

차세대 OLED 조명을 위한 융합 소재 및 공정기술

서승우<성균관대학교 박사과정> · 조성민<성균관대학교 교수>

1 서 론

인류의 역사 상 조명 기술은 원시적인 형태인 불의 사용과 그 후 수많은 연구 개발을 거쳐 발전한 현재의 조명원에 이르기까지 인류의 삶에 있어 인류 문명의 발전에 지대한 영향을 주었다. 이처럼 인류와 밀접한 관련이 있는 조명원은 백열등, 형광등, LED와 같은 기술들이 개발되면서 많은 발전을 이루었으며, 기술이 발전함에 따라 기능적인 요소뿐만 아니라 에너지 효율이나 사용자 중심의 심미적 요인과 같은 다각적인 요소들까지도 요구되고 있는 현실이다. 현재 널리 사용되었던 백열등은 낮은 효율의 문제로 사용 규제에 관한 얘기가 많이 나오고 있으며, 형광등의 경우 백열등에 비해 높은 에너지 효율을 보이고 있지만 제조 과정에서 발생하는 환경오염 문제와 수명 및 편이성 등에서 많은 문제점이 지적되고 있는 현실이다. 현재 많은 학자 및 연구자들은 차세대 조명 기술 개발에 대한 갖가지 사회적 요구들을 충족시키기 위한 많은 연구를 진행하고 있다. 현재까지의 연구 결과로 미루어 본 결과 친환경적인 소재를 사용하며 에너지 효율이 우수한 조명원의 개발이 필수적이라는 판단된다. 본 고에서는 최근 차세대 조명 기술로 각광을 받고 있는 OLED(organic light-emitting diode) 기술에

대한 장점과 융합 소재 및 제조 공법에 대해 설명하고자 한다.

2. 차세대 OLED 조명 기술

OLED 조명은 점이나 선광원 뿐만 아니라 넓은 면적의 면광원의 구현이 가능하며, 두께 수 밀리미터의 초슬림으로 구현이 가능하다. 또한 유기발광소자(OLED)의 최대 장점으로 꼽히는 유연성으로 인해 다양한 디자인의 구현이 가능하며, 눈의 피로 및 눈부심 현상도 거의 없어 시각적으로 편안한 빛을 요구하는 실내조명에 적합하다. 또한 환경적인 문제점으로 꼽히고 있는 중금속을 사용하지 않고 친환경 유기소재를 이용한 양극구조의 면광원 조명 구조를 가지기 때문에 차세대 환경 친화적인 조명으로 부각되고 있으며, 기존의 조명들에 비해 우수한 고효율 특성을 가지고 있어 에너지 절감효과가 우수한 차세대 조명으로 주목을 받고 있다. 유기발광소자는 유기물의 대면적 증착이 가능하기 때문에 이를 이용하여 조명으로 활용하기 위한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 현재는 높은 광 효율을 가지고 있는 LED 조명이 조명 시장에서 활용도가 넓지만, 유기발광소자를 이용한 조명에 대해서도 LED 조명에

