

공 학 석 사 학 위 논 문

색변환 백색 OLED의 광추출 효율 향상을 위한
Breath Figure 기반 마이크로 렌즈 어레이 필름



2018년 2월

부경대학교 대학원

융합디스플레이공학과

한 주 원

공 학 석 사 학 위 논 문

색변환 백색 OLED의 광추출 효율 향상을 위한
Breath Figure 기반 마이크로 렌즈 어레이 필름

지도교수 김 용 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 2월

부경대학교 대학원

융합디스플레이공학과

한 주 원

한주원의 공학석사 학위논문을 인준함.

2018년 2월 23일



위 원 장 이학박사 임 권 택 (인)

위 원 이학박사 정 연 태 (인)

위 원 이학박사 김 용 현 (인)

목 차

목차	i
표 목차	ii
그림 목차	iii
ABSTRACT.....	v
제 I 장 서 론.....	1
제 II 장 이 론.....	4
제 1절 유기발광 다이오드 (OLED).....	4
1.1 유기발광 다이오드의 개념 및 종류.....	4
1.2 유기발광 다이오드의 구조 및 발광 원리.....	9
1.3 유기발광 다이오드의 구성요소.....	11
1.3.1 양극 (Anode).....	11
1.3.2 정공 수송층 (Hole transport layer).....	11
1.3.3 발광층 (Emissive layer).....	12
1.3.4 전자 수송층 (Electron transport layer).....	13
1.3.5 음극 (Cathode).....	13
제 2절 조명용 유기발광 다이오드.....	15
2.1 조명용 유기발광 다이오드의 개념.....	15
2.2 조명용 유기발광 다이오드의 특성.....	16
2.3 백색 유기발광 다이오드.....	19
제 3절 광 추출 (Light extraction).....	21
3.1 기존 유기발광 다이오드의 광 추출 한계.....	21
3.2 내부 광 추출 구조.....	23
3.3 외부 광 추출 구조.....	25
제 III 장 실 험.....	28
제 1절 색변환 마이크로 렌즈 어레이 (DC-MLA) 필름.....	28
1.1 Breath Figure법 기반의 DC-MLA 필름 제작.....	28

제 2절 색변환 백색 유기발광 다이오드.....	30
2.1 색변환 백색 유기발광 다이오드 제작.....	30
제 IV장 결과 및 고찰.....	31
제 1절 DC-MLA 필름의 특성.....	31
1.1 DC-MLA 필름의 표면 특성	31
제 2절 색변환 백색 유기발광 다이오드의 특성.....	34
2.1 색변환 백색 OLED의 전압-전류-휘도 특성.....	34
2.2 색변환 백색 OLED의 효율 특성.....	36
2.3 색변환 백색 OLED의 EL 특성.....	39
2.4 색변환 백색 OLED의 각도별 휘도 특성.....	42
제 V 장 결 론.....	43
제 VI 장 참고 문헌.....	44

표 목차

[표 1] PMOLED/AMOLED 비교.....	6
[표 2] OLED의 분류.....	7
[표 3] 형광과 인광 OLED의 특성.....	8
[표 4] 전자주입용 계면층 및 음극 재료.....	14
[표 5] AMOLED 디스플레이와 OLED 조명의 비교	17
[표 6] OLED 면광원과 타 조명용 광원의 특성 비교	18
[표 7] DC-MLA 필름이 적용된 색변환 백색 유기발광 다이오드의 성능 (1).....	38
[표 8] DC-MLA 필름이 적용된 색변환 백색 유기발광 다이오드의 성능 (2).....	38

그림 목차

[그림 1] LCD/OLED 디스플레이의 구조	4
---------------------------------	---

[그림 2] PMOLED와 AMOLED.....	5
[그림 3] 유기발광 다이오드의 구조	9
[그림 4] 유기발광 다이오드의 에너지 밴드 다이어그램.....	10
[그림 5] LED와 OLED의 구분.....	15
[그림 6] 조명용 광원으로 적합한 색온도 (CCT)별 색좌표 범위.....	17
[그림 7] 백색 OLED의 종류	20
[그림 8] 유기발광 다이오드의 광 추출 모드.....	22
[그림 9] OLED의 내부 광 추출 구조.....	24
[그림 10] 다양한 형태의 내부 광 추출 기술.....	24
[그림 11] OLED 외부 광 추출 구조.....	25
[그림 12] 다양한 형태의 외부 광 추출 기술.....	26
[그림 13] 외부 광 추출 기술 1 (고 굴절 기판).....	26
[그림 14] 외부 광 추출 기술 2 (Micro Lens Array).....	27
[그림 15] Breath Figure법을 위한 실험 장치.....	29
[그림 16] DC-MLA 필름 제작 과정.....	29
[그림 17] 청색 발광 OLED의 구조.....	30
[그림 18] 색변환 필름의 (a) 구조와 (b) 사진.....	32
[그림 19] Breath Figure 패턴과 색변환 필름의 SEM 이미지 (표면 형상).....	33
[그림 20] Breath Figure 패턴과 색변환 필름의 SEM 이미지 (두께).....	33
[그림 21] OLED의 전류-전압-휘도 곡선	35
[그림 22] OLED의 전력 효율 곡선.....	37
[그림 23] OLED의 전계 발광 스펙트럼	40
[그림 24] (a) 청색 OLED와 다양한 색변환 필름이 적용된 색변환 백색 OLED의 동작 사진, (b) 정규화된 적색, 녹색 형광체의 광 발광 강도, (c) 색변환 필름 내부 광선의 도식화.....	41
[그림 25] 색변환 백색 OLED의 각도별 휘도 특성.....	42

**Enhanced Light Outcoupling in Down-Conversion
White OLEDs Using Imprinted Microlens Array Films
with Breath Figure Patterns**

Joo Won Han

Department of Display Science and Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

We demonstrate high performance down-conversion microlens array (DC-MLA) films for white organic light-emitting diodes (OLEDs). The DC-MLA films are readily fabricated by an imprinting method based on breath figure patterns which are directly formed on the polymer substrate with a novel concept. The DC-MAL films result in high quality white light as well as enhanced light outcoupling efficiency for white OLEDs. The power efficiency of OLEDs with DC-MLA films is increased by a factor of 1.86 compared to OLEDs without outcoupling films. Moreover, the white OLEDs with DC-MLA films achieve a high color rendering index of 84.3. It is anticipated that the novel DC-MLA films fabricated by the simple imprinting process with breath figure patterns can contribute to the development of efficient white OLEDs.

제 I 장 서 론

평판 디스플레이 및 조명 분야에서 주목받고 있는 백색 유기 발광 다이오드 (OLED)는 휘도, 효율 및 소자의 안정성이 개선되어 최근 제품으로 상용화 되고 있다 [1-3]. 기존의 OLED는 소자의 내부 양자 효율이 거의 100 %에 도달했음에도 광 추출 효율은 약 20 %로 제한된 효율을 가지고 있으며, 이러한 제한된 광 추출 효율은 소자 내부의 각 층의 굴절률 차이에 따른 내부 전반사에 의한 것으로 소자 내부에서 생성된 빛이 외부로 모두 추출되지 못하고, 기판 (substrate mode)과 투명전극/유기층 (waveguide mode) 사이에서 빠져나오지 못하기 때문이다 [2,4].

이에 따라 광 추출 효율을 향상시키기 위한 수많은 광 추출 기술이 연구되고 있으며, 투명전극/유기층 (waveguide mode)에 갇힌 빛을 추출하기 위해 저굴절률 그리드 [5], 광 산란층 [6,7], 광결정 [8,9], 주름진 구조 [10,11], 고굴절률 기판 [3,12]과 같은 내부 광추출 구조가 도입되었다.

대부분의 내부 광 추출 구조는 복잡한 제조 공정뿐만 아니라 높은 비용, 표면의 거칠기에 따른 유기층의 손상 및 소자의 전기적 단락의 문제점을 가지고 있다. 반면, 기판 (substrate mode)에 갇힌 빛을 추출하기 위한 외부 광 추출 구조는 소자의 전기적인 성능을 저하시키지 않으며 필름의 형태로 기판의 뒷면에 쉽게 부착할 수 있는 이점을 가지고 있으며, 일반적으로 microlens array 필름과 micro-sphere scattering layer가 사용되고 있다 [13-18].

기존의 외부 광 추출 구조는 마이크로 형태의 패턴을 형성하기 위해 복잡하고 고가의 리소그래피 공정을 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 용액 공정을 통해 단순하고 손쉬운 공정으로 벌집 형태의 미세 구조 패턴을 제작할 수 있는 Breath Figure법 기반의 외부 광 추출 구조를 제작하였다 [19]. 또한 조명 분야에서는 광 추출 효율과 함께 고품질의 백색광을 구현하는 것은 매우 중요하다. 백색 OLED를 구현하기 위한 가장 일반적인 방법은 적색, 녹색 및 청색 발광층을 소자에 적층하는 방법이다 [1,20]. 그러나 적층 방법의 백색 OLED는 복잡한 제조 공정, 용액 공정의 어려움 및 색 의존적 수명의 문제를 가진다 [1,20,21].

청색 발광 OLED에 색변환 물질을 적용하는 방법은 yttrium aluminium garnet (YAG) 형광체와 GaN 다이오드를 기반으로 한 무기 백색 발광 다이오드에 널리 사용되는 대체 방법으로 소자로부터 방출된 청색광의 일부는 기판의 뒷면에 부착된 색변환 물질에 의해 황색, 녹색 및 적색으로 변환된다 [22-24]. 색변환 방식은 백색광을 추출하기 위한 저렴하고 간단한 방법으로 여겨지고 있다. 색변환 기술은 적층형 백색 OLED 대비, 형광체의 광 흡수 손실 및 제한된 청색 OLED의 성능으로 인해 낮은 광 추출 효율을 나타낸다. 이러한 이유로 고효율의 색변환 백색 OLED를 실현하기 위한 광추출 기술이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 색변환 백색 OLED를 위한 고성능의 색변환 마이크로 렌즈 어레이 (Down conversion-Microlens array, DC-MLA) 필름을 제작했다. DC-MLA 필름은 적절한 습도 조건에서 폴리 스티렌 (polystyrene) 페트리 접시에 용매를 떨어뜨리는 방식의 Breath Figure법 기반 임프린팅 방법으로 제작되며 저비용의 간단한 용액 공정을 가능하게 한다. DC-MLA 필름이 적용된 색변환 백색 OLED는 매우 향상된 광 추출 효율과 고품질의 백색광을 구현하였으며, 소자의 전력 효율은 1.86배 향상되었고, 연색지수

84.3의 백색광을 구현했다. Breath Figure 패턴 기반의 DC-MLA 필름은 용액 공정이 가능한 새로운 개념의 방법으로 고성능의 색변환 백색 OLED를 제작하기 위한 간단하고 저비용의 방법이 될 것으로 기대한다.



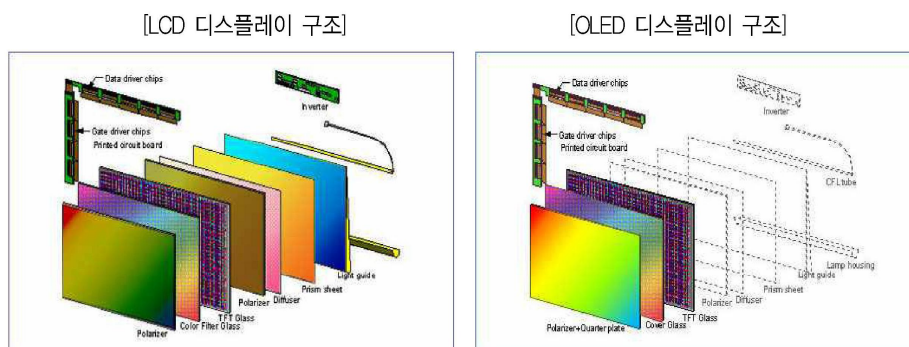
제 II 장 이 론

제 1절 유기발광 다이오드 (OLED)

1.1 유기발광 다이오드의 개념 및 종류

유기발광 다이오드 (Organic Light-Emitting Diode, OLED)는 형광성 유기 화합물에 전류가 흐르면 전계발광현상 (형광체에 전류를 흐르게 하면 빛이 발광하는 현상)을 이용하여 스스로 빛을 내는 자체 발광형 유기물질을 말한다. 기존에 사용되고 있는 TFT-LCD는 백라이트 (backlight unit)로 인해 고화질, 슬림, 저전력 특성을 구현하는데 한계를 가지고 있다.

