ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 24-03-12
j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.28,No.3,329~336,September 2024
https://doi.org/10.7471/ikeee.2024.28.3.329
87

자외선 차단이 가능한 유기발광다이오드의 효율 향상을 위한 친환경 아웃 커플링 필름

Environmental Friendly Out-Coupling Film to Enhance the Efficiency of Organic Light Emitting Diode with UV protection

장 현 준*, 성 백 상*, 한 소 라*, 이 주 호*, 김 용 현**, 이 재 현*, 이 종 희*★

Hyunjun Jang*, Baeksang Sung*, Sora Han*, Jooho Lee*, Yong Hyun Kim**, Jae-Hyun Lee*, and Jonghee Lee*★

Abstract

Organic light emitting diode(OLED) is distributed in layers with different refractive index, which leads to total internal reflection and low light extraction efficiency. As a result, light extraction technologies have been investigated that include structures such as MLA. However, technologies such as MLA are using petroleum-based polymers, which cause environmental problems during disposal. Therefore, this study investigates the use of eco-friendly polymers hydroxyethyl cellulose(HEC) and tannic acid(TA) to produce external light extraction films. HEC is biodegradable and has high transparency, making it suitable for eco-friend external light extraction films. The TA used as an additive is a polyphenolic molecule, which is expected to form strong hydrogen bonds with HEC. In addition, TA can protect OLED from damage by UV light through its phenolic groups. HECTA MLA films were produced by dissolving HEC and TA in water without using additional solvents and then imprinting them on MLA mould. When the HECTA MLA film was attached to the outside of the OLED and analysed, it showed a high Haze of more than 80%, and the external quantum efficiency and current efficiency of the OLED were improved by 38% and 39%, respectively, compared to the reference.

요 약

유기발광다이오드(OLED)는 층간 굴절률 차이로 내부 전반사가 발생하며 낮은 광추출 효율의 원인이 된다. 그 결과, MLA와 같은 구조체를 활용하는 광추출 기술들이 연구되고 있다. 하지만 MLA와 같은 석유계 고분자를 활용한 기술들은 폐기 과정에서 환경 문제를 야기한다. 따라서 본 연구에서는 친환경 고분자 hydroxyethyl cellulose(HEC)와 tannic acid(TA)를 활용하여 외부 광추출 필름을 제작하고자 한다. HEC는 생분해가 가능하며 높은 투명도를 가져 친환경 외부 광추출 필름으로 제작하는데 적합하다. 첨가제로 사용된 TA는 폴리페놀 화합물로 HEC와 견고한 수소결합을 형성할 것으로 예상된다. 또한, TA는 페놀 그룹을 통해 자외선으로부터 OLED가 손상되는 것을 방지할 수 있다. HECTA MLA 필름은 추가적인 용매를 사용하지 않고 물에 HEC와 TA를 용해시킨 후 MLA 몰드에 임프린팅 하여 제작하였다. HECTA MLA 필름을 OLED 외부에 부착하여 분석한 결과, 80% 이상의 높은 흐림도를 보였으며 OLED의 외부 양자 효율과 전류 효율이 기준 대비 각각 38%, 39% 향상되었다.

Key words : Organic Light Emitting Diodes, Micro Lens Array, Biopolymer, Light Extraction, UV blocking

* Department of Creative Convergence Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Republic of Korea
** Department of Smart Green Technology Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea
★ Corresponding authors
E-mail : jonghee.lee@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-828-8802
Manuscript received Sep. 2, 2014; revised Sep. 10, 2024; accepted Sep. 14, 2024.
※ Acknowledgment
This research was conducted with the support of the Korea Institute for Advancement of Technology funded by the government (Ministry of Trade, Industry and Energy) in 2024 (Project No. P0023691, Specialized Workforce Development Program for Space Materials, Parts, and Equipment) and with the support from the Basic Science Research program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2018R1A6A1A03026005).
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.

