

## RESEARCH

# PDL 구조의 유무에 따른 소형 OLED 픽셀의 휘도 분포 분석

배서윤<sup>1</sup>, 유한나<sup>2</sup>, 이성민<sup>1,2\*</sup>

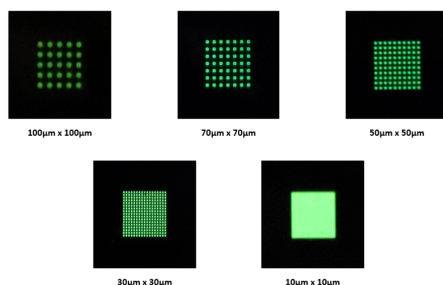
<sup>1</sup>한양대학교 반도체공학과, <sup>2</sup>한양대학교 전기공학과

## Effect of PR-Based Pixel-Defining Structures on the Angular Luminance Distribution of Small-Sized OLED Pixels

Seo-Yoon Bae<sup>1</sup>, Hanna You<sup>2</sup>, Sung-Min Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Semiconductor Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea



### ABSTRACT

This study investigates the influence of pixel miniaturization and photoresist-defined pixel structures on the performance of green bottom-emission OLEDs for microdisplay applications. OLEDs with an ITO/HAT-CN/TAPC/TCTA:Ir(ppy)<sub>3</sub>(acac)/B3PYMPM/Liq/Al structure were fabricated on ITO-coated glass substrates. A 2 mm×2 mm single-pixel OLED and micro-pixel OLED arrays with pixel sizes from 100 µm×100 µm to 10 µm×10 µm were prepared using a photolithography-based process. Their current density, luminance, current efficiency, electroluminescence spectrum, and angular luminance distribution were evaluated.

The PR pattern defining the emission area can act similarly to a pixel-defining layer, restricting the effective emission aperture and modifying the propagation path of obliquely emitted light. Angular luminance measurements showed that the micro-pixel OLED maintained emission near the normal direction but exhibited a sharp luminance decrease at high viewing angles. These results indicate that PR-induced boundary effects and angle-dependent optical losses are critical factors in designing high-resolution micro-OLED displays.

Key Words: Micro-OLED, Microdisplay, Pixel miniaturization, Pixel-defining layer, Light extraction

\*Correspondence: [sungminlee@hanyang.ac.kr](mailto:sungminlee@hanyang.ac.kr)



## 1. 서론

마이크로 디스플레이는 소형 디스플레이 패널에서 고해상도 이미지를 구현할 수 있는 소자로, 디스플레이에서 생성된 이미지를 렌즈 및 광학계를 통해 사용자의 눈에 투사하는 방식으로 작동한다. 주로 AR (augmented reality), VR(virtual reality) 장치에 적용되며, 마이크로 디스플레이는 고품질의 영상을 구현함으로써 몰입감 높은 가상환경을 제공하는 데 핵심적인 역할을 한다. 최근에는 웨어러블 기기, 자동차용 디스플레이, 산업용 장비 등으로 응용 분야가 확장되고 있으며, 높은 범용성과 잠재력을 바탕으로 다양한 산업에서 주목받고 있다[1-2]. 기존 마이크로 디스플레이에서 주로 사용되어 온 LCoS(liquid crystal on silicon)는 실리콘 기판에 액정 층을 형성한 디스플레이로, 외부 광원의 빛을 반사 및 변조하여 이미지를 생성한다. LCoS는 빔 프로젝터, AR/VR용 뷰파인더, 산업용 장치에서 널리 활용됐으나, 몇 가지 기술적 한계를 지닌다. 첫째, 외부 광원이 필수적이기 때문에 장치의 구조가 복잡해지고 두께 및 부피가 증가하며, 발열 문제로 인해 추가적인 열 관리가 요구된다. 둘째, 액정의 반응 속도가 비교적 느려 빠른 화면 전환이 빈번한 AR/VR 환경에서 잔상이나 부자연스러운 장면 전환을 유발할 수 있으며, 이는 사용자의 몰입감을 저해하는 요인이 된다[3-4]. 이러한 한계로 인해 최근에는 OLED(organic light-emitting diode) 또는 LED(light-emitting diode) 기반의 자발광 마이크로 디스플레이로 관심이 이동하는 추세이다[1,5]. 본 연구는 마이크로미터 크기의 픽셀을 갖는 OLED를 제작하고, 이에 대한 성능을 체계적으로 분석함으로써 마이크로 OLED의 성능 지표를 확보하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 고해상도 마이크로 디스플레이 구현을 위한 소자 설계 및 공정 최적화에 필요한 기초 자료를 마련하고, 픽셀 소형화에 따라 나타나는 성능 변화의 임계 구간을 규명함으로써, 마이크로