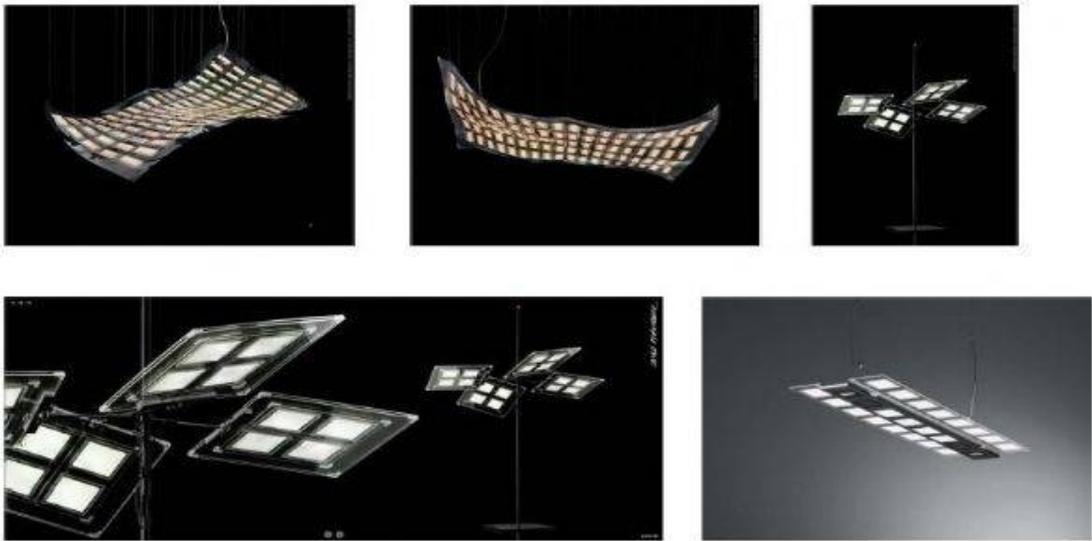


그림 1. 차세대 OLED 조명

근접하는 수준으로 광효율을 높이기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 또한 우수한 발광성 유기물질이 속속 개발되고, 소자구조의 최적화에 관한 연구가 활발히 진행되면서 효율은 지속적으로 향상되어, 일반 조명으로서 활용이 가능한 수준으로 높아지고 있다. 유기발광소자는 뛰어난 광효율 뿐만 아니라 높은 CRI(color rendering index)의 확보가 가능하기 때문에 조명에 적합하고, 유기물의 플렉시블한 특성을 적극 활용하여 플렉시블한 조명의 구현이 가능해지면 다양한 디자인이나 새로운 부가적인 기능으로 활용도는 더욱 확대될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 차세대 플렉시블 OLED 조명 투명전극

현재 차세대 조명 기술로 각광을 받고 있는 OLED 조명은 친환경적, 대면적 및 면광원 구현, 초박형, 유연성, 고효율 등 많은 장점들을 가지고 있어 세계적으로 주목받고 있는 기술이며, 이에 대

한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. OLED 조명 기술은 조명을 위한 소자로서 다양한 장점들을 가지고 있지만, 특히 유기물의 플렉시블한 특성을 활용하여 플렉시블한 조명이 가능해진다면 공간 활용이나 디자인과 같은 분야에서 조명으로서의 활용도는 더욱 확대될 수 있을 것으로 판단된다. 현재 주로 활용되고 있는 유기발광소자의 기관은 투명 전극인 인듐주석산화물(Indium Tin Oxide, ITO)이 코팅된 유리기관이며 ITO와 같은 투명전극이 양극, 그리고 알루미늄 금속이 음극으로 사용되고 있다. 플렉시블 유기광원을 위한 플렉시블 투명전극은 유연성은 물론 ITO 수준의 전도성 및 광학적 투명도 등 이러한 조건들을 충족시켜야 한다. 그러므로 플렉시블한 기관으로서 활용될 수 있는 소재는 유연성을 가지는 플라스틱 기관 및 얇은 금속판이며, 그 상부에 사용될 수 있는 투명전극은 우수한 전도성을 가지는 금속 격자(Metal-grid)와 그래핀(graphene)등을 들 수 있다. 이들은 현재 ITO의 소재인 인듐의 제한된 매장량과 막대한 산업적 수요

에 따른 가격의 상승으로 인한 대안 기술로서 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 유연성을 가지는 플라스틱 기판 기반의 ITO 투명 전극의 경우 유리 기판 상의 ITO와는 달리 기판표면 거칠기 및 증착 온도 등의 제약으로 인해 최저 면 저항이 약 25ohm/square 정도이기 때문에 대면적의 유기발광소자의 기판으로 적용되기는 어렵다. 이를 대체할 투명 전극 기술이 다각적으로 연구되고 있지만, 본 고에서는 금속 격자를 이용한 투명전극과 은 나노선을 이용한 투명전극, 그래핀 투명전극에 관한 기술에 대해 논의하고자 한다.

