

양극 산화 알루미늄 (AAO) 템플릿을 이용한 유기전기발광소자용 외부광추출 필름

External light extraction film for organic light-emitting diodes using AAO template

김진화*, 성백상*, 한소라*, 김다솔*, 우승완*, 이주호*, 부소영*,
김현빈*, 박재용*, 박소미*, 백승요*, 주철웅**, 이재현*, 이종희*

Jinhwa Kim*, Baeksang Sung*, Sora Han*, Dasol Kim**, Seung Wan Woo**,
Joocho Lee*, So-Young Boo*, Hyun-Bin Kim*, Jae-yong Park*, Somi Park*,
Seung-Yo Baek*, Chul Woong Joo**, Jae-Hyun Lee*, Jonghee Lee*

Abstract

In this study, an external light extraction method to improve efficiency of organic light emitting diodes was presented using an anodic aluminum oxide (AAO) template having nano-sized spherical structures. The imprinted polydimethylsiloxane on top of the AAO surface has nano-sized halfsphere shape. Therefore, when this film attached on the substrate of organic light-emitting diodes, the external quantum efficiency is improved up to 16.8%. The produced film shows a high transmittance of over 90% and a low haze value, which results in efficiency enhancement with very marginal pixel blur.

요약

본 연구에서는 나노 크기의 반구 형태를 가지는 양극 산화 알루미늄(AAO) 템플릿을 이용하여 유기 발광 다이오드의 외부 광효율을 향상시키기 위한 방법을 제시하였다. 나노 크기의 반구 형태 필름은 AAO 템플릿 상부에 polydimethylsiloxane를 임프린팅하여 제작하였다. 임프린팅 된 필름은 나노 크기의 반구 구조를 가지며, 이를 유기발광다이오드에 적용시 외부 양자 효율을 최대 16.8%까지 향상시켰다. 제작된 필름은 90% 이상의 높은 투과율과 낮은 흐림도를 보여 이를 통해 pixel blur 현상 없이 광효율을 향상시킬 수 있음을 확인했다.

Key words : organic light-emitting diodes, light extraction, AAO template, imprinting, nano-size

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

** Reality Display Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), 218 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

★ Corresponding authors

E-mail : jonghee.lee@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-828-8802

※ 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).

Manuscript received Apr. 21, 2023; revised May. 22, 2023; accepted Jun. 6, 2023.

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 뚜렷한 명암비와 빠른 응답속도를 가지며, 얇고 유연 기판에 적용하여 고성능 디스플레이 광원으로 사용하기 적합하다[1]. 또한 OLED는 현재 모바일 또는 TV용 디스플레이뿐만 아니라, 다양한 차세대 디스플레이 응용 분야로써 주목받고 있다[2]. 하지만 OLED의 주요 문제점 중 하나는 OLED의 내부 양자 효율이 100%의 빛을 방출하더라도, 우리에게 최종적으로 도달되는 빛은 20~30% 정도에 불과하다는 것이다[3][4][5]. 이는 OLED구조가 각 층마다 굴절률이 다른 다층 박막으로 구성되어 있어, 박막 사이의 굴절률 차이로 인한 전반사가 일어나 광손실이 발생하기 때문이다[6]. 특히 유리 기판(굴절률 $n = 1.5$)과 공기($n = 1.0$) 계면의 큰 굴절률 차이로 인해 OLED 내부에서 발생한 빛이 외부로 나오지 못하고 기판에 갇히게 되는 substrate mode가 발생한다고 알려져 있다. 이와 같이 손실된 빛, 특히 substrate mode를 외부로 추출하기 위해 다양한 외부 광추출 기술이 검토되었다[7][8][9][10][11]. 외부 광추출 기술은 대부분 제작 공정이 간단하다는 장점이 있고, 유리 기판의 굴절률과 유사한 굴절률을 가진 소재를 이용하여 substrate mode를 줄일 수 있다. 대표적인 외부 광추출 기술로는 마이크로렌즈 어레이(micro-lens array, MLA), 주름 구조, 그리고 기판에서의 입사각을 만들기 위해 기판 자체에 흠집을 내는 샌드 블라스팅 방식 등 다양한 방법이 있다. 또한 OLED 소자의 기판 내부에 삽입되어 전기적 안정성을 위한 요구사항이 까다로운 내부 광추출 기술과 달리, 외부 광추출 기술은 소자 외부에 간단히 부착하여 사용할 수 있기 때문에 소자에 영향을 주지 않는 장점을 가지고 있다. 가장 널리 쓰이는 외부 광추출 기술인 MLA의 구조는 정렬된 마이크로 크기의 반구형 렌즈들로부터 높은 광효율 향상을 기대할 수 있다. 하지만 가시광선의 파장 대비 매우 큰 마이크로 크기의 구조체들로 인해 흐림도(haze)가 매우 높아 발광 이미지가 선명하게 보이지 않는 pixel blur 현상이 발생하는 단점이 있다[12]. 따라서 발광 이미지를 표현하는 디스플레이의 경우 선명도가 높아야 하므로 pixel blur 현상을 최소화하면서 효율 향상에 도움을 줄 수 있는 외부 광추출 기술 개발이 요구된다[12][13][14]. 본 연구에서는 알루미늄을 양극 산화 시키면 산화된 알루미늄 표면에 규칙적으로 배열된 nanometer 크기의 구멍이 형성된 양극 산화 알루미늄(AAO : Anodic Aluminum Oxide) template

