

# 유기발광다이오드의 광효율 향상을 위한 친환경 외부광추출 필름

## Eco-friendly External Light Extraction Films for Enhanced Out-Coupling Efficiency of Organic Light Emitting Diodes

한 소 라\*, 성 백 상\*, 김 다 솔\*, 김 진 화\*, 우 승 완\*, 이 주 호\*, 백 승 요\*, 원 미 진\*, 주 철 웅\*\*,  
한 주 원\*\*\*, 김 용 현\*\*\*, 김 동 수\*, 이 재 현\*, 이 종 희\*★

Sora Han\*, Baeksang Sung\*, Dasol Kim\*, Jinhwa Kim\*, Seungwan Woo\*, Jooho Lee\*,  
Seung-Yo Baek\*, Mijin Won\*, Chul Woong Joo\*\*, Joo Won Han\*\*\*, Yong Hyun Kim\*\*\*,  
Dongsoo Kim\*, Jae-Hyun Lee\*, Jonghee Lee\*★

### Abstract

In this study, we fabricated external out-coupling films for organic light emitting diodes (OLEDs) using eco-friendly materials, hydroxyethyl cellulose (HEC) and glycerol to improve the light extraction efficiency of OLEDs. HEC and glycerol-based microlens array (GHEC MLA) films were fabricated by imprinting method. The effect of GHEC MLA film on the external quantum and current efficiency of OLEDs were evaluated, and we found that the light-emitting performances of devices with the GHEC MLA film were improved by approximately 20% compared to those without the film. Furthermore, the GHEC MLA film exhibited excellent dissociation properties, completely dissolving in water within a few minutes, thus establishing its eco-friendliness. Hence, we propose that this GHEC MLA film could be employed as an eco-friendly and non-toxic light extraction film for next-generation OLEDs.

### 요 약

본 연구에서는 친환경 소재인 hydroxyethyl cellulose(HEC)와 glycerol을 활용하여 유기발광다이오드(OLED : organic light emitting diode)의 광효율 향상을 위한 외부 광추출 필름을 제작했다. 기존 microlens array(MLA) 몰드에 HEC 및 glycerol 기반 소재를 임프린팅하여 GHEC MLA 외부 광추출 필름을 제작하였다. GHEC MLA 필름이 OLED 소자의 외부양자효율 및 전류효율에 미치는 효과를 평가한 결과, GHEC MLA 필름을 부착하지 않은 소자에 비해 약 20% 향상됨을 확인했다. 또한, GHEC MLA 필름은 수 분 내로 물에 완전히 해리되는 우수한 친환경 특성을 입증하였다. 이를 통해 친환경 및 무독성의 GHEC MLA 필름은 차세대 OLED 광효율 향상 기술에 적용되어 활용될 수 있음을 제안한다.

*Key words : Organic Light emitting diodes, Out-coupling, Bio-polymer, microlens array(MLA), Eco-friendliness*

\* Department of Creative Convergence Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Republic of Korea

\*\* Reality Display Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), 218 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, 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](mailto:jonghee.lee@hanbat.ac.kr) Tel : +82-42-828-8802

Manuscript received Apr. 21, 2023; revised May. 23, 2023; accepted Jun. 20, 2023.

※ Acknowledgment

The authors acknowledge financial support from the Basic Science Research program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2018R1A6A1A03026005 and 2022R1A2C1004286), and by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (P0012744, The Competency Development Program for Industry Specialist).

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(OLED : Organic light emitting diode)는 유리, 플라스틱 등 다양한 기판 종류에 구애받지 않고, 입체적인 형상에 접목할 수 있다는 장점을 지니고 있어 디스플레이 및 조명 분야에서 많은 관심을 받고 있다[1-3]. OLED는 다층 구조로 이루어져 있으며, 각각의 층마다 굴절률 차이로 인해 입사각이 특정 임계각보다 커지게 되면서 내부 전반사가 발생한다[3-5]. 이러한 내부 전반사에 의해 유리기판과 공기 계면의 substrate mode와 하부전극(ex. ITO : indium tin oxide)과 기판 계면 등에서의 waveguide mode가 발생한다. 따라서 생성된 빛들의 약 70~80%는 substrate mode 및 waveguide mode에서 추출되지 못하고 갇히거나 소실된다. 이에 따른 결과로 내부 전반사에 의한 OLED의 외부양자효율이 20~30%로 제한되는 문제점이 있다. 이와 같은 낮은 외부양자효율을 향상시키기 위해 다양한 광추출 기술들이 활발히 연구되고 있다[4-5]. OLED의 효율 향상을 위한 광추출 기술 중 대표적인 외부 광추출 기술은 OLED 기판 외부에 산란 특성을 가지는 필름을 부착하는 등 간단한 방식의 기술로서, OLED 소자의 전기적 특성 저하 등의 부정적인 영향을 가하지 않으며 OLED의 외부 광추출 효율을 안정적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다[2,5]. 외부 광추출 기술을 통한 OLED의 효율 향상 조건으로 유리기판과 유사한 굴절률(refractive index,  $n \sim 1.5$ ) 및 구조체 등을 요구하고, 대표적인 예로는 반구형 구조체가 일정한 배열로 나열된 microlens array(MLA)가 있다[4]. OLED 소자 외부 기판에 MLA를 부착하면 구조체를 통해 기판과 공기 계면에 도달한 빛의 입사각은 임계각보다 작아져 substrate mode에 갇혔던 빛을 추출해 낼 수 있어 OLED 외부 광추출 효율 향상에 효과적이다[6-8].