Ⅰ. 서론

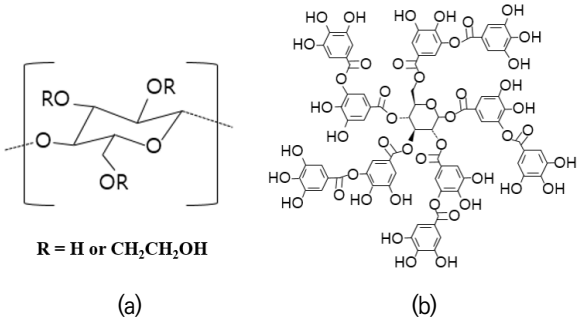
유기발광다이오드(organic light emitting diode, OLED)는 전기적 에너지를 통해 빛을 방출하는 전계 발광(electroluminescence, EL) 방식으로, 유기물을 이용하는 소자이다. 다층 박막 구조의 OLED는 고유한 굴절률을 가진 층으로 구성되어 있으며, 이러한 굴절률 차이로 인해 입사각이 임계각보다 커지게 되면서 내부 전반사(total internal reflection)가 발생한다[1-5]. 내부 전반사는 투명 전극과 유리 기판 계면에서의 도파관 모드(waveguide mode), 유리 기판과 공기 계면에서의 기판 모드(substrate mode) 등 여러 광학 모드들로 인해 생성된 빛의 약 80%가 OLED 외부로 추출되지 못한다[6, 7]. 그 결과, OLED의 내부 양자효율(internal quantum efficiency)이 100%임에도 불구하고 외부 양자 효율(external quantum efficiency, EQE)은 약 20~30% 내외로 낮아지게 된다. 따라서 낮은 광추출 효율을 향상시키기 위한 기술들이 연구되고 있다[8,9]. OLED의 광추출 효율 향상을 위한 기술은 내부 광추출 기술과 외부 광추출 기술로 구분된다. 그 중, 외부 광추출 기술은 OLED 기판 외부에 광산란 구조체를 지닌 필름을 부착하여 substrate mode의 빛을 효과적으로 추출할 수 있다[10]. 또한 OLED의 복잡한 설계를 요구하는 내부 광추출 기술과 달리 간단하면서 안정적인 기술이다. 대표적인 외부 광추출 기술로 주름[1], 피라미드[2], 반구형[11, 12]과 같은 구조체를 통해 기판과 공기 계면의 임계각을 줄일 수 있다. 이처럼 표면 구조체를 활용한 외부 광추출 기술은 비교적 간단한 방식으로 OLED 내부에 갇힌 빛을 추출할 수 있기에 차세대 디스플레이 및 조명 분야에 적용될 것으로 기대된다.

고효율 OLED에 대한 연구가 진행되면서 OLED를 사용한 제품의 수요와 공급이 증가하고 있다. 이로 인해, 석유계 고분자로 구성되어있는 전자제품의 사용도 급증하였다. 대부분의 석유계 고분자는 자연환경에서 미생물에 의한 분해가 느리거나 어려운 난분해성 물질이다. 따라서 석유계 고분자를 사용한 제품은 자외선 노출과 기계적인 힘을 통해 폐기되며 미세 플라스틱으로 분해된다. 특히, 플라스틱 가소제로 사용되는 프탈산에스테르는 인체에 유해하며 분해가 잘 되지 않아 토양, 수질 등 환경 문제를 야기한다[13-15]. 이를 해결하기 위해 석유계 고분자를 대체할 친환경 소재 사용과 저비용의 간단한 공정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 생분해 및 생체적합성을 지닌 친환경 고분자 hydroxyethyl cellulose (HEC)를 기반으로 외부 광추출 필름을 제작하였고 OLED에 적용한 결과를 보고하고자 한다[16]. HEC(n=1.51)는 유리와 유사한 굴절률과 높은 투명도를 가져 외부 광추출 필름으로 제작하는데 적합하다[17, 18]. 하지만 HEC는 필름 형성 시 변형에 취약하여 견고한 결합을 형성해줄 첨가제가 필요하다. 따라서 자연에서 쉽게 얻을 수 있는 친환경 재료인 tannic acid(TA)를 첨가제로 사용하였다. 폴리페놀 화합물인 TA는 풍부한 수산기를 통해 HEC와 수소결합을 형성한다. 그 결과, TA는 HEC와 가교되어 더 단단한 결합을 하였고 필름의 인장강도가 향상될 것으로 예상된다[19]. 또한, TA는 우수한 자외선 차단 특성을 보이며 OLED가 자외선에 노출되었을 때 유기물들의 약한 결합이 끊어지는 것을 방지할 수 있다[20, 21]. 이는 파이 전자 여기 과정을 통해 자외선을 흡수하는 TA의 페놀 그룹에 기인한다[22-24]. HEC와 TA를 혼합한 용액(HECTA)을 micro lens array(MLA) 몰드에 임프린팅하여 자외선 차단 특성을 지닌 친환경 외부 광추출 필름을 제작하였다[25, 26]. HECTA MLA 25 g 필름의 경우, 외부 양자 효율과 전류 효율이 38%, 39% 향상되었으며 HEC를 사용한 타 외부 광추출 필름에 비해 우수한 광추출 향상의 결과를 확인하였다[27].

Ⅱ. 본론

1. HECTA MLA 필름 제작 과정

그림 1은 필름 제작에 사용된 hydroxyethyl cellulose (HEC)와 tannic acid(TA)의 분자 구조이다. HEC와 TA는 모두 다량의 수산기를 포함하고 있으므로 친수성 특성을 가진다. 따라서 필름은 다른 용매를 사용하지 않고 HEC와 TA만을 물에 용해한 후 제작하였다. 제작 과정에서 사용된 HEC와 TA 분말은 Sigma-Aldrich에서 구매하였다.



(a) (b)

Fig. 1. Molecular structure of (a) hydroxyethyl cellulose, (b) tannic acid.

