

액상 공정을 이용한 고분자 OLED 조명

조성민 · 이동현

1. 서론

조명 기술은 인류의 역사와 함께 꾸준히 발전해 왔으며 생활과 밀접하게 연관되어 중요한 역할을 담당해 왔다. 그림 1처럼 최초 어둠으로부터 자신의 위험을 지키기 위하여 시작된 원시적인 형태인 불의 사용과 그 후 개발된 안전하고 소형화된 조명원의 개발에 이르기 까지 인류의 삶에 있어 조명의 발전과 사용은 활동 영역과 시간을 넓혀 주고 그로 인한 인류 문명의 발전에 지대한 영향을 주었다고 할 수 있다. 이렇게 인류와 밀접한 관련을 맺고 있는 조명원은 실제로 백열등, 형광등, LED와 같은 신기술들이 개발되면서 그 형태를 변화시켜 왔으며 근래에 들어서는 단순한 기능적 요소뿐만 아니라 사용자 중심의 심미적 요인이나 에너지 효율과 같은 다각적인 요구까지 발생하고 있는 실정이다.

차세대 조명원은 기본적으로 사용자 편의성, 기술적 우월성 그리고 녹색성장 가능성에 관한 부분을 충족시켜야 할 것으로 판단된다. 현재 널리 사용되고 있는 백열등의 경우에는 낮은 효율로 인한 사용 규제 논의가 진행되고 있으며 형광등의 경우에는 백열등 대비 7~8배의 효율을 보여주어 상대적으로 에너지 효율이 높지만 제조 과정에서 발생하는 환경오염 요소와 편의성 등에서 문제점이 지적되고 있다. 결국 이러한 사회적 요구를 만족시킬 수 있는 차세대 조명 기술개발이 필요하며 이는 근본적으로 효율이 높고 친환경적인 소재를 사용하는 조명원의 개발이 필수적인 요소임을 알 수 있다. 본 글에서는 신조명원으로 최근 부각되고 있는 OLED(organic light-emitting diode) 기술에 대한 장점과 그 응용 가능성에 대해 설명하고자 한다.

2. 조명의 요구 조건

조명은 인간의 생활과 밀접하게 관련되어 있기 때문에 실제로 전력 효율, 안정성, 수명, 제조가격 뿐만 아니라 추가적으로 연색지수(CRI, color rendering index), 대면적 발광 균일도, 색유지 능력 등이 중요한 고려 대상이 된다. 여기서 연색지수는 태양광과 비교하여 얼마나 유사한 스펙트럼을 가지느냐를 정량화한 것이라고 할 수 있으며 그 값은 0에서 100까지 나타낼 수 있다(100에 근접할수록 태양광에 가까운 스펙트럼을 가진다고 할 수 있다). 그림 2는 대표적인 광원들의 연색지수를 나타내고 있다. 실제로 백열등의 경우 다른 광원과 비교하여 에너지효율은 낮지만 90 정도의 상대적으로 높은 연색지수를 가지기 때문에 여전히 시장성을 확보하고 있다.

또한 색좌표 기준으로는 그림 3처럼 흑체복사 곡선으로부터 많이 벗어나게 되면 조명의 품질이 떨어지는 광원이 된다. 일반적으로 1931 CIE 좌표상에서 y 좌표가 커지면 효율(efficacy)은 증가하지만 실제로 조명원으로 사용하기 곤란한 광원이 될 수 있다. 또한 색안정성 역시 중요한 요소이며 이는 광원의 수명과 구동전압 특성과 관련된 요소로서 궁극적으로는 색상 변화가 거의 없고 수명이 길며 효율이 뛰어난 광원

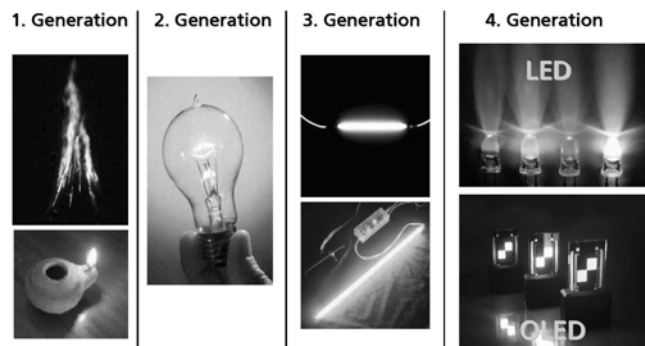


그림 1. 조명 기술의 발전과 미래.



