

스핀코팅 시 가속 시간이 폴리티오펜 박막의 결정성장과 전기적 특성에 미치는 영향

권은혜 · 박소영 · 박영돈[†]

인천대학교 에너지화학공학과

(2020년 12월 31일 접수, 2021년 1월 19일 수정, 2021년 1월 19일 채택)

Effect of Acceleration Time on the Crystal Growth and Electrical Properties in Polythiophene Thin Film during Spin Coating Process

Eun Hye Kwon, So Young Park, and Yeong Don Park[†]

Department of Energy and Chemical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

(Received December 31, 2020; Revised January 19, 2021; Accepted January 19, 2021)

초록: 본 연구에서는 poly(3-hexylthiophene)(P3HT)을 양용매인 클로로포름과 디클로로벤젠에 각각 용해한 후 스핀코팅 시 회전 속도에 도달하는 시간을 달리하여 박막을 제조하였다. 회전 속도에 도달하는 시간을 1초부터 5초로 다양하게 조절하여 박막제조 시 초기에 형성되는 P3HT 결정 생성량을 증가시켰다. 최종 회전 속도에 도달하는 시간이 1초인 경우에는 초기에 형성된 결정 생성량이 적어서 낮은 결정성의 박막이 제조되었으나 가속 시간이 증가함에 따라 높은 결정화도를 가진 박막이 제조되었다. 가속도뿐만 아니라 용매의 비점에 따라서 분자들의 결정성장이 달라지는 것을 관찰하였다. 그 결과 스핀코팅 시 최적의 공정조건을 선택하여 고분자 박막의 결정화도와 전기적 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있었다.

Abstract: In this study, a thin film was prepared by dissolving poly(3-hexylthiophene) (P3HT) in chloroform and dichlorobenzene, which are good solvents, respectively, and varying the time to reach the rotational rate during spin coating. The time to reach the rotational rate was variously adjusted from 1 to 5 s to increase the amount of P3HT crystals formed at the early stage of thin film fabrication. When the time to reach the final rotational rate was 1 s, a thin film with low crystallinity was produced. The number of crystals formed initially was small, but a thin film with high crystallinity was produced as the acceleration time increased. It was observed that the crystal growth of the molecules was changed depending on the boiling point of the solvent and the acceleration time. As a result, the polymer thin film's crystallinity and electrical performance could be dramatically improved by optimum process conditions during spin coating.

Keywords: organic thin film transistor, poly(3-hexylthiophene), spin coating, acceleration time.

서 론

고분자반도체는 무기 실리콘 반도체와는 달리 얇고 가벼워 유연하게 휘어지며, 용액공정으로 제조가 가능해 비용측면에서도 장점이 있어 차세대 전자재료로 각광받고 있다.¹⁻⁵ 고분자 반도체 박막을 제조하는 용액공정으로 가장 많이 사용되는 기술은 스핀코팅이다.^{6,7} 스핀코팅 기술은 간단하여 사용하기 쉽고, 무엇보다 균일한 박막을 제조하는데 매우 효과적이기 때문에 유기 및 무기 박막을 제조하는 방법으로 광범위하게 사용된다. 스핀코팅에 의해 제조된 고분자 박막의 전기적 특성은 고분자 박막의 모폴로지 및 분자 규칙도와 강한

상관 관계가 있으며, 이러한 특성은 스핀코팅 공정 시 다양한 조건들에 의해 좌우된다.⁸⁻¹¹ 일반적으로 스핀코팅 공정은 빠른 회전 속도로 인하여 용매의 증발속도가 빠르기 때문에 균일하지만 낮은 결정성의 고분자박막이 제조된다. 하지만, 용매의 종류 및 회전 속도 또는 회전시간의 조절을 통하여 공정 변수를 최적화하면 높은 분자 규칙도의 고분자 박막을 제조할 수 있다.⁶

스핀코팅 공정에 사용되는 용매는 고분자 박막 구조에 큰 영향을 줄 수 있다.¹²⁻¹⁶ 비점이 높은 용매를 사용하면 용매 증발속도를 느리게 하여 고분자 사슬이 자기조립되는 시간을 허용해 고결정성 박막의 성장을 촉진한다.¹⁷⁻¹⁹ 그러나 고비점 용매의 사용은 표면 에너지가 높은 기관으로 제한되며, 그렇지 않은 경우에는 박막이 균일하게 증착되지 못한다.¹⁸ 스핀코팅 시 회전 속도를 조절하면 원심력 및 전단력의 강도가 달라져 박막의 두께, 거칠기 및 결정 구조를 향상시킬 수 있다. 최근