그림 1. (a) hydroxyethyl cellulose, (b) tannic acid의 분자 구조

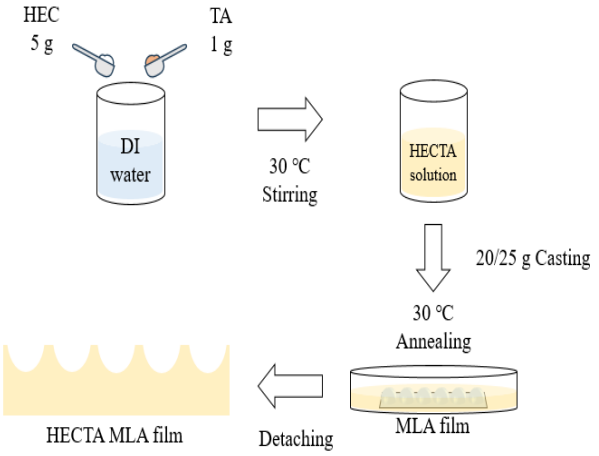


Fig. 2. Fabrication of HECTA MLA film.
그림 2. HECTA MLA 필름 제작 과정

그림 2는 HECTA MLA 필름의 제작 과정의 도식화 결과이다. 탈 이온수(deionized water) 94 mL, HEC 5 g, TA 1 g을 30 ˚C의 온도에서 약 하루 동안 교반하여 HECTA 용액을 제작하였다. 오목한 반구형 구조체를 얻기 위해 MLA(지름 20 ㎛, 높이 10 ㎛)를 petri dish에 고정시켜 몰드로 사용하였다. 용액 양에 따른 구조체 형성을 확인하기 위해 HECTA 용액을 MLA 몰드에 각각 20 g, 25 g 도포하였고, 그 후, 30 ˚C에서 약 하루 동안 건조한 후 MLA 몰드에서 분리하여 최종적으로 HECTA MLA 필름 A, B를 제작하였다.

2. HECTA MLA 필름 표면 분석

몰드에 임프린팅 되어 제작된 HECTA MLA 필름의 구조체 형성에 이상이 없는지 확인하기 위해 광학 현미경(optical microscope, Olympus BX-43)과 전계 방출 주사 전자 현미경(field emission scanning electron microscope, S-4800)을 사용하여 표면 이미지를 분석하였다.

그림 3은 광학 현미경과 전계 방출 주사 전자 현미경으로 관찰한 HECTA MLA 필름의 표면 이미지를 보여준다. 그림 3의 (a)는 HECTA 용액 20 g으로 제작된 HECTA_MLA_A이며, (b)는 HECTA 용액 25 g을 도포하여 제작된 필름 HECTA_MLA_B이다. 제작된 필름 모두 MLA 구조체가 일정하게 임프린팅 되어있음을 확인할 수 있다. 이는 HEC와 TA의 견고한 수소결합이 구조체를 형성하는데 기여한 것으로 해석되며 형성된 구조체를 통하여 OLED 기판에 갇힌 빛을 효과적으로 추출할 것으로 예상된다.

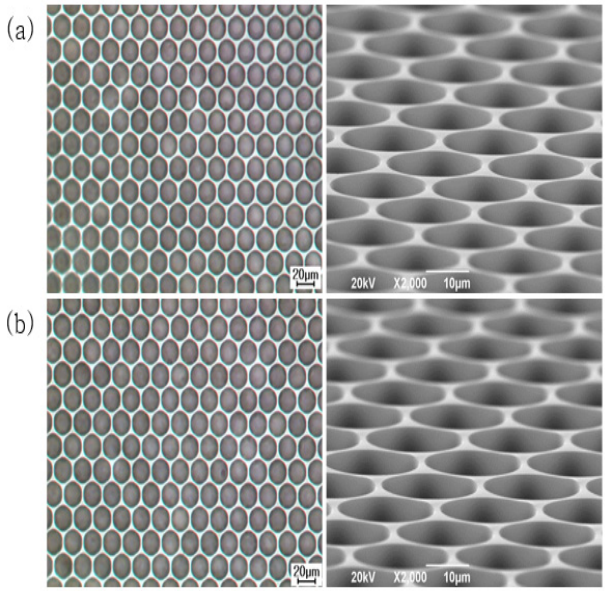


Fig. 3. Optical microscope and field emission scanning electron microscope images of (a) HECTA_MLA_A, (b) HECTA_MLA_B.
그림 3. 광학 현미경 및 전계 방출 주사 전자 현미경 이미지 (a) HECTA_MLA_A, (b) HECTA_MLA _B

3. HECTA MLA 필름의 광학 특성 분석

HECTA MLA 필름의 광학적 특성을 분석하기 위해 UV-vis spectrophotometer(Lambda-950)를 사용하여 200~800 nm에서의 투과도 및 Haze를 측정하였다. 자외선 영역의 흡수를 방지하기 위해 자외선이 투과할 수 있는 석영 유리(quartz glass)에 HECTA MLA 필름을 부착하여 광학적 특성 분석을 진행하였다.