(미성 사이언스)를 구매하였고, 이를 이용하여 유리 기판의 굴절률과 유사한 굴절률을 가진 polydimethylsiloxane (PDMS) 소재를 임프린팅하여 OLED용 외부 광추출 필름을 제작하였다. AAO template에 임프린팅 된 AAO 광추출 필름은 나노 크기의 반구 형태로 이루어져 있으며, 90% 이상의 높은 직진 투과율과 낮은 흐림도를 보였다. 또한, 다른 접착 공정 없이 OLED 픽셀에 부착된 AAO 광추출 필름은 pixel blur 현상 없이 외부 양자 효율이 최대 16.8% 향상됨을 확인하였다.

II. 본론

1. AAO template과 PDMS를 이용한 광효율 향상을 위한 외부 광추출 필름 제작

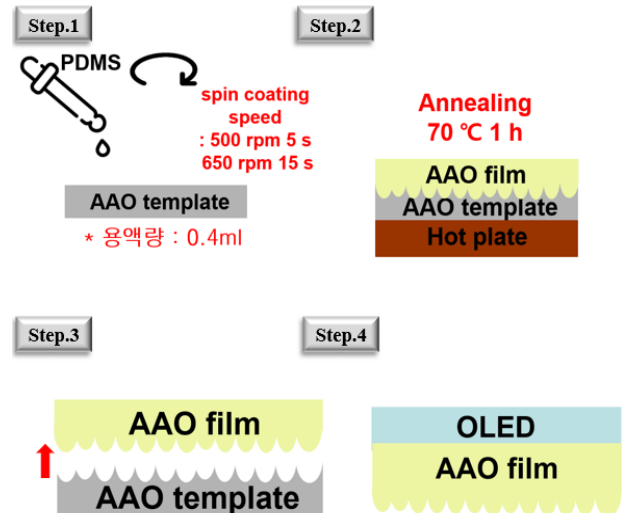


Fig. 1. Schematic diagram of the production process of an external light film using PDMS on the AAO template.