OLED 기반의 산업 확장과 이에 따른 효율 향상 기술이 발전됨에 따라 고효율 전자제품의 수요와 공급이 급증하고 있다. 그에 따른 결과로 엄청난 양의 전자폐기물(e-waste)이 발생된다[9-11]. 하지만 대부분의 전자폐기물은 재활용에 한계가 있고, 특히 석유 기반 플라스틱으로 구성된 전자제품은 생분해가 불가능하여 이로 인한 환경 파괴가 심각하다[12-13]. 또한 공정 시 사용하는 독성 용매 및 발생된 부산물은 인간에게 생태학적 위협으로 다가온다[10,12]. 이를 개선하기 위한 노력으로 환경친화적인 미래를 위해 폐액과 폐제품을 줄인 공정과 제품의 전환이 요구되며, 에너지 및 비용 효율적인 방식

의 공정 기술도 요구된다[9, 11]. 또한 독성 용매의 사용을 줄이는 동시에 자연에서도 쉽게 분해되는 친환경 소재 기반 부품 및 제품이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 bio-polymer인 cellulose계 소재인 hydroxyethyl cellulose(HEC)를 기반으로 OLED의 광효율을 향상시키는 외부 광추출 필름을 제작하였고 그 특성을 보고하고자 한다. HEC는 식물 및 박테리아 등에서 추출되는 가장 풍부한 bio-polymer로써 우수한 화학적 안정성과 생체적합성 및 생분해성을 지닌 재료이다[14-15]. 또한, 광학적으로 투명하며 대표적 OLED용 기판인 유리와 유사한 굴절률( $n=1.51$ )를 가지므로 광추출 필름의 재료로 적합하다. 하지만 HEC는 약한 기계적 특성을 지니고 있어 OLED의 광효율 향상을 위한 광추출 필름을 제작할 시 취성이 높아 끊어지거나 광효율 향상 구조체를 형성하기 어렵다는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위해 HEC에 glycerol을 혼합하였다. glycerol은 cellulose 분자 내 수소결합으로 얽힌 고분자 사슬들을 풀어주는 동시에 유연성 및 신축성을 부여해준다. 따라서 HEC의 물성을 개선하여 광추출 필름 제작 시에 원하는 모양으로 쉽게 제작할 수 있도록 하였다[16]. GHEC의 우수한 생분해 특성은 OLED용 환경친화적인 외부 광추출 필름으로 잠재력을 가지고 있다. 본 연구에서는 기존의 대표적인 외부 광추출 필름 형태인 MLA를 몰드로 사용하여 간단한 임프린팅 공정을 통해 오목한 반구형 패턴의 친환경 외부 광추출 필름 제작에 관한 연구를 보고하고자 한다. 제작된 hydroxyethyl cellulose : glycerol(GHEC) MLA 필름은 높은 흐림도(haze > 90)를 지녔으며 GHEC MLA 필름의 유리와 유사한 굴절률과 오목한 반구형의 구조체를 통해 외부양자효율 및 전류효율을 약 20% 향상시켰다. 또한, GHEC MLA 필름의 친환경 특성을 실험한 결과, GHEC MLA 필름은 물속에서 3분 이내로 해리되었음을 확인하였고, GHEC MLA 필름 제작 과정 중 독성 용매를 사용하지 않는 동시에 공정 시 발생하는 폐액의 양을 줄여 인간과 환경에 해롭지 않은 긍정적인 방안을 제시한다.

## II. 본론

### 1. GHEC MLA 필름 제작 과정

그림 1은 hydroxyethyl cellulose(HEC)와 glycerol의 분자 구조를 나타내며, 그림 2는 HEC와 glycerol을 사용한 GHEC MLA 필름의 제작 과정을 도식화하였다.

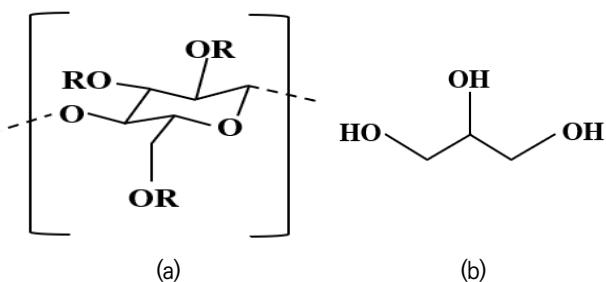


Fig. 1. Molecular structure of (a) hydroxyethyl cellulose, (b) glycerol.