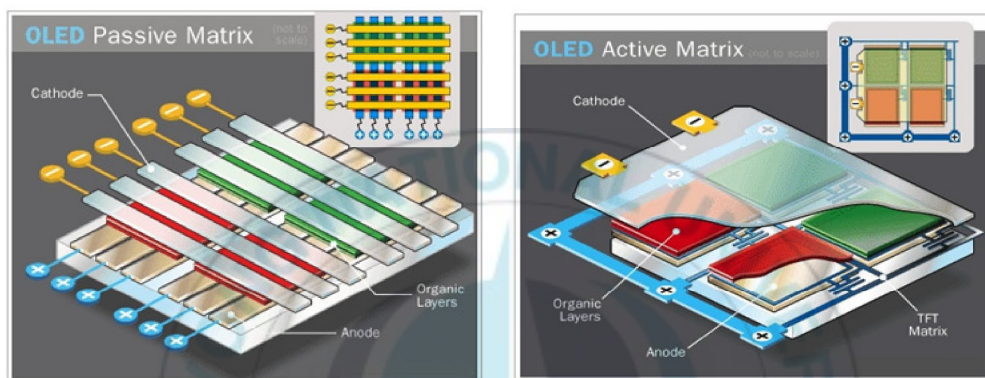
화질 측면에서 백라이트 방식은 명암비를 높이는데 한계가 있고, 슬림 디자인의 측면에서는 LCD는 백라이트가 추가적인 공간을 필요로 하기 때문



자료: http://www.cmel.com.tw/CMELWEB_EN/index.asp

[그림 1] LCD/OLED 디스플레이의 구조

에 두께의 슬림화에 어려움이 있으며, 저전력 측면에서 백라이트는 상시 점등하고 있어야 하기 때문에 전력소모가 많은 단점을 가진다. 이에 반해 저소비전력, 초슬림화, 빠른 응답속도, 자유로운 시야각 등의 많은 이점을 가진 OLED가 최근 디스플레이 분야에서 각광받고 있다. LCD와 OLED 디스플레이의 구조는 [그림 1]과 같다.



자료: 특허청

[그림 2] PMOLED와 AMOLED

OLED는 구동방식에 따라 수동형 (Passive Matrix, PM)과 능동형 (Active Matrix, AM)으로 구분할 수 있다. 수동형은 순간적으로 EL 소자를 높은 밝기로 발광하므로 해상도가 높아짐에 따라 순간 발광 휘도가 높아야 하며, 짧은 시간 동안에만 소자를 동작시켜야 하므로 전력 소모가 증가하여 대면적화에 적합하지 않다. 반면에 능동구동은 유기 EL을 원하는 밝기에서 지속적으로 발광하므로 낮은 전류로 구동이 가능하며 대면적으로 고해상도의 패널을 제작할 수 있다. 그러나 능동구동은 하나의 유기 EL 소자당 한 개 이상의 트랜지스터를 사용하여야 하므로 이를 필요로 하지 않은 수동구동에 비해 제조 공정도 복잡할 뿐만 아니라 비용도 많이 든다.

[표 1] PMOLED/AMOLED 비교

구분	PMOLED	AMOLED
소비전력	고전압 구동 (순간휘도 = 요구휘도 × 스캔라인수)	저전압 구동 (수직라인 수에 관계없이 구동전압 일정)
크기	소형화 유리 (구동 IC 외부장착)	대면적화 가능 (구동회로를 Panel 상에 내장)
구조 및 제조비용	단순, 저비용(Simple Matrix + OLED)	복잡, 고비용(LTPS TFT + OLED)

자료: IBK 투자증권

또한, OLED는 발광재료의 종류, 발광방식, 발광구조, 구동방식 등에 따라 다양하게 분류된다. [표 2]

발광재료에 따라 저분자 (small molecule) 및 고분자 (polymer) OLED로 구분된다. 저분자 OLED는 일반적으로 분자량 1,000 이하를 가지는 유기물을 사용하며, 일반적으로 진공 증착을 통하여 박막형성 및 다층 박막의 형성이 가능하고 발광 효율이 높고 수명이 길다는 장점을 가진다. 반면 진공 증착 과정에서 유기재료의 손실률이 높고, 공정 속도가 늦어 생산성이 낮다. 고분자 OLED는 10,000 이상의 분자량을 가지는 유기물을 사용하고, 스핀 코팅 또는 잉크젯 프린팅 등의 용액 코팅 방법으로 박막을 제조할 수 있어 제조 공정이 상대적으로 간편하며, 대면적 소자의 구현에 유리하며, 분자량이 크기 때문에 소자의 물리적 강도가 높다는 장점을 가진다.

[표 2] OLED의 분류

구분방법	구분	특성
발광재료	저분자	분자량이 작은 유기물 진공증착 방식으로 제작 수명특성이 상대적으로 우수
	고분자	분자량이 큰 유기물 스핀코팅 또는 잉크젯프린팅으로 제작
발광방식	형광 (Fluorescence)	최고 외부효율이 약 5~10%로 효율 향상 제한 수명특성이 상대적으로 우수
	인광 (Phosphorescence)	최고 외부효율이 약 20~30%로 고효율임
발광구조	전면발광 (Top Emission)	유기층의 빛을 기판의 반대방향으로 발광
	배면발광 (Bottom Emission)	유기층에서 발광된 빛이 기판을 통과
구동방식	수동형(PM)	양극배선과 음극배선을 교차배열
	능동형(AM)	각 화소마다 TFT(Thin Film Transistor) 형성

자료: 특허청

그러나, 다층 구조의 구현이 어렵기 때문에 발광 효율이 낮고 수명이 짧다는 단점을 가진다. 현재 양산에는 저분자 OLED가 주로 사용되고 있다. 발광 방식에 따라 형광 (fluorescence) 및 인광 (phosphorescence) 방식으로 분류된다. 형광 OLED는 전자-정공의 재결합에 의해 생성된 여기자의 25%만이 발광에 참여하며, 인광 OLED에서는 여기자의 100%가 발광에 참여할 수 있기 때문에 인광 OLED가 형광 OLED에 비해 효율이 높다. 발광 구조에 따른 분류는 발광하는 빛의 방향에 따라 배면발광 (Bottom emission)과 전면발광 (Top emission)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 OLED에서는 유기 기판 위에 증착되는 양극 전극은 투명한 재료인 ITO로 되어있고 Top 층에 형성된 음극과 봉지층 (Encapsulation layer)는 불투명한 재료로 되어있다. 이에 따라 발광층에서 나온 빛은 투명 전극 방향인 기판 아래쪽으로만 향하게 되며, 이 방식은 일반적인 배면발광 방식이다.

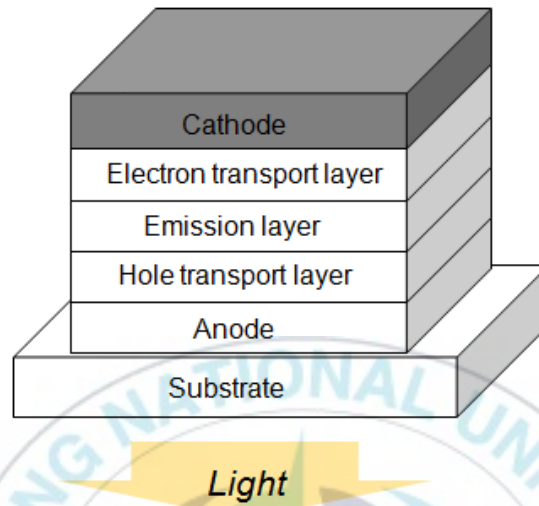
반면에 전면발광 방식은 발광 층에서 나온 빛이 기판 위쪽 방향으로 향하며, 전면발광이 가능하게 하려면 음극 전극을 투명하게 만들고 유리기판

아래쪽에 반사판을 형성해야 하므로 공정이 복잡하고 난이도가 높다. 전면 발광 방식은 빛의 일부가 기판 위에 형성된 TFT에 의해 가려지는 배면발광에 비해 개구율 (Aperature Ratio)이 높아 휘도 특성이 상대적으로 우수하고 고화질 구현에 유리하다. 이때, 개구율은 디스플레이의 단위 화소에서 빛이 나올 수 있는 면적의 비율을 말한다.

[표 3] 형광과 인광 OLED의 특성

구분	특성
형광	• 최고 외부 효율이 약 5 % (내부효율 20 %)로 효율 향상에 제한이 있음 • 수명 특성이 상대적으로 우수 • 효율, 색순도 등에 있어서 적색 발광 소자의 개발이 미진함 • 현재 양산에 주로 이용되고 있음
인광	• 최고 외부효율이 약 20 % (내부효율 100 %)로 고효율의 OLED 제작 가능 • 수명이 상대적으로 짧음 • 효율 및 수명 등에 있어서 청색 소자의 개발이 미진함

1.2 유기발광 다이오드의 구조 및 발광 원리

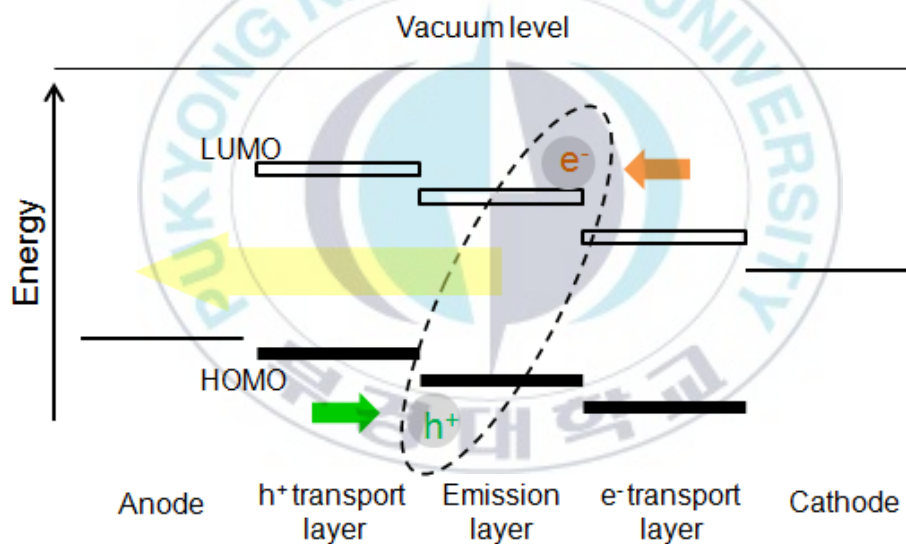


[그림 3] 유기발광 다이오드의 구조

유기발광 다이오드의 기본 구조는 [그림 3]과 같이 양극 (anode), 정공 수송층 (hole transport layer), 발광층 (Emission layer), 전자 수송층 (electron transport layer), 음극 (cathode)의 적층형 구조로 되어있으며, 발광층이 일함수 (work function)가 높은 양극 (anode)와 일함수가 낮은 음극 (cathode) 사이에 존재하는 형태이다. 일함수가 높은 양극에서는 정공 (hole)이 주입되며 반대로 음극에서는 전자 (electron)이 주입된다. 주입된 전자와 정공은 각각 수송층 (transport layer)를 거쳐 발광층에 도달하게 되고 이때 정공과 전자의 쌍인 엑시톤 (exciton)을 형성한다. 엑시톤의 전자와 정공이 발광층 내에서 재결합 (recombination)하여 발광한다.

