

# 유기전기발광소자 및 디스플레이 (Organic Electroluminescent Devices and Displays - OLED)

김 영 규

고등기술연구원 네스센터

ykim@iae.re.kr

## 1. 서론

고체상태의 유기재료를 이용한 최초의 유기전기발광소자는 1963년 Pope와 공동 연구자들이 수십 마이크로미터 이상의 두께를 가진 안쓰라센(Anthracene) 단결정을 이용하여 제작한 것을 발표하였으며, 이어서 1965년에 Helfrich와 Schneider 연구진과 Mehl과 Bucher 연구진이 각각 발표하였다<sup>1-4)</sup>. 그러나, 이들의 연구에서 제작된 소자는 전하 주입을 위해 액체 전해질 전극이 사용되었지만 50V~2000V 정도의 높은 전압을 인가하여야만 발광이 되었으며 수명 또한 수분 이하로 짧아서 실용화와는 상당한 거리가 있었다.

1969년 Dresner는 전하 주입을 용이하게 하기 위해서 고체 전해질을 처음 도입하여 전체가 고체로 이루어진 소자가 탄생되었다<sup>5)</sup>. 1973년 Vityuk와 Mikho는 기존의 단결정 뿐만 아니라 진공 증착된 박막을 이용하여 소자를 제작하여 대면적 디스플레이에 대한 가능성을 보였다<sup>6)</sup>. 그러나 여전히 효율 및 휘도 등의 주요 특성은 실용화 기준에 못 미친 상태였으며 이를 극복하기 위해서 유기물에 의한 전하 주입 및 수송에 대한 지속적인 연구가 진행되었다<sup>7-14)</sup>.

1980년대에 접어들면서 유기전기발광소자의 성능에 획기적인 진보가 있었다. 1980년 초에 Eastman Kodak의 Tang 연구진은 수년 동안 진행해오던 유기물질의 전하 생성, 수송, 그리고 태양전지 연구를 접목하여 유기전기발광소자에 유기 단분자 정공주입층(Hole Injection Layer)을 도입하여 구동전압을 20V 이하로 낮추었으며<sup>15)</sup>, 이어서 1980년 후반에 구동전압 및 휘도 등의 특성이 실용화 수준에 이르는 결과를 발표하였다<sup>16-19)</sup>. 이때 양자효율은 1%(photon/electron), 휘도는 1,000cd/m<sup>2</sup>, 그리고 구동전압은 10V 내외로 기존의 성능에 비해서 충격적인 결과였다.

1990년 영국의 Cambridge 대학의 Burroughes 등은 기존의 고분자전계효과트랜지스터(Polymer Field Effect Transistor)를 연구하던 중에 우연히 공액 고분자인 Poly(*p*-phenylenevinylene) (PPV)에 전기장을 인가할 때 녹색 빛이 나오는 것을 발견하였

다<sup>20)</sup>. 그러나, PPV는 용해성 선구체 고분자 박막을 열 제거 반응(Thermal Elimination Reaction)을 통해 불용성 고분자로 변환되므로 선구체 고분자가 불안정한 근본적인 단점 때문에 상용화에 문제가 있었다. 다음해인 1991년 Braun과 Heeger는 이러한 단점을 해결하기 위해서 PPV 결가지에 용해성 유기사슬을 붙여서 전체 고분자가 용해될 수 있게 하여 간단히 한번의 스핀 코팅으로 고분자 유기전기발광소자를 제작하여 그 결과를 발표하였다<sup>21)</sup>. 이를 계기로 유기 단분자 뿐만 아니라 고분자를 이용한 유기전기발광소자에 대한 연구가 급속히 확산되기 시작하였다<sup>22-29)</sup>.

더디어 1996년에 일본의 동북 파이오니어전자에서 유기 단분자를 진공증착하여 녹색 유기전기발광 디스플레이를 최초로 상품화 하였으며, 이어서 1998년에 다중색 유기전기발광 디스플레이를 상품화 하였다<sup>30-31)</sup>. 이와 더불어 그동안 연구된 결과를 바탕으로 유기전기발광 재료 및 디스플레이에 관련된 많은 벤처기업들이 설립되었다<sup>32-38)</sup>.

## 2. 유기전기발광소자의 기본 구조 및 발광 원리

유기전기발광소자는 일반적으로 그림 1에 나타난 것처럼 양

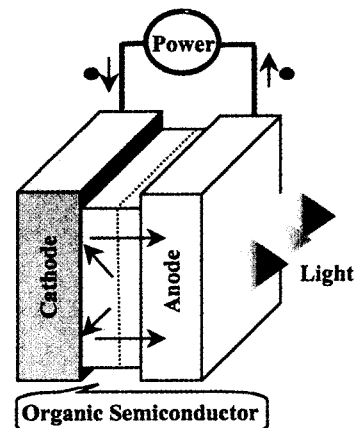


그림 1. 유기전기발광소자의 일반적인 구조.

극과 음극 사이에 유기물로 구성된 반도체 박막이 삽입된 구조를 가진다. 이때 유기 반도체 박막은 소자의 특성에 따라서 단일층 또는 다중층으로 구성될 수 있으나 상용화 수준의 성능을 내기 위해서는 기본적으로 이중층 이상의 구조가 바람직하다. 이렇게 구성된 소자의 양극과 음극에 전원을 연결하여 전압을 인가하면 사용한 유기 반도체 박막의 종류 및 두께에 따라서 조금씩 차이는 있지만 약 1V에서 7V 사이의 전압에서 소자가 빛을 내기 시작하며 소자가 파괴되는 전압은 약 30V 내외이다.

현재까지 가장 많이 알려져 있는 무기물 다이오드는 일반적으로 도핑된 p형 반도체와 n형 반도체의 p-n 접합에 의해서 발광되며 발광 영역은 p-n 접합 부분에 한정되나<sup>39)</sup>, 유기전기발광소자는 재결합형 무기전기발광소자<sup>40)</sup>와 유사하게 양극에서 주입된 정공(hole)과 음극에서 주입된 전자(electron)가 유기 반도체 박막 내부에서 여기자(exciton)를 형성한 후 바닥상태(ground state)로 떨어지면서 빛을 방출하게 된다<sup>41)</sup>. 그림 2에 대표적인 이중층 유기전기발광소자의 에너지 밴드 구조(Energy Band Structure)를 나타내었다. 양극인 ITO 전극에서 정공수송층(HTL)의 가전대(Valence Band 또는 HOMO)로 주입된 정공은 유기물 사이를 Hopping에 의해서 이동하여 정공수송층과 발광층(EML) 계면을 통과한 후 발광층(EML)으로 진행하고, 동시에 음극인 Li:Al 합금 전극에서 발광층의 전도대(Conduction Band 또는 LUMO)로 전자가 주입되어 유기 분자 사이를 역시 Hopping에 의해서 이동하여 발광층에서 정공과 만나게 된다. 이렇게 만나는 것을 재결합(Recombination)이라고 하며 재결합된 전자-정공 쌍은 정전기적 인력에 의하여 재배열되어 여기자가 된다. 이 여기자는 유기 박막의 특성 및 인가된 전기장의 세기에 따라서 약간씩 차이는 있으나 대부분의 경우 약 수십 나노미터(nanometer) 정도 확산(Exciton

Diffusion)하기 전 또는 후에 빛과 열에너지를 방출하면서 바닥상태로 전이하게 된다.