[†]To whom correspondence should be addressed.
ydpark@inu.ac.kr, ORCID[®]0000-0002-1615-689X
©2021 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

에는 스핀코팅 시간을 매우 짧게 하여 후처리 공정없이 고결정성의 고분자 박막을 손쉽게 제조하는 연구가 진행되었다.⁶ 스핀코팅 시 다양한 공정 조건들은 고분자 박막의 전하이동 특성에 큰 영향을 미치며 스핀코팅의 회전조건과 박막의 결정화도, 그리고 그에 따른 전기적 성능 간의 관계에 대한 중요한 단서를 제공한다. 하지만, 최종 회전 속도에 도달하는 가속 시간이 고분자 박막에 미치는 영향에 대해서는 알려진 바가 거의 없다. 스핀코팅으로 고분자 박막 제조 시 최종 회전 속도에 도달하는 시간에 대한 언급이 없으나 대부분의 스핀코팅 공정조건에서는 1초 이내의 빠른 시간 안에 최종 회전 속도에 도달하게 된다.

본 연구에서 고분자 박막의 미세 구조와 소자 성능 간의 관계를 확립하기 위해 스핀 가속도 시간이 고분자 박막에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 이를 위해 비점이 상이한 두가지 종류의 용매를 사용하였고, 각각 최종 회전 속도에 도달하는 가속도를 달리하여 박막을 제조하였다. UV-vis. spectroscope, grazing incidence X-ray diffraction(GIXD), atomic force microscope(AFM)를 이용하여 고분자 박막의 형태, 두께, 미세 구조, 광학적 특성을 분석하였으며 트랜지스터 소자를 제조하여 전기적 특성 변화를 자세히 조사하였다.

실 험

폴리티오펜 박막 제조 및 분석. 본 연구에서 사용된 공액 고분자인 poly(3-hexylthiophene)(P3HT)는 Rieke Metals(regioregularity 90~94%, $M_w = 83$ kDa, PDI = 2.2)에서 구입하였다. 클로로포름과 디클로로벤젠 용매를 사용하여 각각 농도가 10 mg/mL인 P3HT 용액을 50 °C, 800 rpm의 조건으로 혼합하며 제조한 뒤 회전 속도 1500 rpm에 도달하는 시간을 1 초에서 5초까지 다양하게 조절하여 스핀코팅한 후 20 °C에서 진공 건조하여 박막을 제조하였다. 가속 시간과 용매에 따른 결정화도를 분석하기 위해 UV-vis. spectrometer(Perkin Elmer, Lambda 365)와 GIXD(SmartLab, Rigaku)를 사용하였으며, 모폴로지 분석을 위하여 AFM(Bruker, Multimode 8)과 optical microscope(OM)(Olympus, BX51)을 사용하였다.

유기트랜지스터 제조 및 성능 평가. 유기박막 트랜지스터 제조를 위해 도핑된 n형 실리콘 웨이퍼를 게이트 전극으로 사용하였고 그 위에 300 nm 두께의 SiO_2 (10.8 nF/cm²)를 증착하여 게이트 절연체로 사용하였다. 아세톤 및 에탄올로 SiO_2 를 세척한 뒤, UV/ozone을 20분 동안 처리한 후 hexamethyldisilazane(HMDS)을 2500 rpm으로 30초 동안 스핀코팅하였다. HMDS로 개질된 SiO_2/Si 기판을 130 °C에서 1시간 동안 열처리하였고, 초음파를 이용하여 아세톤 및 에탄올 용매에서 세척하였다. 전처리된 실리콘 웨이퍼 위에 가속 시간을 조절하여 P3HT 박막을 코팅하였다. 제조된 P3HT 박막은 20 °C에서 12시간 동안 진공 하에서 건조시킨 뒤, 채널길이 100 μm ,

채널너비 2000 μm 인 shadow mask를 사용하여 소스, 드레인 금 전극을 증착하여 top-contact 구조의 유기박막 트랜지스터를 제조하였다. 빛이 차단된 상온, 진공상태에서 Keithley 4200 SCS를 사용하여 전기적 특성을 분석하였다.