$$T_t = T_d + T_p \tag{1}$$

$$Haze = \frac{T_t - T_p}{T_t} \times 100 \tag{2}$$

그림 4의 (a)는 HECTA MLA 필름의 총 투과율(total transmittance, T_t), (b)는 확산 투과율(diffuse transmittance, T_d) 그리고 Haze를 나타낸 그래프이다. Haze는 식 (1), (2)를 적용하여 계산되었다. 총 투과율(T_t) 그래프를 통해 HECTA MLA 필름은 모두 자외선 영역인 200~400 nm에서 우수한 차단을 보였으며 이는 TA의 영향으로 해석된다. TA는 페놀 그룹으로 구성되어 있으며, 페놀 그룹은 공액 이중결합을 형성한다. 따라서 자외선이 페놀 그룹에 있는 파이 전자를 여기시켜 에너지를 흡수하는 과정에서 자외선을 효과적으로 차단할 수 있다[1]. 이와 같은 TA의 자외선 차단 특성은 OLED가 자외선에 손상되는 것을 방지할 수 있다. 또한, HECTA

MLA 25 g 필름은 HECTA MLA 20 g 필름 대비 높은 Haze 값을 보인다. 이는 질량이 증가함에 따라 필름의 표면구조체가 더욱 깊게 형성되어 차이를 보이는 것으로 예상된다[27]. 제작된 HECTA MLA 필름 모두 가시광선 영역인 400~700 nm에서 높은 확산 투과율을 보였으며 80% 이상의 Haze 값을 나타내어 외부 광추출 필름으로 적용하기에 적합함을 시사한다.

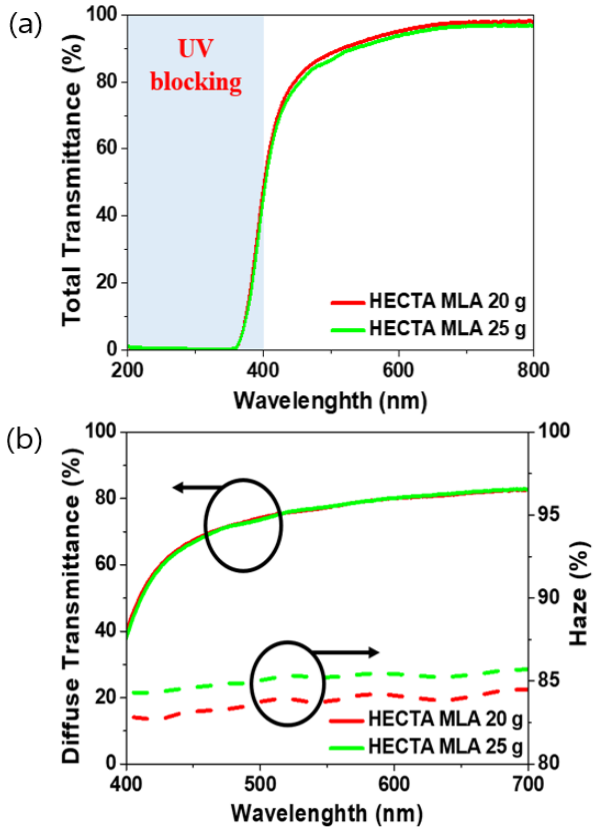


Fig. 4. Optical characteristic of HECTA MLA film
(a) total transmittance(Tt)
(b) diffuse transmittance(Td) and Haze.
그림 4. HECTA MLA 필름의 광학 특성
(a) 총 투과율(Tt) (b) 확산 투과율(Td)과 Haze

4. OLED 제작 과정

OLED 제작을 위해 150 nm의 indium tin oxide(ITO) 패턴 유리 기판을 acetone으로 15분 동안 초음파 세척한 후 220 ℃에서 isopropyl alcohol(IPA)로 20분 동안 추가 세척을 진행하였다. 기판 건조 후 ITO(150 nm) / 1,4,5,8,9,11-Hexaazatriphenylenehexacarbonitrile(HAT-CN)(5 nm) / N,N'-Di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine(NPB)(55 nm) / Tris(8-hydroxyquinolinato)aluminium(Alq_3)(40 nm) / LiF(1 nm) / Al(100 nm)의 구조로 이루어진 OLED

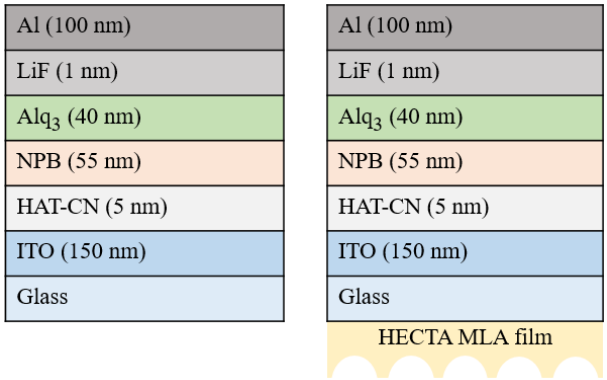


Fig. 5. Device structures of (a) OLED without HECTA MLA film (b) OLED with HECTA MLA film.
그림 5. 소자 구조
(a) HECTA MLA 필름이 부착되지 않은 OLED
(b) HECTA MLA 필름이 부착된 OLED

를 제작하였다. 1.0×10^{-6} torr 이하의 고진공 상태에서 각 유기물들은 1 Å/s, 금속 전극은 0.5 Å/s의 속도로 증착되었다. 증착이 완료되고 산소와 수분이 차단된 글로브 박스 내부에서 UV 레진(FPD sealing resin UV curing adhesive and sealant)을 사용하여 봉지(encapsulation) 공정을 진행하였으며, UV 레진은 OS CARE에서 구매하였다.