그림 1. AAO template 위에 PDMS를 이용한 외부 광추출 필름 제작 과정 도식

상기 그림 1은 상용화된 AAO template 위에 PDMS를 이용하여 외부 광추출 필름을 제작하는 과정을 도식화하였다. AAO template 위에 유리($n = 1.5$)의 굴절률과 비슷한 PDMS($n = 1.45$)를 spin coating하였다. spin coating의 공정 조건은 500 rpm에서 5초 진행 후 650 rpm에서 15초로 spin coating을 진행하였다. spin coating 후 필름을 굳히기 위해 hot plate에서 70 °C로 2시간동안 annealing을 진행하였다. 임프린팅 후 열적 annealing 과정에서 PDMS가 열 경화가 일어나게 되고 가교 반응이 일어나서 고무와 같은 상태로 변하게 됩니다. 완성된 AAO 광추출 필름은 AAO template로

부터 떼어내어 제작된 OLED 소자 기판 하부에 접착제를 사용하지 않고 부착하였다.

2. OLED 소자 제작 및 특성 평가

Al (100 nm)	Al (100 nm)
LiF (1 nm)	LiF (1 nm)
Alq3 (40 nm)	Alq3 (40 nm)
NPB (55 nm)	NPB (55 nm)
HAT-CN (5 nm)	HAT-CN (5 nm)
ITO	ITO
Glass	Glass
	AAO film

(a)
(b)

Fig. 2. Device structure fabricated for this study
 Device (a): Reference device
 Device (b): Device with AAO light extraction film.
 그림 2. 본 연구를 위해 제작된 소자 구조
 소자 (a): 기준 소자
 소자 (b): AAO 광추출 필름 부착 소자 구조

Indium Tin Oxide(ITO)가 패턴 된 유리 기판을 Acetone에 넣어 초음파 세척을 진행하였고, 그 후 220 °C Isopropyl alcohol(IPA)에서 20분간 세척하였다. 그림 2는 제작된 OLED 소자의 구조이다. 구조는 ITO/1,4,5,8,9,11-Hexaazatriphenylenehexacarbonitrile (HATCN)/N,N'-di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine (NPB) (60 nm)/tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum (Alq₃) (50 nm)/LiF (1 nm)/Al (100 nm)으로 구성되어 있다. 각 유기물들은 고진공 상태의 열증착기 내에서 1 Å/s의 속도로 증착하였고 금속 전극은 0.5 Å/s 속도로 증착되었다. 증착이 끝난 후 질소 상태의 글로브박스 내에서 UV 레진을 이용하여 Encapsulation을 진행하고 외부에서 Keithley 2401을 이용하여 전기적 특성을 측정하였다. 필름을 부착하지 않은 기준 소자(reference)와 AAO 광추출 필름을 부착한 소자의 전계발광 특성은 적분구(Integrating sphere, IS200-4)와 분광광도계(Spectrometer, Thorlab, CCS200/M)를 이용하여 측정하였다.

3. AAO template의 width 크기에 따른 AAO 광추출 필름의 표면 이미지와 표면 거칠기

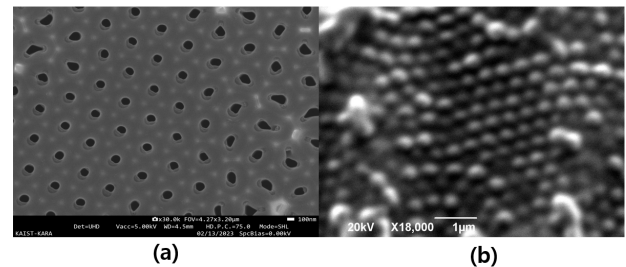


Fig. 3. Top view of SEM images of the AAO template and imprinted AAO light extraction film of 100 nm
 (a) AAO template
 (b) imprinted AAO light extraction film.
 그림 3. 100 nm의 AAO template와 임프린팅 된 AAO 광추출 필름의 평면 SEM 이미지 (a) AAO 템플릿
 (b) 임프린팅 된 AAO 광추출 필름