조성민

1981 서울대학교 화학공학과(공학사)
1985 서울대학교 화학공학과(공학석사)
1988 University of Florida(공학박사)
1992 University of Florida(Post-Doc)
1994~ 성균관대학교 화학공학부 교수
현재



이동현

1997 성균관대학교 화학공학과(공학사)
2005 성균관대학교 화학공학과(공학석사)
2007~ 성균관대학교 화학공학과(공학박사)
현재

Solution Processed Polymer OLED Lighting

성균관대학교 화학공학부(Sung Min Cho and Dong Hyun Lee, Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea) e-mail: sungmcho@skku.edu

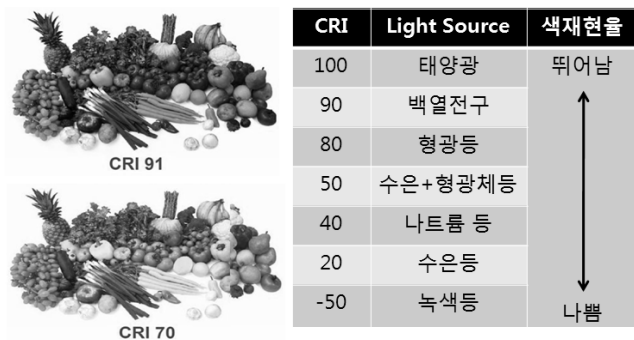


그림 2. 태양광 스펙트럼과 연색지수에 따른 색재현력 차이.

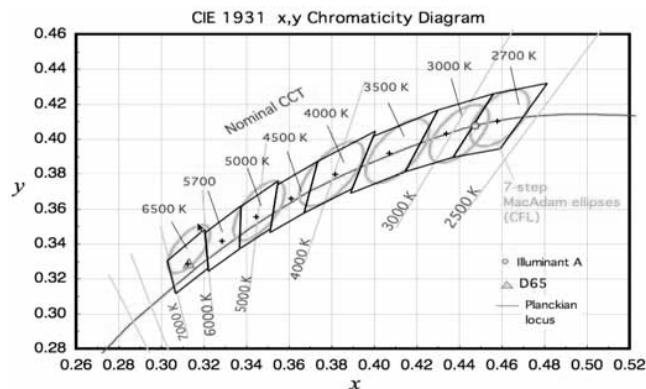


그림 3. 조명용 광원으로 적합한 색온도(CCT) 별 색좌표 범위.

을 개발하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 특히 수명 문제는 이미 OLED 개발 초기부터 언급되고 있는 문제로서 그동안 재료, 소자구조, 봉지 구조 등에서 많은 연구가 진행되면서 일정 부분 해소되었지만 여전히 조명용으로 사용하기 위한 방안으로는 기술개발이 추가적으로 필요한 부분이라고 할 수 있을 것이다.^{1,2}

3. OLED의 원리

3.1 OLED의 기본 작동 원리

가장 기본적인 OLED 소자는 그림 4와 같이 정공이 주입되는 양극과 전자가 주입되는 음극과 그 사이의 유기물층들로 구성된다. 현재 개발되고 있는 일반적인 형태의 OLED는 양극으로 일함수가 4.8 eV 이하인 투명전극 ITO(indium tin oxide)가 사용되고, 음극으로는 일함수가 4.3 eV인 Al(aluminum)이 사용되고 있다.

OLED 양 전극에 전압을 인가하게 되면, 열방사 혹은 터널링 효과에 의해서 양극에서는 정공이, 음극에서는 전자가 각각 유기물의 HOMO(highest occupied molecular orbital)와 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)를 통하여 발광층 내부로 주입된다. 그러나 결정형 물질과는 달리 일반적으로 OLED에서 사용되는 물질들은 분자간 상호 결합력이 낮고 편재화되어 있는(localized state) 캐리어의 호핑(hopping)에 의하여 이동하는 구조이기 때문에 캐리어의 이동이 느린 것이 일반적이다. 이렇게 이동한 전자와 정공은 발광층 내부의 하나의 분자에서 만나게 되며 이때 여기자(exciton)를 형성하게 되는데, 이 여기자가 들뜬상태(excited state)에서 바닥상태(grounded state)로 천이되면서 가지고 있던 에너지를 방출하고 이 에너지가 빛

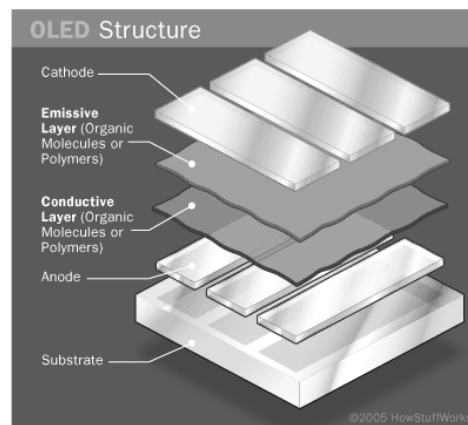


그림 4. OLED 소자의 기본 구조 (2005 HowStuffWorks).