Reference : ITO(150 nm)/HAT-CN(5 nm)/NPB(55 nm)/Alq_3(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)

Device A : ITO(150 nm)/HAT-CN(5 nm)/NPB(55 nm)/Alq_3(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)/**HECTA_MLA_A**

Device B : ITO(150 nm)/HAT-CN(5 nm)/NPB(55 nm)/Alq_3(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)/**HECTA_MLA_B**

5. HECTA MLA 필름을 적용한 발광 이미지와 OLED 성능 분석

HECTA MLA 필름을 OLED 외부에 부착하기 전에 기포 제거 및 필름과 공기 사이 계면의 굴절률 차이를 줄여주고자 유리와 굴절률이 유사한 refractive index matching oil(n=1.5200±0.002)을 OLED에 적정량 도포한 후 필름을 부착하였다. HECTA MLA 필름이 부착된 OLED의 광효율 향상 결과를 확인하기 위해 소스 측정 장치(Source Measurement Unit)인 Keithley-2401과 광학 분광계인 PR-650을 이용하여 전류밀도-전압-휘도(current density-voltage-luminance, *J-V-L*) 특성과 EL spectrum 분석을 진행하였다. 그림 6의 (a)는 Reference와 HECTA MLA 필름이 부착된 OLED의 *J-V-L* 결과이다. 각 소자의 turn on voltage가 3 V로

동일하며 전류밀도가 유사한 것을 확인하였다. 그림 6의 (b), (c)는 Reference와 HECTA MLA 필름이 부착된 OLED의 외부 양자 효율과 전류 효율 결과이다. Reference 대비 HECTA MLA 필름을 부착한 OLED 모두 효율 향상이 되었음을 확인할 수 있다. 전압 5 V에서 측정한 외부 양자 효율과 전류 효율의 결과를 표 1에서 확인할 수 있다.

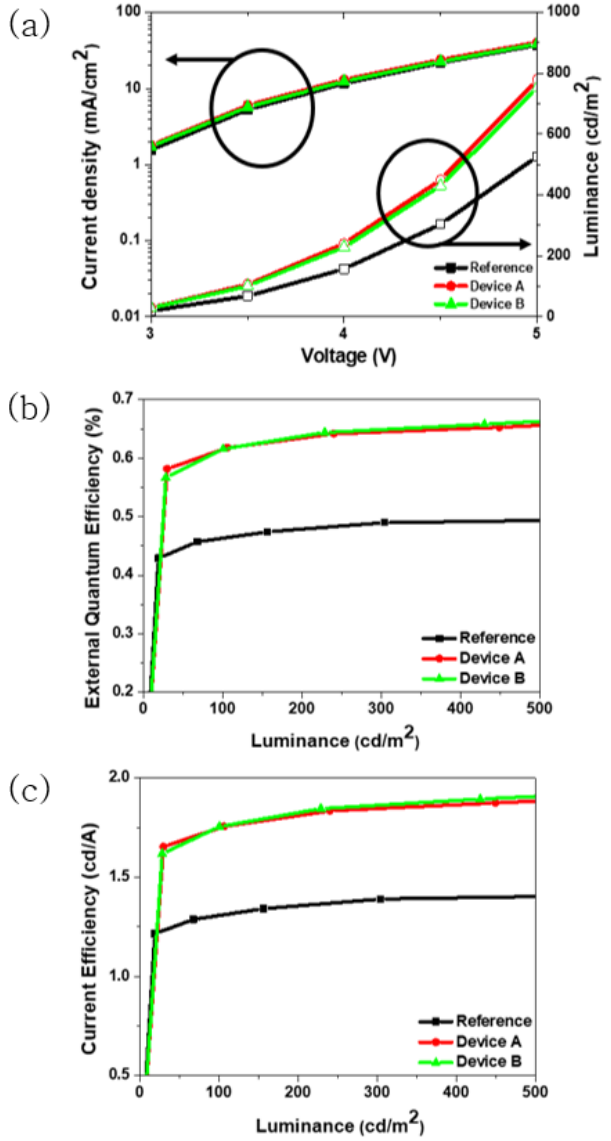


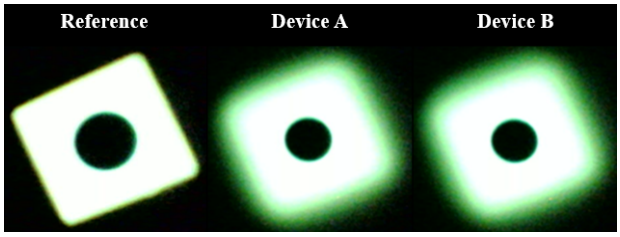
Fig. 6. (a) current density-voltage-luminance(*J-V-L*), (b) external quantum efficiency(EQE), (c) current efficiency(CE) characteristics.
그림 6. (a) 전류밀도-전압-휘도(*J-V-L*), (b) 외부 양자 효율(EQE), (c) 전류 효율(CE) 특성