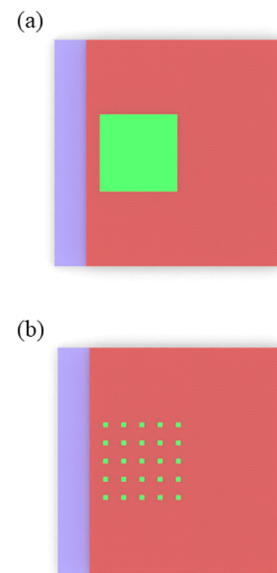
로 OLED 구현 시 고려해야 할 물리적 한계를 도출하는데 의의가 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험 설계

본 연구에서는 픽셀 크기에 따른 OLED의 성능 변화를 관찰하기 위해 총 6종의 표본을 설계 및 제작하였다. 픽셀 크기는 가장 큰 2 mm×2 mm 단일 픽셀을 시작으로, 100  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  크기의 픽셀 배열을 형성하였다. 모든 표본의 픽셀 대 픽셀 간격 비율은 1:3으로 설정하였다. 픽셀 크기가 100  $\mu\text{m}$ 인 경우 인접 픽셀과의 간격은 300  $\mu\text{m}$ 로 유지된다.

감광제 패턴은 전극과 OLED 측정에 필요한 전기적 접촉 영역, 그리고 OLED가 형성되는 영역을 제외한 나머지 부분을 차폐하도록 설계되었다. 이를 통해 불필요한 전기적 간섭을 최소화하고, 정밀한 성능 평가가 가능하게 했다(Fig. 1).



**Fig. 1.** (a) Large-area single-pixel OLED (2 mm×2 mm), (b) micro-pixel array OLED.



기판은 유리 기판이며, OLED의 구조는 총 7개의 유기 및 무기층으로 구성된다. 각 층의 소재 및 증착 두께는 다음과 같다. 양극 ITO(indium tin oxide) 150 nm, 정공 주입층 HAT-CN(1,4,5,8,9,11-Hexaazatriphenylenehexacarbonitrile) 5 nm, 정공 수송층 TAPC(1,1-Bis[4-[N,N-di(p-tolyl)amino]phenyl]cyclohexane) 40 nm, 발광층 TCTA(tris(4-carbazoyl-9-ylphenyl)amine)(호스트), 8 wt% Ir(ppy)<sub>3</sub>(acac) (bis(2-phenylpyridine)(acetylacetonate)iridium(III))(도펀트), 전자 수송층 B3PYMPM (4,6-Bis(3,5-di(pyridin-3-yl)phenyl)-2-methylpyrimidine) 35 nm, 전자 주입층 Liq(8-Hydroxyquinolinolathium) 1 nm, 음극 Al(Aluminum) 100 nm. OLED의 발광 파장은 약 520 nm의 녹색 영역에 해당하며, 발광 형태는 배면 발광 구조로 설계되었다(Fig. 2).