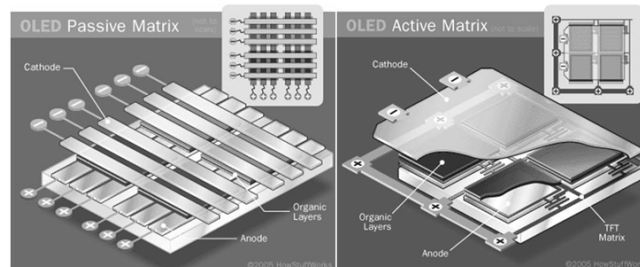


그림 5. PM, AM 방식의 OLED (2005 HowStuffWorks).

	Small Molecule	Polymer
Process	Thermal Vacuum Deposition	Wet Process
Structure	6~7 Layer Substrate ITO HTL EML ETL Cathode	3~4 Layer Substrate ITO HTL EML Cathode
Characteristics	Long Life time High efficiency Long tact time Difficult process for Large Size	Short Lifetime Low efficiency Simple and easy process Suitable for Large Size Application.

그림 6. OLED 재료에 따른 분류.

으로 방출되는 것이 일반적인 OLED의 동작원리에 대한 설명이다.³⁻⁵

3.2 OLED의 분류

OLED는 구동방식, 재료에 따라서 크게 몇 가지로 구분된다. 우선 구동 방식의 차이에 따른 분류를 보면 PM(passive matrix) 방식과 AM(active matrix) 방식으로 분류할 수 있다. PM 방식은 화면 표시 영역에 양극과 음극을 매트릭스 방식으로 교차 배열한 후 라인 전체에 대한 전압을 인가함으로써 양극과 음극이 교차하는 부분(화소)에 빛을 발생하여 화상을 표현하는 방식이며 AM 방식은 소자 후면에 별도의 TFT(thin film transistor)를 구성하여 각각의 픽셀을 직접 구동하는 방식이다. 자세한 구조는 그림 5에 나타내었다.

또한 OLED의 발광층을 형성하는 유기재료의 특성에 따라 그림 6과 그림 7에서 처럼 형광과 인광 그리고 저분자(small molecule)와 고분자(polymer)로 구분할 수 있다. 우선 저분자 물질은 유기발광재료의 특성 파악이 용이하고 합성이 상대적으로 쉽기 때문에 수년간 많은 물질들이 합성되었으며 효율성 측면에서도 비교우위에 있다. 그러나 저분자 물질을 얇은 박막으로 형성하기 위해서 진공열증착(thermal evaporation) 등의 고가 장비가 사용되며 생산성이 떨어진다는 단점을 가지고 있

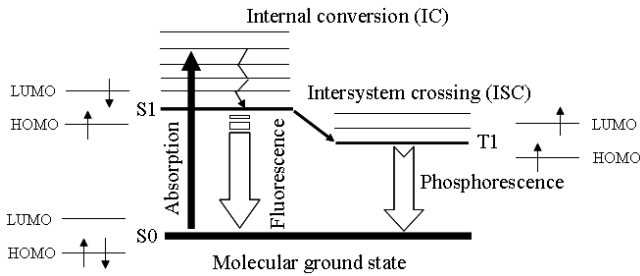


그림 7. 형광발광 및 인광발광의 원리.

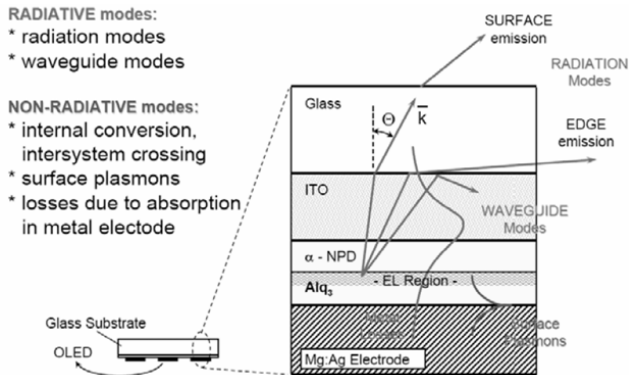


그림 8. 배면발광 OLED에서의 광추출 경로.⁶

다. 반면 PLED(polymer light emitting diode)의 경우 상대적으로 저분자 물질보다 기계적 강도가 우수하고, 유기재료를 적절한 용매에 녹여 박막을 형성하는 방식임으로 스펀코팅, 잉크젯, 스크린, 그라비아 등 인쇄 장비를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이는 궁극적으로 생산성 증대와 원가 절감을 가져올 것이며 산업화 측면에서 유리한 점이라 할 수 있다. 다만 아직 소자의 성능 측면에서 저분자 물질에 비해 우수한 성능을 보이지 못하고 있기 때문에 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 이에 대한 구체적인 내용은 3장에서 설명하였다.