표 1에서 필름이 부착되지 않은 기준소자 Reference 대비 Device B가 외부 양자 효율 38.78%, 전류 효율 39.29%로 가장 높은 향상을 보였다. 이는 도포한 용액의 질량이 큰 필름일수록 더욱 오목한 구조체를 형성하여 substrate mode에 갇힌 빛을 보다 효과적으로 추출한 것으로 해석된다[27]. 결과적으로 HECTA MLA 필름이 부착된 소자 모두 외부 양자 효율과 전류 효율에서 36% 이상 향상을 보인다. 따라서 필름 부착 후 OLED의 전기적 특성 변화 없이 휘도 및 효율 향상이 이뤄진 것은 HECTA MLA 필름에 의한 결과로 확인하였다.

Table 1. Summarized comparison of OLED performance of Reference and HECTA MLA film.
표 1. Reference 성능과 HECTA MLA 필름의 요약 비교

	EQE (%)	EQE enhancement (%)	CE (cd/A)	CE enhancement (%)
Reference	0.49	-	1.40	
Device A	0.67	36.73	1.93	37.86
Device B	0.68	38.78	1.95	39.29

Note : At a driving voltage of 5 V



(a) (b) (c)

Fig. 7. OLED emission actual images of (a) Reference, (b) Devic A, (c) Device B.
그림 7. (a) Reference, (b) Device A, (c) Device B를 부착한 OLED 발광 이미지

그림 7의 (a)는 필름이 부착되지 않은 Reference의 발광 이미지이며 (b), (c)는 HECTA MLA 필름이 부착된 OLED의 발광 이미지이다. 그림 7의 (b), (c)는 임프린팅 된 MLA 반구형 구조체를 통해 OLED에 갇힌 substrate mode의 빛을 외부로 효과적으로 추출하였기에 (a)와 비교하여 산란된 빛에 의한 발광부의 경계를 확인할 수 있다.

그림 8은 가시광선 영역인 400~700 nm까지 전면을 기준으로 Reference와 HECTA MLA 필름이 부착된 OLED의 정규화 된 전계 발광 세기를 나타낸다. OLED 외부에 제작된 광추출 필름을 부착하였을 때 필름으로 인한 발광색 변화를 확인하기 위해 그래프를 분석한 결과 Reference와 유사하게 HECTA MLA 필름을 부착한

OLED 모두 약 530 nm에서 최대 peak을 보였다. 이는 HECTA MLA 필름으로 인한 발광색 변화가 없음을 확인 할 수 있다.

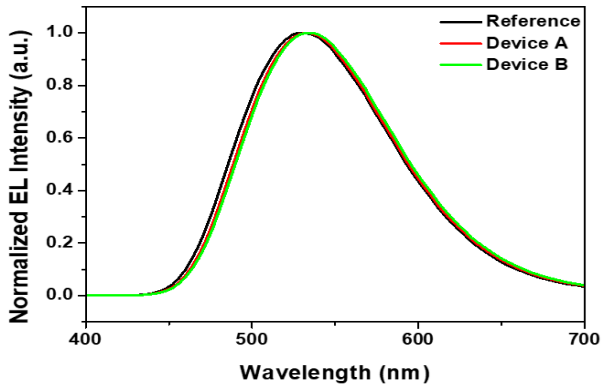


Fig. 8. normalized electroluminescence(EL) spectrum of Reference and HECTA MLA film.
그림 8. Reference 및 HECTA MLA 필름의 정규화EL (normalized electroluminescence) 스펙트럼

Ⅲ. 결론

본 연구에서는 인체에 유해한 유기 용매를 사용하지 않고 물을 사용한 간단한 용액 공정을 통해 친환경 외부 광추출 필름을 제작하였다. 우수한 생분해성을 지닌 HEC와 풍부한 수산기를 포함한 TA를 혼합하여 MLA 몰드에 임프린팅 한 결과, 일정한 형태의 반구형 구조체를 얻을 수 있었다. HEC는 광학적으로 투명하고 유리와 유사한 굴절률(n=1.51)을 가지고 있어 광추출 필름으로 활용하기에 적합하다. 또한, 첨가제로 사용된 TA는 수산기가 풍부하여 HEC와의 가교로 더 단단한 결합을 하였다. 추가적으로 HECTA MLA 필름은 TA의 페놀 그룹의 영향으로 자외선 영역에서 우수한 차단 특성을 보였으며 이는 자외선으로부터 OLED를 보호할 수 있을 것으로 해석된다. 보편적으로 사용되는 MLA 구조를 통해 제작된 HECTA MLA 필름을 OLED에 적용한 결과, substrate mode의 빛을 효과적으로 추출하였다. 가장 높은 향상을 보인 Device B 필름의 경우 Device A 필름 대비 더욱 오목한 구조체로 substrate mode로 갇힌 빛을 더 효과적으로 추출하였고 외부 양자 효율과 전류 효율을 각각 38%, 39% 향상시켰다.