제작된 AAO 광추출 필름의 width 크기에 따른 표면 특성을 관찰하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, JSM-6390)과 전계방출형주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM, SU5000)을 통해 표면 이미지를 측정하였다. 상기 그림 3 (a), (b)는 주사전자현미경(SEM)으로 측정 한 이미지이다. 그림 3 (a)은 width 크기가 100 nm인 AAO template의 표면이며, 그림 3 (b)는 100 nm 크기의 반구가 임프린팅 된 AAO 광추출 필름 표면이다. 이미지를 통해 알 수 있는 사실은 AAO 광추출 필름의 표면이 template의 나노 구조물의 형상을 따라서 임프린팅 되어 100 nm 크기의 반구 형태로 이루어져 있다는 것이다. AAO 광추출 필름의 고화질의 표면 이미지를 위해 추가적으로 전계방출형주사전자현미경(FE-SEM)을 이용하여 측정하였다. 하기 그림 4는 AAO 광추출 필름의 tilt FE-SEM 이미지이다. 그림 4를 통해 100~300 nm 크기가 전체적으로 잘 형성되었고, width 크기가 증가함에 따라 구조체의 높이 역시 동일한 경향으로 증가했다는 것을 확인할 수 있었다.

상기 그림 3, 4와 같이 SEM을 통해 확인한 AAO 광추출 필름의 반구 형태를 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 추가적으로 원자현미경(Atomic Force Microscope, AFM)을 이용하여 확인하였다. 하기 그림 5를 통해 제작된 200 nm의 AAO 광추출 필름의 경우 200 nm 너비의 반구 형태들이 필름 제작 과정을 통해 균일하게 잘 형성되어 있는 것을 확인하였다.

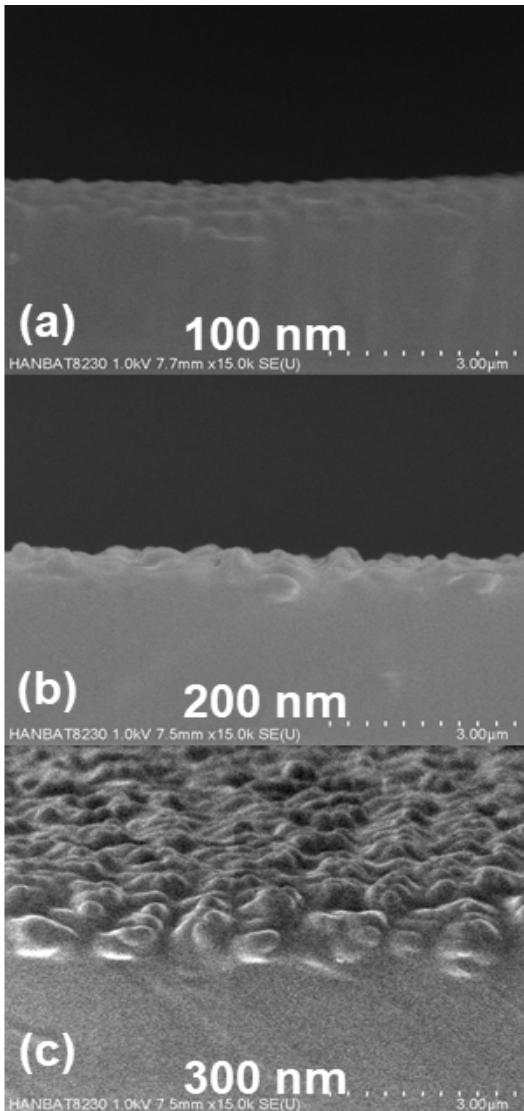
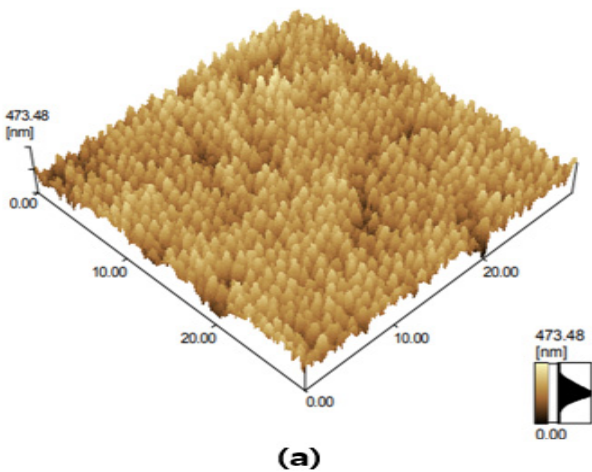
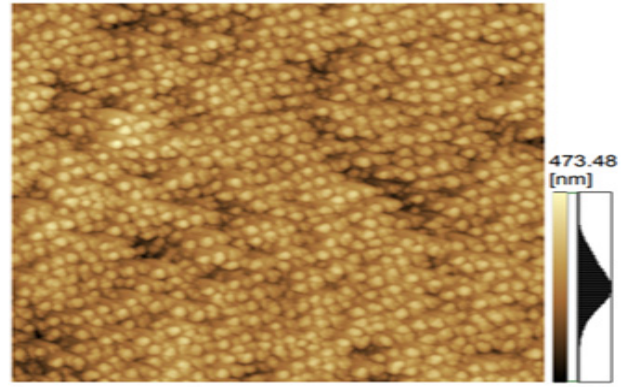