### 3. 유기전기발광소자의 대표적 구조 및 재료

유기전기발광소자는 넓은 관점에서는 모두 동일하지만 사용되는 유기재료의 종류에 따라서 단분자 유기전기발광소자, 고분자 유기전기발광소자, 그리고 혼성 유기전기발광소자로 구분할 수 있다. 또한 기능에 따라서 투명한 유기전기발광소자, 적층형 유기전기발광소자, 유연한 유기전기발광소자, 미세공동형 유기전기발광소자, 그리고 역구조 유기전기발광소자 등의 다양한 형태가 가능하다.

#### 3.1. 단분자 유기전기발광소자(Small Molecule OLED)

유기전기발광소자 중에서 유기 단분자를 이용한 소자가 가장 먼저 연구되었으며 현재 상용화된 유일한 구조이다. 그림 3에 최근 가장 우수한 특성을 나타내는 유기박막 4층 구조의 유기전기발광소자를 나타내었다. 서론에서 설명한 것처럼 기본적으로는 정공수송층(HTL)과 발광층(EML)의 2층만으로 기능이 되나 켜짐 전압, 휘도, 그리고 효율을 최적화 시키기 위해서는 정공주입층(HIL), 정공수송층(HTL), 발광층(EML), 그리고 전자(주입)전달층(ETL)의 구조가 바람직하다. 유기 단분자의 특성상 각 층은 고진공( $10^{-6} \sim 10^{-7}$  Torr) 상태에서 저항 가열식 열증착(Thermal Evaporation)을 통하여 형성되며 가능하면 한 층을 증착한 후 진공을 해제하지 않은 상태에서 다음 층을 증착 하여야만 재현성 있는 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 안정한 소자를 얻게 된다. 그러나 고진공 상태에서 여러가지 유기물을 동일한 진공챔버(Vacuum Chamber)에서 사용할 경우 상호 오염(Cross Contamination)되는 현상에 의하여 사용

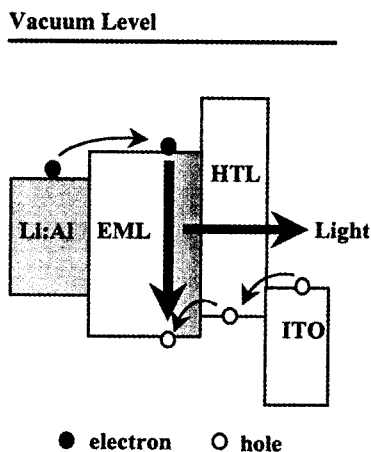


그림 2. 에너지띠 구조에 의한 발광 과정. 여기서 Li:Al은 Cathode로 ITO는 Anode로 사용됨. EML은 발광층 그리고 HTL은 정공수송층임.

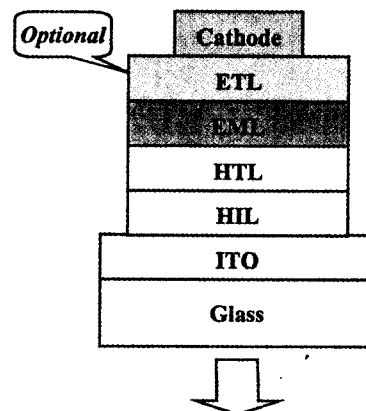


그림 3. 유기 단분자로 구성된 유기전기발광소자의 대표적 구조.

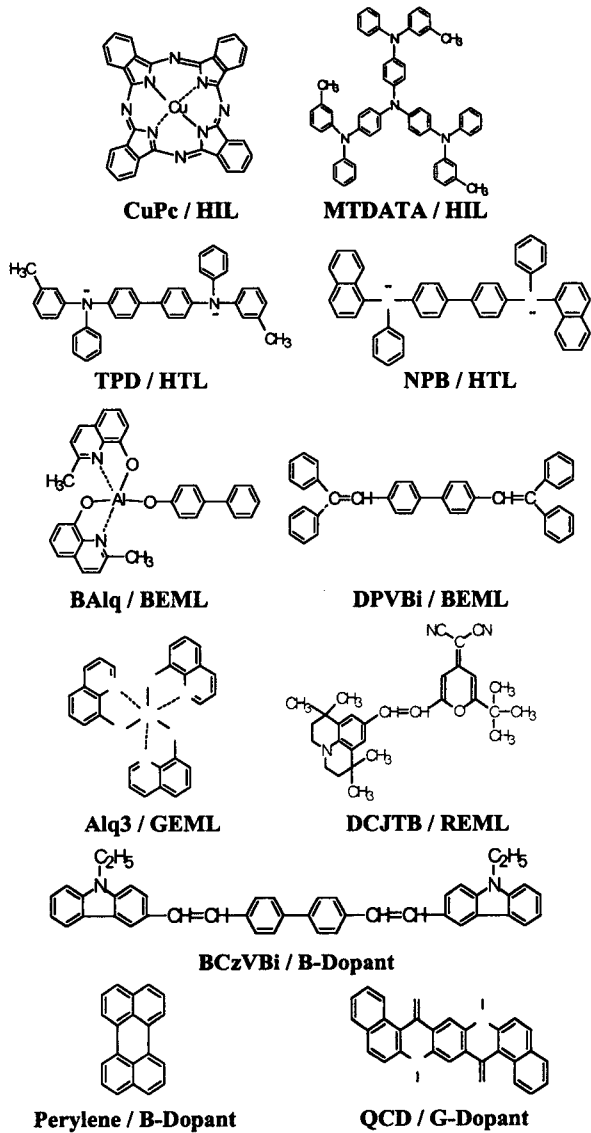


그림 4. 유기전기발광소자용 유기 단분자 그늘 재료.

빈도수가 증가할수록 소자특성이 변하는 경우가 일반적이다. 따라서 한 개의 진공 챔버로 한 종류의 유기물을 사용하는 것이 바람직하며 각 챔버 사이에 버퍼 챔버(Buffer Chamber)를 장착하여 공기 중에 노출 시키지 않고 진공상태 그대로 이송시키는 것이 가장 이상적이다.