3.2 OLED 효율 향상

실제 OLED는 각각의 전극으로부터 전자와 정공이 주입된 후 실제로 빛이 외부로 방출될 때까지 여러 가지 과정을 거치게 되며 크게 내부양자효율과 외부양자효율로 표현할 수 있다. 내부양자효율은 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며

$$\eta(\text{INT}) = \gamma \times \eta_r \times \phi_f \quad (1)$$

주입된 전자와 정공이 모두 재결합에 사용되고($\gamma=1$) 생성된 엑시톤이 모두 내부에서 빛으로 변환된다면($\eta_r=1$) 두 가지 엑시톤 중에서 형광발광에 의하여 형성되는 내부양자효율은 약 25%가 되며, 인광발광 물질을 사용하게 될 경우 계간전이를 이용하여 단일항 여기자도 모두 발광에 참여할 수 있기 때문에 이론적으로 100%의 효율 달성이 가능하다.

외부양자효율, $\eta(\text{EXT})$ 는 내부양자효율과 빛의 방출효율의 곱으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\eta(\text{EXT}) = \eta(\text{INT}) \times \eta_{\text{ext}} = \gamma \times \eta_r \times \phi_f \times \eta_{\text{ext}} \quad (2)$$

이론적인 외부양자효율을 두 가지 엑시톤에 따라 계산해 보면, 형광

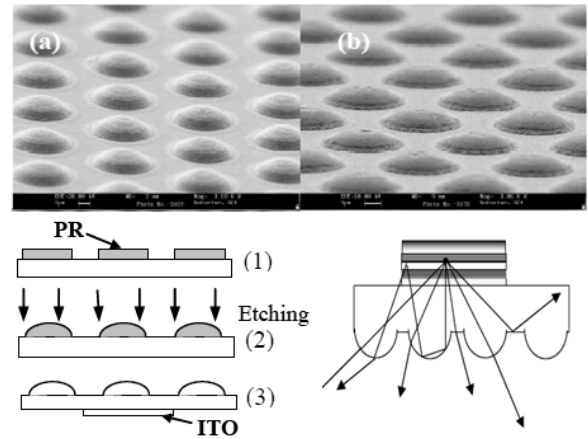


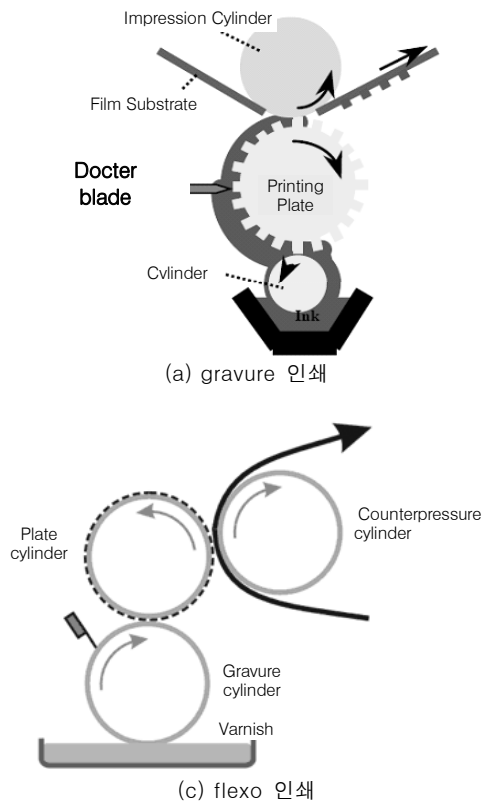
그림 9. 마이크로렌즈 어레이를 이용한 효율 향상.⁷

의 엑시톤인 경우에는 내부양자효율이 25%, 방출효율이 20%이므로, 형광발광을 이용하여 소자를 제작하게 되면 최고 외부양자효율은 5%가 된다. 반면에 인광발광을 사용하여 소자를 구성하게 되면 내부양자효율 100%, 방출효율이 20%이므로 최대 외부양자효율은 20%가 된다. 그러나 실제 OLED 소자에서는 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 다양한 이유로 인하여 소자 내부에서 발생한 빛이 제한적으로 외부로 전달되어지며 이러한 이유 때문에 조명용 OLED와 같이 높은 효율의 달성이 매우 중요한 상황에서 개선되어야 하는 사항으로 인식되고 있다. 현재 관련된 다양한 연구가 진행중이며 그림 9에서 보는 것처럼 마이크로렌즈 어레이나 산란을 유도하는 여러 형태의 박막들을 형성하거나 고굴절률의 기판을 사용하고 기판과 ITO 사이에 산란층을 도입하는 방법 등이 보고되고 있다.⁸