## 2.2. 실험 방법

본 연구에서는 ITO 150 nm가 사전 증착된 2.5 cm×2.5 cm 크기의 유리 기판을 사용하였다. ITO 표면 위에 감광제(AZ-5214E, merck performance materials GmbH)를 스핀 코팅(4,000 rpm, 50초) 방식으로 균일하게 도포한 후, 120°C로 설정된 핫플레이트에서 1분간 소프트 베이킹을 수행하여 포토레지스트 내 잔류

용매를 제거하고 접착력을 확보했다. 노광 장비(MA-6 contact aligner, SUSS microtec SE)에서 마스크와 기판을 정렬한 뒤, i-line 파장(365 nm)의 자외선을 이용하여 3초간 노광을 수행하였다. 현상액(AZ 300 MIF, AZ electronic materials)을 사용하여 1분간 패턴을 현상함으로써, OLED의 활성 영역 및 전극 패드를 제외한 나머지 부분이 차폐된 패턴을 형성하였다. 125°C로 설정된 핫플레이트에서 1분 30초간 하드 베이킹을 추가로 수행하여 감광제 패턴의 내열성 및 기판과의 접착력을 확보했다. 열 증발 방식 증착 장비(thermal evaporator, sunic system)에서 정공 주입층 HAT-CN 5 nm, 정공 수송층 TAPC 40 nm, 발광층 TCTA 23 nm (호스트), 8 wt% Ir(ppy)<sub>3</sub>(acac) 2 nm(도펀트), 전자 수송층 B3PYMPM 35 nm, 전자 주입층 Liq 1 nm를 차례로 증착하였다. 마지막으로 알루미늄 100 nm를 동일한 방식으로 증착하여 OLED 제작을 완료하였다(Fig. 3).

제작된 OLED는 분광휘도계(SR-3AR, topcon technology)를 사용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 실험 결과

#### 3.1.1. 대면적 픽셀을 갖는 OLED와 마이크로 픽셀을 갖는 OLED 간 성능 비교

Fig. 4는 포토리소그래피 공정을 통해 제작된 마이크로 픽셀 OLED의 발광 이미지를 나타낸다(Fig. 4).

본 연구에서 PR 패턴은 OLED의 발광 영역을 정의하는 용도로 사용되었다. 해당 구조에서 PR은 PDL(pixel defining layer)와 유사하게 발광부를 정의하는 역할을 한다. 제작된 소자는 100 μm에서 7 μm까지의 픽셀 크기에서 녹색 발광을 나타냈으며, 이를 통해 포토리소그래피 공정을 이용한 마이크로 픽셀 OLED 구현이 가능함을 확인하였다.