3.1 금속 격자를 이용한 투명전극 (Metal grid transparent electrode)

금속 격자를 이용한 투명전극은 PET와 같은 플라스틱 기판 상에 전도성이 좋은 금속 박막을 격자무늬로 증착하여 제작하는 기술이다. 육각형의 구조를 가진 알루미늄 금속(두께 150nm)을 격자모양으로 형성하여 플렉시블 투명전극을 구성한 결과 육각형 구조의 중심으로부터의 변심거리 $h(100\sim 250\mu\text{m})$ 와 금속선의 폭 $w(20\sim 50\mu\text{m})$ 의 비인 h/w 의 값에 따라 면 저항은 $6\sim 45\text{ohm/square}$, 투명도는 550nm 파장에서 55~90%까지 변화가 될 수 있다. 일반적으로 투명도 T 와 면 저항 R_s 는 아래와 같은 관계식을 가진다.

$$T(\lambda) = (1 + \frac{188.5}{R_s} \frac{\sigma_{Op}(\lambda)}{\sigma_{DC}})^{-2}$$

위 식에서 $\sigma_{Op}(\lambda)$ 는 광전도도를 의미하며, σ_{DC} 는 전기전도도를 의미한다. 일반적으로 σ_{DC}/σ_{Op} 값은 투명전극의 특성을 값으로 면 저항이 10ohm/square, 투명도가 90%인 투명전극의 경우에 σ_{DC}/σ_{Op} 값은 350이다. 일반적으로 사용되는 플라스틱 기판 상에 ITO의 경우 σ_{DC}/σ_{Op} 값은 150보다 낮으며 알루미늄 격자의 경우 σ_{DC}/σ_{Op} 값은 100, Ag 격자의 σ_{DC}/σ_{Op} 값은 165정도이다. 아래의 그림과 같은 금속격자 위에 전도성 고분자와 유기광원을 형성하여 소자를 구동하면 그림 2에 보인 바와 같은 균일한 발광을 얻을 수 있다. 그림 2는 금속격자를 이용한 투명전극 상에 제작한 유기발광소자이다.

3.2 그래핀 투명전극 (Graphene transparent electrode)

그래핀은 이미 오래전부터 잘 알려져 있던 흑연(graphite)에서 한 층을 떼어낸 형태이며, 탄소 원자들이 완전히 한 겹으로 배치된 육각형 모양의 2차원 구조를 이루고 있다. 또한 단층 탄소 구조체로 완벽한 디랙 페르미온(Dirac Fermion)의 특성을 보여 일반적인 3차원 구조와는 다른 물리적 특성을 가지고 있다. 그래핀은 Novoselov와 Geim이 흑연으로부터 그래핀을 분리하여 2차원적인 탄소구조를 얻어

