liquid EGOFET Biosensors: Effects of the Solvent and the Surface," *Sensors*, Vol. 19, 2019, 4497.
4. Cao, Z., Huo, X., Ma, Q., Song, J., Pan, Q., Chen, L., Lai, J., Shan, X., and Gao, J., "TFT-CN/P3HT Blending Active Layer Based Two-component Organic Field-effect Transistor for Improved H<sub>2</sub>S Gas Detection," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 385, 2023, 133685.
5. Kim, H.J., Kim, J.-S., Kim, Y., Jung, Y.S., Kim, B.J., and Kim, Y., "Regioregularity Controlled Phase Behavior for Poly(3-hexylthiophene): A Combined Study of Simple Coarse-grained Simulation and Experiment," *Polymer*, Vol. 178, 2019, 121569.
6. Cruz, R., Catunda, T., Facchinatto, W., Balogh, D.T., and Faria, R.M., "Absolute Photoluminescence Quantum Efficiency of P3HT/CHCl<sub>3</sub> Solution by Thermal Lens Spectrometry," *Synthetic metals*, Vol. 163, 2013, pp. 38-41.
7. Chang, M., Choi, D., Wang, G., Kleinhenz, N., Persson, N., Park, B., and Reichmanis, E., "Photoinduced Anisotropic Assembly of Conjugated Polymers in Insulating Polymer Blends," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 7, 2015, pp. 14095-14103.
8. Tazuhara, S., Nagase, T., Kobayashi, T., Sadamitsu, Y., and Naito, H., "Understanding the Influence of Contact Resistances on Short-channel High-mobility Organic Transistors in Linear and Saturation Regimes," *Applied Physics Express*, Vol. 14, 2021, 041010.
9. Bhatt, T., Pant, T., Dhondiyal, C.C., Rana, M., Chowdhury, P., Joshi, G., Arya, P., and Tiwari, H., "Computational Study of the Intermolecular Interactions and Their Effect on the UV-visible Spectra of the Ternary Liquid Mixture of Benzene, Ethanol and Propylene Glycol," *Journal of Molecular Modeling*, Vol. 26, 2020.
10. Jeong, G., Choi, S., Jang, M., and Chang, M., "Thermal Annealing Effects on the Morphology and Charge Transport of Polymer Semiconductor Nanowires Aligned in an Insulating Polymer Matrix," *Dyes and Pigments*, Vol. 185, 2021, 108962.
11. Geisse, N.A., "AFM and Combined Optical Techniques," *Materials Today*, Vol. 12, 2009, pp. 40-45.
12. He, K., Chen, N., Wang, C., Wei, L., and Chen, J., "Method for Determining Crystal Grain Size by X-ray Diffraction," *Crystal Research and Technology*, Vol. 53, 2018, 1700157.
13. Kim, Y.J., Jung, H.T., Ahn, C.W., and Jeon, H.J., "Simultaneously Induced Self-assembly of Poly(3-hexylthiophene)(P3HT) Nanowires and Thin-film Fabrication via Solution-floating Method on a Water Substrate," *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 4, 2017, 1700342.
14. Jo, G., Choi, S., Jeong, J.W., Lim, G.T., Jung, J., and Chang, M., "Controlled Self-assembly of Polymer Semiconductors in Solution Using a Solvent-vapor Approach," *Modern Physics Letters B*, Vol. 33, 2019, 1940038.
15. Liu, J., Qi, X., Feng, Q., and Lan, Q., "Suppression of Phase Separation for Exclusive Stereocomplex Crystallization of a High-molecular-weight Racemic Poly(l-lactide)/Poly(d-lactide) Blend from the Glassy State," *Macromolecules* Vol. 53, 2020, 3493-3503.
16. Chu, P.H., Wang, G., Fu, B., Choi, D., Park, J.O., Srinivasarao, M., and Reichmanis, E., "Synergistic Effect of Regioregular and Regiorandom Poly(3-hexylthiophene) Blends for High Performance Flexible Organic Field Effect Transistors," *Advanced Electronic Materials*, Vol. 2, 2016, 1500384.