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

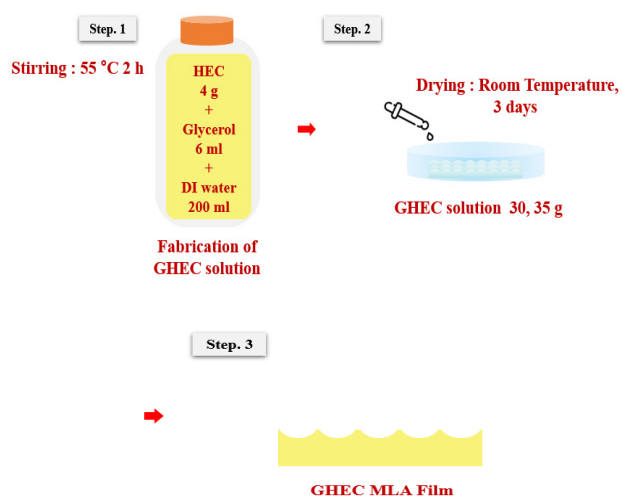


Fig. 2. Fabrication of GHEC MLA film.

그림 2. GHEC MLA 필름 제작 과정

HEC 분말 4 g, glycerol 6 ml, 탈 이온수(deionized water) 200 ml를 55 °C에서 2 시간 교반하여 GHEC 용액을 제작하였으며, HEC와 glycerol은 sigma aldrich에서 구매하였다. 외부 필름의 구조체를 얻기 위한 몰드로 MLA(내부 반구 지름 20  $\mu\text{m}$ , 높이 20  $\mu\text{m}$ )를 사용하였다. GHEC 용액 양에 따른 구조체의 변화를 확인하고자 MLA 몰드 상부에 GHEC 용액을 30 g 도포한 GHEC MLA 필름 1과 GHEC 용액을 35 g 도포한 GHEC MLA 필름 2를 각각 제작하였고, 도포 후 상온에서 건조 및 건조된 GHEC를 MLA로부터 떼어내는 과정을 통해 최종 GHEC MLA 필름 1, 2를 제작하였다. 제작된 GHEC MLA 필름은 OLED의 광효율 향상을 위한 외부 광추출 필름으로 사용하였다.

## 2. GHEC MLA 필름 표면 분석

제작된 GHEC MLA 필름의 표면을 확인하기 위하여 광학 현미경(Optical Microscope)과 주사전자 현미경

(Scanning Electron Microscope, JSM-6390)을 사용하여 분석하였다.

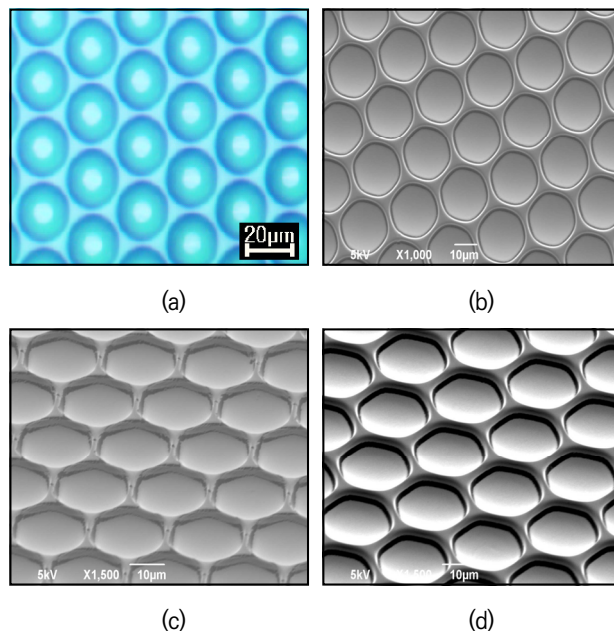


Fig. 3. (a) Optical Microscope Image of GHEC MLA film, (b) Scanning Electron Microscope Image of GHEC MLA film, (c) Tilt Image of GHEC MLA film 1, (d) Tilt Image of GHEC MLA film 2.

그림 3. (a) GHEC MLA 필름의 광학 현미경 이미지, (b) GHEC MLA 필름의 주사 전자 현미경 이미지, (c) GHEC MLA 필름 1의 tilt 이미지, (d) GHEC MLA 필름 2의 tilt 이미지