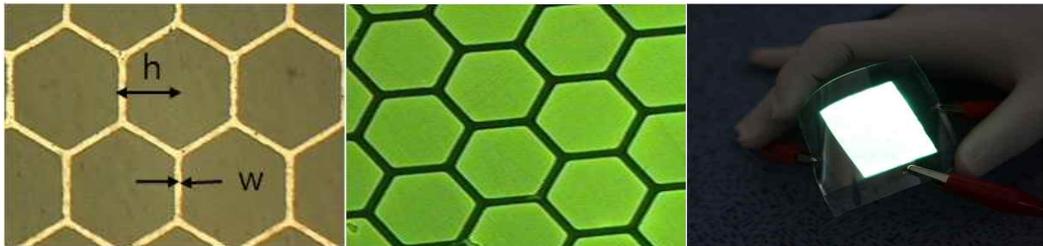


그림 2. 금속격자 투명전극의 구조 및 이를 이용한 유기광원

냄에 따라 노벨상을 수상한 이후 수많은 연구가 진행되고 있다. 그래핀은 ITO와 비교해서 높은 전하 이동도와 투과율을 가지고 있어 투명도체로써 활용 가능성이 높은 재료인 것은 분명하며 이론적으로는 초박형 및 우수한 유연성, 투명도, 전도성 등 많은 장점들이 보고되었지만 아직까지 실험적으로는 ITO 투명전극에 버금가는 성능을 얻고 있지 않다. 또한 그래핀 투명전극을 이용하여 유기발광소자를 제작하였을 경우 ITO 투명 전극 기반의 유기발광소자와 유사한 결과를 얻을 수 있다는 것도 보고되었다. 그래핀 투명전극의 특성은 계속적으로 발전하고 개선되면서 현재 30인치 크기의 플렉시블 그래핀 투명전극이 roll-to-roll 공정으로 제작될 수 있다. 또한 그래핀을 여러층을 형성하게 되면 전기적인 특성이 우수해 진다는 점도 보고되었다. 그래핀의 제작은 Cu 등의 기판 상에 Cu의 촉매작용으로 인해 약 1,000°C의 온도에서 성장되며 기판인 Cu를 습식 식각하면서 플라스틱 기판 상으로 전이하여 플렉시블한 그래핀 투명전극을 형성시킬 수 있다. 그래핀의 일함수는 약 4.6eV로서 ITO의 일함수 4.8eV와 유사하기 때문에 다양한 연구를 통해 유기발광소자의 투명전극으로서 ITO를 대체할 수 있는 대체 물질로 부각되고 있다. 그래핀 투명전극은 현재까지 보고된 플렉시블 투명전극 중에서 안정성 및 광학적, 전기적 특성이 가장 우수하고 유연성이 뛰어난 투명전극이라고 할 수 있다. 향후 대면적 전이, 고온의 성장온도 등 공정상의 문제점들에 대한 개선방안이 나오고 해결된다면 궁극적으로 플렉시블 유기발광소자를 위한 플렉시블 투명전극으로서 활용이 기대된다. 또한 합성된 대면적 그래핀 투명전극은 ITO와 견줄만한 투명도와 전도도를 가지면서 휘거나 당겼을 때 그 특성의 변화가 통상적인 전극의 작동 범위를 벗어나지 않는 것으로 밝혀졌다. 이러한 새로운 신축성 투명전극의 개발은 차세대 플렉시블 OLED 조명 분야에 중요한 전환점을 제시할 것으로 기대된다.

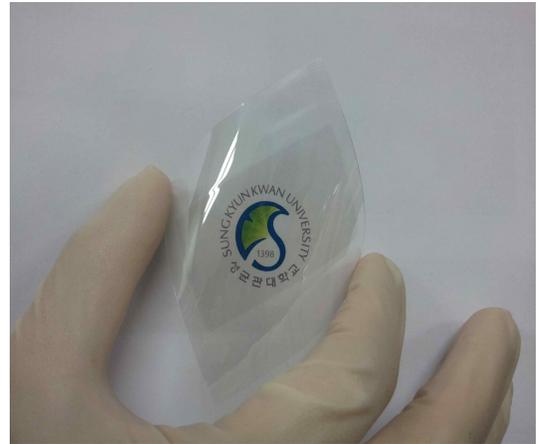


그림 3. 그래핀 투명전극

(Graphene transparent electrode)

3.3 은 나노선 투명전극

(Nanowire transparent electrode)

위의 두 가지 소재 이외에도, 수십 나노미터 사이의 금속 선을 전극으로 이용하는 방법 또한 활발하게 연구되고 있다. 이는 위에서 설명했던 금속 격자와 비슷한 맥락으로, 전도성 좋은 금속 선을 기판상에 증착, 우수한 투명성과 우수한 전도성 및 일함수를 가지는 전극을 제작한다는 맥락이다. 다만 이 방법은 그래핀 투명전극과는 비교해서 덜 주목을 받고 있는데, 그 이유는 나노선이 1차원 물질(선 모양을 가지는 물질들)이기 때문에 2차원 물질(면 모양을 가지는 물질들)과 비교하여서는 균일도나 표면 거칠기 등의 문제점이 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 이를 이용한 OLED 제작에 성공한 곳이 있으며, 대표적인 사례로 캄브리오스(Cambrios)사에서 제작한 은 나노선(Ag nanowire) 등이 있겠다. 은 나노선 잉크를 포함한 캄브리오스의 필름은 투과율 91%에 면저항은 250ohm/square 수준으로 일반적인 ITO 필름의 경우보다 높은 투과율을 보여 주고 있으며, 투과율을 80%로 낮출 경우에는 0.1ohm/square 정도의 낮은 면저항을 얻을 수 있다.