결과 및 토론

본 연구에서 사용한 클로로포름과 디클로로벤젠은 p형 고분자 반도체로 사용된 P3HT에 대해서 용해도가 높은 대표적인 양용매이다.²⁰ 회전 속도에 도달하는 가속 시간과 용매의 비점에 따른 P3HT 박막 결정성장을 UV-vis. spectroscope를 이용하여 관찰하였다(Figure 1). Figure 1에서 보는 바와 같이 클로로포름은 61 °C의 낮은 비점을 가지고 있어 스핀코팅 시 빠른 용매 증발속도로 인하여 낮은 결정성의 박막이 제조되고, 디클로로벤젠은 180 °C의 높은 비점을 가지고 있어 상대적으로 높은 결정성의 박막을 얻을 수 있었다.

클로로포름으로 제조된 P3HT 박막의 경우 가속 시간이 1 초에서 5초로 증가함에 따라 P3HT 분자의 interchain의 결정성장을 나타내는 (0-0), (0-1) transition 피크가 증가하였다. 스핀코팅 시 가속도가 느려지면 최종 회전 속도에 도달하는 시간이 증가하게 되어 초기 용매 증발속도가 느려지고 그로 인해서 고분자들의 규칙도가 증가하였다. 디클로로벤젠으로 제조된 P3HT 박막의 경우 가속 시간이 증가하여도 고분자들의 규칙도가 변하지 않았다. 높은 비점을 갖는 용매를 사용할 경우 초기 용매의 증발속도가 느리기 때문에 가속 시간의 영향

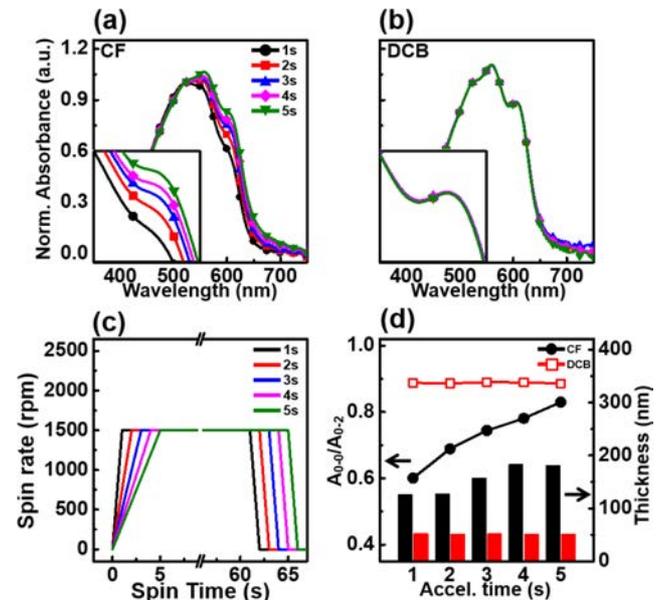


Figure 1. UV-vis. absorption spectra of the P3HT film with acceleration time: (a) chloroform; (b) dichlorobenzene; (c) spin rate schedule with the various acceleration time; (d) thickness of the P3HT thin films and A₀₋₀/A₀₋₂ peak ratio.

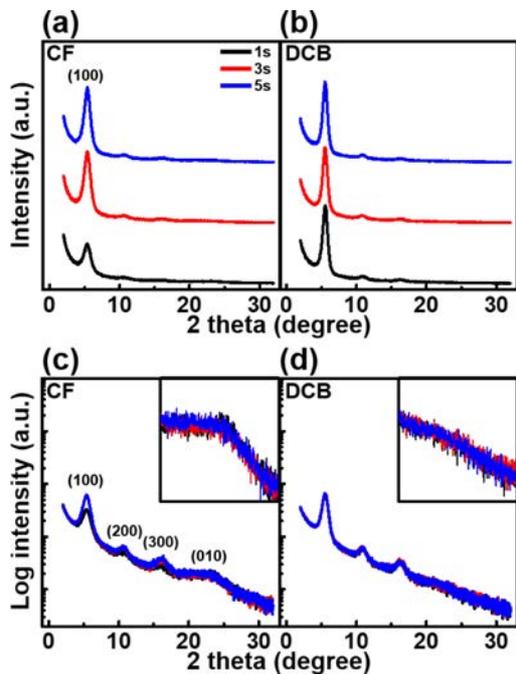


Figure 2. Linear scale GIXD pattern of the P3HT thin films by different acceleration times: (a) chloroform; (b) dichlorobenzene. Log scale GIXD pattern of P3HT thin films; (c) chloroform; (d) dichlorobenzene. Inset images is magnified GIXD (010) pattern in the scan range from 19° to 27° .