4. 액상 OLED 공정 기술의 개발

저분자 물질을 이용한 기존의 OLED 제조 공정은 유기물을 진공상 태에서 승화시켜 유리 기판에 막을 증착하는 열승화법으로 양질의 소자를 얻을 수 있는 장점이 있으나 고가의 진공 장비를 사용해야 하고 유리기판과 금속마스크와의 사이에서 발생하는 열팽창률 차이로 인한 성막의 얼룩현상, 기판 처짐 문제 등으로 생산성 및 제품 가격 측면에서 약점을 가지고 있다. 결국 상용화를 위해서는 이러한 난점들을 극복할 수 있는 기술개발이 필요하다. 그에 대한 대안으로 고분자 물질을 활용한 액상 공정 기술들이 개발되고 있으며 대표적인 예로 스펀 코팅(spin coating)법이 있다. 이는 가장 간단하게 양질의 박막을 얻을 수 있는 방식으로 알려져 있으나 대면적화가 어렵고 패턴형성이 불가능하며 재료의 낭비가 많다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 액상 공정의 장점을 그대로 유지하면서도 대면적화가 가능하고 직접 패턴링이 가능한 인쇄 공정의 활용이 최근들어 대두되고 있으며 그라비아(gravure)인쇄, 잉크젯(ink-jet)인쇄, 플렉소(flexo)인쇄, 스크린(screen)인쇄 등이 활용되고 있다. 각 인쇄 방식별 기본적 작동원리를 그림 10에 나타내었다.

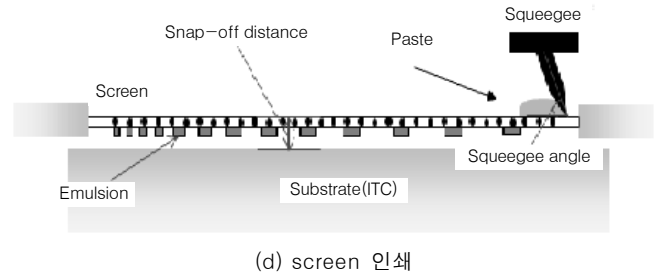
우선, 그라비아 인쇄는 패턴을 실린더에 오목하게 들어가게 만든 뒤 그 부분에 잉크를 채우고 필요 없는 영역의 잉크는 doctor blade를 이용하여 제거한 뒤 기판을 다른 압착 실린더에 끼워 잉크를 인쇄체에 전사하는 방식이다.^{9,10} 그라비아 인쇄는 오목판 인쇄 방식이기에 잉크



(a) gravure 인쇄

(b) inkjet 인쇄

(c) flexo 인쇄



(d) screen 인쇄

그림 10. 다양한 인쇄 기술.

를 누르는 작용을 하지 않아 높은 품질의 제품을 얻을 수 있는 장점이 있다. 잉크젯 인쇄는 잉크 형태로 제조한 물질을 직접 기판 위에 형성하여 패턴을 형성하는 방법으로 공정이 단순하며, 패턴의 정밀도가 우수한 장점이 있으나 속도가 느리고 대면적화할 경우 품질이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 플렉소인쇄는 크게 스택형과 드럼형으로 나눌 수 있으며, 스택형은 인쇄부를 쌓아올린 것으로 가장 일반적인 형식으로 거의 모든 피인쇄물에 적합하나 신축되기 쉬운 필름과 주름이 생기기 쉬운 금속박막 등에는 적합하지 않아 플렉서블 디스플레이에 적용이 용이하지 않다. 드럼형은 큰 지름의 압통 주위에 4~6개의 인쇄부를 배치한 것으로 주름이 생기기 쉬운 필름과 신축되기 쉬운 필름의 인쇄에 적합하며 피인쇄체는 압통에 감긴 상태로 인쇄되므로 각 인쇄부 사이에 신축이 없고 정밀도가 우수하다. 이 인쇄방법은 그라비아 인쇄가 오목한 영역에 잉크를 채워 전사시키는 것에 반하여 볼록한 영역에 잉크를 묻혀 전사시키는 방법이다.¹¹ 스크린 인쇄는 패턴이 형성된 마스크를 활용하는 기술이며 잉크를 스크래퍼를 이용하여 마스크에 묻혀주고 스퀴지로 압력을 가하여 잉크를 메쉬 모양의 패턴에 통과시켜 원하는 형태의 박막을 얻는 방식이다. 이러한 인쇄 방식을 활용한 대표적인 예로 그림 11에서처럼 GE에서는 프로토타입의 roll-to-roll 제품을 선보인 바 있으며 그 외 여러 그룹에서도 인쇄 방식을 활용한 다양한 결과들을 보고하고 있다.