소자 내부에 생성된 빛이 소자 밖으로 빠져 나오게 하기 위해서는 양극 혹은 음극이 투명해야 하며, 일반적으로 사용되는 양극용 TCO (Transparent Conductive Oxide)로는 ITO (Indium Tin Oxide)가 있다. ITO는 일함수가 약 4.8 eV이고 음극에 비해 상대적으로 높으므로 대기 중

에서 안정한 전도성 금속산화물 (metal oxide)이다. 전자가 주입되는 음극으로는 일함수가 낮은 칼슘 (Ca), 마그네슘 (Mg), 리튬 (Li), 알루미늄 (Al) 등의 금속 혹은 이들의 합금(alloy)을 주로 사용한다. 그러나 음극 금속은 대기 중에서 쉽게 산화되어 고순도로 이들 금속을 다루기 힘들고 보관에 많은 주의가 필요하다. 그 밖에 정공과 전자가 각각 양극과 음극으로부터 주입 또는 수송될 수 있도록 정공 주입층 (HIL: Hole injection layer), 정공 수송층 (HTL: Hole transport layer), 전자 주입층 (EIL: Electron injection layer), 전자 수송층 (ETL: Electron transport layer) 등을 사용하고 있다.



[그림 4] 유기발광 다이오드의 에너지 밴드 다이어그램

1.4 유기발광 다이오드의 구성요소

1.3.1 양극 (Anode)

양극 (Anode)은 정공을 정공 주입층 및 정공 수송층에 주입하는 역할을 하며 일함수 (work function)가 큰 물질이 요구된다. 양극의 재료로서 사용되는 ZnO:Al, ITO와 최근에 연구되는 In_2O_3 -ZnO (IZO)등이 있다. 현재는 전도성, 투명성, 에칭 가공성 등을 고려하여 ITO가 일반적으로 사용되고 있다. ITO는 저항률이 약 $1.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 로, 박막 두께가 약 150 nm인 경우, 표면 저항은 약 $10 \Omega/\square$, 광 투과율은 90 % 이상으로 상용화되어 있다. ITO 투명 전극의 일함수는 4.6~5.0 eV 정도로 정공수송 재료의 HOMO 준위 (5.0~5.5 eV)와 비슷하여 정공의 주입에 적합한 재료이다. ITO 투명 전극 위에 약 100 nm 이내의 EL 유기 발광층이 형성되므로 ITO의 평탄도 (smoothness) 또한 중요한 요소이다.

1.3.2 정공 수송층 (Hole transport layer)

양극으로부터 주입된 정공을 발광층 (Emission layer)으로 효율적으로 주입 및 전달하기 위해 정공 수송층 (Hole transport layer)은 양극과 유기층 사이의 계면 접촉을 높이고 HOMO level 으로의 에너지 차이를 효과적으로 줄임으로써 정공 주입을 원활하게 하고, 소자의 수명을 향상 시킨다. 또한 정공 수송층의 경우, 정공 주입 및 양극과의 우수한 계면 특성 외에도 전자 차단층 (electron blocking layer)의 역할도 한다. 정공주입 재료는 양극으로부터의 정공주입을 용이하게 해주는 재료로, 정공주입 장벽을 낮추기 위해서는 양극인 ITO와 이온화 에너지 (ionization potential, IP)가 비

슷하고 ITO와의 계면접착력이 높아야 한다. 또한 외부 양자효율을 높이기 위해서는 가시광 영역에서의 흡수가 가능한 없어야 한다. 현재 사용되는 재료로는 프탈로시아닌구리 (CuPc; copper phthalocyanine)와 PEDOT이 많이 알려져 있으며, CuPc의 경우 열 안정성은 우수하나 가시광 영역에서의 흡수가 문제가 되고, PEDOT은 스핀 코팅을 사용하므로 진공증착을 주 공정으로 하는 단분자계 유기 발광소자의 공정 적용에는 무리가 있다.

정공수송 재료는 정공을 쉽게 운반시킬 뿐만 아니라 전자를 발광 영역에 속박함으로써 여기자 (exciton) 형성의 확률을 높여주므로 정공수송 재료는 위에서 언급한 기본성 외에도 정공 이동도가 높은 물질이 바람직하다.

1.3.3 발광층 (Emission layer)

발광층 (Emission layer)에서는 전자와 정공의 쌍인 엑시톤 (exciton)이 형성되고 사용되는 재료에 따라 녹색, 적색, 청색의 발광 파장이 결정되며, 재료의 발광 메커니즘에 의해 인광 (phosphorescence)와 형광 (fluorescence)으로 구분되고, 발광 물질의 분자적인 특성에 따라 고분자 OLED, 저분자 OLED로 분류된다. 발광층의 구조는 색순도 향상과 효율 특성의 향상을 위해 단일 재료보다는 호스트 (Host)에서 생성된 엑시톤이 도펀트 (Dopant)로 전이하여 발광하는 시스템인 호스트-도펀트 시스템을 주로 사용한다.

1.3.4 전자 수송층 (electron transport layer)

현재 OLED 소자의 대부분은 hole-rich한 경우가 많으며, 양자 효율을 높이기 위해서는 정공과 전자의 균형을 맞추기 위한 연구가 필요하다.

전자 수송층 (electron transport layer)는 전자의 수송 이외에도 음극 (cathode)로 정공이 통과하지 않도록 정공 차단층 (Hole blocking layer)의 역할도 하며, 음극으로부터 전자가 쉽게 주입되도록 전자 수송층 재료는 전자친화력이 큰 재료가 바람직하다. 전자친화력을 크게 하기 위해 분자 구조에 억셉터성의 치환기를 도입하거나 π 전자계를 확대할 필요가 있다. 일반적으로 Alq₃, TPBi, Bphen, BCP 등이 사용되고 있다. 전자 수송 재료로서 가장 많이 쓰이는 Alq₃는 음극으로부터 전자주입을 용이하게 하므로, 다른 발광층과 조합하여 전자수송 및 전자 주입층으로 활용되고 있다.

1.3.5 음극 (Cathode)

음극 (Cathode)은 전자를 유기 박막층에 쉽게 주입하기 위해 일함수 (work function)이 작은 물질이 바람직하며, OLED 연구 초기에는 Mg-합금이 널리 사용되었다. 이후 전자주입을 개선하기 위해 알칼리 금속을 사용하는 방법이 고안되었다. 예를 들어, Li를 1 % 이하의 농도로 도핑한 Al-Li 합금의 사용을 들 수 있다. 전극의 안정성을 고려할 때 Al 금속이 바람직하며, 최근에는 알칼리금속, 알칼리금속 산화물, 불화물 등을 초박막 형태의 계면층으로 만들어 Al 금속과 조합하여 음극으로 사용하는 경우가 많다. 예를 들어, LiF (0.5 nm)/ Al (150 nm)를 들 수 있으며 저분자용 OLED 소자에 사용되고 있다.

[표 4] 전자주입용 계면층 및 음극 재료

소자 형태	계면층	음극 전극
저분자 EL 소자	-	MgAg, MgIn
	LiF	Al
고분자 EL 소자	Ca	Al
	Ba	Al
	Cs	Al
	LiF/Ca	Al



제 2절 조명용 유기발광 다이오드

2.1 조명용 유기발광 다이오드의 개념

조명용 OLED은 점이나 선광원 뿐 아니라 넓은 면적의 패널조명도 구현이 가능해 2~3mm의 매우 얇은 제품의 제작이 가능하고, 눈부심도 거의 없기 때문에 실내조명에 적합하며 플렉서블한 특성으로 다양한 디자인의 구현이 가능하고, 수은, 납 등과 같은 중금속을 사용하지 않는 친환경 유기소재를 이용한 발광 다이오드로 양극 구조의 면광원 조명이다.

또한 에너지 절감효과가 우수한 고효율 특성으로 인해 LED 조명과 함께 기존 조명을 대체할 차세대 광원으로 주목받고 있다. OLED 조명은 디스플레이에서 요구되는 미세패턴, 박막트랜지스터 (TFT), 화소 형성 등과 같은 단위 공정들이 필요 없는 등의 OLED 디스플레이에 비해 저렴하고 단순한 공정의 이점을 가진다.



[그림 5] LED와 OLED의 구분

2.2 조명용 유기발광 다이오드의 특성

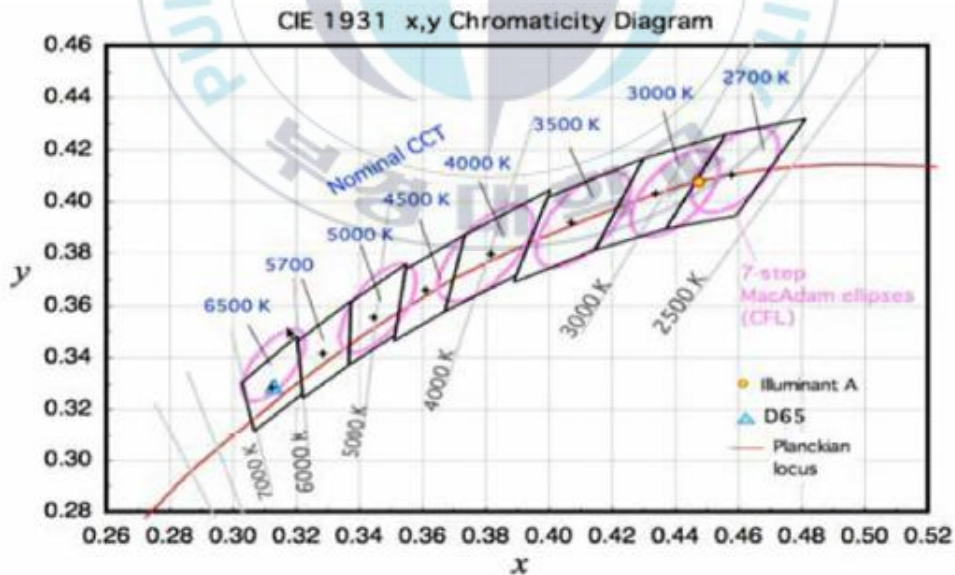
조명 광원으로서의 OLED는 디스플레이용 OLED와 공통적인 요소도 있지만, 각각 특징적인 요소도 가지고 있다. 공통적인 기술 요소는 전력효율, 안정성, 수명, 제조가격 등이 있고, 디스플레이용 OLED에서 요구되는 기술 요소로는 미세 화소 패턴 형성, Contrast, 해상도, 색재현 능력 등이 있다.

조명용 OLED에서는 연색지수 (color rendering index, CRI), 대면적 발광 균일도, 색유지 능력 등이 요구된다. 조명용 OLED에서 매우 중요한 특성이 연색지수는 한마디로 얼마나 태양광과 근접한 스펙트럼을 가지느냐를 정량화한 것이라고 할 수 있다. 그 값은 0에서 100까지 나타낼 수 있으며, 100에 가까울수록 태양광과 유사한 스펙트럼을 가지는 우수한 광원이라고 할 수 있다. 일반적으로 사용되는 백열등은 효율은 낮지만 100에 가까운 연색지수를 가지고 있다. 또한, 색좌표 기준으로는 백색의 기준인 블랙바디 라디에이션 곡선으로부터 많이 벗어나게 되면 조명의 품질이 떨어지는 광원이 된다. 일반적인 193 CIE 좌표상에서 y 좌표가 커지면 효율은 증가하게 되는데, 효율만을 높이려고 하다보면 y 좌표가 너무 높아져서 조명으로 사용하기 어려운 광원이 될 수가 있으므로 주의하여야 한다. 또한, 광원의 색안정성 역시 중요한 요소로서 광원의 수명과 구동전압에 따른 색상변화와 광원의 배광 방향에 따른 색상변화가 적어야 한다. [그림 5]