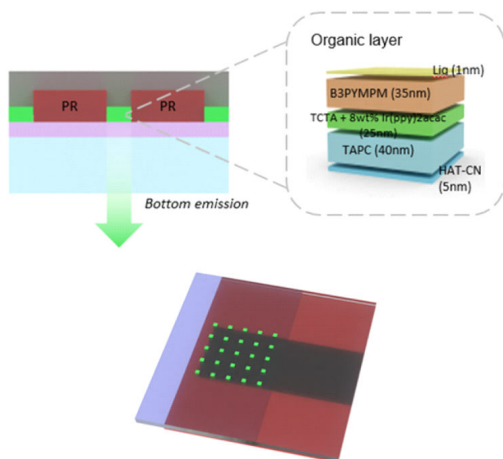


Fig. 2. Structure of micro-pixel OLEDs

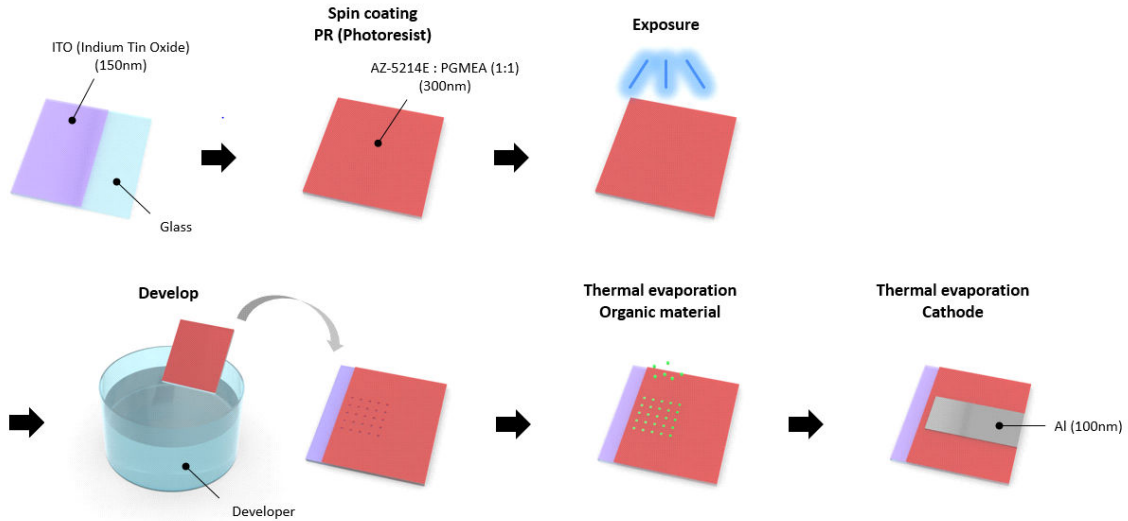


Fig. 3. Fabrication process of micro-pixel OLEDs.

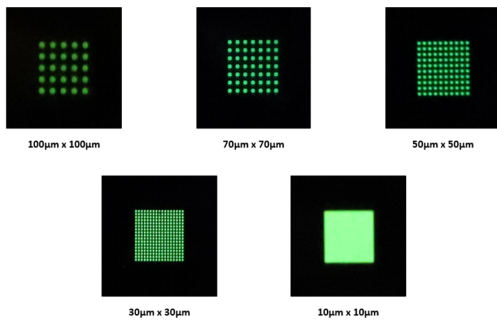


Fig. 4. Electroluminescence image of a micro-pixel OLEDs.

### 3.1.2 마이크로 픽셀을 갖는 OLED 간 성능 비교

2 mm×2 mm 단일 픽셀 OLED와 100 μm×100 μm 마이크로 픽셀 OLED배열의 전기적 및 광학적 특성을 비교하였다(Fig. 5). J-V 특성에서 큰 차이가 나타나지 않았으며, 이는 PR 구조에서 유의미한 전류 주입 감소가 나타나지 않은 것을 의미한다. 반면 L-V 특성에서는 마이크로 픽셀 OLED의 휘도가 단일 픽셀 OLED에 비해 현저히 감소하였다. 이러한 휘도 감소는 PR 패턴이 기존 OLED의 PDL과 유사하게 발광 영역을 정의함으로써 발광 구역을 제한하고, 픽셀 가장자리에서 방출되거나 측면으로 진행되는 빛의 광추출 경로를 변

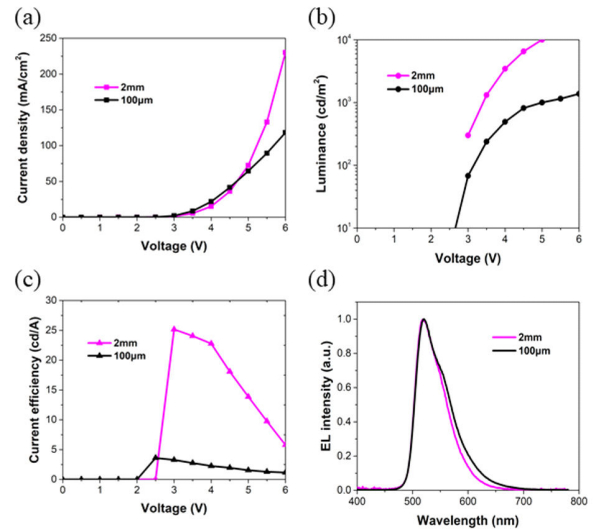


Fig. 5. Performance comparison between a large-area single-pixel OLED (2 mm×2 mm) and a micro-pixel OLED, (a) current density-voltage characteristics, (b) luminance-voltage characteristics, (c) current efficiency-voltage characteristics, and (d) electroluminescence spectrum.