그림 4에 흔히 사용되는 유기 단분자의 구조를 나타내었다. 정공주입층으로는 CuPc가 가장 안정하기 때문에 널리 사용되나 청색 영역에서의 흡수가 많기 때문에 풀칼라(Full Color) 디스플레이 제작의 경우 문제점이 되고 있다. 따라서 청색 영역에서의 흡수가 없는 MTDATA와 같은 아민류가 최근 사용되고 있다. 정공수송층으로 초기에는 TPD가 흔히 사용되었으나 60°C 이상에서 불안정하기 때문에 95°C 까지 안정한 NPB 또는 좀 더 많은 방향족기가 치환된 아민류를 사용하고 있다. 청색 발

광층으로는 여러 종류의 화합물이 제안되었으나 초기 상태의 발광 안정성이 낮아서 현재는 BAQ, DPVBI, Spiro-DPVBi, 그리고 LiPBO 등이 집중적으로 연구되고 있으나 LiPBO를 제외한 대부분의 화합물들은 순수한 청색이 아닌 하늘색(Light Blue)이기 때문에 여전히 풀칼라화 디스플레이에 부적합하다 [42,43]. 그리고 청색 발광의 효율을 높이기 위해서 Perylene 및 BCzVBI(DSA 아민류) 등을 소량 도핑(Doping)하여 사용한다. 녹색 발광층으로는 Alq3가 독보적으로 사용되고 있으며 역시 효율을 높이기 위해서 Quinacridone류와 같은 양자효율이 높은 물질을 도핑하여 사용한다. 적색 발광층의 경우 밴드갭(Band Gap)이 작은 적색 발광의 특성상 다량의 녹색 발광 물질에 적색 발광 물질을 소량 도핑하여 사용한다. DCJTb와 같은 DCM 류의 물질이 현재까지 알려진 적색 발광 물질 중에서 가장 높은 휘도를 나타내고 색순도 또한 NTSC기준에 근접하기 때문에 많이 사용되고 있으나 여전히 분자 구조상의 문제점 때문에 장수명화에 걸림돌이 되고 있다.

양극전극은 일반적으로 ITO(Indium Tin Oxide), IZO(Indium Zinc Oxide) 등의 금속산화복합박막을 사용하는데 그 이유는 이온화 포텐셜(Ionization Potential)이 커서 정공주입을 용이하게 하며 무엇보다도 투명하기 때문이다. 그 중에서 ITO를 주로 사용하며 일정한 모양으로 식각(Etching)한 후 습식 세척(Wet Cleaning)과 건식 세척인 UV-Ozone을 처리하여 사용한다. 음극전극은 일 함수(Work Function)가 낮은 세슘(Cs), 리튬(Li), 그리고 칼슘(Ca) 등과 같은 금속과 일 함수는 높지만 안정하고 증착이 용이한 알루미늄(Al), 구리(Cu), 은(Ag) 등과 같은 금속의 합금을 주로 사용한다.

### 3.2. 고분자 유기전기발광소자(Polymer OLED)

고분자 유기전기발광소자의 최적 구조는 그림 5에 나타난 것과 같은 3층 구조이다. 초기에는 주로 발광층 만을 투명전극이 코팅된 기판 위에 스펀코팅(Spin Coating) 등과 같은 습식 방법으로 코팅하여 소자를 제작하였으나 켄집전압, 휘도, 그리고 효율을 최적화 시키기 위해서 3층 구조로 개선하였다. 완충층(Buffer Layer-BL)은 양극전극의 불균일한 표면을 평탄하게 만들어 발광층과의 접촉력을 개선할 뿐만 아니라 단분자 유기 전기발광소자의 정공주입층(HIL)과 동일한 역할을 한다. 일반적으로 고분자는 반복 단위(Repeating Unit)인 단분자가 공유 결합(Covalent Bond)에 의해서 수십에서 수백 개가 서로 연결되어 있기 때문에 단분자에 비해서 박막 형성이 용이하며 내충격성이 큰 장점이 있기 때문에 유기전기발광소자와 같이 초박막을 이용하는 전자 및 광학 소자에 가장 적합한 재료 중의 하나이다.

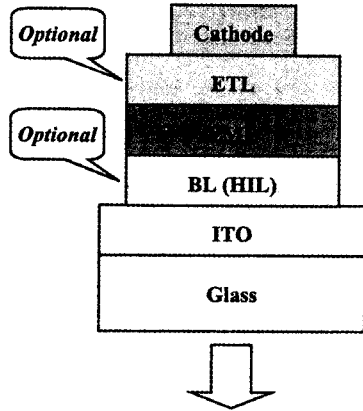


그림 5. 고분자로 구성된 유기전기발광소자의 대표적 구조.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 여전히 해결해야 할 문제점들이 남아있다. 특히 완충층을 습식으로 코팅한 후에 다시 발광층을 만들기 위해서 발광 고분자를 담은 용액을 완충층 위에 코팅할 때 용매에 의해서 완충층이 녹거나 미세하게 부푸는 경우가 발생하게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 완충층을 녹이지 않는 용매를 선별해야만 한다. 그러나 완충층의 구성 성분이 가교결합 등에 의한 불용성이 아닌 경우 대부분 상처를 입게 되므로 기본적인 소자는 제작할 수는 있으나 상용화할 수 있는 정도의 안정성은 부족하다. 따라서 완충층의 선택이 고분자 유기전기발광소자의 상품화에 매우 중요한 역할을 하게 될 것이다. 또 다른 문제는 역시 습식 코팅 후 남아 있는 미량의 용매 분자이다. 일반적으로 고분자 용액을 사용하여 박막을 제조할 경우 고분자의 종류 및 분자량에 따라서 다르지만 높은 온도 및 진공을 사용하여 건조하여도 사슬에 끼어 있는 일정량의 용매 분자는 제거하기 힘들다. 다행히 이러한 조건에서도 제거가 되지 않기 때문에 소자를 제작한 후 구동하여도 남아 있는 소량의 용매 분자가 큰 영향을 주지 않을 수도 있지만 용매 분자와 고분자 사슬은 단지 약한 분자간력에 의하여 물리적으로 결합하고 있기 때문에 오랜 시간에 따른 완화 거동이 발생할 경우 소자의 장수명(Long Term Lifetime)에 치명적인 영향을 주게 된다.

고분자 유기전기발광소자에 사용되는 고분자 재료를 그림 6에 나타내었다. 완충층으로 사용되는 재료의 대표적인 예로는 전도성 고분자의 한 종류인 PEDOT과 전도성을 증가시키기 위한 도핑제(Dopant)로 사용되는 PSS를 혼합한 블렌드(Blend) 박막이다. 청색 발광 고분자로는 PPP, PF, PFV 등이 있으나 소자의 최적 조건이 완성된 단계는 아니며 지속적으로 연구되고 있는 중이다. 녹색 발광 고분자로는 가장 먼저 개발된 PPV가 대표적인 예이며 불용성인 PPV의 용해성을 높이기 위해서 지방족 측쇄기(Aliphatic Side Group)를 도입한 여러 가지 유