그림 3의 (a)는 광학 현미경으로 관찰한 GHEC MLA 필름의 평면상의 이미지를 보여준다. 그림 3의 (b)-(d)는 주사 전자 현미경을 사용하여 GHEC MLA 필름의 표면을 관찰한 이미지이다. 그림 3의 (c)는 GHEC 용액 30 g을 사용하여 제작한 GHEC MLA 필름 1의 tilt 이미지이며 (d)는 GHEC 용액 35 g을 사용하여 제작한 GHEC MLA 필름 2의 tilt 이미지이다. 그림 3을 통해 일정한 배열의 내부 반구 지름이 20  $\mu\text{m}$ 인 MLA 구조체를 효과적으로 임프린팅 되었음을 확인할 수 있다. 또한 그림 3의 (c)와 (d)를 통해 GHEC 용액을 달리함으로써 GHEC MLA 필름의 구조체 변화를 확인할 수 있었다. GHEC 용액을 30 g 사용하여 제작한 GHEC MLA 필름 1(깊이 ~ 2.67  $\mu\text{m}$ ) 대비 GHEC 용액 35 g을 도포하여 제작한 GHEC MLA 필름 2(깊이 ~ 4.0  $\mu\text{m}$ )에서 더욱 깊은 반구형의 오목한 구조체를 형성했음을 확인할 수 있다. 이는 35 g의 GHEC 용액을 도포한 MLA에서 30 g의 GHEC 용액 대비 큰 무게와 압력이 가해진 결과로 해석

된다. GHEC MLA 필름을 OLED 소자에 적용하였을 때, 구조체를 통한 빛의 산란 효과로 광추출 효율이 향상될 것으로 예상되므로 GHEC MLA 필름 2가 더 깊고 오목한 구조체를 형성함으로써 GHEC MLA 필름 1 대비 더 높은 광효율 향상을 보일 것으로 예상하였다.

3. OLED 제작 과정

150 nm 두께의 indium tin oxide(ITO) 패턴이 된 유리 기판은 acetone을 이용하여 초음파 세척을 한다. 그 후 isopropyl alcohol(IPA)로 20분간 추가 세척을 진행하였다. 건조 후 열 증착기로 기판을 이송하여 ITO (150 nm) / Dipyrazino[2,3-f : 2',3'-h]quinoxaline-2,3,6,7,10,11-hexacarbonitrile(5 nm) / N,N'-Di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine(NPB)(55 nm) / Tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum(Alq3)(60 nm) / LiF(1 nm) / Al(100 nm) 의 구조로 박막 증착을 진행하여 OLED 소자를 제작하였다. 각 유기물들을  $1.0 \times 10^{-6}$  torr 이하의 고진공 상태에서 증착하였으며, 금속 전극은 0.5 Å/s의 속도로 증착되었다. 산소와 수분으로부터 제작된 OLED를 보호하기 위해 질소로 채워진 글로브 박스 내에서 encapsulation glass에 UV 레진을 바른 후 봉지 작업을 진행하였다. 제작한 OLED의 구조는 그림 4를 통해 확인할 수 있다. 제작한 OLED의 전류밀도-전압-휘도 특성은 Keithley 2400을 사용하여 측정하였다.

Device A(Reference) : ITO(150 nm)/HAT-CN(5 nm)/NPB(55 nm)/Alq3(60 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)

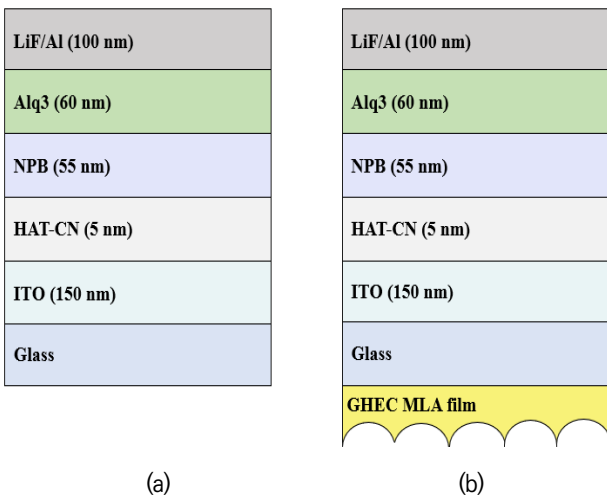


Fig. 4. Device structures of (a) OLED without film, (b) OLED with GHEC MLA film.  
그림 4. (a) 필름을 부착하지 않은 OLED, (b) GHEC MLA 필름을 부착한 OLED 소자 구조

Device B : ITO(150 nm)/HAT-CN(5 nm)/NPB(55 nm)/Alq3(60 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)/GHEC MLA film 1

Device C : ITO(150 nm)/HAT-CN(5 nm)/NPB(55 nm)/Alq3(60 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)/GHEC MLA film 2