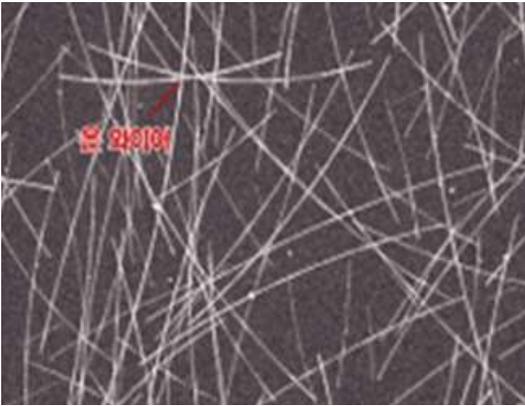


그림 4. 은 나노선 잉크를 도포한 투명 전극

4. 차세대 플렉시블 OLED 조명 공정기술

유기발광소자의 경우에는 소자를 만들 때 사용되는 물질에 따라 저분자 유기발광물질과 고분자 유기발광물질로 나눌 수 있다. 고분자 유기발광물질의 경우 용제를 사용하여 액상으로 박막을 형성하기 때문에 다양한 액상인쇄 공정이 가능하다. 그러나 용제를 사용하기 때문에 다층 구조의 유기소자를 형성하기 어렵다는 단점이 있고 고분자 물질의 효율 및 수명이 저분자 물질의 성능에 미치지 못하기 때문에 이에 대한 많은 연구 개발이 진행되고 있다. 또한 저분자 물질은 이미 능동형 유기발광소자가 상용화 되면서 효율이나 수명 등의 기술적인 문제는 대부분 해결이 된 상태이기 때문에 소자의 제조 공정기술에 초점이 맞추어져 있다.

4.1 Roll-to-roll (R2R) 공정기술

플렉시블 OLED 조명 제조시 roll-to-roll 공정을 기반으로 한 대면적, 저가의 기술이 실현되면 실내용 광고용, 각종 장식용 조명 등 새로운 수요를 창출할 수 있을 것으로 전망된다. Roll-to-roll 공정기술은 플렉시블 OLED 조명의 대량 저가 생산의 기반이 되는 기술로 현재 수준으로는 고속 인쇄가 가능하다는

장점이 있으나, 소자 제작공정을 위한 장비 연구가 아직 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 그림에 보인 바와 같은 roll-to-roll 증착장비 및 공정 기술이 플렉시블 OLED 조명 제조 기술로 개발이 되면 고속으로 플렉시블 OLED 조명의 구현이 가능할 것으로 판단되며, 이를 통해 플렉시블 OLED 조명의 저가화가 실현될 수 있을 것으로 기대된다.

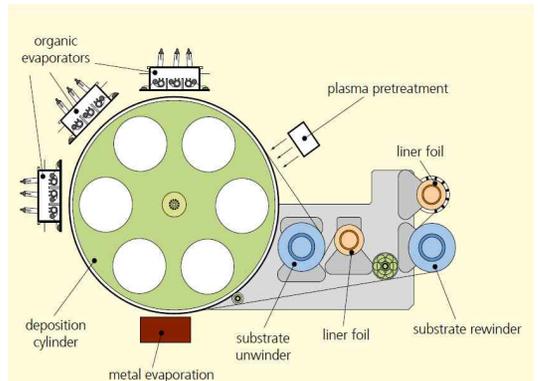
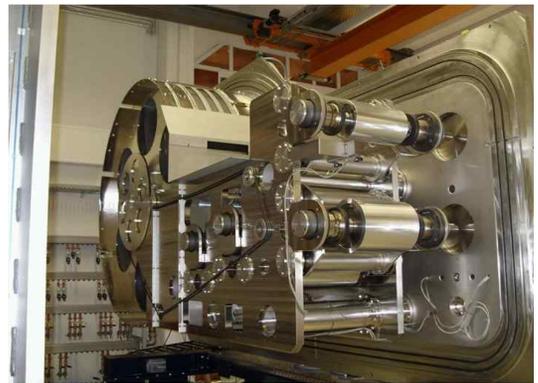