Fig. 4. FE-SEM tilt images by AAO light extraction film size. (a) 100 nm, (b) 200 nm, (c) 300 nm.

그림 4. AAO 광추출 필름 크기 별 FE-SEM 측면 이미지 (a) 100 nm, (b) 200 nm, (c) 300 nm



(a)



(b)

Fig. 5. AFM images of 200 nm AAO light extraction film. (a) 3D AFM image (b) Surface AFM image.

그림 5. 200 nm AAO 광추출 필름의 AFM 이미지 (a) 3D AFM 이미지 (b) 표면 AFM 이미지

4. AAO 광효율 향상 필름의 광학적 특성 및 OLED에 적용시 성능 분석

제작한 AAO 광추출 필름을 OLED에 적용했을 때의 광 효율 향상 특성을 확인하기 위해 OLED 소자의 기판에 필름 부착 전/후의 유기 전계발광(Electroluminescence, EL) spectrum을 적분구(Integrating sphere, IS200-4)와 분광광도계(Spectrometer, Thorlab, CCS200/M)를 이용하여 측정하였다. 그림 6를 통해 동일 구동 전압에서 측정시, 필름을 부착하지 않은 OLED 소자 (reference)의 EL spectrum 세기보다 AAO 광효율 향상 필름을 부

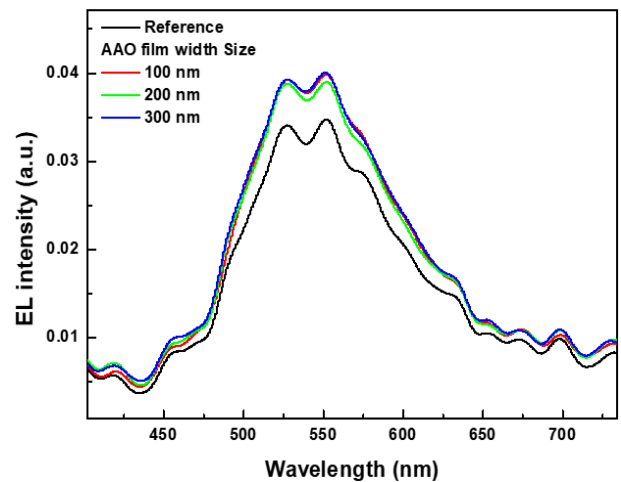


Fig. 6. Electro-luminescence spectrum of reference OLED (black) and OLED with AAO light extraction films of 100 nm (red), 200 nm (green), and 300 nm (blue).