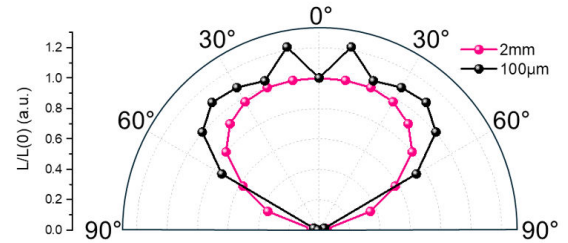
화시킨 결과로 해석할 수 있다. Chen et al.은 AMO LED 픽셀에서 PDL이 발광 영역을 정의하는 구조적 요소이며, PDL의 기하학적 형상이 내부에 갇힌 광자



의 광추출 경로에 영향을 줄 수 있음을 보고하였다[6]. 따라서 본 연구에서 J-V 특성의 큰 변화 없이 L-V 특성 및 전류 효율이 감소한 것은 PR 구조에 의한 광학적 손실과 관련된 것으로 판단된다.

100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  픽셀 크기를 가진 마이크로 픽셀 OLED 배열의 성능을 비교하였다. 앞서 단일 픽셀과 100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  마이크로 픽셀 OLED를 비교한 것과 달리, 마이크로 픽셀 OLED 간 픽셀 사이즈 변화에 따른 큰 성능 차이는 발견되지 않았다(Fig. 6).

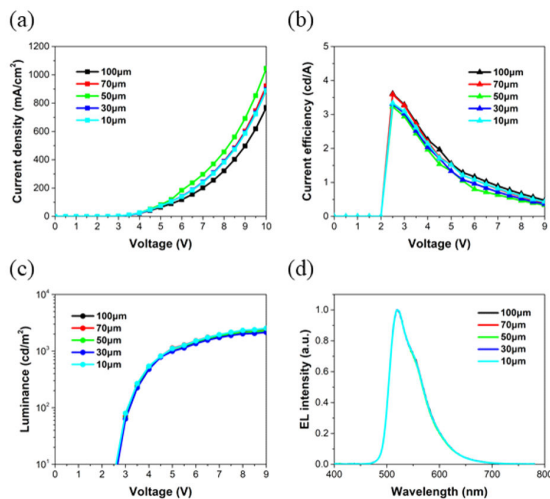
Fig. 7은 시야각에 따른 정규화 휘도  $L/L(0)$  변화를 나타낸다. 단일 픽셀(2 mm $\times$ 2 mm) 소자는 0 $^\circ$ ~80 $^\circ$ 까지 램버티안(lambertian) 방출 분포를 보인 반면, 마이크로 픽셀 OLED(100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ )는 40 $^\circ$  이내에서는  $L/L(0)$ 이 1 이상으로 상승하며, 70 $^\circ$  이상의 고시야각 영역에서 급격한 휘도 감소를 나타낸다. 이러한 결과는 마이크로 픽셀 OLED의 정면 방향 발광은 비교적 유지되지만, 고시야각 영역으로 방출되는 빛의 외부



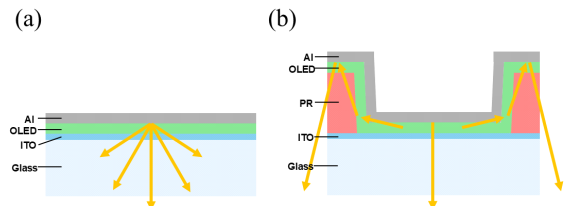
**Fig. 7.** Luminance distribution as a function of viewing angle for a large-area single-pixel OLED (2 mm $\times$ 2 mm) and a micro-pixel OLEDs (100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ).

추출이 제한되고 있음을 의미한다. 이러한 각도에 따른 휘도 특성은 앞서 관찰된 전체 휘도 감소와 관련될 수 있다. J-V 특성에서 마이크로 픽셀 OLED의 전류 효율이 단일 픽셀 OLED와 큰 차이를 보이지 않았음에도 L-V 특성에서 휘도가 감소한 것은 전하 주입량 자체의 감소보다는 발광층에서 생성된 빛이 외부로 추출되는 과정에서 손실되었을 가능성을 나타낸다. 특히 마이크로 픽셀 OLED 구조에서는 PR 패턴이 발광부를 둘러싼 높은 벽 형태로 존재하므로, 발광층에서 생성된 빛 중 측면 또는 고 시야각 방향으로 진행하는 광 성분이 PR 측벽에 의해 부분적으로 차단될 수 있다.