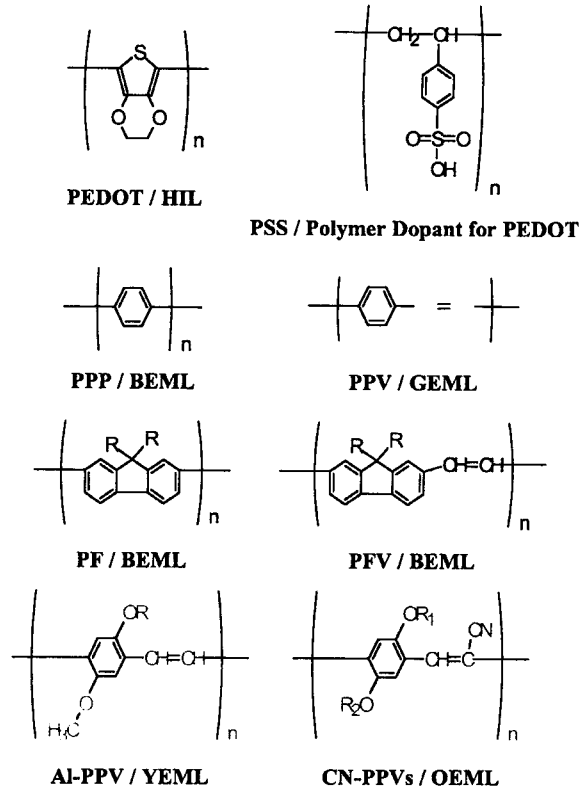


그림 6. 유기전기발광소자용 고분자 기능 재료.

도체가 합성되었다. 적색 발광 고분자의 개발은 탐색 중에서 가장 미진한 단계이며 대부분의 시도가 황색 또는 오렌지색에 머무르는 결과를 얻었다. 그러나 최근에는 단분자 유기전기발광소자의 적색 발광과 유사한 개념으로 청색 또는 녹색 발광 고분자에 적색 발광 단분자를 소량 혼합하여 밴드 갭이 큰 매질 고분자에서 밴드 갭이 작은 소량의 적색 발광 단분자로의 에너지 전달(Energy Transfer)에 의해서 적색 발광을 얻는 시도가 있었다<sup>44)</sup>.

사용하는 양극 및 음극 전극은 단분자 유기전기발광소자의 경우와 동일하다. 그러나 주로 사용하는 양극인 ITO 위에 완충층을 형성하기 위해서 혼합용액을 사용하기 때문에 사용되는 용매에 의해서 ITO 전극의 표면 전자 구조(Surface Electronic Structure)가 조금씩 변할 수 있다.

### 3.3. 혼성 유기전기발광소자(Hybrid OLED)

재료의 구성에 의한 마지막 구조가 혼성 유기전기발광소자이며 그림 7에 나타내었다. 혼성 유기전기발광소자는 단분자 및 고분자 유기전기발광소자의 단점을 없애고 장점만을 결합시킨 진보된 소자이다. 즉, 단분자 유기전기발광소자의 경우 양극전극과 직접 접하는 정공주입층을 구성하는 단분자의 경

우 청색 영역에서의 흡수 및 열적 안정성이 동시에 만족되지 못하여 풀칼라 디스플레이의 제작시 문제점이 되며, 고분자 유기전기발광소자의 경우 완충층위에 발광층을 형성할 때 용해 및 팽윤(Swelling)에 의한 층 구조의 파괴 현상이 생긴다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 정공수송물질이 주쇄 및 측쇄에 도입된 고분자 박막 또는 내열성이 우수한 절연 고분자에 분자수준으로 분산된 복합 박막(Molecularly Doped Composite Film)을 정공주입 및 수송층(HITL)으로 사용하는 것이다. 이렇게 구성된 정공주입 및 수송층 위에 단분자 유기전기발광소자에서 사용한 것과 동일한 발광 및 전자전달 단분자를 진공 증착하여 발광층 및 전자전달층을 형성한다. 그러므로 양극 전극과 접하여 표면의 거칠기(Roughness)를 결정하여 소자의 안정성에 가장 중요한 역할을 하는 정공주입 및 수송층이 안정한 고분자로 형성되기 때문에 연속하여 형성되는 단분자 박막들

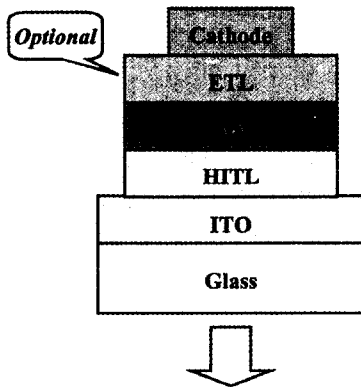


그림 7. 유기 단분자와 고분자로 구성된 혼합형 유기전기발광소자의 대표적 구조.

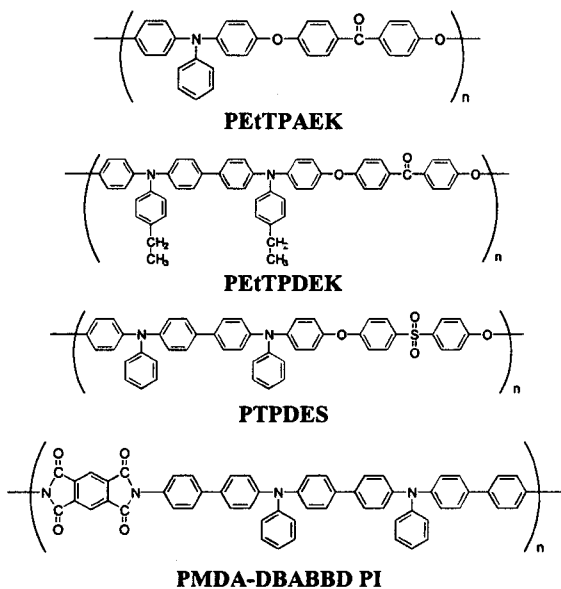


그림 8. 혼합형 유기전기발광소자의 HITL에 사용되는 주쇄형 고분자 기능 재료.

은 표면 유도 안정화(Surface Induced Stabilization) 현상에 의하여 더욱 안정하게 된다. 그러나 정공주입 및 수송층을 형성할 때 고분자 용액을 이용하면 고분자 유기전기발광소자의 문제점 중의 하나인 잔여 용매 분자에 의한 수명 저하 문제는 여전히 남아있게 된다. 따라서 고분자 정공주입 및 수송층을 형성할 때 진공증착중합(Vapor Deposition Polymerization-VDP)과 같은 반응성 증착법을 사용하는 것이 소자의 장수명화를 위해서 무엇보다 중요하다<sup>45,46</sup>.