4. GHEC MLA 필름을 적용한 OLED 소자 성능 분석

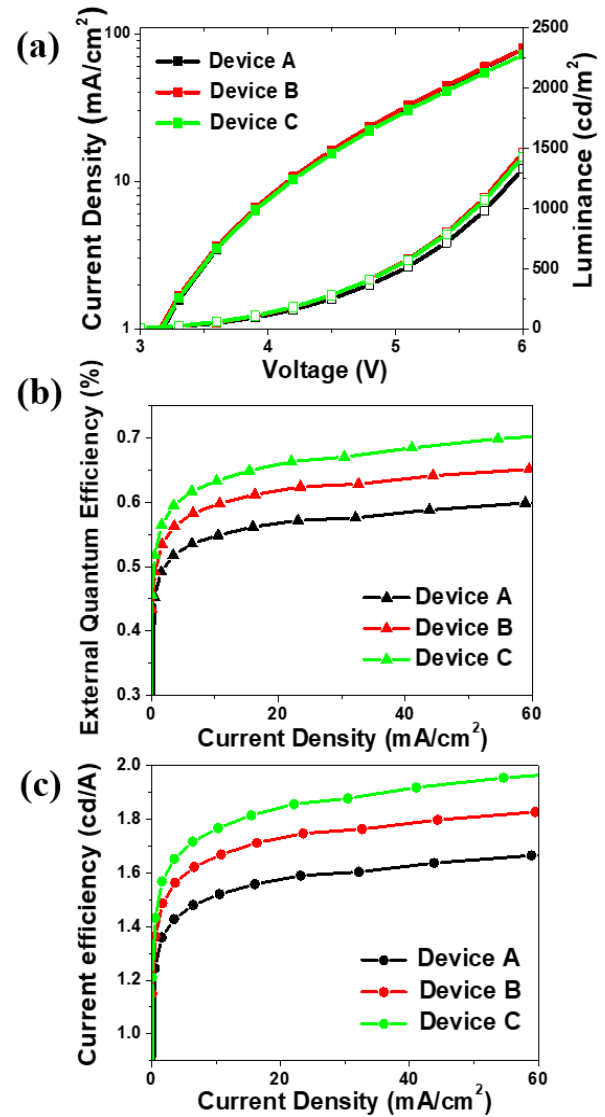


Fig. 5. (a) current density-voltage-luminance (J-V-L) characteristics, (b) external quantum efficiency (EQE) - current density characteristic, (c) current efficiency (CE) - current density of Device A-C.  
그림 5. Device A-C의 (a) 전류밀도-전압-휘도 특성, (b) 외부양자효율 특성, (c) 전류효율 특성 비교

GHEC MLA 필름을 통한 OLED의 광효율 향상을 확인하기 위해 GHEC MLA 필름 1과 GHEC MLA 필름 2

를 각각 부착하여 OLED 소자의 Current density-Voltage-Luminance( $J-V-L$ ) 및 효율 분석을 진행하였다. GHEC MLA 필름을 OLED 기판에 부착하기 전, refractive index matching oil( $n=1.5200\pm 0.002$ )을 OLED 기판 위에 소량을 떨어뜨려 GHEC MLA 필름을 부착하였다. 이는 OLED 기판과 GHEC MLA 필름 사이 공기층에 대한 굴절률 차이를 줄여주며 필름을 OLED 기판에 부착 시 발생하는 기포를 없애준다.

그림 5 (a)는 Device A-C의 Current density-Voltage-Luminance( $J-V-L$ ) 측정 결과이다. 그림 5 (a)를 통해 각 소자의 전류밀도가 유사함을 확인하였다. turn on voltage도 모든 픽셀에서 2.7V로 동일함을 확인하였다. 이를 통해 GHEC MLA 필름 적용에 의한 OLED 소자의 성능 저하가 없음을 확인하였다. 또한 OLED 소자의 휘도 및 효율 향상은 GHEC MLA 필름에 의한 결과임을 알 수 있다. 그림 5의 (b)와 (c)는 각각 Device A-C의 외부양자효율(EQE : external quantum efficiency), 전류효율(CE : current efficiency)의 측정 결과이다.

필름을 부착하지 않은 Device A 대비 GHEC MLA 필름 1과 2를 부착한 Device B와 C에서 외부양자효율과 전류효율이 향상됨을 확인할 수 있었다. 전류밀도 60 mA/cm<sup>2</sup>에서 측정한 외부양자효율과 전류효율의 상세 값은 표 1에서 확인할 수 있다.

Table 1. Comparison of OLED performance with or without GHEC MLA film.

표 1. GHEC MLA 필름 유무에 따른 OLED 성능 비교

	EQE (%)	EQE enhancement (%)	CE (cd/A)	CE enhancement (%)
Device A	0.59	-	1.64	
Device B	0.65	10.17	1.81	10.37
Device C	0.69	16.95	1.95	18.90

Note : At a current density of 60 mA/cm<sup>2</sup>

표 1을 통해 기준 소자인 Device A 대비 GHEC MLA 필름 1을 부착한 Device B는 외부양자효율과 전류효율이 각각 10.17%, 10.37% 향상되었으며, GHEC MLA 필름 2를 도입한 Device C는 Device A 대비 외부양자효율 및 전류효율이 각각 16.95%, 18.9% 향상을 확인하였다. 이는 GHEC MLA 필름을 부착함에 따른 결과로서, GHEC MLA 필름이 기존 OLED 기판 내부에 갇혀서 방출되지 못한 substrate mode의 빛을 추출 해

내는 능력이 우수함을 확인하였다. 또한 GHEC MLA 필름 2를 부착한 OLED 소자는 기존 소자와 GHEC MLA 필름 1을 부착한 Device B 대비 외부양자효율 및 전류효율이 우수함을 확인할 수 있다. 이는 GHEC MLA 필름 제작 과정에서 GHEC 용액 양을 달리함으로써 변화된 구조체의 형태와 깊이에 따른 결과임을 알 수 있다.