Fig. 8은 배면 발광(Bottom-emission) 구조를 갖는 대면적 단일 픽셀 OLED(2 mm $\times$ 2 mm)와 마이크로 픽셀 OLED(100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ )의 소자 내부의 광추출 경로를 단면상에서 비교한 모식도이다. 대면적 단일 픽



**Fig. 6.** Performance comparison between micro-pixel OLEDs (a) current density-voltage characteristics, (b) luminance-voltage characteristics, (c) current efficiency-voltage characteristics, and (d) electroluminescence spectrum.



**Fig. 8.** Comparison of structural differences and light extraction paths between a large-area single-pixel OLED (2 mm $\times$ 2 mm) and a micro-pixel OLED (100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ).



셀 OLED(2 mm×2 mm)의 경우, 최상단의 AI 음극으로부터 하부의 유리 기판 방향으로 발광층(EML)에서 생성된 빛이 램버시안 분포를 보이며 진행한다(Fig. 8(a)). 이때 정면 측 부근의 빛은 투명 전극과 기판을 통과하여 외부로 탈출하지만, 고시야각의 방출광은 유기물 층 내부의 전반사(total internal reflection, TIR) 경계 조건에 갇혀 측면으로 전파되다가 내부에서 손실된다[8].

반면, PR로 정의된 발광 영역의 양 PR 측벽이 형성된 마이크로 픽셀 구조 Fig. 8(b)에서는 픽셀 크기가 축소됨에 따라 가장자리 경계면에 의해 기존 평면 구조에서 측면으로 진행되던 고시야각의 방출광 성분이 인접한 PR 측벽 구조와 충돌한다[9].

이러한 구조적 요인에 의해 마이크로 픽셀 OLED (100  $\mu\text{m}$ ×100  $\mu\text{m}$ )에서 광학적 손실로 이어지는 방출광 성분의 방향 변화가 발생할 수 있으며, 이는 Fig. 5에서 관측된 마이크로 픽셀 OLED의 전체 휘도 감소로 이어질 수 있다.

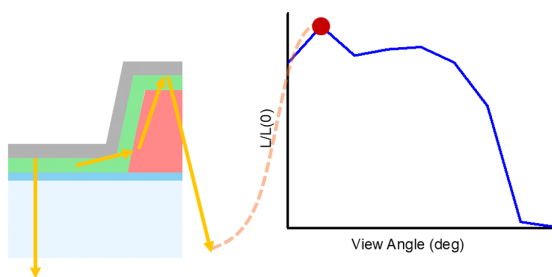
Fig. 9는 마이크로 픽셀 구조의 PR 측벽 형상에 의한 방출광의 반사 경로와 이에 따른 시야각별 휘도 특성과의 관계를 나타낸 도식이다. 양성 포토레지스트 특성상, 발광 영역을 정의하는 PR 측벽은 하부 ITO 전극 접촉면의 폭이 더 넓은 경사 구조를 갖게 된다(Fig. 9). 이로 인해 발광층에서 측면 방향으로 방출된 고각

의 광 성분이 PR 경사면에 입사할 경우, 일차적으로 빛의 경로가 변하게 된다. 그러나 마이크로 픽셀 OLED 구조에서 반사율이 높은 AI 음극이 상부를 밀봉하고 있으므로, 해당 광 성분은 전극의 계면에서 이차적으로 반사된다.

그러나 특정 시야각에서의 국소적인 휘도 상승에도 불구하고, PR 구조 내부에서 발생하는 잦은 충돌은 PR 폴리머 매질 자체의 광 흡수 및 AI 음극에서의 반사 누적 손실을 동반한다. 픽셀 가장자리 경계면에서 발생한 휘도 손실로 인해 전체 휘도는 대면적 단일 픽셀 OLED에 비해 한계를 나타낸다[9].