그림 6. 기준 OLED (검정) 및 100 nm (빨강), 200 nm (초록), 300 nm (파랑)의 AAO 광추출 필름을 부착한 OLED의 전계발광 스펙트럼

착한 OLED 소자들의 EL spectrum 세기가 증가함을 알 수 있었다. 이와 같은 EL 세기 증가의 이유는 유리 기판에 간혀진 substrate mode가 나노 크기의 구조체 표면을 가지는 AAO 광추출 필름을 통해 유리 기판 외부로 방출되어 EL intensity가 증가되었기 때문으로 해석된다. 또한 AAO 광추출 필름으로 인한 발광색 변화 유무 확인을 위해 EL spectrum 그래프의 peak를 분석한 결과, 필름을 부착하지 않은 OLED 소자와 AAO 광추출 필름을 부착한 OLED 소자 모두 552 nm에서 최대 peak를 가진다. 이러한 결과들로 AAO 광추출 필름에 의해 발광색 변화는 일어나지 않았음을 확인할 수 있다.

Table 1. EL intensity area enhancement comparison table with and without AAO light extraction film.

표 1. AAO 광추출 필름 유무에 따른 전계발광 강도 면적 향상 비교 표

	EL intensity area	Improved rate EL intensity area over reference (%)
reference	5.73	
100 nm	6.54	14.1 %
200 nm	6.56	14.4 %
300 nm	6.70	16.9 %

표 1은 적분구 내에서 측정된 AAO 광추출 필름 부착 전/후의 OLED 소자의 가시광선 영역에서의 EL intensity 면적을 AAO 광추출 필름의 사이즈에 따라 정리한 것이다. template로 사용된 AAO의 width 크기가 증가할수록 구조체의 크기가 커지면서 빛들이 구조체를 더 많이 접하게 되고 임계각이 줄어드는 현상이 생겨 효율이 증가하였다. 즉 제작된 AAO 광추출 필름의 나노구조체의 크기가 달라짐에 따라 100 nm는 14.1%, 200 nm는 14.4%, 300 nm로 16.9%로 EL intensity가 증가함을 확인할 수 있었다. 이 결과들을 통해 AAO 광추출 필름을 부착한 OLED의 외부 광추출 효율을 높여 OLED의 발광 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

서론 부분에서 언급한 바와 같이, 외부 광추출 필름으로 많이 사용되는 MLA의 경우 수십 마이크로 크기의 반구 형태로, 빛의 방향 범위가 넓어지고 그로 인해 해당 빛이 옆의 렌즈에 간섭을 일으켜 픽셀이 흐려진다. 하지만 본 연구에서 제작된 AAO 광추출 필름은 나노 크기의 반구 형태를 띄고 있다. 이로 인해 빛이 인접한 반구 형태에 영향을 미치지 않아 흐림도가 낮고, pixel blur 현상 없이 뚜렷한 상을 볼 수 있을 것으로 예상하였다. 그

림 7과 같이 제작한 AAO 광추출 필름을 그림과 텍스트로 이루어진 이미지 위에 올렸을 경우, 특별히 이미지가 흐려지는 현상이 없이 아주 깨끗한 이미지를 볼 수 있었다. 또한 그림 8에 도시한 가시광선 영역에서의 투과도 특성을 살펴보면 제작된 각 필름의 직진 투과율이 90% 이상으로 pixel blur 현상이 최소화 될 것으로 예상되었다.

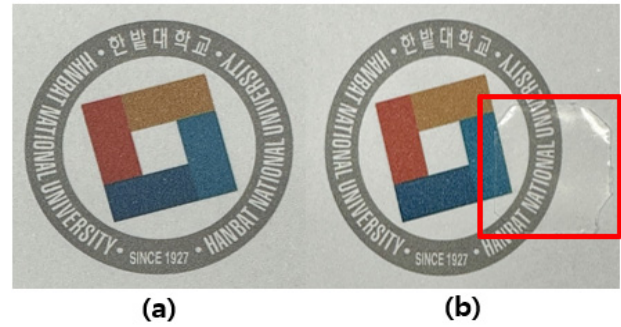


Fig. 7. Actual image of AAO light extraction film. (a) Logo with AAO light extraction film (b) Logo without AAO light extraction film.