### 5. GHEC MLA 필름의 광학 특성 분석

제작한 GHEC MLA 필름의 광투과율 및 흐림도(haze) 분석을 위해 UV-vis spectrophotometer(Lambda 950)를 이용해 총 투과율( $T_t$ ), 확산 투과율( $T_d$ )과 흐림도(haze)를 측정하였다. 총 투과율( $T_t$ )은 평행 투과율( $T_p$ )과 확산 투과율( $T_d$ )의 총합으로, 총 투과율( $T_t$ )과 평행 투과율( $T_p$ ) 값을 이용해 확산 투과율( $T_d$ )을 구한 후 다음 식 (1), (2)를 기반으로 흐림도 값을 얻었다.

$$T_t = T_d + T_p \quad (1)$$

$$haze = \frac{T_t - T_p}{T_t} \times 100 \quad (2)$$

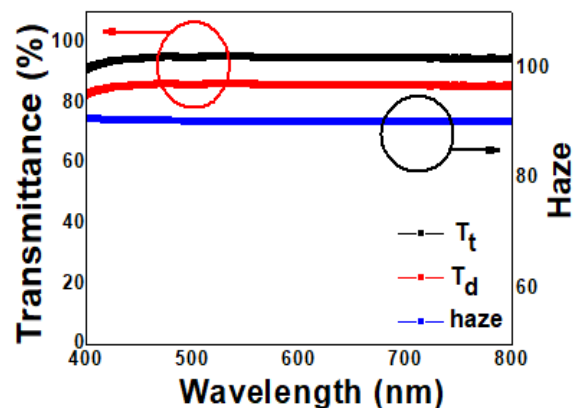


Fig. 6. Total transmittance( $T_t$ ), Diffuse transmittance( $T_d$ ) and Haze of GHEC MLA film.

그림 6. GHEC MLA 필름의 총 투과율( $T_t$ ), 확산 투과율( $T_d$ ) 및 흐림도

상기 그림 6은 GHEC MLA 필름의 총투과율( $T_t$ )과 확산 투과율( $T_d$ ), 흐림도를 측정한 그래프로서, 그림 6을 통해 GHEC MLA 필름은 가시광선 영역에서 총 투과율( $T_t$ ) 94%, 확산 투과율( $T_d$ ) 85%, 흐림도는 약 90으로 매우 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. GHEC MLA 필름이 94%로 높은 투과율을 가짐으로써 높은 광 투과율을 요구하는 OLED의 외부 광추출 필름으로 적합함을 확인하였다.

산란 효과는 substrate mode의 손실된 빛을 추출하

여 OLED의 효율을 높이는 역할을 한다. 큰 산란 효과는 흐림도와 관련이 있으며 GHEC MLA 필름의 광학적 특성을 분석한 결과, 확산 투과율( $T_d$ )은 85%, 흐림도는 약 90으로 높은 값을 가짐을 확인하였다. 이는 GHEC MLA 필름의 오목한 반구형의 구조체를 통해 빛들이 산란 되어 높은 확산 투과율( $T_d$ )과 흐림도를 보임으로 해석된다. GHEC MLA 필름의 높은 확산 투과율( $T_d$ )과 흐림도를 통해 OLED에 GHEC MLA 필름을 적용하였을 때 구조체를 통해 빛의 산란을 유도하여 substrate mode의 빛을 효과적으로 추출할 것으로 예상된다. 따라서 GHEC MLA 필름은 OLED의 낮은 광효율의 원인인 내부 전반사를 효과적으로 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

그림 7의 (a)는 GHEC MLA 필름을 부착하지 않은 OLED, (b)와(c)는 GHEC MLA 필름을 부착한 OLED 소자의 발광 이미지이다.

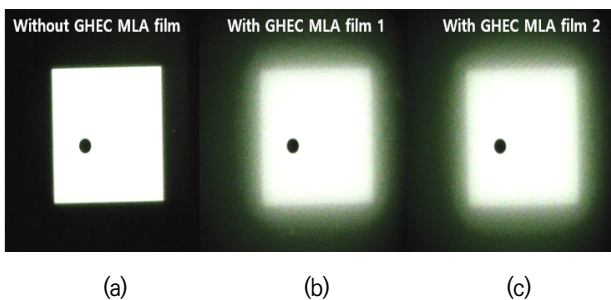


Fig. 7. OLED emission actual images of (a) without GHEC MLA film, (b) with GHEC MLA film 1, (c) with GHEC MLA film 2.