을 받지 않는다.

Figure 2는 용매 별 가속 시간에 따른 P3HT 박막의 결정화도를 GIXD를 사용하여 측정하였다. 클로로포름을 사용한 P3HT 박막은 가속 시간이 증가할수록 (100) 피크가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 저비점 용매는 가속 시간이 증가하게 되면 초기 스핀코팅 과정 중에 증발속도가 느려지게 되며 고분자의 규칙도가 증가하여 (100) 피크가 증가하게 된다. 반면, 디클로로벤젠을 사용할 경우 가속 시간의 변화에 상관없이 모든 P3HT 박막에서 높은 (100) 피크를 관찰할 수 있었다. 고비점 용매는 가속 시간에 상관없이 용매의 증발속도가 느리기 때문에 고결정성의 P3HT 박막을 형성하였다.²¹

Figure 3은 용매에 따른 가속 시간의 변화가 P3HT 박막의 모폴로지에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 AFM을 이용하여 분석하였다. 클로로포름을 사용한 P3HT 박막의 경우 1초의 가속 시간에서는 나노와이어가 관찰되지 않았지만(Figure 3(a)), 가속 시간이 증가함에 따라 나노와이어가 성장된 것을 확인할 수 있었다(Figure 3(b)). 느려진 용매의 증발속도는 P3HT 자기조립을 촉진시켰다. 디클로로벤젠을 사용한 P3HT 박막에서는 가속 시간에 상관없이 모두 나노와이어가 성장된 것을 관찰하였다. 고비점 용매는 스핀코팅 동안 증발속도가 느리기 때문에 고분자가 자기조립되는 시간이 길어서 나노와이어의 성장이 가속 시간에 영향을 받지 않는다.

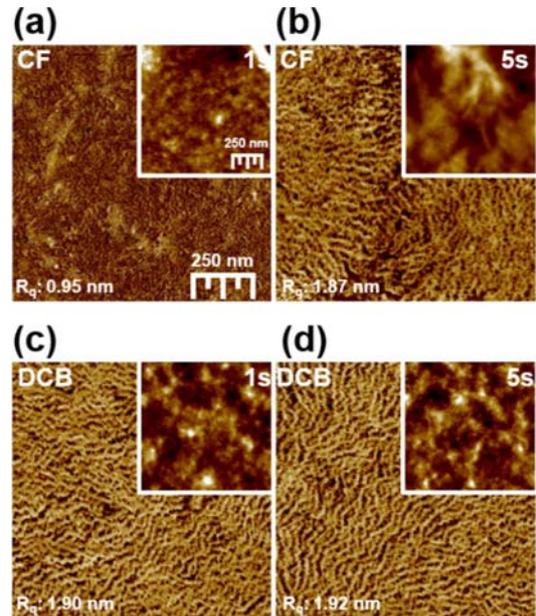


Figure 3. Tapping-mode AFM phase images of the P3HT thin films using chloroform by the different acceleration times: (a) 1 s; (b) 5 s and using dichlorobenzene by the different acceleration times; (c) 1 s; (d) 5 s. Inset shows AFM height images.

용매의 비점에 따라 가속 시간이 고분자의 규칙도에 미치는 영향을 증명하기 위하여 스핀코팅 과정을 사진으로 찍어 고체화 시간을 분석하였다(Figure 4). 스핀코팅 시 박막의 색 변화가 발생하는 이유는 잔여 용매가 존재하기 때문이며, 색 변화가 더 이상 발생하지 않는 것은 박막이 완전히 건조되었다는 것을 의미한다.^{22,23} 클로로포름을 사용하여 P3HT 박막을 제조할 때 고체화 시간은 가속 시간 전후로 나타났다. 1초의 가속 시간으로 P3HT 박막을 제조할 때 고체화 시간은 2.13초에서 나타났으며, 이 시간은 가속 시간이 종료된 이후 빠른 속도로 기판이 회전하는 시간이다. 3초의 가속 시간에서는 3.10초에서 고체화가 발생하였으며 가속 시간과 비슷한 시간이었다. 5초의 가속 시간에서는 4.03초에서 P3HT의 고체화가 발생하였으며 가속 시간이 끝나기 전에 고체화가 완료되었다. 클로로포름을 사용한 P3HT 용액의 고체화는 가속 시간과 유사하기 때문에 박막 제조 시 가속 시간에 큰 영향을 받게 된다. 짧은 가속 시간에서는 용액의 증발이 빨라서 고분자의 자기조립시간이 짧은 반면, 가속 시간이 길어지면 용액의 증발이 느리므로 고분자의 자기조립 시간이 충분히 길어져 고결정성의 P3HT 박막을 제조할 수 있다. 디클로로벤젠을 사용하여 P3HT 박막을 제조하는 경우에는 고체화 시간이 55~58초 사이로 가속 시간과는 무관하게 나타났다. 따라서 비점이 높은 용매를 사용하여 고분자 박막을 제조할 경우는 고분자의 결정화도가 초반 가속도에 영향을 받지 않는다.