[표 5] AMOLED 디스플레이와 OLED 조명의 비교

	AMOLED 디스플레이	OLED 조명	비고
구조	- TFT Back-plane 필요 - RGB 픽셀 필요	- TFT Back-plane 불필요 - 백색광의 단일 픽셀로 구성	 디스플레이용 조명용
OLED 특성	- 색온도 : 6,000K~10,000K - 연색성 : 고려하지 않음 (<60) - 시야각 : 지향광 - 색재현율이 중요	- 색온도 : 3,000K~6,000K - 연색성 : >80 - 지향성 : 확산광	
제조장비 호환성	- 픽셀 구성을 위한 기능 필요 - 공정시간: 現4분 (<2분 목표) - 유기소재소비율: 現15%(40%목표) - 2세대형 생산장비로 양산 중 - 5.5세대형 생산장비 개발 중	- 픽셀 불필요 - 공정시간 : <1분 요구 - 유기소재소비율 : >50% 요구 - 2세대형 장비로 파일럿 생산 - 4세대이상 장비 개발 예정	- 디스플레이용 장비로 조명용 패널의 제조는 가능하나, 원가를 낮출 수 없음
응용분야	- 모바일용, TV용 디스플레이	- 보조조명, 주조명, BLU	
벤더 (現)	해외 - 소니, CMEL	- 필립스, 오스람 - 도호쿠디바이스, 루미오텍	- LG화학, 삼성모바일디스플레이, 네오뷰코오롱 등 기술 개발 중
	국내 - 삼성모바일디스플레이 - LG디스플레이	- 없음	

자료: 한국고분자학회, 고분자 과학과 기술(2013)



자료: 한국고분자학회, 고분자 과학과 기술(2013)

[그림 6] 조명용 광원으로 적합한 색온도 (CCT)별 색좌표 범위

조명의 신기술 광원으로 주목받는 OLED는 백색 LED 광원과 비교되곤 한다. LED가 반도체 칩을 사용하여 만들기 때문에 소형의 점광원이고 면광원화 하는데 있어서 부가적인 부품과 공정이 필요한 반면, OLED 조명은 패들 형태로 생산되므로 자체가 면광원이며 확산광이라는 특징을 가진다. 확산광은 눈의 피로감을 줄이고 낮은 높이에서 넓은 면적을 밝힐 수 있어 실내용 조명으로 적합한 특성을 나타낸다. 또한, LED 광원의 경우, 매우 높은 휘도를 가지고 수명이 길며 외광 효율이 높은 장점을 가지고 있지만 발열이 심하여 커다란 방열장치를 필요로 하며 눈이 부시고 확산광을 만들기 어렵다는 단점이 있다. 이와 달리 OLED 광원은 눈에 편안한 휘도로 면광원 형태를 발광하므로 실내용 조명으로 적합하고 매우 얇아 혁신적인 디자인이 가능하다는 장점이 부각되고 있다.

[표 6] OLED 면광원과 타 조명용 광원의 특성 비교

구분	OLED	LED	형광등	백열등
특징	면광원 	점광원 	선광원 	원광원 
광원 밝기	보통	강함	보통	약함
광원효율 (lm/W)	50	100	70	20
주 사용처	가정	신호등, 자동차, BLU 등	가정	가정
수명 (시간)	20,000	100,000	10,000	1,000
단가(\$/Klm)	--	100	10	1
장점	높은 연색성 다양한 형태 등기구화 효율 우수	고휘도	저렴한 가격	저렴한 가격
단점	R&D투자필요	부품추가소요 조명공해유발	중금속 오염	낮은 효율

자료: 한국고분자학회, 고분자 과학과 기술(2013)

2.3 백색 유기발광 다이오드

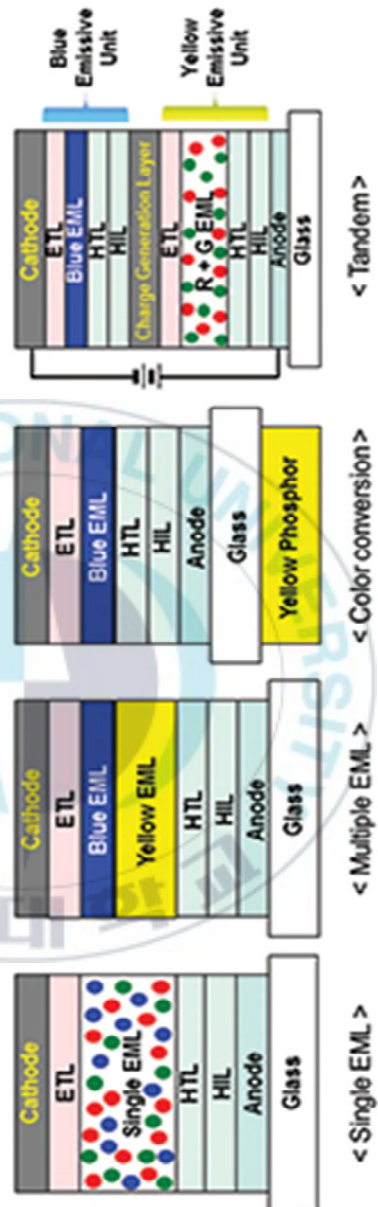
OLED 조명이 상용화되기 위해서는 3,000 K 이상의 색온도와 80 이상의 연색성을 가지며 10,000 시간 이상의 수명을 갖는 백색 광원이 요구되는데, 이러한 백색 광원을 제작하기 위해서는 단일 발광층 구조, 수직 적층 구조, 색변환 구조 등의 방법이 사용된다. 단일 발광층 구조는 단층의 유기물을 이용하는 방식으로 저분자 발광층을 이용하는 것과 고분자 발광층을 이용하는 방식이 있다. 일반적으로는 저분자보다는 고분자를 이용하여 백색 OLED를 구현한다. 비교적 제조공정이 간단한 장점이 있으나, 백색광의 방출이 쉽지 않으며 효율이 낮고 색제어를 할 수 없다는 단점이 있다.

수직 적층 구조는 적색, 녹색, 청색의 유기물을 적층하거나 보색관계인 두 유기물을 양극과 음극 사이에 수직으로 적층함으로써 각 유기층에서 발광하는 빛이 혼합되어 백색이 방출되는 원리다. 삼원색을 적층할 경우 제조공정이 복잡하나 연색성이 우수한 장점이 있고, 보색을 적층할 경우에는 공정이 단순하고 효율이 좋지만 연색성이 나쁘다는 특징을 가진다.

색변환 구조는 청색 발광만으로 구성된 OLED를 제조한 후 발광면에 적색, 녹색 등의 색변환층을 도입하여 백색광을 방출하는 방법으로 주로 LED에서 많이 사용된다. 제조가 간단하고 시간에 따른 색의 변화가 적는데, 성능이 우수한 청색 소재의 개발이 관건이다.

Items	Structure	Single EML	Multiple EML	Color conversion	Tandem
Efficiency		Δ	⊙	X	⊙
Lifetime		X	○	○	⊙
Process		⊙	○	⊙	Δ

⊙ : Best, ○ : Good, Δ : Normal, X : Bad

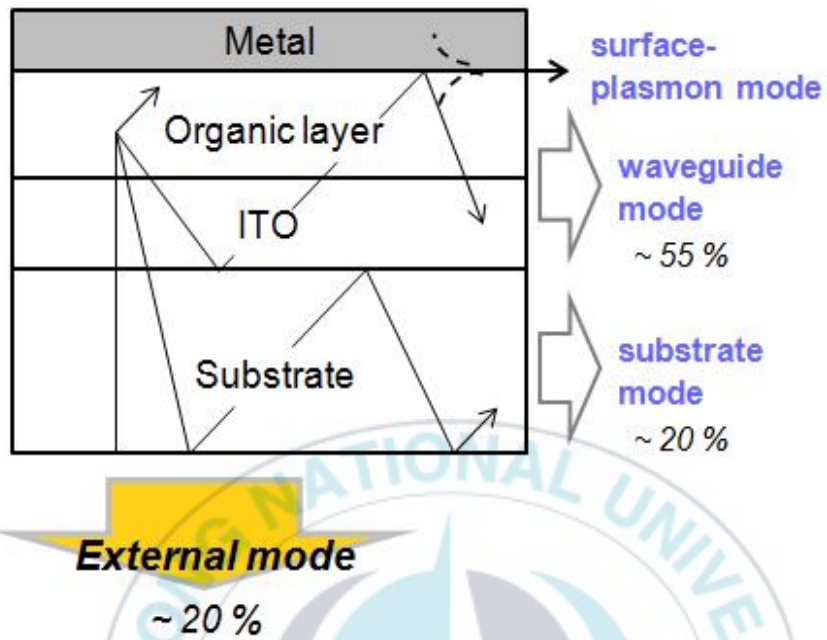


[그림 7] 백색 OLED의 종류

제 3절 광 추출 (Light extraction)

3.1 기존 유기발광 다이오드의 광추출 한계

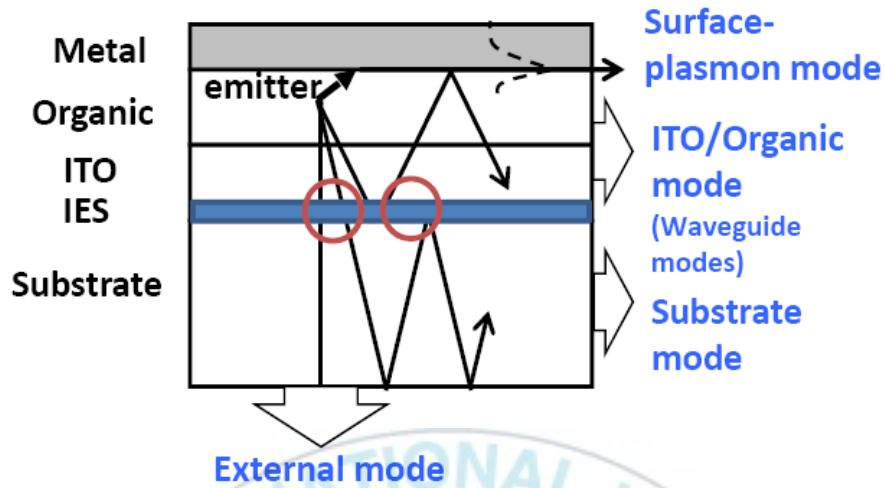
최근 유기재료와 소자 구조의 발전으로 전력효율 및 수명이 크게 향상됨에 따라 차세대 조명 및 디스플레이로 주목받고 있는 유기 발광 다이오드(OLED)는 얇고, 가벼우며, 플렉서블한 형태의 다양한 소자의 구현이 가능하다. 디스플레이용 OLED는 이미 성공적으로 상용화 되었으며, 향후 현재보다 더 큰 시장을 확보할 것으로 예상되고 있다. 반면에, 조명용 OLED의 경우, 곡면형, 플렉서블 조명등의 다양한 디자인의 구현이 가능하고 눈부심이 없는 이점을 가지고 기존의 형광등을 대체할 대체 조명으로 주목받고 있다. 그러나 조명용 OLED의 실제 상용화를 위해서는 개선되어야 할 문제점들이 남아있으며, 그 중에서도 OLED의 낮은 외광 효율을 높이는 것이 시급한 과제로 여겨지고 있다. 현재 OLED의 소자는 유기층, 투명전극, 기판의 굴절률 차이에 따른 내부 전반사로 인해 소자 내부에 생성된 빛의 약 25% 정도만이 외부로 추출되어지고, 나머지 약 75%의 빛이 내부 혹은 층간에서 소실되고 있다. 이 때, 유기층/투명전극과 기판에서 갇혀 있는 빛을 각각 waveguide mode, substrate mode 라고 한다. [그림 8]