결국 조명원으로서의 기술개발은 상용화 단계에서 발생하는 제조가격의 문제가 중요한 요소로 작용하며 원가 절감이 필수적으로 선행되어야함을 의미한다. 다시말해 제품 성패의 주요 요인으로 제조공정 기술개발을 통하여 단위면적당 패널의 제조 가격은 낮추면서도 뛰어난 성능을 낼 수 있는 제품만이 시장 점령에 성공할 수 있다는 것을 의미



그림 11. Roll-to-roll OLED 조명(GE).

하며 꾸준히 진행되고 있는 공정 기술개발과 물질개발이 서로 시너지 효과를 일으킬 때 차세대 조명원으로서 OLED의 상용화 가능성은 더욱 커질 것으로 판단된다.¹²

5. OLED 조명 시장 전망 및 기술개발 동향

5.1 OLED 시장 전망

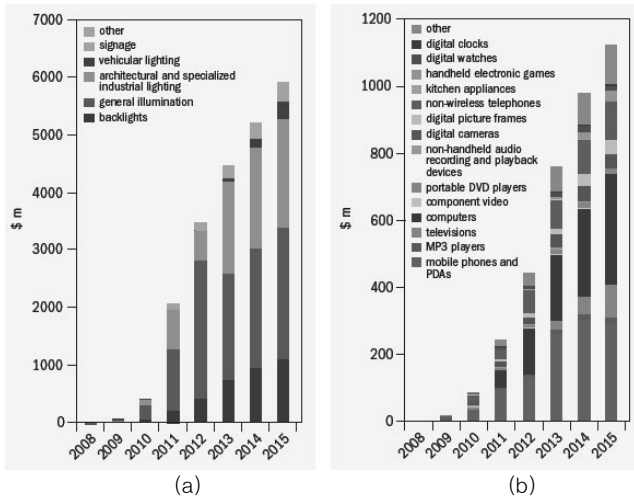


그림 12. OLED 조명시장 규모 예측(NanoMarkets, 2008).

표 1. OLED 조명과 타 기술의 비교(NanoMarkets, 2008)

OLED lamps versus competing technologies				
	Incandescent bulb	Fluorescent tube	Fluorescent screw base	White OLED
Wall plug power (W)*	75	20	20	0.08–0.18
Cost (\$)	0.65	4.75	12.75	n/a
Lifetime (h)	750	10 000	10 000	>20 000
Luminous efficiency (lm/W)	17	60	60–90	>120
Initial cost for 1000 lm-h	0.07	0.04	0.11	n/a
Electricity cost per 1000 lm-h**	0.71	0.20	0.20	n/a
Total cost per 1000 lm-h***	0.78	0.24	0.31	n/a

*0.08 for polymeric OLEDs, 0.18 for “small molecular” devices
 **calculated using lifetime
 ***calculated using \$0.12 per kW-h

조명원으로서 OLED는 최근의 활발한 기술개발로 인하여 본연의 장점들은 그대로 유지하면서 단점으로 지적되었던 문제들까지 극복하고 있다. 이는 결과적으로 급격한 시장 증가를 가져왔고 단순한 조명 형태의 제품뿐만 아니라 백라이트나 자동차 헤드라이트 등 다양한 적용 분야에서 응용되면서 시장 규모를 키우고 있는 상황이다. Nano-market의 2008년 OLED Lighting markets 보고서에 의하면 2008년 기준으로 매년 24억개 이상의 전구가 전세계적으로 소모되고 있으며 이러한 시장은 여전히 개발중인 아시아, 아프리카, 라틴아메리카에 의해 더욱더 증가할 것으로 예상하였다. 이러한 상황에서 순수 조명으로서의 OLED는 대략 2008년 기준 1.1백만 \$에서 2015년 2.3억 \$ 규모로 성장할 것으로 예상하였다. 또한 백라이트로서의 OLED 시장 역시 성장하여 2015년 1.1억 \$ 정도의 규모로 성장할 것이라 예상하였다. 이를 전체적으로 환산해 보면 2008년 2.8백만 \$이던 시장 규모가 2015년 6억 \$까지 고도성장을 지속할 것이라는 예상이다. **그림 12**는 (a) OLED lighting market, (b) OLED backlight market이다.¹³

결국 OLED 조명 역시 시장에서 경쟁력을 가지기 위해서는 기존의 사용 조명과 비교하여 비교적 우위를 가지는 것이 중요하다. 그러나 **표 1**에서 볼 수 있는 것처럼 OLED는 기존의 기술과 비교하여 현저히 낮은 에너지 소비율과 에너지 효율을 가지고 있기 때문에 기술개발을 통해서 가격 문제를 해결할 경우 경쟁적 우위를 갖게 될 것으로 판단된다.¹⁴