그림 5. 플렉시블 유기광원용 R2R 증착장비

4.2 Linear scanning 공정기술

한편 linear scanning 공정기술에 대해서는 저분자 유기발광소자를 만드는 진공 공정에도 이미 적용되고 있는 기술로, 이는 기판이 지나가면서 기체 혹은 용액 source를 코팅시키거나 증착하는 일련의 소자 제작 과정이라고 할 수 있다. Linear scanning 공정 기술은 R2R 공정과 더불어 OLED를 양산할 만한 수

준에 올라 있는 기술이기도 하고 현재 이러한 방법으로 실제 OLED를 양산하는 곳도 있는 것으로 알려져 있다. 다만 이와 같은 공정은 기판의 크기가 커짐에 따라서 공정 비용 또한 기하급수적으로 증가한다는 치명적인 단점이 있고, 공정 조건 설정 시에도 많은 시간이 필요하다는 난점 등 여러 가지 보완해야 하는 점들이 문제점으로 지적되고 있다.

5. 결 론

본 고에서는 플렉시블 유기발광소자의 장점들 및 이에 대한 융합 소재 및 공정 기술에 대해서 간단하게 논하였다. 유기발광소자를 조명으로 응용하기 위해서 앞으로 이루어져야 하는 기술 및 소재에 대해서는 투명전극 및 이에 대한 대량 생산 공정 등을 들 수 있고, 주목받는 투명전극에는 금속 격자, 그래핀, 그리고 나노선 등이 있을 수 있으며, 앞으로의 보완을 통해 실제 제품에도 응용될 수 있을 것으로 전망되고 있다. 또한 유기발광소자를 양산하기 위한 연속 공정에는 R2R 공정 및 linear scanning 공정 등이 있는데, 이들 기술들을 통한 소자의 양산이 가능해지면 유기발광소자의 가격 경쟁력 및 각종 응용력 등을 높여서 궁극적으로는 디스플레이 및 조명에 대한 시장을 확대해 나갈 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] 추해용, 이정익, 유병근, 전자통신동향분석 제24권 제6호 2009년 12월, pp 22~31.
- [2] 황지선, 박상희, 조경익, 전자통신동향분석 제25권 제5호 2010년 10월, pp 20~32.
- [3] 유병근, 이정익, 추해용, 전자통신동향분석 제26권 제6호 2011년 12월, pp 189~198.
- [4] 김태원, 허기석, 박종운, 이종호, 전기전자재료 제23권 제4호 (2010년 4월), pp 3~12.
- [5] 진병두, 고분자과학과 기술 제 18권 6호 2007년 12월, pp 554~555.
- [6] 송풍근, 한국광학회 2008년도 하계학술발표회 논문집 (2008. 7. 10~11).

◇ 저 자 소개 ◇



서승우

1983년 2월 25일생. 2008년 2월 공주대학교 화학공학과 졸업. 2010년 2월 성균관대학교 화학공학과 졸업(석사). 2012년 9월 성균관대학교 화학공학과 박사수료.

주요관심분야 : 유기발광소자, 유기조명



조성민

1961년 10월 28일생. 1985년 2월 서울대학교 화학공학과 졸업. 1987년 2월 서울대학교 화학공학과 졸업(석사). 1992년 12월 미국 플로리다주립대학교 졸업(박사). 1994년 3월~현재 성균관대학교 화학공학부 교수.

주요관심분야 : 유기발광소자, 유기조명