Figure 5는 가속 시간에 따른 박막의 고체화 시간을 정리

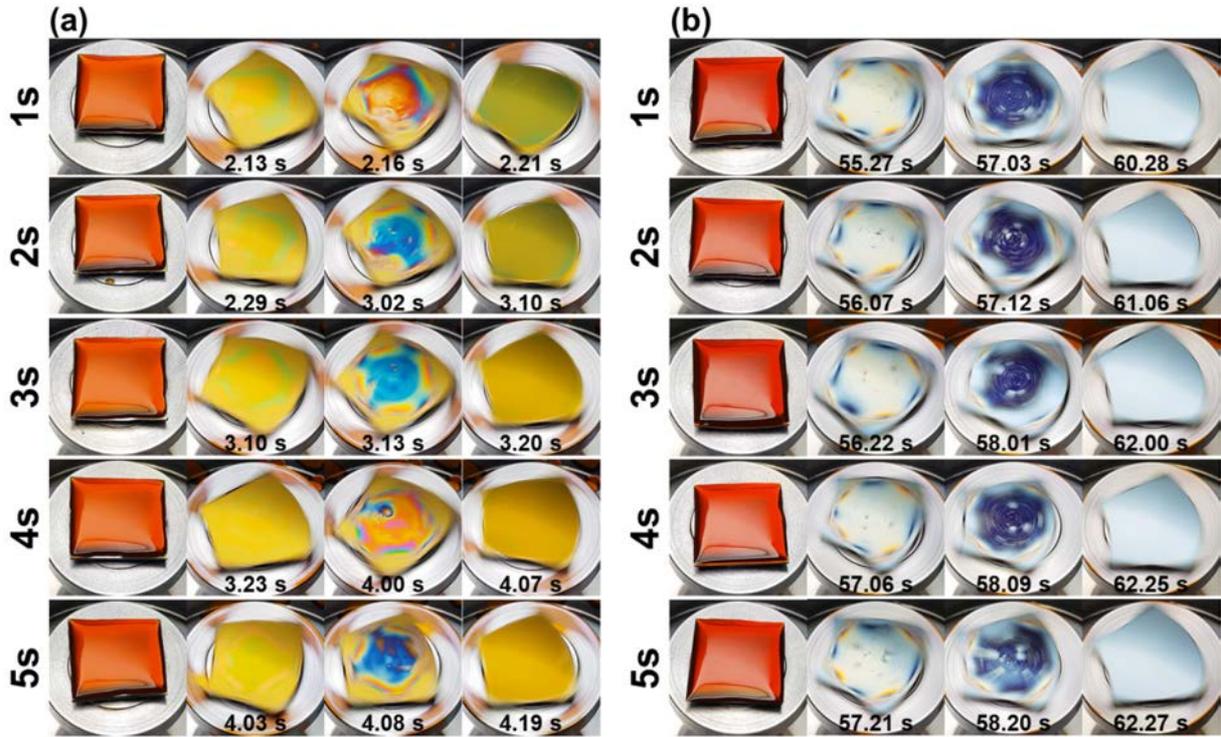


Figure 4. Video microscopy image of the spin coating process by the different acceleration times using (a) chloroform; (b) dichlorobenzene.

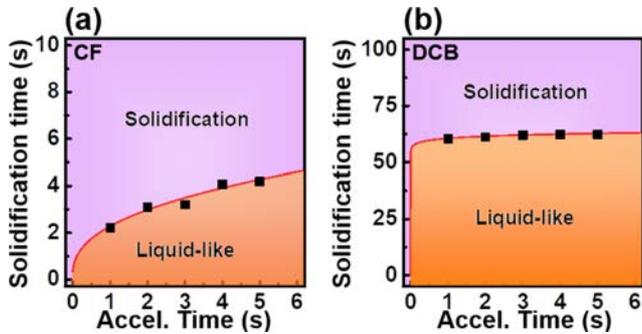


Figure 5. Graph for solidification time with acceleration time; (a) chloroform; (b) dichlorobenzene.