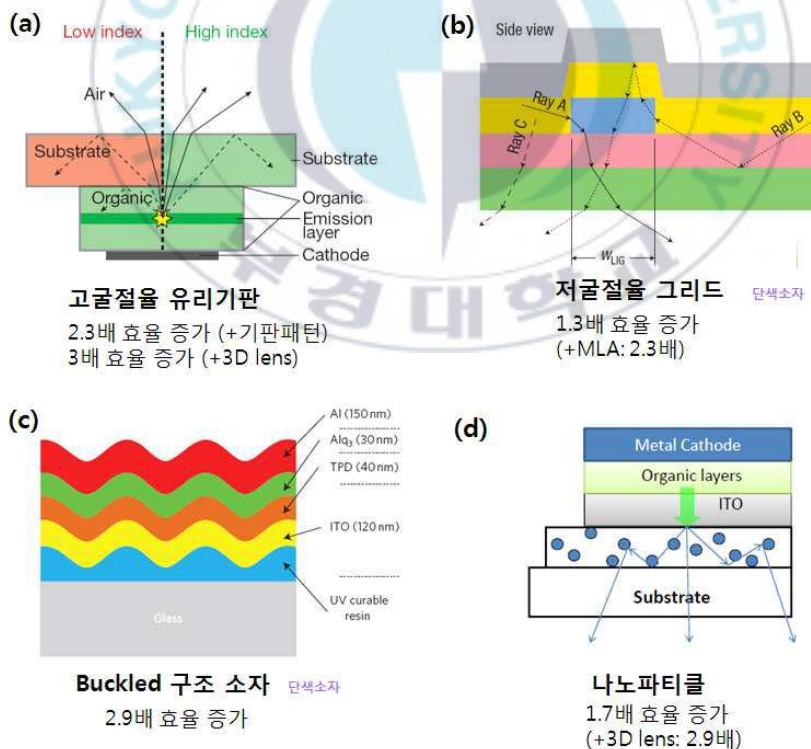
[그림 8] 유기발광 다이오드의 광 추출 모드

2.2 내부 광 추출 구조 (Internal light extraction structure)

OLED의 투명전극과 유기층 사이에서 빠져나오지 못하는 waveguide mode의 빛을 추출하기 위한 내부 광 추출 구조에 대한 연구는 한계를 가진다. OLED를 구성하고 있는 유기층은 기판이나 투명전극의 표면 거칠기에 의해 손상을 받기 쉽기 때문에 내부 광 추출 구조를 소자에 적용할 때, 누설 전류가 유도되고 전기적인 short가 발생하는 문제점이 있으며, 대부분의 내부 광 추출 구조는 기판과 투명전극의 사이에 제작되거나 기판 또는 투명전극의 형태를 변형시키는 기술을 활용하는데, 이는 투명전극의 증착 공정시 박막 성장을 저해하여 광학적, 전기적 특성이 제한된다. 따라서 내부 광 추출 구조의 상용화를 위해서는 뛰어난 광 추출 기능과 함께 낮은 표면 거칠기를 구현할 수 있는 기술이 요구된다. 기존의 내부 광 추출 구조는 저굴절율 그리드 구조, 광산란 나노파티클 구조, Buckled 기판 구조, photonic crystal 기술 등 다양한 기술들 [그림 9] 이 연구되고 있지만, 대다수의 공정이 복잡하고, 대면적에 적용하기 힘들기 때문에 상용 OLED 소자에 적합하지 않다.



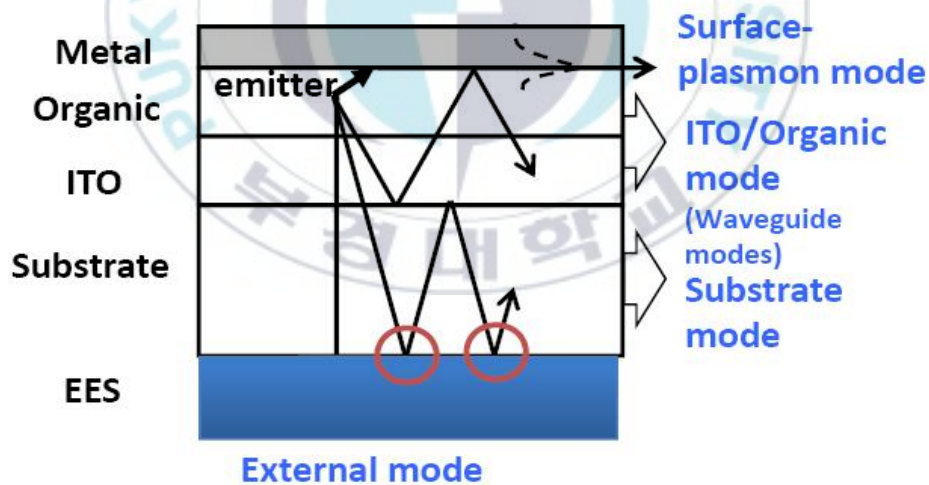
[그림 9] OLED의 내부 광 추출 구조



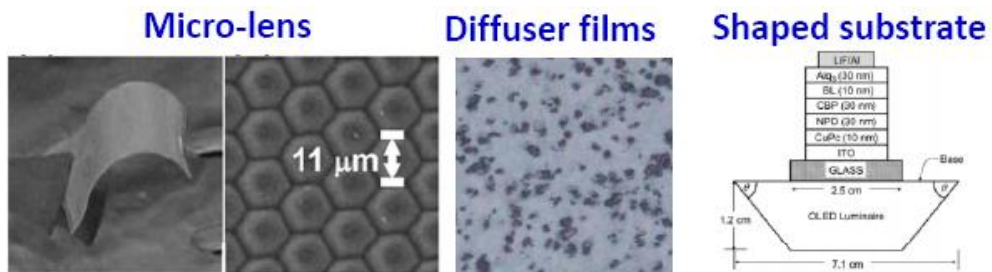
[그림 10] 다양한 형태의 내부 광 추출 기술

2.3 외부 광 추출 구조 (external light extraction structure)

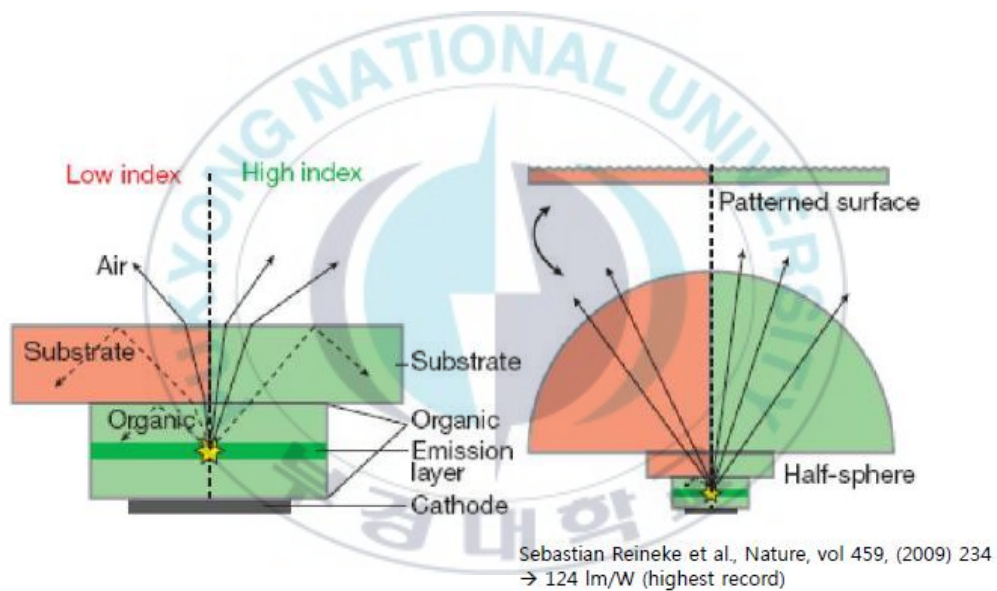
외부 광 추출 기술은 유리 기판 외부 면에서 유리기판과 공기사이의 굴절률 차이에 의한 전반사 효과를 줄여 외부로의 광 추출 효율을 높이는 것으로, 광 산란층, 마이크로 렌즈 어레이 (Microlens array), 저 반사 코팅 기술 등이 있다. 일반적으로는 기판의 외부에 다양한 광 추출 형상 (반구, 필라, 피라미드 등)을 만들어 기하학적으로 광 추출 효과를 향상시키는 방법을 사용한다. 그러나 이들 방법은 효율성이 떨어지고 기판 에칭에 의한 원재료 가격 상승에 따라 OLED 조명의 가격 상승의 원인이 된다. 또한 이러한 주기성을 갖는 광 추출 구조는 특정 파장을 광도파하여 연색성을 저하시킬 수 있기 때문에 무작위 구조를 갖는 구조가 요구되고 있다.



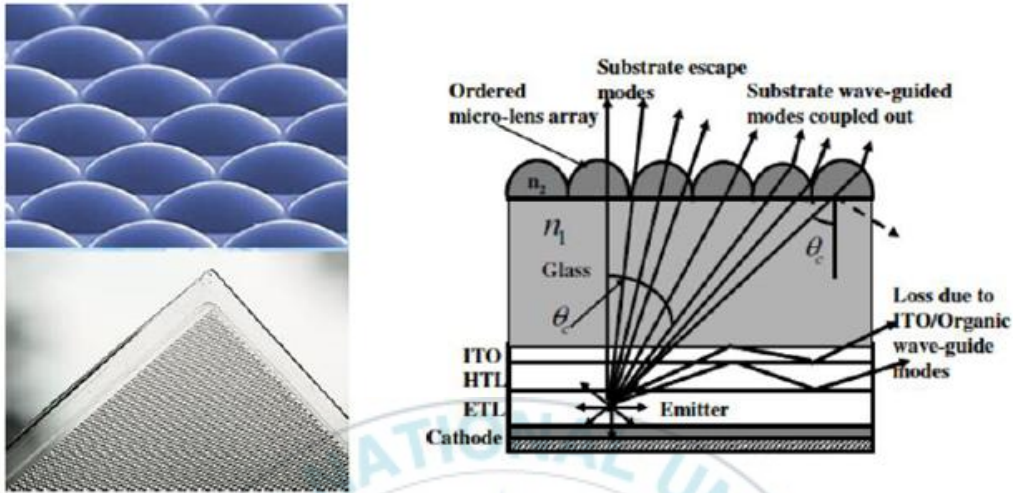
[그림 11] OLED 외부 광 추출 구조



[그림 12] 다양한 형태의 외부 광 추출 기술



[그림 13] 외부 광 추출 기술 1 (고 굴절률 기판)



[그림 14] 외부 광 추출 기술 2 (Micro Lens Array)

제 III장 실험

제 1절 색변환 마이크로 렌즈 어레이 (DC-MLA) 필름

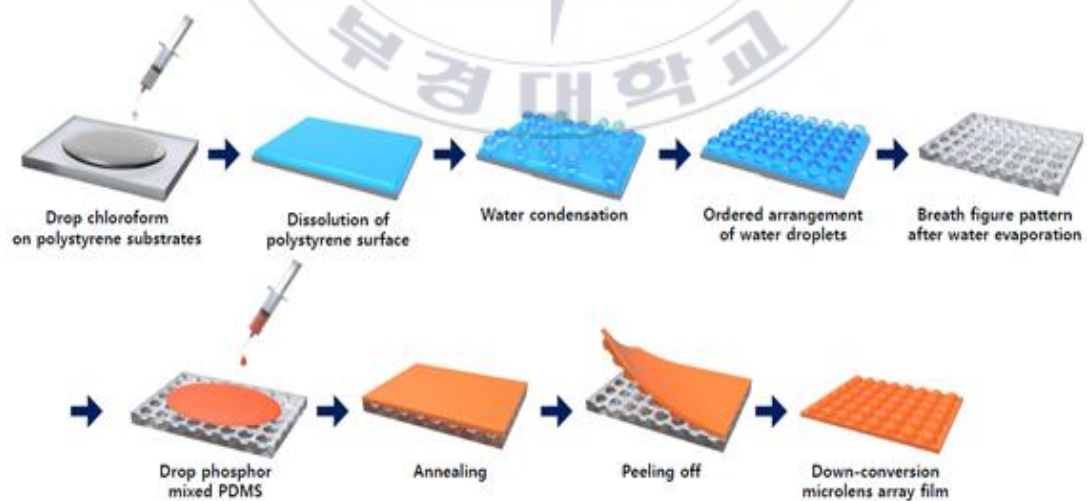
1.1 Breath Figure법 기반의 DC-MLA 필름 제작

본 연구에서는 마이크로 렌즈 어레이 형태의 필름을 제작하기 위해 Breath Figure법을 이용하여 몰드(mold)를 제작하였다. 적절한 습도 하에서 냉각기 위에 폴리스티렌 (polystyrene) 페트리 접시를 놓고, 1ml의 클로로폼 (chloroform)을 떨어뜨린 후 1시간 정도 용매 및 냉각에 의해 생성된 물방울을 증발시키면 배열된 다공성의 폴리스티렌 몰드를 형성한다. 색변환 필름을 제작하기 위해 적색 ($\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$)과 녹색 ($\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$, LuAG) 형광체를 PDMS (polydimethylsiloxane, Sylgard 184, Dow Corning)에 혼합한 다음, 유리 기판 (Film DC) 또는 Breath Figure법으로 제작된 마이크로 렌즈 패턴의 몰드 (Film DC-MLA-2)에 스핀 코팅하고, 70 °C의 온도에서 1시간 동안 열처리하여 건조시킨다. 건조된 필름은 바로 유리 기판 또는 Breath Figure 몰드로부터 분리한다. Film DC-MLA-1을 제작하기 위해서, 형광체를 혼합하지 않은 PDMS를 Breath Figure 몰드에 스핀 코팅한 후 열처리하여 건조시킨 다음, 형광체가 혼합된 PDMS를 건조된 마이크로 렌즈 어레이 PDMS 필름위에 바로 스핀 코팅 및 열처리하여 건조하고 바로 Breath Figure 몰드로부터 분리한다. 제작된 색변환 필름의 표면 특성 및

두께는 SEM(scanning electron microscopy, S-2400 Hitachi)을 통해 확인하였다.