표 2. 각 국가별 OLED 조명 기술 프로젝트

	OLLA: Organic Light emitting diodes of ICT & Lighting Applications : Power efficiency: 50 lm/W, Lifetime: 100,000 hour Size: 15 cm × 15 cm, Roll-to-roll process : 4 years from 2004. 10.
	NEDO Project: New Energy and Industrial Technology Development Organization : 7 years from 2004. (4.3 billion Yen)
	DOE Project: Next Generation lighting : Depart of Energy in USA 100 lm/W, 10\$/klm : 1999.–2015.(36.9 million \$(OLED), 37.8 million \$(LED))
	COMBOLED: Combined OLED technology for large area and low cost lightings applications : a European funded research and development project within the 7 th Framework Programme : 3 years from 2008. 1. 1.(7 million euro)
	OLED100. eu funded under 7 th Framework Programme : Power efficiency: 100 lm/W, Lifetime: 100,000 hour Size: 100 cm × 100 cm, Costs: 100 euro/m ² : 3 years from 2008. 9. 1.(12.5 million euro)
	Fast2Light: Cost-effective, high-throughput, roll-to-roll, large area deposition processes for fabricating light-emitting polymer-OLED for lighting applications: : a European funded research and development project within the 7 th Framework Programme : 3 years from 2008. 1. 1.

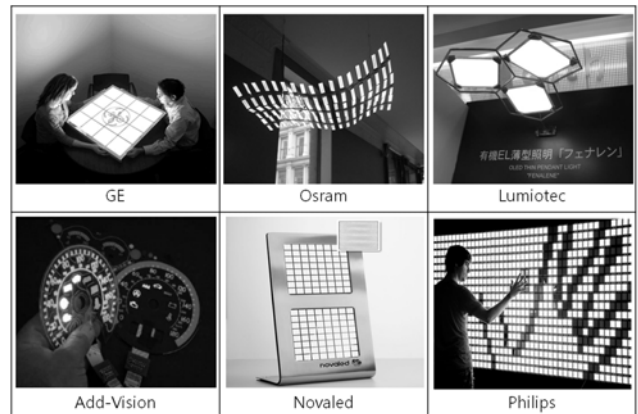


그림 13. OLED 조명 시제품.

5.2 OLED 기술개발 동향

앞서 언급한 것처럼 OLED 조명은 실제로 기존 조명에서 문제로 제기되던 요소들을 해소하고 전혀 새로운 형태의 시장 창출이 가능하기 때문에 유럽, 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 한 적극적인 연구 개발이 진행되고 있다. 대표적으로 EU는 Philips, Siemens, Osram-OS, Novaled, Merck 등 8개국 24개 협력 기관이 참가하는 OLLA(Organic Light Emitting Diodes of ICT & Lighting Applications) 프로젝트를 진행하였으며 이는 고효율, 저가격화를 위한 roll-to-roll 공정 및 소재 기술개발을 위한 연구로서 2008년 8월 종료시 까지 15×15 cm² 면적에 50 lm/W의 효율과 10,000시간의 수명 특성을 갖는 백색 OLED 조명개발을 성공적으로 수행하였다. 이의 후속으로 현재는 OLED100.eu 프로젝트가 2008년 9월부터 진행되고 있으며 1 m × 1 m의 면적으로 100 lm/W의 효율과 100 euro/m²의 가격 경쟁력을 확보하는 OLED 조명개발 연구가 진행되고 있다. 일본은 2004

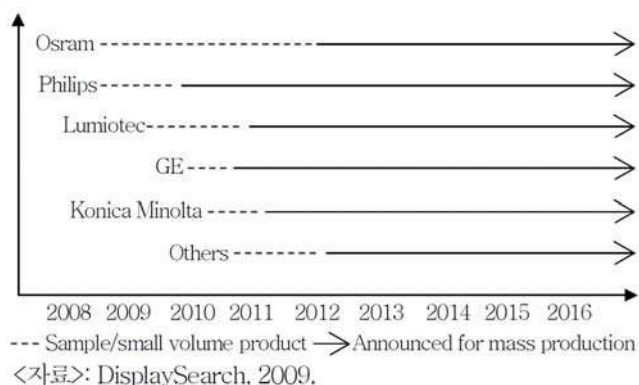


그림 14. 조명 업체의 사업화 전략.