그림 7. (a) GHEC MLA 필름을 부착하지 않은, (b) GHEC MLA 필름 1, (c) GHEC MLA 필름 2를 부착한 OLED 발광 이미지

필름을 부착하지 않은 그림 7 (a)와 비교하여, OLED 소자에 GHEC MLA 필름 1을 부착한 OLED 소자의 발광 이미지 (b)와 GHEC MLA 필름 2를 부착한 OLED 소자의 발광 이미지 (c)에서 substrate mode의 빛들이 GHEC MLA 필름의 오목한 반구형의 구조체를 통해 다양한 각도로 추출되면서 빛들이 산란 되는 모습을 확인할 수 있다.

## 6. GHEC MLA 필름의 친환경 특성

GHEC MLA 필름의 친환경 특성을 확인하기 위해 필름의 일부분을 물에 침전시켜 실험을 진행하였다. 그림 8은 GHEC MLA 필름을 물에 침전시키기 전/후의 과정으로, 그림 8 (a)는 물에 침전시키기 전의 GHEC MLA 필름, (b)는 침전되어 3분이 경과한 GHEC MLA 필름의

이미지이다. 물과 접촉된 필름은 물에 의해 점차 해리되는 것을 그림 8을 통해 확인할 수 있으며, 그 이유는 HEC와 glycerol의 하이드록시기(-OH)들이 물과 결합하여 점차 해리됨으로 해석된다. 즉, 상호작용하고 있던 HEC 분자와 glycerol 분자가 물 분자에 의해 분자 간 거리가 멀어져 물속에서 해리되는 것이다. 그 결과, 25분 후 침전된 GHEC MLA 필름은 육안으로 볼 수 없을 정도로 물속에서 완전히 해리됨을 확인하였다. 결과적으로 GHEC MLA 필름은 짧은 시간 내에 물에서 해리되는 친환경 특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 GHEC MLA 필름 제작 과정에서 독성 용매의 사용을 줄이는 동시에 물만을 사용한 친환경 공정을 사용함으로써 GHEC MLA 필름은 자연에서 독성 없이 빠른 시일 내에 분해될 것으로 예상된다.

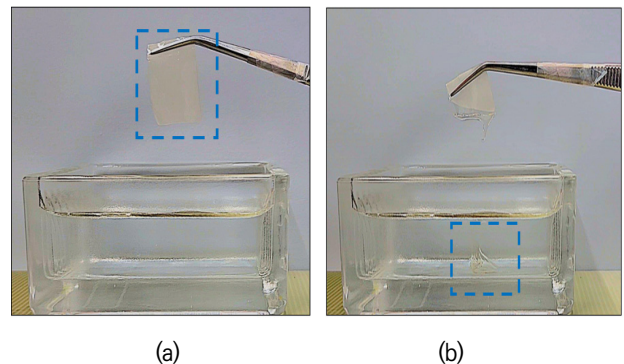


Fig. 8. Images of GHEC MLA film (a) before immersion, (b) after immersion: lower part of GHEC MLA film dissociated.

그림 8. (a) 침전 전, (b) 침전 후 (GHEC MLA 필름의 하단 부분이 해리됨)의 GHEC MLA 필름 이미지

## III. 결론

본 연구에서는 OLED의 광효율을 개선하는 동시에 급증하는 전자폐기물로 인한 환경오염을 해결하기 위해 생체적합성 및 우수한 분해력 지닌 Bio-polymer를 이용하여 OLED의 외부 광추출 필름을 제작했다. HEC는 glycerol과 혼합하여 사용되었으며, 검증된 광추출 구조인 MLA를 임프린트하는 방식으로 OLED용 외부 광추출 필름을 제작하였다. GHEC MLA 필름은 94%의 총 투과율( $T_d$ )과 높은 흐림도 (haze >90)를 가지며 OLED 소자 기판에 부착하는 간단한 방식을 통해 외부양자효율 및 전류효율을 약 20% 향상시켰다. 또한, 독성 용매를 사용하지 않고 제작한 GHEC MLA 필름은 환경친화적이며 우수한 생체적합성을 지님을 확인하였고, 자연에서 쉽게

분해되는 특성을 통해 GHEC MLA 필름이 전자폐기물로 인한 환경 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 비용 및 에너지 효율적인 공정으로 제작된 GHEC MLA 필름은 차세대 조명 및 디스플레이의 광효율 향상을 위한 외부 광추출 필름으로 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