한 그래프이다. 클로로포름을 사용하여 P3HT 박막을 제조할 경우, 가속 시간이 증가함에 따라 고체화 시간이 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 클로로포름의 증발속도는 스핀 코팅 초반의 가속 시간에 영향을 받으며, 가속 시간을 증가시키면 P3HT 용액의 고체화 시간을 지연시킬 수 있음을 의미한다. 반면, 디클로로벤젠을 사용할 경우에는 가속 시간의 증가에도 고체화 시간은 일정하게 매우 느린 건조 시간을 가진다는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 낮은 비점을 갖는 용매를 사용하여 P3HT 박막을 제조할 경우 스핀코팅 초반의 가속 시간을 P3HT 분자의 자기조립 거동을 결정하는 데 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Figure 6은 용매별 가속 시간에 따른 P3HT 박막 트랜지스터의 전기적 특성 변화를 나타낸 것이다. 전달 곡선(transfer curve) 특성은 드레인 전압을 -60 V로 인가한 상태에서 게이트 전압을 +60 V에서 -60 V까지 스위핑하여 빛이 차단된 상온, 진공상태에서 측정하였다. 클로로포름으로 제조된 P3HT 박막은 용매의 낮은 비점으로 인해 1초의 가속 시간에서 최대 전류값이 2.93 μA 로 낮은 값을 보였으나 가속 시간이 5초로 늘어나면 최대전류가 14.1 μA 로 증가하였다. 디클로로벤젠으로 제조된 P3HT 박막은 용매의 높은 비점으로 인해 최대 전류값이 10.0 μA 로 상대적으로 높은 값을 보였고, 가속 시간이 5초일 때 최대전류가 10.8 μA 로 변화가 거의 없었다.

$$I_D = \frac{WC_i}{2L} \mu (V_G - V_T)^2 \quad (1)$$

- I_D = drain current
- W = channel width (2000 μm)
- L = channel length (100 μm)
- C_i = capacitance of insulator (10.8 nFcm⁻²)

전달 곡선으로부터 식 (1)을 이용하여 다양한 가속도 시간에 따른 전계효과 이동도를 계산하여, 용매에 따른 전계효과 이동도 변화의 경향을 Figure 6(c)에 정리하였다. 클로로포름으로 제조된 박막의 경우 가속 시간이 5초인 경우에 전계효

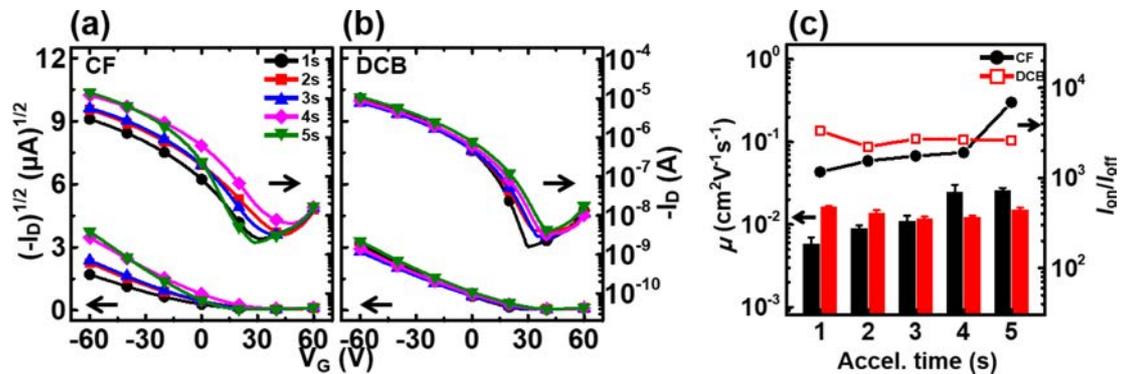


Figure 6. Transfer curve (drain current vs. gate voltage) at fixed drain voltage of -60 V on both the linear and logarithmic scale for P3HT thin films from different acceleration time using (a) chloroform; (b) dichlorobenzene; (c) average field-effect mobilities and I_{on}/I_{off} ratio of the P3HT thin films with the various acceleration time.