그림 8에 주쇄형(Main Chain Type) 정공주입 및 수송층 고분자 재료를 나타내었다. PMDA-DBABBD PI는 습식 및 건식 공정으로 박막형성이 되나 나머지 고분자들은 습식 공정만으로 박막형성이 가능하다<sup>45,47</sup>. 특히 주쇄에 정공주입 및 수송 물질이 포함되어 있기 때문에 고분자 전체가 정공주입 및 수송 역할을 하므로 안정성이 우수하다. 그림 9에 대표적인 측쇄형(Side Chain Type) 정공주입 및 수송층 고분자 재료를 나타내었다<sup>48-50</sup>. PVK는 진공증착중합이 일부 시도 되었으나 그 결

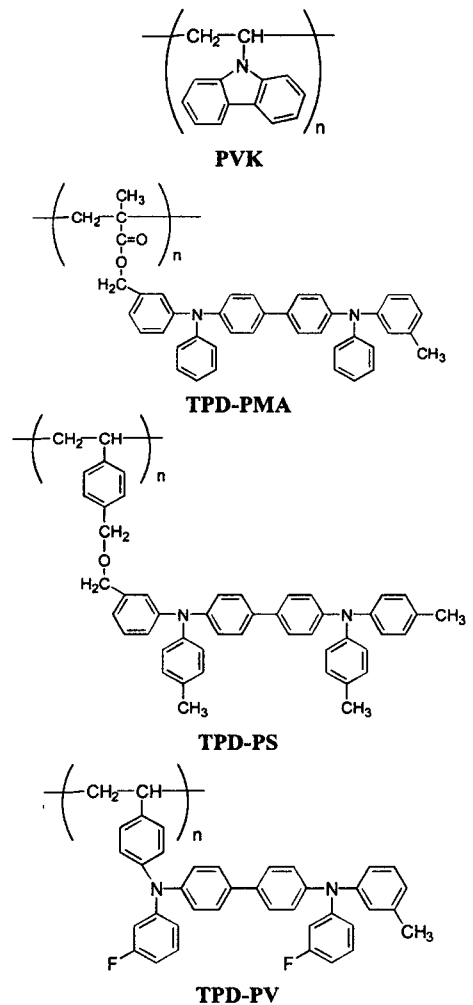


그림 9. 혼합형 유기전기발광소자의 HITL에 사용되는 측쇄형 고분자 기능 재료.

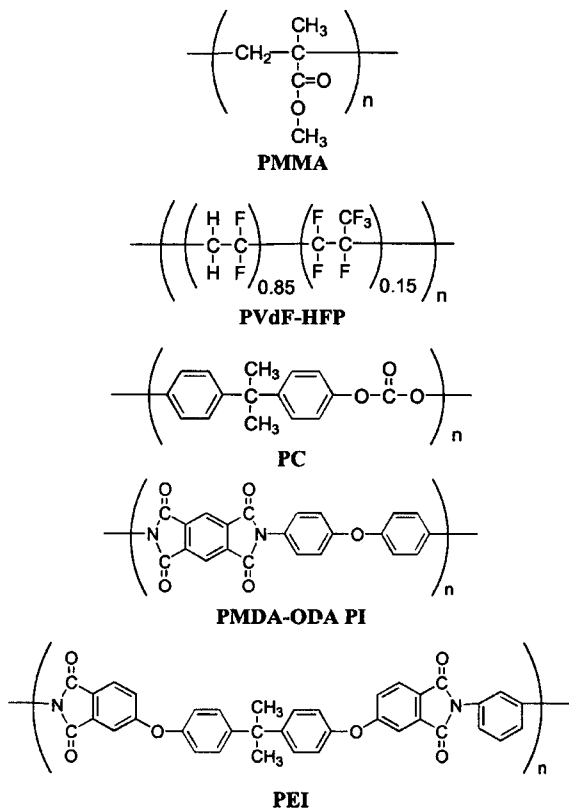


그림 10. 혼합형 유기전기발광소자의 HITL에 사용되는 분산형 매질 고분자 기능 재료.

과는 좋지 않았으며 그 외의 모든 측쇄형 고분자는 습식 공정으로 박막이 형성된다. 측쇄형 고분자의 경우 정공주입 및 수송 기능을 하는 부분은 측쇄에 한정되므로 주쇄는 일반적으로 전기적으로 절연기능을 한다. 또한 주쇄를 이루는 고분자의 종류에 따라서 전체의 안정성이 좌우되는 특징이 있다. 마지막의 경우가 분산형(Dispersion Type 또는 Molecularly Doped) 정공주입 및 수송 복합 박막이다. 즉, 정공주입 및 수송 역할을 하는 단분자 또는 고분자를 전기적인 활성이 없는 절연성 고분자(그림 10)에 분산 또는 혼합하는 것이다<sup>[42,51-55]</sup>. 매우 경제적인 접근이긴 하나 유기전기발광소자 제작시 수백 Angstrom의 초박막을 다루기 때문에 Nanometer 수준의 상분리(Phase Separation)가 일어날 경우 소자의 파괴 및 수명 단축을 초래하므로 매우 까다로운 공정이 필요하다.

이러한 고분자-단분자 혼성형과 전혀 다르게 유기물-무기물 혼성형 발광소자에 대한 연구도 진행되고 있다<sup>[56-58]</sup>. 절연성이며 안정한 무기물을 Host로 사용하고 전기적 활성이 있는 유기물을 Guest로 사용하는 형태 및 Sol-Gel 반응을 일으킬 수 있는 부분을 유기물에 도입하여 반응을 유도하는 형태 등이 있다.

### 3.4. 기능에 따른 소자 구조

사용하는 재료에 따른 구조 외에 기능에 따른 소자로는 투명한 유기전기발광소자(Transparent OLED-TOELD)<sup>[59-62]</sup>, 유연한 유기전기발광소자(Flexible OLED-FOELD), 적층형 유기전기발광소자(Stacked OLED-SOELD)<sup>[59-61]</sup>, 미세공동형 유기전기발광소자(Microcavity OLED-MOELD)<sup>[41]</sup>, 그리고 역구조 유기전기발광소자(Inverted OLED-IOELD)<sup>[28]</sup> 등이 있다.

TOELD는 반투명 금속음전극을 사용하는 방법(그림 11의 왼쪽)과 음전극의 폭을 줄이는 방법이 있으며 스마트 윈도우(Smart Window) 등과 같은 기능성 디스플레이로 응용이 기대된다. FOELD는 대부분의 경우 유연한 플라스틱 기판에 투명 전극인 ITO가 코팅되어 있는 것을 사용한다. 그림 11의 오른쪽 위의 FOELD는 PET-ITO 기판에 고분자 발광체인 MEH-PPV를 코팅하여 제작한 것이며, 왼쪽 아래의 것은 PET-ITO 기판위에 폴리이미드 정공수송층을 코팅하고 연속하여 단분자 발광체인 Alq3를 증착하여 제작한 것이다. SOELD는 그림 12에 나타난 것처럼 TOELD의 투명성을 이용하여 적색, 녹색, 청색 빛을 내는 소자를 적층하여 제작한 것이다. 그러나 TOELD와 SOELD의 경우 핵심인 반투명 음전극의 저항이 크고 안정성이 낮은 문제점을 가지고 있다.