[그림 15] Breath Figure법을 위한 실험 장치



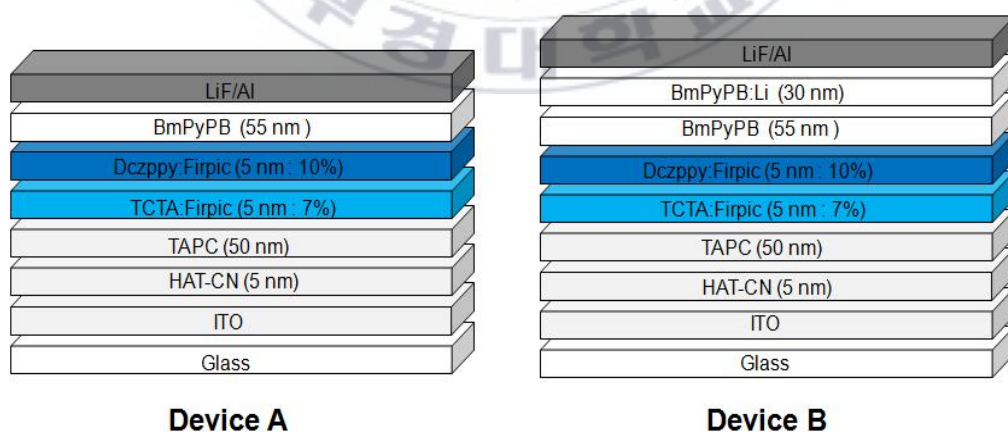
[그림 16] DC-MLA 필름 제작 과정

제 2절 색변환 백색 유기발광다이오드

2.1 색변환 백색 유기발광 다이오드 제작

청색 유기발광 다이오드는 약 10^{-8} mbar의 기저 압력을 갖는 고진공 챔버에서 제작된 ITO glass상에 열 증착 방법을 통해 제작되었다.

제작된 청색 OLED의 구조는 [그림 17]와 같으며, 모든 증착과정이 끝난 후에 질소 대기에서 에폭시 접착제 (epoxy glue)와 글라스 리드 (glass lid)를 사용하여 encapsulation 하였다. 소자의 active area는 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 이며, 제작된 청색 OLED의 전류-전압-휘도 (current-voltage-luminescence) 특성, 각도별 휘도, 그리고 전계 발광 (electroluminescence) 스펙트럼은 source-measure unit system (Keithley 238)와 goniometer-equipped spectroradiometer (Minolta CS-2000)을 통해 측정하였다.



[그림 17] 청색 발광 OLED의 구조

제 IV장 결과 및 고찰

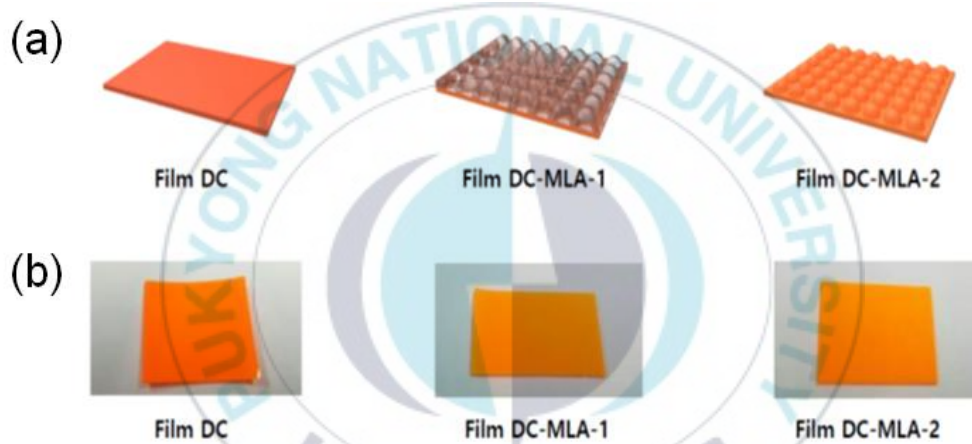
제 1절 DC-MLA 필름의 특성

1.1 DC-MLA 필름의 표면 특성

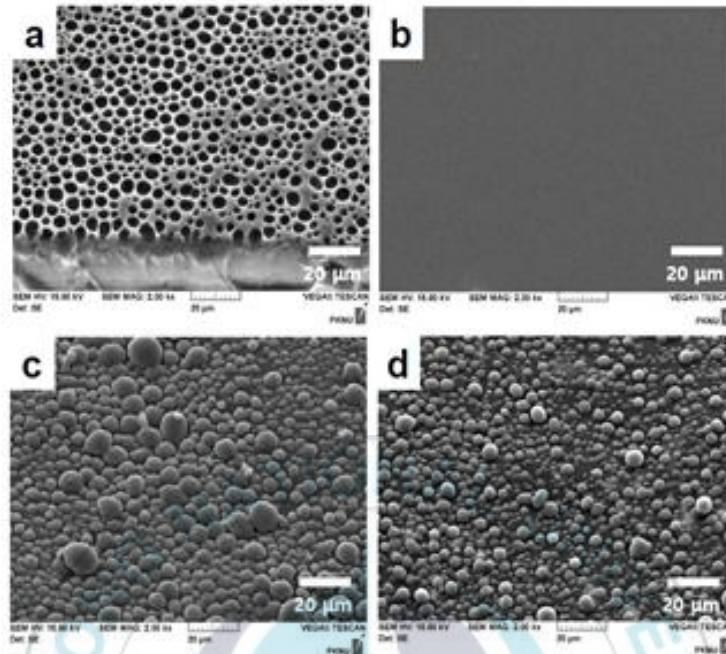
Breath Figure 몰드로부터 제작된 세가지 종류의 색변환 필름은 그림과 같다. 광 추출 구조가 없는 색변환 필름 (e.g. 형광체가 혼합된 flat PDMS)은 Film DC, 형광체와 혼합된 flat PDMS와 형광체가 없는 Breath Figure 패턴의 PDMS 필름의 복합체는 Film DC-MLA-1, 그리고 Breath Figure 패턴을 가진 형광체가 혼합된 PDMS 필름을 Film DC-MLA-2으로 표시한다 [그림 18]. [그림 19]은 Breath Figure 패턴을 가진 다공성의 폴리 스티렌 몰드 (그림 19a)와 다양한 색변환 필름 (그림 19b-d)의 SEM (scanning electron microscope) 이미지를 보여주며, Breath Figure 패턴의 폴리 스티렌 필름은 수 마이크로미터 (수 μm) 크기의 조밀한 pore를 확인할 수 있다. (그림 19a).

Film DC의 경우, 형광체가 PDMS 필름 내부에 성공적으로 포함되어 평평한 표면을 보여주며 (그림 19b), Film DC-MLA-1과 Film DC-MLA-2는 모두 Breath Figure 몰드의 마이크로렌즈 패턴으로부터 임프린팅된 약 10-20 μm 크기로 형성된 광 추출 구조를 확인할 수 있다 (그림 19c와 그림 19d).

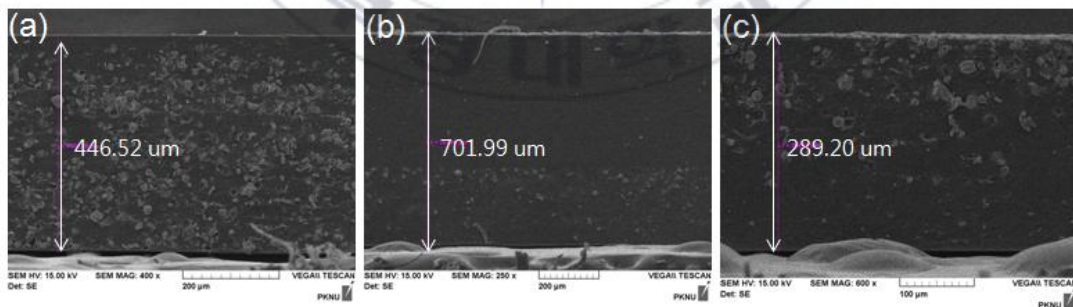
Film DC-MLA-2의 마이크로 렌즈 어레이의 개별적인 크기는 Film DC-MLA-1의 개별적인 크기보다 상대적으로 작다는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Film DC-MLA-2 내부에 혼합된 형광체의 크기 (적색 형광체 : 5-25 μm , 녹색 형광체 : 10-50 μm)가 크기 때문에 마이크로 패턴의 몰드와 PDMS 필름 사이의 계면에서 약간의 방해를 받는 임프린팅 과정이 야기될 수 있다. PDMS 필름에 내장된 형광체에 의한 교란은 이전의 연구에서도 관찰되었다. [24]



[그림 18] 색변환 필름의 (a) 구조와 (b) 사진



[그림 19] Breath Figure 패턴과 색변환 필름의 SEM 이미지 1 (표면)



[그림 20] Breath Figure 패턴과 색변환 필름의 SEM 이미지 2 (두께)

제 2절 색변환 백색 유기발광 다이오드의 특성

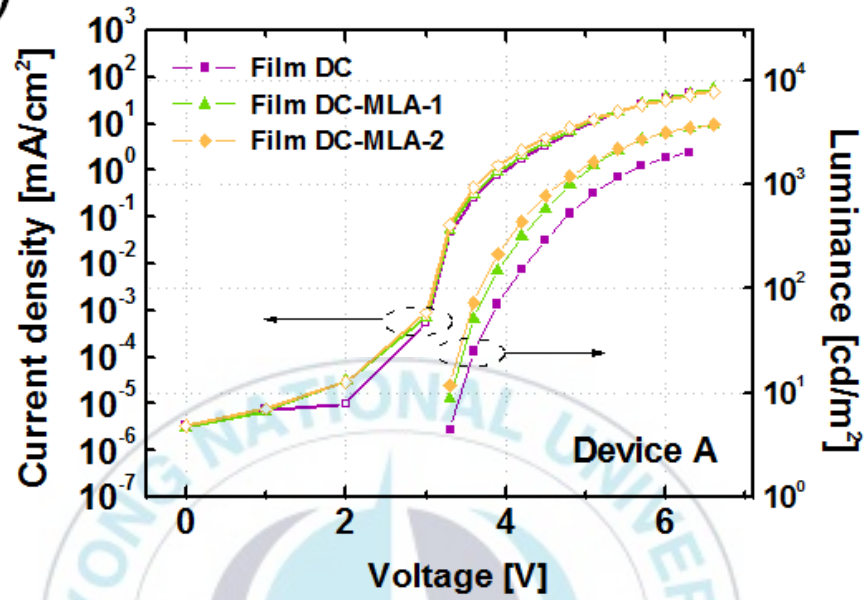
2.1 색변환 백색 OLED의 전류-전압-휘도 특성

색변환 필름이 적용된 백색 OLED 연구의 신뢰성을 위해, BmPyPB:Li의 전자 수송층이 추가된 구조와 BmPyPB:Li의 전자 수송층이 없는 구조를 제작하였고, 제작된 청색 OLED의 구조는 [그림 17]와 같다.