년부터 신에너지 산업기술 종합개발기구(New Energy and Industrial Technology Development Organization: NEDO) 주관으로 21세기 조명 프로젝트를 진행하고 2011년까지 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 크기의 조명, tact time 1분을 목표로 진행하고 있다. 미국은 Depart of Energy의 지원하에 ‘Next Generation Solid State Lighting’ 프로젝트를 통하여 GE, UDC 등이 참여하는 LED와 OLED 조명 관련 프로젝트를 진행하고 있으며 2020년 200 lm/W 의 효율을 목표로 하고 있다. 우리나라는 2006년부터 지식경제부 지원과 생산기술 연구원의 주관으로 2013년 100 lm/W 효율의 백색광원 개발을 목표로 프로젝트가 진행 중에 있다. 2008년까지 1단계 50 lm/W 를 달성하고 지금은 2단계에 접어들어 기업 중심으로 80 lm/W 와 부분조명 상용화를 목표로 진행 중에 있다. 또한, 2009년 지식경제부의 지원과 한국전자통신연구원의 주관으로 OLED광원의 투명 및 주색가변성을 구현하기 위한 새로운 프로젝트를 시작했다. 이 과제에서는 투명광원과 색가변광원을 개발하고, 이를 이용한 감성조명의 개발을 목표로 하고 있다. 한편, 2007년부터 2010년까지 에너지관리공단의 지원으로 저가격 액상 OLED 공정 기술개발에 관한 프로젝트가 성균관대 조성민 교수의 주관아래 진행 중에 있다. 그 외에도 ComboLED, Fast2light, TOPLESS 등의 프로젝트가 진행되고 있으며 이는 OLED 조명 기술 개발의 중요성을 선진국들에서 얼마나 중요하게 인식하고 있는지를 보여주는 사례들이라고 할 수 있을 것이다.

이러한 국가적 프로젝트 이외에도 조명 사업을 주도하고 있는 기업들 역시 차세대 조명원으로서의 OLED 기술개발을 위해 다각적으로 노력하고 있다. 각 업체들은 그간의 기술개발을 기반으로 하여 시장에 다양한 형태의 시제품들을 내어놓고 있으며 차츰 관련 시장이 형성될 것으로 예측되어진다. 그림 13과 14는 각 업체별 시제품과 상용화 전략을 보여주고 있다.

6. 결론

OLED는 분명 기술적으로 차세대 조명원으로 부각되기에 충분한 여러 가지 장점들을 가지고 있다. 그러나 실제 상용화되기 위해서는 여전히 꾸준한 기술개발이 필요하며 이러한 기술개발은 효율 향상, 연색지수의 증가, 안정성, 수명뿐만 아니라 제조 가격의 감소, 생산성의 증가 등에 걸쳐서 폭넓게 진행되어야 한다. 또한 사회적 요구 조건에 맞는 친환경적이고 인간 친화적인 제품 생산이 가능해야 할 것이다. 지금의 기술개발 속도라면 멀지 않은 미래에 실제 상용화된 제품으로서의 OLED 조명을 어렵지 않게 볼 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 이러한 과정에서 조금한 시장 진입 보다는 완성도가 높고 신뢰성이 확보되는 형태로 시장 진입을 시도하는 것이 중요하다고 할 수 있겠다.

참고문헌

1. 이정익, 이종희, 조두희, 이주원, and 추혜용, *The Korean Information Display Society*, **10**, 31 (2009).
2. 문대규, *전자공학회지*, **35**, 49 (2008).
3. 최중찬, 경신수, 김영목, 성만영, and 주병권, *전자부품*, 4월호, 76 (2008).
4. 김재우, 김강희, and 박창걸, *유기EL 디스플레이*, 한국과학기술정보연구원 (2003).
5. 권지인, *유기 EL*, 정보통신산업연구원 (2003).
6. V. Bulovic, V. B. Khalfin, G. Gu, P. E. Burrows, D. Z. Garbuzov, and S. R. Forrest, *Phys. Rev. B*, **58**, 3730 (1998).
7. H. J. Peng, Y. L. Ho, C. F. Qiu, M. Wong, and H. S. Kwok, *SID 04 Digest*, 158 (2004).
8. J. Shinar, *Organic Light-Emitting Devices*, Springer, New York, 2003.
9. M. Lahti, S. Leppävuori, and V. Lantto, *Appl. Surf. Sci.*, **142**, 367 (1999).
10. M. Kittilä, J. Hagberg, E. Jakku, and S. Leppävuori, *IEEE Trans. Electronics Packaging Manufacturing*, **27**, 109 (2004).
11. DFTA & K. H. Meyer, Flexo Printing Technology, 2000.
12. C. May, S. Mogck, and J. Amelung, *Society of Vacuum Coaters*, **52**, 132 (2009).
13. M. Bryner, *OLE Magazine*, 12월호, 19 (2008).
14. Kevin Liao, DisplaySearch, “OLED Market Outlook”, April, 2008.