MOELD는 기판의 구조에 광학적 미세공동(Optical Microcavity) 구조를 설계하여 삽입하고 그 위에 투명 양극전극을 코팅하여 양극 기판을 완성한 후 유기 박막 및 금속 음전극을 증착한 구조이다. 따라서 제작된 미세 공동은 Diffractive Bragg Resonator(DBR)로 작용하여 해당되는 파장의 빛을 그림 13에 나타난 것처럼 마치 레이저(Laser)처럼 직선형 빛으로 유도시킨다. 따라서 미세 공동에서 공명하는 파장을 적색, 녹색, 청색에 맞게 설계하고 유기 박막층을 백색발광에 가깝게 설계하면 이론적으로 풀칼라 디스플레이를 만들 수 있으나 OLED의 주요 장점 중의 하나인 시야각이 매우 넓다는 장점이

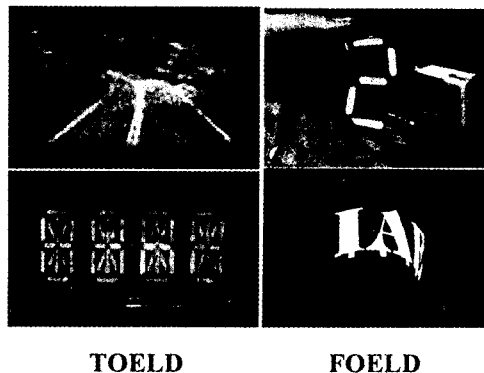


그림 11. 투명한 유기전기발광소자 및 유연한 유기전기발광소자.(왼쪽 위 : OFF 상태의 TOELD, 왼쪽 아래 : ON 상태의 TOELD, 오른쪽 위 : UNIAX의 FOELD, 오른쪽 아래 : IAE의 FOELD).

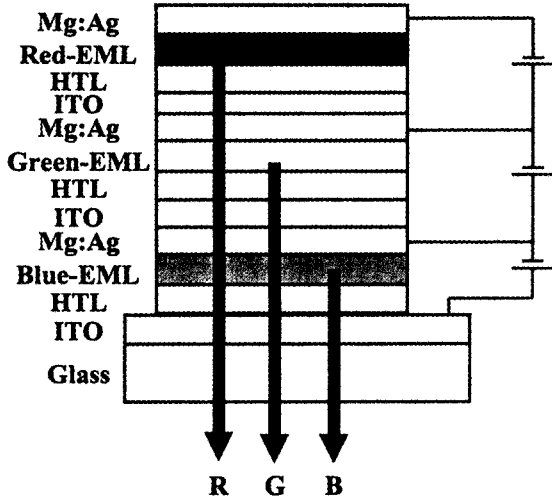


그림 12. 적층형 유기전기발광소자.

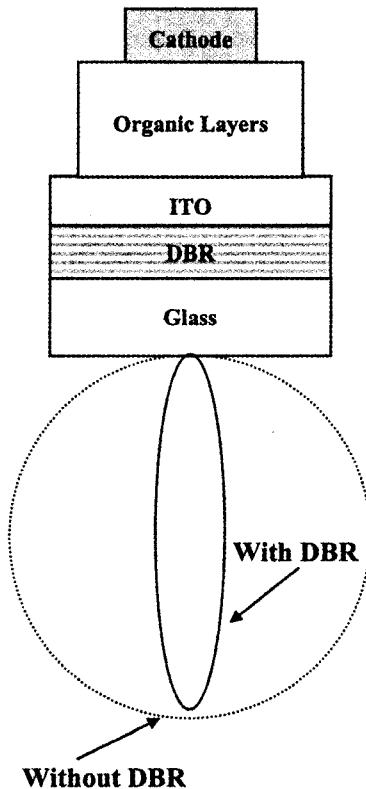


그림 13. Microcavity를 이용한 유기전기발광소자.

없어지게 된다.

IOELD는 기능적인 구분은 아니나 일반적인 OLED 제작 공정의 역공정을 하는 것으로서 다양한 소자 구조 설계 및 응용을 가능하게 해준다. 그러나 역공정에서 유기 박막을 코팅한 후 투명 양극 전극을 그 위에 Sputtering이 E-beam으로 증착할 때 발생하는 열과 물리적 에너지 때문에 유기 박막이 손상될 확률이 높은 단점이 있다. 따라서 열적으로 안정한 유기 단분

자 또는 고분자가 개발되면 충분히 가능성 있는 공정이다.

#### 4. 유기전기발광소자의 효율

유기전기발광소자의 효율은 흔히 내부양자효율(Internal Quantum Efficiency), 외부양자효율(External Quantum Efficiency), 전력효율(Power Efficiency), 그리고 발광효율(Luminous Efficiency)의 4가지로 표현된다<sup>63,64</sup>. 내부양자효율은 이론적으로 가능한 효율로서 주입된 전체 전하(정공+전자)수에 대한 방출되는 광자수의 비율로서 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{INT} = \gamma \times \eta_r \times \phi_f$$

여기서  $\gamma$ 는 정공 및 전자의 균형 인자,  $\eta_r$ 는 일중항 여기자 생성 효율, 그리고  $\phi_f$ 는 형광 효율이다. 그러나 실질적으로 전기발광 후 방출되는 빛은 유기 박막, 전극, 그리고 기판의 영향 때문에 이론적인 양보다 훨씬 줄어들게 된다. 그 중에서 가장 큰 영향을 미치는 부분은 기판에 의한 굴절 및 반사이다. 따라서 아래의 식과 같이 외부양자효율이 결정된다.

$$\eta_{EXT} \approx \frac{1}{2n^2} \times \eta_{INT}$$

여기서  $n$ 은 유리의 굴절율로서 일반적으로 1.5의 값을 가진다.

전력(에너지)효율은 주입된 전체 외부 전기에너지에 대하여 방출된 광자의 에너지의 비를 표현한 것으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_E \approx \frac{N_p}{N_e} \times \frac{\epsilon_p}{eV_{app}}$$

$N_p$ 와  $N_e$ 는 광자 및 전하의 수이고,  $\epsilon_p$ 는 방출되는 광자의 평균 에너지이며  $V_{app}$ 는 인가 전압이다. 마지막으로 발광효율은 전력효율과 유사하나 방출되는 광자의 에너지 단위를 디스플레이의 밝기를 측정하는 통상 단위인 칸델라를 사용한 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_L = \frac{N \times L}{J \times V}$$

여기서  $J$ 는 전류밀도이며 단위로  $A/m^2$ 를 사용하며,  $V$ 는 인가전압,  $L$ 은 휘도로서 단위는  $cd/m^2$ 이다.

일반적으로 일중항 여기자에 의한 발광을 이용하는 OLED의 경우 스핀 통계학상 내부양자효율이 25%를 넘을 수 없으며 외부양자효율은 5%이하 이나 최근 인광물질을 사용하여 삼중항을 발광에 활용함으로 외부양자효율이 10%를 넘어서는 획기

적인 결과를 얻었다<sup>65,66</sup>.