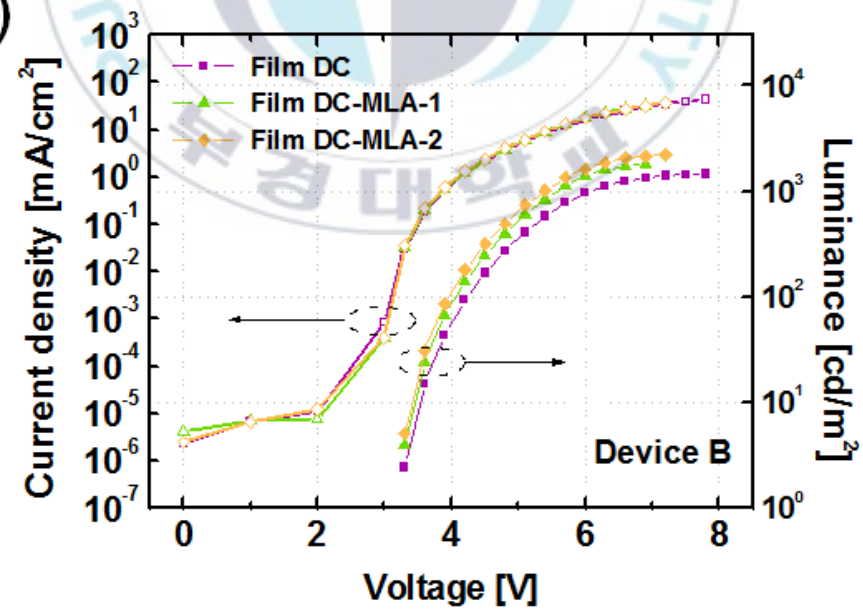
외부 광 추출 필름은 소자의 전기적인 특성에 영향을 주지 않으므로 모든 소자의 전기적 특성은 동일하다는 것을 [그림 21]을 통해 확인할 수 있다.

Film DC-MLA-1과 Film DC-MLA-2의 경우, 전기적 특성은 동일하지만 Film DC 대비 높은 휘도를 보여 주고 있다. 이 결과는 Film DC-MLA-1, Film DC-MLA-2의 마이크로 렌즈 어레이 패턴의 광 추출 구조에 의한 광 추출 향상 효과를 명확하게 보여준다.

(a)



(b)

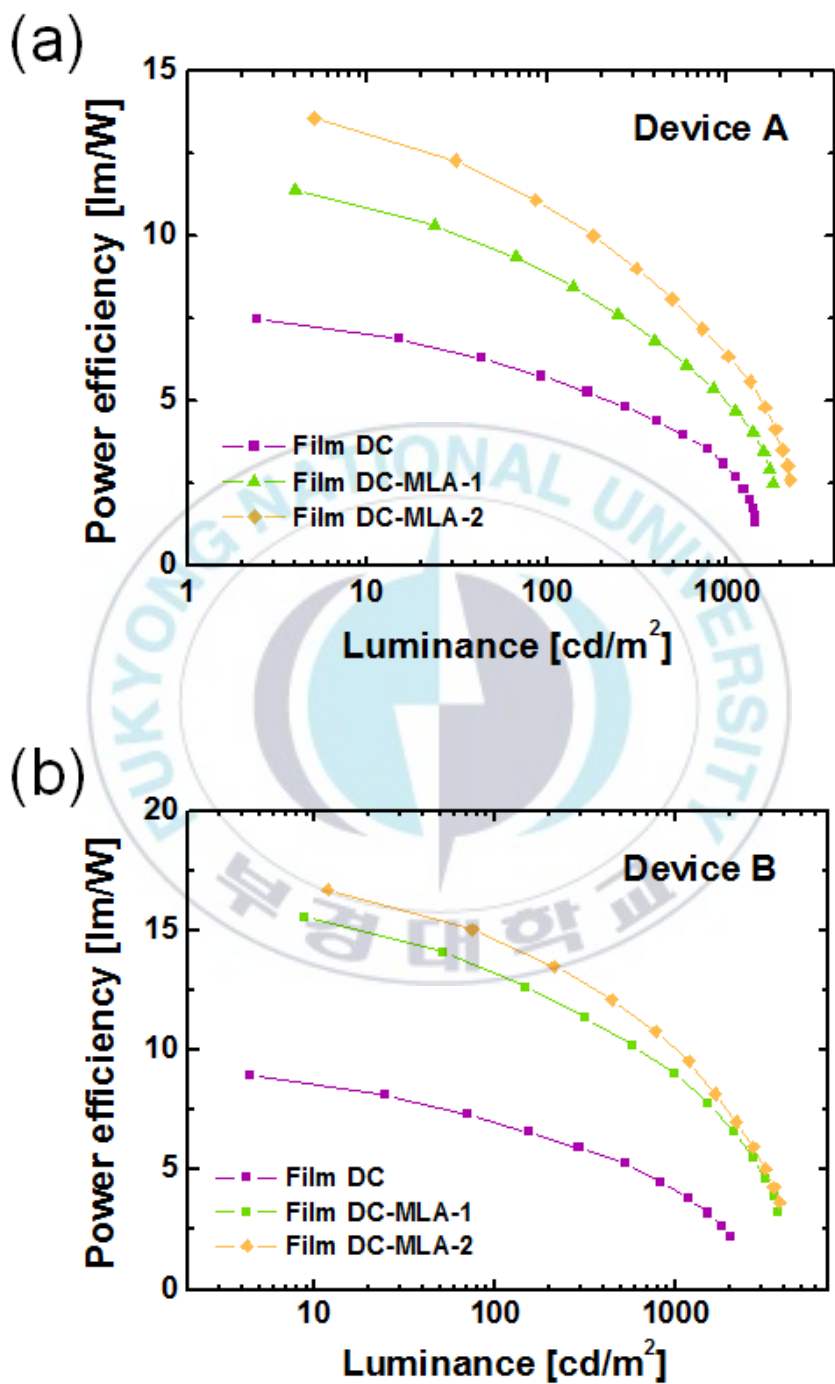


[그림 21] OLED의 전류-전압-휘도 곡선

2.2 색변환 백색 OLED의 효율 특성

제작된 OLED의 전력 효율 (power efficiency)은 [표7. 8]와 [그림 22]을 통해 확인할 수 있다. Film DC-MLA-1과 Film DC-MLA-2를 청색 OLED에 적용함으로써 소자의 전력 효율은 외부 광 추출 구조가 없는 Film DC 대비, Device A 는 각각 1.52, 1.81배, Device B 는 각각 1.73, 1.86배 향상되었다. Film DC-MLA-2를 적용한 OLED의 광 추출 성능은 Film DC-MLA-1을 적용한 OLED 보다 높게 나타났으며, 이에 따라 Film DC-MLA-2의 마이크로 렌즈 어레이 패턴의 크기가 Film DC-MLA-1에 비해 작은 크기지만, 광 추출 패턴이 충분히 형성되었음을 나타낸다.

Film DC-MLA-1의 경우, 마이크로 패턴의 PDMS와 형광체가 혼합된 평평한 PDMS 구조의 계면에 의해 광 추출 효과가 감소되었을 것으로 예상된다.



[그림 22] OLED의 전력 효율 곡선

	Device A		
	Film DC	Film DC-MLA-1	Film DC-MLA-2
Power efficiency (Max.) [lm/W]	7.49	11.4	13.58
Enhancement ratio [%]	-	1.52	1.81
CRI	44.9	75.5	77.4

[표 7] DC-MLA 필름이 적용된 색변환 백색 유기발광 다이오드의 성능 (1)

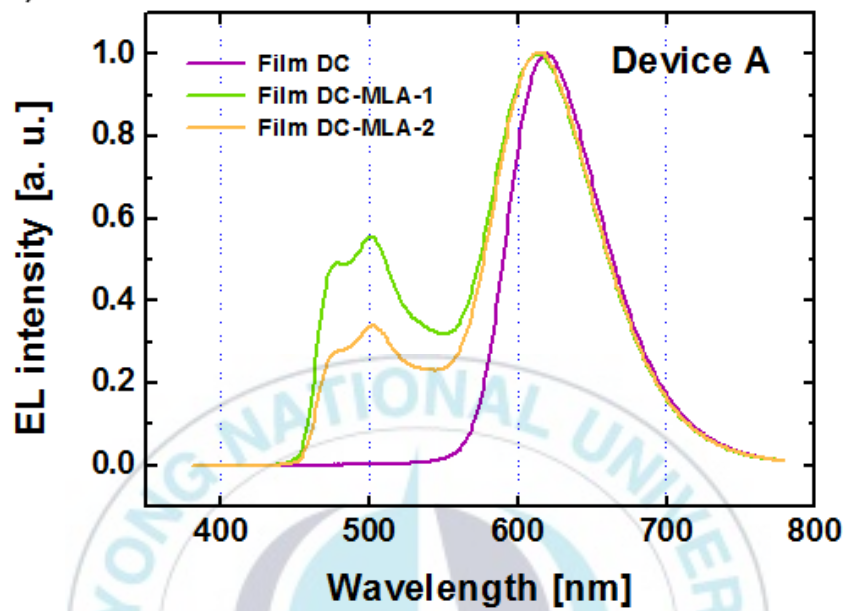
	Device B		
	Film DC	Film DC-MLA-1	Film DC-MLA-2
Power efficiency (Max.) [lm/W]	8.97	15.56	16.7
Enhancement ratio [%]	-	1.73	1.86
CRI	57.2	84.3	83.7

[표 8] DC-MLA 필름이 적용된 색변환 백색 유기발광 다이오드의 성능 (2)

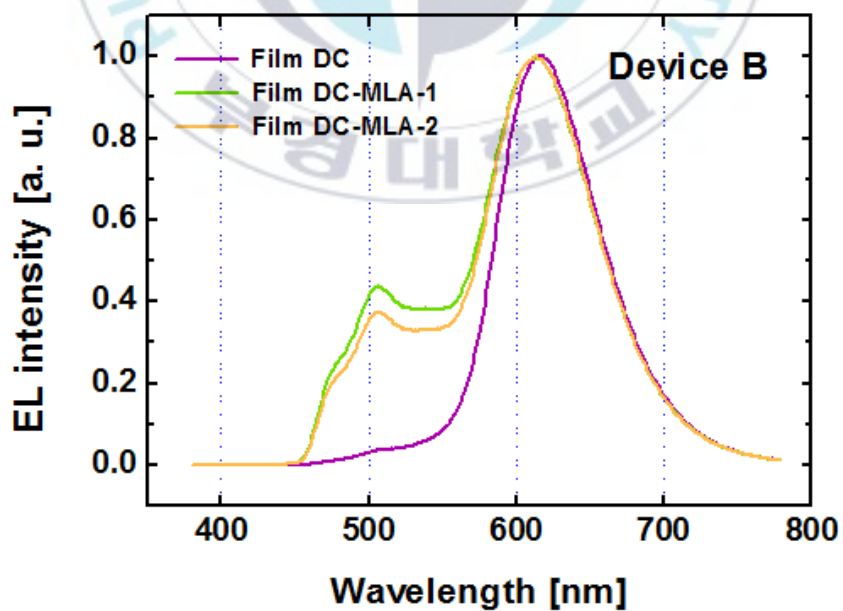
2.3 색변환 백색 OLED의 EL 특성

[그림 23]을 통해 Film DC가 적용된 청색 OLED는 청색 영역에서 낮은 광의 세기를 나타내지만, Film DC-MLA-1과 Film DC-MLA-2가 적용된 청색 OLED의 경우, 청색 영역의 광의 세기가 상당히 향상되었음을 확인하였다. Film DC가 적용된 OLED는 색변환 성능이 좋지 않으나 (그림 24a), Film DC-MLA-1과 Film DC-MLA-2를 적용함으로써 성공적으로 청색광이 백색광으로 변환되었음을 확인 할 수 있다. 이 결과로부터 남아 있는 청색광은 평평한 표면을 가진 Film DC 내부에서 상당히 산란되어 외부로 빠져나오지 못하며 [그림24c의 Ray a], 일부 청색광은 적색과 녹색 형광체에 흡수되어 색변환 된다. 반면에, Film DC-MLA-1과 Film DC-MLA-2 내부에서 산란된 흡수되지 않은 청색광은 Breath Figure 패턴에 의해 형성된 광 추출 구조에 의해 효과적으로 외부로 추출되며 [그림 24c의 Ray b], 색 변환된 적색과 녹색 또한 함께 추출된다 [그림24c의 Ray c]. 청색광의 광 추출 향상에 의해 소자의 연색지수 (CRI, color rendering index)는 상당히 향상되었다. Film DC가 적용된 Device A와 Device B의 연색지수는 각각 44.9와 57.2 였으며, Film DC-MLA-1이 적용된 Device A와 Device B는 각각 75.5와 84.3, 그리고 Film DC-MLA-2가 적용된 Device A와 Device B는 각각 77.4와 83.7의 결과로 광 추출 구조에 의해 상당히 향상된 연색지수의 결과를 확인하였다. 이 중에서도 Film DC-MLA-1이 적용된 Device B에서 84.3의 가장 높은 연색지수의 결과를 얻었다.