그림 7. AAO 광추출 필름의 실제 이미지 (a) AAO 광추출 필름이 있는 로고 (b) AAO 광추출 필름이 없는 로고

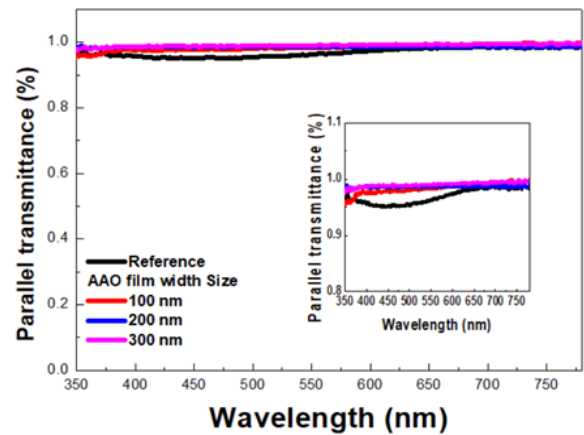


Fig. 8. Graph of parallel transmittance of reference and by AAO light extraction film size.

그림 8. AAO 광추출 필름 사이즈 별 직진 투과율 그래프

제작된 AAO 광추출 필름을 OLED 소자에 부착시 pixel blur 현상을 확인하기 위하여 OLED 픽셀에 부착 전/후의 발광 이미지를 CCD 카메라를 통해 측정하였다. 그 결과 빛의 왜곡이 최소화 되어, 픽셀 모양 그대로 빛이 발광함을 확인할 수 있다. 이러한 사실들로 본 연구를 통해 개발한 AAO 광추출 필름은 모바일, TV용 디스플레이뿐만 아니라 차세대 디스플레이 분야에도 적용이 가능할 것으로 예상된다.

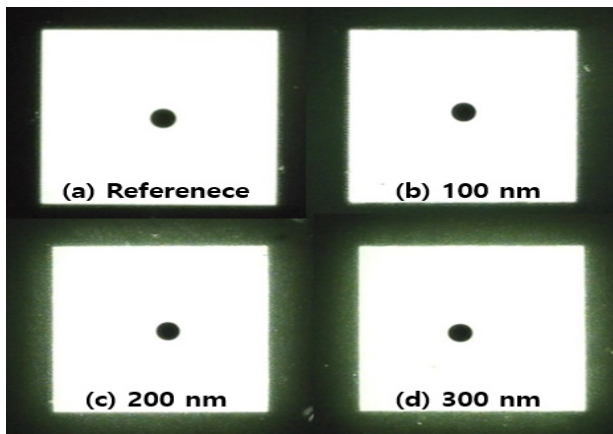


Fig. 9. OLED emission images of (a) reference, (b) with 100 nm AAO light extraction film, (c) with 200 nm AAO light extraction film, and (d) with 300 nm AAO light extraction film.

그림 9. (a) reference, (b) 100 nm AAO 광추출 필름, (c) 200 nm AAO 광추출 필름, (d) 300 nm AAO 광추출 필름을 부착한 OLED 발광 이미지

III. 결론

본 연구에서는 간단한 임프린팅 공정을 통해 높은 직진 투과도를 가지고, pixel blur 현상 없이 광효율을 높일 수 있는 외부 광추출 필름을 제작하였다. 나노 크기의 AAO template에 PDMS를 임프린팅하여 나노 크기의 AAO 광추출 필름을 제작하였고, 제작된 AAO 광추출 필름은 특별한 접착 공정 없이 OLED 소자 기판에 부착하여 외부 양자 효율을 16.4% 향상시켰다. 따라서 간단한 임프린팅 공정을 통해 제작된 AAO 광추출 필름은 대량생산에 적합하며, 디스플레이용 외부 광추출 필름으로 사용될 수 있으며, 나아가 마이크로 디스플레이 분야에도 적용 가능할 것으로 예상된다.