과 이동도가 $2.58 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 측정되었으며, 가속 시간이 1초일때 이동도 $5.87 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 보다 약 4.4배 증가하였다. 디클로로벤젠으로 제조된 박막의 경우에는 가속 시간 1초에서 $1.63 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 5초에서 $1.51 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 가속 시간에 영향을 받지 않았다. 가속 시간의 조절을 통해 낮은 비점의 클로로포름 용액을 이용하여 손쉽게 높은 전하이동도를 얻을 수 있었다.

결론

본 연구는 P3HT를 양용매인 클로로포름과 디클로로벤젠에 용해한 뒤 스핀코팅 시 회전 속도에 도달하는 가속도를 다르게 하였을 때 결정성장 거동을 UV-vis. spectroscopy, GIXD, 그리고 AFM을 통해 확인하였으며, 트랜지스터 소자를 제작하여 전하이동 특성 변화를 분석하였다. 비점이 낮은 클로로포름의 경우 회전 초기 빠른 시간 내에 가속시켰을 때 P3HT 박막의 낮은 결정성이 나타났으나 가속 시간이 증가함에 따라 결정성 향상이 관찰되었고 동시에 전하이동도가 증가됨을 보여주었다. 그 이유는 스핀코팅 시 회전 속도에 도달하는 시간이 증가하게 되면 초기에 용매 증발속도가 느려지고 그로 인해서 고분자들의 규칙도가 증가하기 때문이다. 회전 속도에 도달하는 시간뿐만 아니라 용매의 비점에 따라서도 고분자의 결정성장이 달라지기 때문에, 스핀코팅 시 적절한 공정조건을 선정하여 고분자 박막의 결정화도와 그에 따른 전기적 성능을 향상시킬 수 있었다. 본 연구는 회전 속도에 도달하는 가속 시간을 고려하여 최적의 결정성 박막을 제조할 수 있음을 보여주었다. 이 성과는 고분자 박막의 결정성을 높이는 데 있어서 후처리 공정 없이 손쉽게 스핀코팅만으로 결정성 박막을 만들 수 있는 효과적인 용액 공정 기술을 제시한다.

감사의 글: 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1F1A1059612).

참고 문헌

- Kim, S. J.; Kim, H.; Ahn, J.; Hwang, D. K.; Ju, H.; Park, M. C.; Yang, H.; Kim, S. H.; Jang, H. W.; Lim, J. A. A New Architecture for Fibrous Organic Transistors Based on a Double-Stranded Assembly of Electrode Microfibers for Electronic Textile Applications. *Adv. Mater.* **2019**, 31, 1900564.
- Sirringhaus, H. 25th Anniversary Article: Organic Field-Effect Transistors: The Path beyond Amorphous Silicon. *Adv. Mater.* **2014**, 26, 1319-1335.
- Tang, X.; Kwon, H. J.; Hong, J.; Ye, H.; Wang, R.; Yun, D. J.; Park, C. E.; Jeong, Y. J.; Lee, H. S.; Kim, S. H. Direct Printing of Asymmetric Electrodes for Improving Charge Injection/Extraction in Organic Electronics. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, 12, 33999-34010.
- Chen, H.; Zhang, W.; Li, M.; He, G.; Guo, X. Interface Engineering in Organic Field-Effect Transistors: Principles, Applications, and Perspectives. *Chem. Rev.* **2020**, 120, 2879-2949.
- Mizukami, M.; Oku, S.; Cho, S. I.; Tatetsu, M.; Abiko, M.; Mamada, M.; Sakanoue, T.; Suzuri, Y.; Kido, J.; Tokito, S. A Solution-Processed Organic Thin-Film Transistor Backplane for Flexible Multiphoton Emission Organic Light-Emitting Diode Displays. *IEEE Electron Device Lett.* **2015**, 36, 841-843.
- Na, J. Y.; Kang, B.; Sin, D. H.; Cho, K.; Park, Y. D. Understanding Solidification of Polythiophene Thin Films during Spin-Coating: Effects of Spin-Coating Time and Processing Additives. *Sci. Rep.* **2015**, 5, 13288.
- Chang, M.; Lim, G. T.; Park, B.; Reichmanis, E. Control of Molecular Ordering, Alignment, and Charge Transport in Solution-Processed Conjugated Polymer Thin Films. *Polymers* **2017**, 9, 23-31.
- Petoukhoff, C. E.; Shen, Z.; Jain, M.; Chang, A.; O'Carroll, D.