한편, Fig. 6에서 마이크로 픽셀 OLED의 정규화 휘도  $L/L(0)$ 이 일부 각도 범위에서 1 이상으로 나타나는 현상은 정면 방향 휘도 성분의 상대적인 광 재분배 현상으로 해석될 수 있다. 마이크로 픽셀 OLED에서는 발광 영역 주변에 PR 측벽이 형성되어 있으며, 상부에는 반사율이 높은 AI 음극이 존재한다. 따라서 발광층에서 측면 방향으로 방출된 일부 광 성분은 PR 경사면 또는 AI 계면에서 반사되어 특정 중간 각도 방향으로 재분배될 수 있다. 고시야각 영역에서는 PR 측벽에 의한 차단 및 PR 매질 내 흡수, AI 계면에서의 반복 반사 손실이 누적되므로 급격한 휘도 감소가 나타난 것으로 판단된다.

PR 측벽 구조의 기하학적 요소 또한 마이크로 픽셀 OLED의 각도별 휘도 분포에 중요한 영향을 줄 수 있다. PR 두께가 증가할 경우 발광층에서 측면 방향으로 진행되는 광 성분이 PR 측벽과 충돌할 가능성이 증가한다. 반대로 PR 두께가 감소할 경우 측면 방향으로 진행되는 광 성분의 차단은 완화될 수 있으나, 픽셀 간 전기적 분리 기능은 약화될 수 있다. 또한 PR 측벽의 구조가 수직에 가까울수록 측면 방향으로 진행되는 광 성분이 손실될 가능성이 높으며, 경사 각도가 증가할수록 광의 재분배 가능성이 높아질 수 있다. Pixel opening ratio가 감소할수록 발광 면적 대비 픽셀 경계



**Fig. 9.** Relationship between the PR-structure-induced reflection mechanism and angular luminance distribution.



면의 비율이 증가하므로, 마이크로 픽셀 OLED에서 빛이 PR 측벽 및 픽셀 경계에 충돌할 가능성이 커지므로 PR 측벽에 의해 광경로가 변화할 가능성이 커져 각도별 휘도 분포에 미치는 영향이 커질 것으로 예상된다. 반면 PR 구조 없이 마이크로 픽셀이 각각 독립된 구조를 갖는 경우에는 평면 OLED에 가까운 방출 특성이 나타날 수 있으나, 픽셀 간 간섭이 증가할 것으로 예상된다.

기존 연구들은 PDL 또는 픽셀 경계 구조가 OLED의 광추출 경로와 각도별 방출 특성에 영향을 줄 수 있음을 보고하였다. 특히 finite pixel boundary와 PDL 구조는 발광층에서 생성된 광의 진행 방향 및 추출 특성을 변화시킬 수 있음을 보여준다. 본 연구에서는 이러한 선행 연구들과 달리, PR 구조를 PDL과 유사하게 활용하여 실제 포토리소그래피 공정을 통해 제작하고, 픽셀 크기 축소에 따른 전기적 특성과 시야각 의존 휘도 분포 특성을 실험적으로 비교하였다는 점에서 차별성을 가진다. 특히 J-V 특성의 큰 변화 없이 L-V 특성 및 고시야각 휘도 분포가 변화한다는 결과는 PR로 정의된 PDL 구조가 마이크로 OLED의 광학적 성능을 제한하는 주요 요인 중 하나임을 시사한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 OLED 픽셀의 크기를 단계적으로 축소하며, 픽셀 소형화가 전기적 및 광학적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 분석 결과, 2 mm×2 mm 단일 픽셀 OLED와 비교했을 때 마이크로 픽셀 OLED에서 전류 효율이 현저히 저하되는 경향이 나타났으며, 마이크로미터 수준의 픽셀 간에는 전류 효율이 일정 수준으로 유지되었다. 또한 PR 구조의 유무에 따라 측면 또는 고시야각 방향으로 진행되는 광성분의 손실이 발생하여 전체 휘도가 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 시야각에 따른 휘도 분포에서 단일

픽셀과 PR 구조가 존재하는 마이크로 픽셀 OLED 간의 성능 차이로 이어졌다.