References

[1] J. Song, S. Yoo, "Organic Light-Emitting Diodes : Pushing toward the Limits and Beyond," *Advanced Materials*, 1907539, 2020.
 [2] Y Sun, R. Forrest, "Enhanced light out-coupling of organic light-emitting devices using embedded low-index grids," *Nature photonics*, vol.2, no.8, pp.483-487, 2008.
 [3] K Saxena, "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

[4] K. Lee, J. Lee, "Simultaneously enhanced device efficiency, stabilized chromaticity of organic light emitting diodes with lambertian emission characteristic by random convex lenses," *Nanotechnology*, 27, Article 075202, 2016. DOI: 10.1088/0957-4484/27/7/075202

[5] J. W. Shin, D. H. Cho, "Random nano-structures as light extraction functionals for organic light-emitting diode applications," *Organic Electronics*, Vol.15, Issue.1, pp.196-202, January 2014. DOI: 10.1016/j.orgel.2013.11.007

[6] E. J. Bae, S. W. Kang, "Enhanced Light Extraction from Organic Light-Emitting Diodes with Micro-Nano Hybrid Structure," *Nanomaterials*, Vol.12, No.8, pp.1266, 2022. DOI: 10.3390/nano12081266

[7] K. Kim, K. H. Han, "Dual pattern for enhancing light extraction efficiency of white organic light-emitting diodes," *Organic Electronics*, Vol.57, pp. 201-205, 2018. DOI: 10.1016/j.orgel.2018.03.011

[8] A. Kim, G. Huseynova, "Enhancement of out-coupling efficiency of flexible organic light-emitting diodes fabricated on an MLA-patterned parylene substrate," *Organic Electronics*, Vol.71, pp.246-250, 2019. DOI: 10.1016/j.orgel.2019.05.025

[9] A. Gasonoo, Y. S. Lee, "Outcoupling efficiency enhancement of a bottom-emitting OLED with a visible parylene film," *Optics Express*, Vol.30, No.7, pp.11959-11972, 2022. DOI: 10.1364/OE.410539

[10] S. Woo, 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

[11] E. J. Bae, S. W. Kang, "Enhanced Light Extraction from Organic Light-Emitting Diodes with Micro-Nano Hybrid Structure," *Nanomaterials*, Vol.12, No.8, pp.1266, 2022. DOI: 10.3390/nano12081266

[12] J. W. Han, C. W. Joo, "Enhancement of spectral stability and outcoupling efficiency in

organic light-emitting diodes with breath figure patterned microlens array films," *Optical Materials*, Vol.96, 109262, 2019.

DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109262

[13] C. Lee, J. J. Kim "Enhanced Light Out-Coupling of OLEDs with Low Haze by Inserting Randomly Dispersed Nanopillar Arrays Formed by Lateral Phase Separation of Polymer Blends," *NANO* MICRO SMALL* Vol.9, Issue22, 2013.

DOI: 10.1002/sml.201300068

[14] B. Pyo, C. Joo, "A nanoporous polymer film as a diffuser as well as a light extraction component for top emitting organic light emitting diode with strong microcavity structure," *Nanoscale*, Vol.8 pp.8575-8582, 2016.

BIOGRAPHY

Jinhwa Kim (Member)



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

Baeksang Sung (Member)



2013~2020 : BS degree course of Creative Engineering, Hanbat Nat'l Univ
2020~2023 : MS degree in Creative Engineering, Hanbat Nat'l Univ
2023~present : PhD degree in Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ

Sora Han (Member)



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

Dasol Kim (Member)



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

Seung Wan Woo (Member)



2016~2021 : BS degree course of Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ
2021~present : MS degree in Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ

Jooho Lee (Member)



2018~present : BS degree course of Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ

So-Young Boo (Member)



2018~present : BS degree course of Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ

Hyun-Bin Kim (Member)



2018~present : BS degree course of Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ

Jae-young Park (Member)

2018~present : BS degree course of Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ

Somi Park (Member)

2019~2023 : BS degree course of Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ
2023~present : MS degree in Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ

Seung-Yo Baek (Member)

2019~2023 : BS degree course of Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ
2023~present : MS degree in Creative Engineering Hanbat Nat'l Univ

Jae-Hyun Lee (Member)

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

Jonghee Lee (Member)

2002, 2004, and 2007 : BS, MS, and PhD. degree in Chemistry, 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.