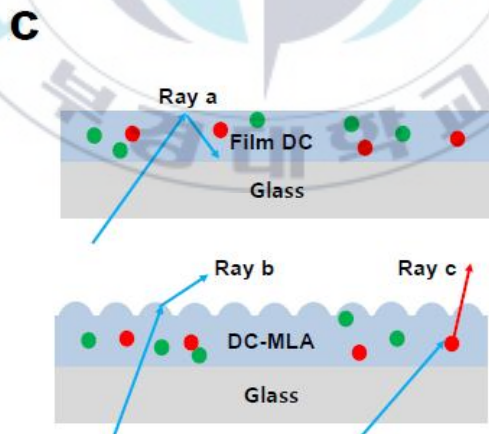
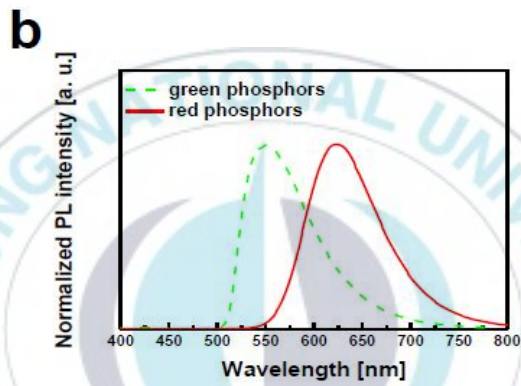
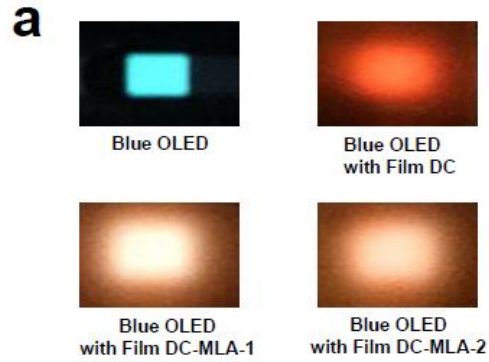
(a)



(b)



[그림 23] OLED의 전계 발광 스펙트럼

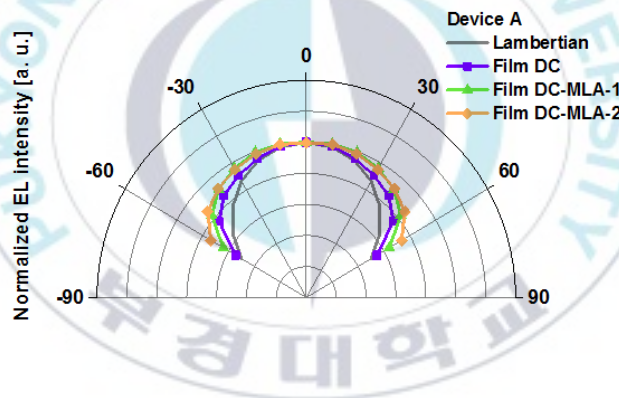


[그림 24] (a) 청색 OLED와 다양한 색변환 필름이 적용된 색변환 백색 OLED의 동작 사진, (b) 정규화된 적색, 녹색 형광체의 광 발광 강도, (c) 색변환 필름 내부 광선의 도식화

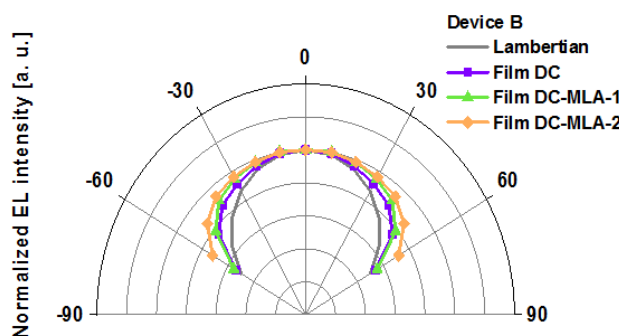
2.4 색변환 백색 OLED의 각도별 휘도 특성

다양한 색변환 필름이 적용된 OLED의 정규화된 각도별 휘도 특성은 [그림 25]과 같다. 제작된 모든 소자는 이상적인 램버시안 (Lambertian) 발광 패턴보다 더 높은 휘도를 나타내고, 각각의 색변환 필름은 약간 다른 각도별 특성을 보여준다. 30° 이상의 시야각에서 Film DC-MLA-2 가 적용된 OLED는 Film DC와 Film DC-MLA-1이 적용된 소자보다 더 높은 휘도를 확인할 수 있으며, 광 추출 구조가 없는 Film DC가 적용된 소자에서 가장 낮은 휘도 특성을 보였다.

(a)



(b)



[그림 25] 색변환 백색 OLED의 각도별 휘도 특성

제 V 장 결 론

본 연구에서는 백색 OLED의 높은 광 추출 효율과 고품질의 백색광 구현을 위한 고성능의 색변환 외부 광 추출 필름을 제작하였다. DC-MLA 필름은 Breath Figure 패턴을 기반으로 하는 단순한 임프린팅 방법을 통해 준비하였다. Film DC-MLA-2가 적용된 색변환 백색 OLED의 전력 효율(power efficiency)은 외부 광 추출 구조가 없는 Film DC 대비, 1.86배 향상되었으며, 이는 Breath Figure 패턴을 가진 색변환 백색 OLED에 대해 보고된 연구 중에서 가장 향상된 결과로 여겨지고 있다. 또한, DC-MLA 필름의 CRI는 84.3으로 이 결과에 따라 고품질의 백색광을 구현하였음을 확인 하였다. 색변환 필름 내부에서 산란된 청색광의 광 추출 향상에 의해 DC-MLA 필름이 적용된 소자의 높은 광 추출 효율과 높은 CRI의 결과를 얻을 수 있었다. 이에 따라 Breath Figure 패턴을 통해 단순한 임프린팅 방법으로 제작된 DC-MLA 필름은 고 성능의 백색 OLED를 위한 가장 유망한 외부 광추출 기술 중의 하나라고 생각된다.

제 VI 장 참고 문헌

1. Reineke, S., Thomschke, M., Lüssem, B. & Leo, K. White organic light-emitting diodes: Status and perspective. *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1245 - 1293 (2013).
2. Gather, M. C. & Reineke, S. Recent advances in light outcoupling from white organic light-emitting diodes. *J. Photonics Energy* **5**, 57607 (2015).
3. Reineke, S. *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency. *Nature* **459**, 234 - 238 (2009).
4. Brütting, W., Frischeisen, J., Schmidt, T. D., Scholz, B. J. & Mayr, C. Device efficiency of organic light-emitting diodes: Progress by improved light outcoupling. *Phys. Status Solidi* **210**, 44 - 65 (2013).
5. Sun, Y. & Forrest, S. R. Enhanced light out-coupling of organic light-emitting devices using embedded low-index grids. *Nat. Photonics* **2**, 483 - 487 (2008).
6. Chang, H.-W. *et al.* Nano-particle based scattering layers for optical efficiency enhancement of organic light-emitting diodes and organic solar cells. *J. Appl. Phys.* **113**, 204502 (2013).
7. Kim, Y. H. *et al.* We Want Our Photons Back: Simple Nanostructures for White Organic Light-Emitting Diode

- Outcoupling. *Adv. Funct. Mater.* **24**, 2553 - 2559 (2014).
8. Do, Y. R. *et al.* Enhanced Light Extraction from Organic Light-Emitting Diodes with 2D SiO₂/SiN_x Photonic Crystals. *Adv. Mater.* **15**, 1214 - 1218 (2003).
 9. Kim, D. *et al.* Enhanced light outcoupling of polymer light-emitting diodes with a solution-processed, -flattening photonic-crystal underlayer. *J. Inf. Disp.* **17**, 143 - 150 (2016).
 10. Koo, W. H. *et al.* Light extraction from organic light-emitting diodes enhanced by spontaneously formed buckles. *Nat. Photonics* **4**, 222 - 226 (2010).
 11. Zhou, L. *et al.* Efficiently Releasing the Trapped Energy Flow in White Organic Light-Emitting Diodes with Multifunctional Nanofunnel Arrays. *Adv. Funct. Mater.* **25**, 2660 - 2668 (2015).
 12. Kim, E. *et al.* A Facile Route to Efficient, Low-Cost Flexible Organic Light-Emitting Diodes: Utilizing the High Refractive Index and Built-In Scattering Properties of Industrial-Grade PEN Substrates. *Adv. Mater.* **27**, 1624 - 1631 (2015).
 13. Moeller, S. & Forrest, S. R. Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays. *J. Appl. Phys.* **91**, 3324 - 3327 (2002).
 14. Sun, Y. & Forrest, S. R. Organic light emitting devices with enhanced outcoupling via microlenses fabricated by imprint lithography. *J. Appl. Phys.* **100**, 1 - 7 (2006).
 15. Galeotti, F., Mróz, W., Scavia, G. & Botta, C. Microlens arrays for light extraction enhancement in organic light-emitting diodes:

- A facile approach. *Org. Electron.* **14**, 212 (2013).
16. Sharma, R. K., Deepak & Katiyar, M. Effect of various microlens parameters on enhancement of light outcoupling efficiency of organic light emitting diode. *Org. Electron.* **38**, 121 - 129 (2016).
 17. Pyo, B. *et al.* A nanoporous polymer film as a diffuser as well as a light extraction component for top emitting organic light emitting diodes with a strong microcavity structure. *Nanoscale* **8**, 8575 - 8582 (2016).
 18. Eom, S. H., Wrzesniewski, E. & Xue, J. Close-packed hemispherical microlens arrays for light extraction enhancement in organic light-emitting devices. *Org. Electron. physics, Mater. Appl.* **12**, 472 - 476 (2011).
 19. Zhang, A., Bai, H. & Li, L. Breath Figure: A Nature-Inspired Preparation Method for Ordered Porous Films. *Chem. Rev.* **115**, 9801 - 9868 (2015).
 20. Gather, M. C., Köhnen, A. & Meerholz, K. White organic light-emitting diodes. *Adv. Mater.* **23**, 233 - 48 (2011).
 21. Lee, J. *et al.* Simplified Bilayer White Phosphorescent Organic Light-Emitting Diodes. *ETRI J.* **38**, 260 - 264 (2016).
 22. Lee, J. *et al.* Down-conversion white organic light-emitting diodes using microcavity structure. *Adv. Energy Mater.* **1**, 174 - 178 (2011).
 23. Koh, T.-W., Cho, H., Yun, C. & Yoo, S. ITO-free down-conversion white organic light-emitting diodes with

structured color conversion layers for enhanced optical efficiency and color rendering. *Org. Electron.* **13**, 3145 - 3153 (2012).

24. Oh, J. Y. *et al.* Down-conversion light outcoupling films using imprinted microlens arrays for white organic light-emitting diodes. *Dye. Pigment.* **136**, 92 - 96 (2016).