이러한 결과는 마이크로 디스플레이용 OLED 소자의 소형화 한계와 그에 따른 성능 유지 범위를 파악하는데 중요한 기준을 제공한다. 본 연구에서 도출된 기초 데이터는 향후 고해상도 마이크로 디스플레이 구현을 위한 소자 설계 방향 수립과 제조 공정의 최적화에 있어 유용한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 기호설명

AR: Augmented reality

VR: Virtual reality

LCoS: Liquid crystal on silicon

OLED: Organic light-emitting diode

LED: Light-emitting diode

ITO: Indium tin oxide

PR: Photoresist

rpm: Revolutions per minute

wt%: Weight percent

## ACKNOWLEDGEMENTS

### Author Contributions

S.-Y. B. and H. Y. were involved in experiments and data collection. S.-Y. B. drafted the manuscript. S.-M. L. supervised the entire research, provided conceptual guidance, and reviewed the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

### Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT under Grants RS-2023-00209380,



RS-2024-00415821, and RS-2021-NR057529.

### Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

## REFERENCES

- [1] Zhan, T.; Yin, K.; Xiong, J.; He, Z.; Wu, S.-T. Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Perspectives and Challenges. *iScience* 2020, 23 (8), 101397.
- [2] Xiong, J.; Hsiang, E. L.; He, Z.; Zhan, T.; Wu, S. T. Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Emerging Technologies and Future Perspectives. *Light Sci. Appl.* 2021, 10, 216.
- [3] Hsiang, E. L.; Yang, Z.; Yang, Q.; Lai, P. C.; Lin, C. L.; Wu, S. T. AR/VR Light Engines: Perspectives and Challenges. *Adv. Opt. Photonics* 2022, 14 (4), 783-861.
- [4] Chen, H. M. P.; Yang, J. P.; Yen, H. T.; Hsu, Z. N.; Huang, Y.; Wu, S. T. Pursuing High Quality Phase-Only Liquid Crystal on Silicon (LCoS) Devices. *Appl. Sci.* 2018, 8 (11), 2323.
- [5] Huang, Y.; Hsiang, E. L.; Deng, M. Y.; Wu, S. T. Mini-LED, Micro-LED and OLED Displays: Present Status and Future Perspectives. *Light Sci. Appl.* 2020, 9, 105.
- [6] Chen, L.; Gu, H.; Jiao, S.; Liu, S. Optical Modeling and Analysis of Pixel Organic Light-Emitting Diode Using a Mixed-Level Algorithm Considering Light Leakage Effects. *Thin Solid Films* 2023, 769, 139741.
- [7] Chen, Y. T.; Wen, S. W.; Liao, P. H.; Lee, W. K.; Lee, C. C.; Huang, C. W. et al. Reflective 3D Pixel Configuration for Enhancing Efficiency of OLED Displays. *Organic Electronics* 2022, 103, 106451.
- [8] Chen, Y. J.; Lee, W. K.; Chen, Y. T.; Lin, C. Y.; Wen, S. W.; Jiao, M. et al. A Vision toward Ultimate Optical Out-Coupling for Organic Light-Emitting Diode Displays: 3D Pixel Configuration. *Adv. Sci.* 2018, 5 (10), 1800467.
- [9] Kang, K.; Yoon, J.; Kim, J.; Lee, H.; Yang, B. Effect of the Finite Pixel Boundary on the Angular Emission Characteristics of Top-Emitting Organic Light-Emitting Diodes. *Opt. Express* 2015, 23 (11), A709-A717.
- [10] Liao, P. H.; Lee, W. K.; Lee, C. C.; Huang, C. W.; Wen, S. W.; Chen, Y. T. et al. Using Angle-Selective Optical Film to Enhance the Light Extraction of a Thin-Film Encapsulated 3D Reflective Pixel for OLED Displays. *Opt. Express* 2022, 30 (26), 46435-46449.