## References

- [1] A. Kim, G. H. Lee, J-H. Lee, "Enhancement of out-coupling efficiency of flexible organic light-emitting diodes fabricated on an MLA-patterned parylene substrate," *Organic Electronics*, vol.71, no.25, pp.246-250, 2019.  
DOI: 10.1016/j.orgel.2019.05.025
- [2] 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
- [3] R. Shinar and 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
- [4] M. C. Suh, B. P. Byung, B. W. Lim, N. S. Kim, "Preparation of randomly distributed micro-lens arrays fabricated from porous polymer film and their application as a light extraction component," *Organic Electronics*, vol.38, pp.316-322, 2016.  
DOI: 10.1016/j.orgel.2016.08.029
- [5] K. Saxena, V. K. Jain, D-S. Metha, "A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices," *Optical Materials*, vol.32, pp.221-233, 2009.  
DOI: 10.1016/j.optmat.2009.07.014
- [6] 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
- [7] F. Galeotti, W. Mroz, G. Scavia, B. Chiara, "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
- [8] S. Müller and S. R. Forrest, "Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays," *J. Appl. Phys.*, vol.91, no.5, pp.3324-3327, 2002.  
DOI: 10.1063/1.1435422
- [9] G. Zhal, 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," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.53, p.8, 2020.  
DOI: 10.1088/1361-6463/ab9fc3
- [10] M. Irimia-Vladu, "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future," *The Royal Society of Chemistry*, vol.43, pp.588-610, 2014.
- [11] A. S. Khurd, B. Kandasubramanian, "A systematic review of cellulosic material for green electronics devices," *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, vol.4, 2022.  
DOI: 10.1016/j.carpta.2022.100234
- [12] Z. Fang, H. Zhang, S. Qiu, Y. Kuang, J. Zhou, Y. Lan, C. Sun, G. Li, S. Gong, Z. Ma, "Versatiese Wood Cellulose for Biodegradable Electronics," *Adv.Mater. Technol.*, vol.6, 2021.  
DOI: 10.1002/admt.202000928
- [13] B. Pang, G. Jliang, J. Zhou, Y. Ahu, W. Cheng, D. Zhao, K. Wang, G. Xu and H. Yu, "Molecular-Scale Design of Cellulose-Based Functional Materials for Flexible Electronic Devices," *Adv. Electron.Mater*, vol.7, 2021.  
DOI: 10.1002/aelm.202000944
- [14] R. Tong, G Chen, J. Tian, M. He, "Highly transparent, weakly hydrophilic and biodegradable cellulose film for flexible electroluminescent devices," *Carbohydrate Polymers*, vol.227, 2020.  
DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115366
- [15] A. S. Khurd, B. Kandasubramanian, "A systematic review of cellulosic material for green electronics devices," *Carbohydrate Polymer Technologies and*

*Applications*, vol.4, 2022.

DOI: 10.1016/j.carpta.2022.100234

[16] M. Hao, L. Li, S. Wang, F. Sun, Y. Bai, Z. Cao, C. Qu & T. Zhang, "Stretchable, self-healing, transient macromolecular elastomeric gel for wearable electronics," *Microsystems & Nanoeengineering*, vol.5, no.9, pp.5-9, 2019.

DOI: 10.1038/s41378-019-0047-4

[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] J. H. Lee, S. Kang, N-M. Park, J-W. Shin, C. W. Joo, J. Lee. S-D. Ahn, S-Y. Kang & J. Moon, "Porous cellulose paper as a light out coupling medium for organic light-emitting diodes," *Journal of Information Display*, vol.19, no.4, pp.171-177, 2018.

DOI: 10.1080/15980316.2018.1527260

[19] J-H. Lee, Y-H. Ho, H-Y. Lin, J-H. Fang, S-C. Hsu, J-R. Lin & M-K. Wei, "Efficiency improvement and image quality of organic light-emitting display by attaching cylindrical microlens arrays," *OPTICS EXPRESS*, vol.16, no.26, 2008.

DOI: 10.1364/OE.16.021184

[20] N. Jürgensen, B. Fritz, A. Mertens, J-N. Tisserant, M. Kolle, G. Gomard, G. Hernandez-Sosa, "A Single-Step Hot Embossing Process for Integration of Microlens Arrays in Biodegradable Substrates for Improved Light Extraction of Light-Emitting Devices," *Adv. Mater. Technol.*, vol.6, no.2, 2021.

DOI: 10.1002/admt.201900933

[21] 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

## BIOGRAPHY

### 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

### 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

### Dasol Kim (Member)



2018~2022 : BS degree in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University  
2022~present : MS degree course in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University

### Jinhwa Kim (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

### Seungwan Woo (Member)



2016~2022 : BS degree in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University  
2022~present : MS degree course in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l University



**JooHo Lee** (Member)



2018~present : BS 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.

**Seung-Yo Baek** (Member)



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

**Dongsoo Kim** (Member)



1991~2001 : MS, Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Yung Nam University  
1991~2011 : Nano Mechanical System Research Division at Korea Institute of Machinery & Materials as the general manager (KIMM)

2012~present : Professor, Hanbat Nat'l Univ.

**Mijin Won** (Member)



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

**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.

**Chul Woong Joo** (Member)



2008~2010 : BS, MS degree in Polymer Science and Engineering Organic Electronics Devices, Dankook University  
2011~present : Electronics and Telecommunications Research Institute in Daejeon, South Korea

**Jonghee Lee** (Member)



2002, 2004, and 2007 : BS, MS, and PhD. 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 : Associate Professor, Hanbat Nat'l Univ.

**Joo Won Han** (Member)



2010~2021 : BS, MS, and Ph.D. degree in Display Engineering, Pukyong Nat'l University  
2021~present : Post. Doc, Pukyong Nat'l Univ.