References

[1] S. Han, B. Sung, H. Jang, J. Lee, S. Woo, D. Kim, J. Kim, H. R. Joe, J. W. Han, Y. H. Kim, J. H. Lee, J. Lee, "Spontaneously formed cellulose-based random micro-textured film for light extraction in organic light-emitting diodes," *Journal of Information Display*, pp.1-8, 2024. DOI: 10.1080/15980316.2024.2325357

[2] B. Sung, C. W. Joo, J. C. Yang, A. Gasonoo, S. W. Woo, J. H. Lee, S. Park, J. Lee, "Application of optical property-enhancement film to improve efficiency and suppress angle dependence of top-emitting organic light-emitting diodes," *Journal of Information Display*, vol.24, no.1, pp.71-79, 2023. DOI: 10.1080/15980316.2022.2127950

[3] S. W. Woo, J. Lee, B. Sung, A. Gasonoo, J. Cho, S. Y. Lee, S. J. Lee, Y. S. Lee, S. Y. Baek, J. Kim, Y. H. Kim, J. H. Lee, M. H. Kim, J. Lee, "Improved out-coupling efficiency of organic light-emitting diodes using micro-sized perovskite crystalline template," *Organic Electronics*, vol.108, 2022. DOI: 10.1016/j.orgel.2022.106580

[4] H. J. Jang, J. Y. Lee, G. W. Baek, J. Kwak, J. H. Park, "Progress in the development of the display performance of AR, VR, QLED and OLED devices in recent years," *Journal of Information Display*, vol.23, no.1, pp.1-17, 2022. DOI: 10.1080/15980316.2022.2035835

[5] S. J. Zou, Y. Shen, F. M. Xie, J. D. Chen, Y. Q. Li, J. X. Tang, "Recent advances in organic light-emitting diodes: toward smart lighting and displays," *Materials Chemistry Frontiers*, vol.4, no.3, pp.788-820, 2020. DOI: 10.1039/c9qm00716d

[6] R. Shinar, J. Shinar, "Light extraction from organic light emitting diodes (OLEDs)," *Journal of Physics: Photonics*, vol.4, no.3, 2022. DOI: 10.1088/2515-7647/ac6ea4

[7] K. Saxena, V. K. Jain, D. S. Mehta, "A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices," *Optical Materials*, vol.32, no.1, pp.221-233, 2009. DOI: 10.1016/j.optmat.2009.07.014

[8] C. H. Shin, E. Y. Shin, M. H. Kim, J. H. Lee, Y. Choi, "Nanoparticle scattering layer for improving light extraction efficiency of organic light emitting