## 5. 유기전기발광소자의 수명

유기전기발광소자의 수명은 무기물을 주로 다루는 물리학자들 및 전기전자공학자들에 의해서 유기물이라는 이유 하나 때문에라도 초기부터 논란의 대상이 되어왔다. 그러나 지금은 이미 일부가 상품화된 상태이며 지속적으로 장수명화 기술이 발전하고 있다. 아래에 유기전기발광소자의 수명에 영향을 미치는 내부 및 외부 원인, 그리고 해결방법을 간단히 요약하였다.

### 5.1. 열화의 내부 원인 및 해결 방법

가장 주요한 원인은 유기 물질의 전기화학적 불안정성에 의한 여기 상태에서의 반응 및 열화이다. 유기전기발광소자는 음극 및 양극에서 전자와 정공이 끊임없이 주입되어 박막상태의 유기물질을 1초에 약 10억번 이상 들뜨게 만든 후 빛을 생성시키는 원리로 동작된다. 따라서 여기 상태의 유기 분자가 불안정하여 다른 구조로 변성되거나 이웃하는 분자와 서로 반응을 일으켜 발광 기능이 없는 구조로 전환될 경우 이러한 부분이 발광억제부분(Luminescent Quenching Site)로 작용하여 소자의 수명은 급속히 저하된다. 따라서 이러한 반응은 박막을 구성하고 있는 유기 분자들이 확률적으로 동일하게 일으킬 수 있기 때문에 소자를 구동시키는 초기 단계부터 변화를 관측할 수 있다. 기초적인 검증 실험으로서 소자를 제작하여 진공 또는 질소 분위기에서 수십 번 On-Off를 반복했을 때에도 휘도 및 색상이 크게 변하지 않으면 일반적으로 초기상태의 발광 안정성(Emission Stability)이 있다고 판단할 수 있다. 만일 패키징(Packaging 또는 Encapsulation)이 완벽하지 않아서 산소가 존

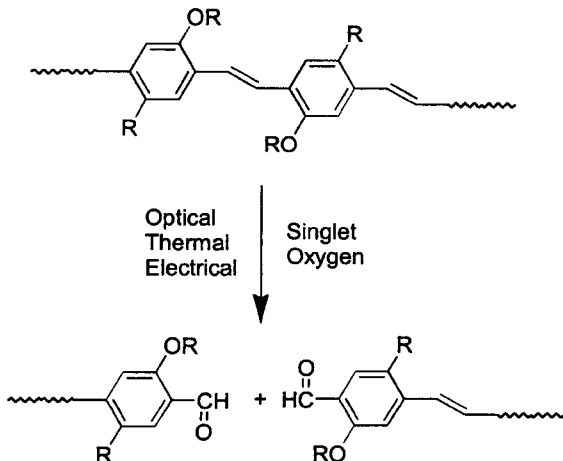


그림 14. 분해에 의한 발광 고분자의 열화.

재할 경우 광학적, 열적, 또는 전기적인 힘에 의해서 산소가 촉매 작용을 하거나 직접 반응에 참여하여 유기 박막을 열화 또는 분해 시킨다<sup>67-69</sup>. 유기 단분자를 사용하는 경우에는 도핑을 하여 발광중심(Emission Center)을 도핑 분자로 변화 시키면 이러한 열화 속도가 매우 느려져서 장수명을 확보할 수 있다<sup>67</sup>. 고분자의 경우 대표적인 예가 PPV 유도체와 같이 비닐결합(Vinyl Bond)을 가진 유기 화합물들이며 그림 14와 같이 일중항 산소에 의해서 발광억제부분인 알데하이드(Aldehyde)로 변하게 된다<sup>68,69</sup>. 따라서 산소 투과를 억제할 수 있는 보호층(Protection Layer)의 도입이 필수적이다.

또 다른 원인은 유기 박막과 투명 양극전극 또는 금속 음극 전극사이의 접착력이 근본적으로 좋지 않기 때문에 구동 전압 및 온도가 높을 경우 계면 전압 차이 및 서로 다른 열팽창 계수 때문에 층간 분리가 일어나 소자가 열화된다. 이런 경우 구동 전압을 낮추고 유리전이온도가 높은 유기물질을 사용하면 문제점을 해결할 수 있다.

### 5.2. 열화의 외부 원인 및 해결 방법

유기전기발광소자 대부분은 구동 전압, 휘도, 그리고 효율을 최적화하기 위해서 리튬 등과 같은 수분에 민감한 금속을 소량 함유한 합금을 사용한다. 또한 사용하는 유기 물질 대부분이 파이전자(Phi Electron)를 가지고 있기 때문에 정도에 따라 다르지만 물 분자와 상호작용을 하게 된다. 따라서 공기중의 수분 또는 이미 기판 등에 부착된 수분은 소자를 구동하지 않고 단순히 보관만 할 경우에도 서서히 전극 및 유기 박막을 공격하여 흑점(Dark Spot)을 만든다.

이미 상품화에 성공한 일본의 파이오니아전자는 그림 15와

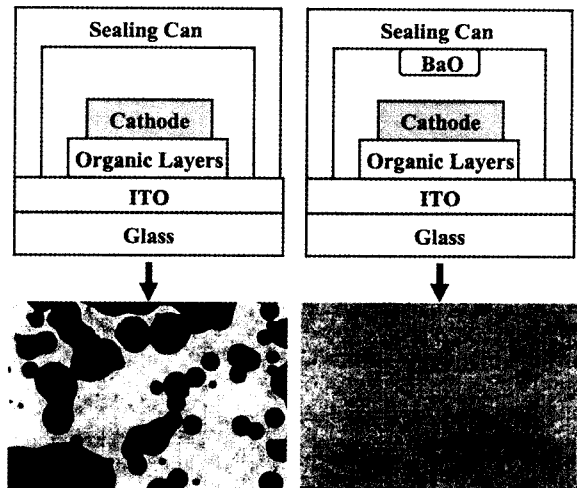


그림 15. 유기전기발광소자의 수명에 미치는 흡습제의 영향(사진 : 85°C에서 500시간 동안 보관 후 측정된 것임).



같이 흡습제인 산화바륨 화합물(BaO Complex)을 패키징시 부착하여 내부에 존재하는 수분 및 장시간 구동시 외부로부터 침투하는 수분을 제습하는 기술을 특허화 하였다<sup>70)</sup>. 즉, 단순한 패키징 만으로는 1,000시간 내외의 수명은 확보할 수 있으나 상용화 수준에는 미치지 못한다. 그 외에 최근에는 패키징의 일환으로 산화무기물 또는 반응성 고분자를 증착하는 연구들이 진행되고 있다.

## 6. 유기전기발광 디스플레이

지금까지 설명한 유기전기발광소자에 대한 기술을 기본으로 하여 상품적 가치가 있는 디스플레이로 제작할 수 있다. 가능한 디스플레이의 종류로는 가장 단순한 아이콘형, 투자비가 소규모인 수동구동형, 그리고 고해상도가 가능한 능동구동형이 있다.