- M. Plasmonic Electrodes for Bulk-Heterojunction Organic Photovoltaics: A Review. *J. Photonics Energy* **2015**, 5, 057002.
9. Gargi, D.; Kline, R. J.; Delongchamp, D. M.; Fischer, D. A.; Toney, M. F.; O'Connor, B. T. Charge Transport in Highly Face-On Poly(3-Hexylthiophene) Films. *J. Phys. Chem. C* **2013**, 117, 17421-17428.
 10. Dong, B. X.; Amonoo, J. A.; Purdum, G. E.; Loo, Y. L.; Green, P. F. Enhancing Carrier Mobilities in Organic Thin-Film Transistors Through Morphological Changes at the Semiconductor/Dielectric Interface Using Supercritical Carbon Dioxide Processing. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 31144-31153.
 11. Schulz, G. L.; Ludwigs, S. Controlled Crystallization of Conjugated Polymer Films from Solution and Solvent Vapor for Polymer Electronics. *Adv. Funct. Mater.* **2017**, 27, 1603083.
 12. Han, S.; Yu, X.; Shi, W.; Zhuang, X.; Yu, J. Solvent-Dependent Electrical Properties Improvement of Organic Field-Effect Transistor Based on Disordered Conjugated Polymer/Insulator Blends. *Org. Electron.* **2015**, 27, 160-166.
 13. Sanda, S.; Nagase, T.; Kobayashi, T.; Takimiya, K.; Sadamitsu, Y.; Naito, H. High-Performance Didodecylbenzothienobenzothiophene-Based Top-Gate Organic Transistors Processed by Spin Coating Using Binary Solvent Mixtures. *Org. Electron.* **2018**, 58, 306-312.
 14. Kwon, E. H.; Kim, G. W.; Kim, M.; Park, Y. D. Effect of Alcohol Polarity on the Aggregation and Film-Forming Behaviors of Poly(3-Hexylthiophene). *ACS Appl. Polym. Mater.* **2020**, 2, 2980-2986.
 15. Jeon, G. G.; Lee, M.; Nam, J.; Park, W.; Yang, M.; Choi, J. H.; Yoon, D. K.; Lee, E.; Kim, B.; Kim, J. H. Simple Solvent Engineering for High-Mobility and Thermally Robust Conjugated Polymer Nanowire Field-Effect Transistors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, 10, 29824-29830.
 16. Morgan, B.; Dadmun, M. D. The Importance of Solvent Quality on the Modification of Conjugated Polymer Conformation and Thermodynamics with Illumination. *Soft Matter* **2017**, 13, 2773-2780.
 17. Kim, Y. S.; Lee, Y.; Kim, J. K.; Seo, E. O.; Lee, E. W.; Lee, W.; Han, S. H.; Lee, S. H. Effect of Solvents on the Performance and Morphology of Polymer Photovoltaic Devices. *Curr. Appl. Phys.* **2010**, 10, 985-989.
 18. Kwon, E. H.; Jang, Y. J.; Kim, G. W.; Kim, M.; Park, Y. D. Highly Crystalline and Uniform Conjugated Polymer Thin Films by a Water-Based Biphasic Dip-Coating Technique Minimizing the Use of Halogenated Solvents for Transistor Applications. *RSC Adv.* **2019**, 9, 6356-6362.
 19. Na, J. Y.; Kim, M.; Park, Y. D. Solution Processing with a Good Solvent Additive for Highly Reliable Organic Thin-Film Transistors. *J. Phys. Chem. C* **2017**, 121, 13930-13937.
 20. Hansen, C. M. *Hansen Solubility Parameters - A User's Handbook*; 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2007.
 21. Birnie, D. P.; Hau, S. K.; Kamber, D. S.; Kaz, D. M. Effect of Ramping-up Rate on Film Thickness for Spin-on Processing. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2005**, 16, 715-720.
 22. Lee, J. H.; Seo, Y.; Park, Y. D.; Anthony, J. E.; Kwak, D. H.; Lim, J. A.; Ko, S.; Jang, H. W.; Cho, K.; Lee, W. H. Effect of Crystallization Modes in TIPS-Pentacene/Insulating Polymer Blends on the Gas Sensing Properties of Organic Field-Effect Transistors. *Sci. Rep.* **2019**, 9, 21.
 23. Na, J. Y.; Kang, B.; Lee, S. G.; Cho, K.; Park, Y. D. Surface-Mediated Solidification of a Semiconducting Polymer during Time-Controlled Spin-Coating. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, 9, 9871-9879.

출판자 공지사항: 한국고분자학회에 게재된 논문 및 기관 소속의 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.