diodes," *Optics express*, vol. 23. no.3, pp.133-139, 2015. DOI: 10.1364/OE.23.00A133
[9] S. Yuan, Y. Hao, Y. Miao, Q. Sun, Z. Li, Y. Cui, H. Wang, B. Xu, "Enhanced light out-coupling efficiency and reduced efficiency roll-off in phosphorescent OLEDs with a spontaneously distributed embossed structure formed by a spin-coating method," *RSC advances*, vol.7, no.69, pp.43987-43993, 2017. DOI: 10.1039/c7ra06921a
[10] A. Salehi, X. Fu, D. H. Shin, F. So, "Recent advances in OLED optical design," *Advanced Functional Materials*, vol.29, no.15, 2019.
DOI: 10.1002/adfm.201808803
[11] A. Kim, G. Husynova, J. Lee, J. H. Lee, "Enhancement of out-coupling efficiency of flexible organic light-emitting diodes fabricated on an MLA-patterned parylene substrate," *Organic Eltronics*, vol.71, pp.246-250, 2019.
DOI: 10.1016/j.orgel.2019.05.025
[12] J. H. Han, J. Moon, D. H. Cho, J. W. Shin, H. Y. Chu, J. I. Lee, N. S. Cho, J. Lee, "Luminescence enhancement of OLED lighting panels using a microlens array film," *Journal of Information Display*, vol.19. no.4, pp.179-184, 2018.
DOI: 10.1080/15980316.2018.1531073
[13] M. I. Vladu, ""Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future," *Chemical Society Reviews*, vol. 43. no.2. pp.588-610, 2014.
DOI: 10.1039/c3cs60235d
[14] Z. Fang, H. Zhang, S. Qiu, Y. Kuang, J. Zhou, Y. Lan, C. Sun, G. Li, S. Gong, Z. Ma, "Versatile wood cellulose for biodegradable electronics," *Advanced Materials Technologies*, vol.6, no.2, 2021. DOI: 10.1002/admt.202000928
[15] R. Mori, "Replacing all petroleum-based chemical products with natural biomass-based chemical products: a tutorial review," *RSC Sustainability*, vol1, no.2, pp.179-212, 2023.
DOI: 10.1039/d2su00014h
[16] N. S. El-sayed, H. Awad, G. M. El-sayed, Z. A. Nagieb, S. Kamel, "Synthesis and characterization of biocompatible hydrogel based on hydroxyethyl cellulose-g-poly (hydroxyethyl methacrylate), *Polymer Bulletin*, vol.77, pp.6333-6347, 2020.
DOI: 10.1007/s00289-019-02962-1
[17] Y. Han, C. K. Moon, K. Kim, H. Lee, J. J. Kim, "Random organic nano-textured microstructures formed by photoexcitation for light extraction of blue OLEDs, "*Organic Electronics*, vol.87, 2020.
DOI: 10.1016/j.orgel.2020.105892
[18] S. Chandrasekaran, A. C. Izquierdo, R. Castaing, B. Kanola, J. L. Scott, "Facile preparation of flame-retardant cellulose composite with biodegradable and water resistant properties for electronic device applications," *Scientific Reports*, vol.13, no.1, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-30078-0
[19] Z. Lu, J. Huang, S. E, J. Li, L. Si, C. Yao, F. Jia, M. Zhang, "All cellulose composites prepared by hydroxyethyl cellulose and cellulose nanocrystals through the crosslink of polyisocyanate," *Carbohydrate polymers*, vol.250, 2020.
DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116919
[20] S. K. Kwon, J. H. Baek, H. C. Choi, S. K. Kim, R. Lampande, R. Pode, J. H. Kwon, "Degradation of OLED performance by exposure to UV irradiation", *RSC advances*, vol.9, no.72, pp. 42561-52568, 2019. DOI: 10.1039/c9ra09730a
[21] A. Turak, "Interfacial degradation in organic optoelectronics,"*RSC Advances,* vol.3, pp.6188-6225, 2013. DOI: 10.1039/c2ra22770c
[22] Y. N. Chen, C. Jiao, Y. Zhao, J. Zhang, H. Wang, "Self-assembled polyvinyl alcohol-tannic acid hydrogels with diverse microstructures and good mechanical properties," *CS omega*, vol.3, no.9, pp.11788-11795, 2018.
DOI: 10.1021/acsomega.8b02041
[23] H. Sun, X. Fang, Y. Zhu, Z. Yu, X. Lu, J. Sun, "Highly tough, degradable, and water-resistant bio-based supramolecular plastics comprised of cellulose and tannic acid," *Journal of Materials Chemistry*, vol.11, no.13, pp.7193-7200, 2023.
DOI: 10.1039/d3ta00351e
[24] M. A. Gwak, B. M. Hong, W. H. Park, "Hyaluronic acid/tannic acid hydrogel sunscreen with excellent anti-UV, antioxidant, and cooling

effects," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol.191, pp.918-924, 2021.
DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.09.169
[25] F. Galeotti, W. Mroz, G. Scavia, C. Botta, "Microlens arrays for light extraction enhancement in organic light-emitting diodes: a facile approach," *Organic Electronics*, vol.14, no.1, pp.212-218, 2013. DOI: 10.1016/j.orgel.2012.10.034
[26] G. Zahi, W. Zhu, L. Huang, C. Yi, K. Ding, "Enhanced light extraction from green organic light-emitting diodes by attaching a high-haze random-bowls textured optical film," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol.53, no.43, 2020.
DOI: 10.1088/1361-6463/ab9fc3
[27] S. Han, B. Sung, D. Kim, J. Kim, S. Woo, J. Lee, S. Y. Baek, M. Won, C. W. Joo, J. W. Han, Y. H. Kim, D. Kim, J. H. Lee, J. Lee, "Eco-friendly External Light Extraction Films for Enhanced Out-Coupling Efficiency of Organic Light Emitting Diodes," *Journal of IKEEE*, vol.27, no.2, pp.9-17, 2023.
DOI: 10.7471/ikeee.2023.27.2.135

BIOGRAPHY

Hyunjun Jang (Member)

2019~2024 : BS degree in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University
2024~present : MS degree course in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University

Baeksang Sung (Member)

2013~2022 : BS, MS degree in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University
2022~present : PhD degree course in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University

Sora Han (Member)

2019~2023 : BS degree in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University
2023~present : MS degree course in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University

Jooho Lee (Member)

2018~2024 : BS degree in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University
2024~present : MS degree course in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University

Yong Hyun Kim (Member)

2000~2010 : BS, MS and PhD. degree in Materials Science and Eng., Korea University
2010~2013 : PhD degree in Physics, Dresden University of Technology (Germany)
2014~present : Professor, Pukyong Nat'l Univ.

Jae-Hyun Lee (Member)

2011 : PhD degree in Material Science and Eng., Seoul Nat'l University
2011~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, TU Dresden (Germany).
2012~present : Professor, Hanbat Nat'l Univ.

Jonghee Lee (Member)

2002, 2004, and 2007 : BS, MS, and Ph.D degree in Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Korea.
2007~2010 : Member of Engineering Staff, Electronics and Telecommunication Research Institute (ETRI), Korea
2010~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, Technical Univ. of Dresden, Germany.
2012~2018 : Senior Member of Engineering Staff, Researcher, ETRI, Korea
2018~present : Professor, Hanbat Nat'I Univ.