### 6.1. 디스플레이 종류 및 구동

아이콘형(Icon Type) OLED는 용어가 의미하는 것처럼 전극의 모양을 나타내고자 하는 아이콘과 동일하게 형성한 후에 해당하는 정보를 단순 On-Off로 제어하는 것이다. 그림 16에 대표적인 아이콘형 디스플레이로서 고등기술연구원에서 개발한 자동차 자동온도 조절기(Automatic Temperature Controller for Automobile)용 OLED를 나타내었다. 가능한 색상으로는 청색, 적색, 녹색 등의 단일색 및 아이콘의 일부 색상을 다르게 제작한 다중색 등이 있다.

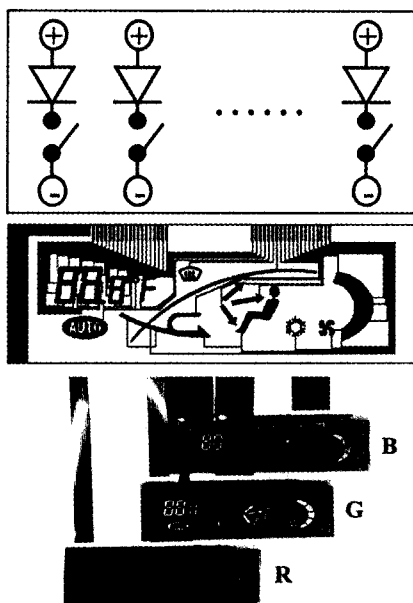


그림 16. 아이콘형 유기전기발광 디스플레이.

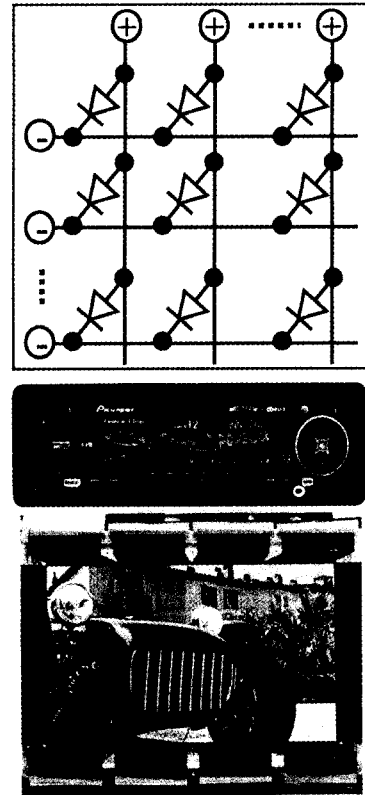


그림 17. 수동구동형 유기전기발광 디스플레이.

수동구동형(Passive Matrix Type) OLED는 그림 17에 나타난 것처럼 양극전극과 음극전극이 서로 교차하는 형태로서, 문자나 영상을 나타내기 위해서는 양쪽 전극 중에서 한쪽을 데이터 전극(Data Electrode)로 정하고 관련 구동칩(Driving Chip)을 장착하여 각각 전극선(Electrode Line)에 해당하는 정보를 특정 시간마다 동시에 전기신호로 흘려주며, 다른 쪽 전극은 주사 전극(Scan Electrode)으로 정하고 역시 구동칩을 붙여서 처음 전극선부터 마지막 전극선 까지 일정한 시간 간격으로 주사하는 형태로 전기신호를 흘린다. 따라서 시간 제어 및 흘리는 전기신호의 파형이 깨끗한 이미지를 나타내는데 있어서 필수적이며 PWM(Pulse Width Modulation)과 PAM(Pulse Amplitude Modulation) 방식을 기본으로 사용하며 상황에 따라서 이 두가지 방법을 혼합하여 사용하기도 한다. 수동구동형 OLED의 구동시 평균휘도와 순간최대휘도 등에 대한 관련 식은 다음과 같다.

$$L_0 = \frac{L_d \times M}{r_a \times d}$$

여기서  $L_d$ 는 디스플레이의 평균휘도,  $L_0$ 는 순간최대휘도,  $r_a$ 는 개구율,  $d$ 는 Duty Cycle, 그리고  $M$ 은 주사전극의 수이다. 따라서 개구율이 0.8, Duty Cycle이 0.5, 주사전극의 수가 120

개, 그리고 2분할한 수동구동형 OLED에서 평균휘도가 100cd/m<sup>2</sup>가 되게 하기 위해서는 약 30,000cd/m<sup>2</sup> 이상의 순간 최대휘도가 필요하다. 여기서 이러한 고휘도를 얻을 수는 있지만 휘도가 높은 만큼 수명이 짧아지는 역효과가 생기기 때문에 수동구동형 디스플레이의 가장 큰 문제점 중의 하나로 지적되고 있다. 그림 17의 중간에 수동구동형 및 아이콘형이 혼합된 일본 파이오니아전자에서 상품화한 카오디용 다중색 OLED를 나타내었으며, 맨 아래쪽에 수동구동형 5.2인치 QVGA급 풀칼라 OLED 시작품을 나타내었다.

수동구동형 OLED는 Cross-Talk 및 전압 강하 현상 때문에 고화질 또는 대형 디스플레이에 부적합한 반면 능동구동형 OLED는 그림 18의 회로도에 나타낸 것처럼 개별구동을 가능하게 해주는 박막트랜지스터(Thin Film Transistor-TFT)가 기판에 장착되어 있기 때문에 화소 단위인 각각의 소자를 Switching TFT로 On-Off만으로 구동이 가능하므로 고화질이 가능하다[71]. 특히 수동구동형 OLED와는 달리 모든 화소를 동시에 On-Off할 수 있기 때문에 다음의 식으로 평균휘도와 순간최대휘도를 계산할 수 있다.

$$L_o = \frac{L_d}{r_a \times d}$$

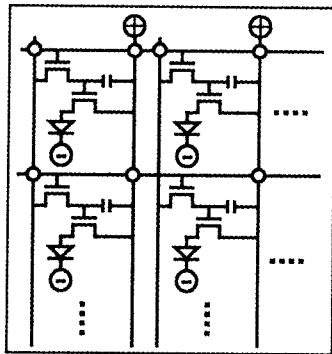


그림 18. 능동구동형 유기전기발광 디스플레이.

따라서 개구율이 0.8이고 Duty Cycle이 0.5인 능동구동형 OLED에서 평균휘도가 100cd/m<sup>2</sup>가 되게 하기 위해서는 순간 최대휘도가 250cd/m<sup>2</sup>가 필요하며 최종적으로 반사방지필름(Anti-reflective Film-ARF)에 의한 손실이 약 50%일 경우 궁극적으로 필요한 순간최대휘도는 약 500cd/m<sup>2</sup>가 된다. 그러므로 휘도가 낮기 때문에 필요한 전압 및 전류밀도도 적게되므로 비록 Switching TFT에서 일부 전력이 소비된다 할지라도 궁극적으로는 소비전력이 작아지는 장점이 있다. 특히 휘도가 낮으므로 단위 시간당 흐르는 전하의 수가 적으므로 결국 수명이 수동구동형 OLED 보다 길어지게 된다. 능동구동형 OLED의 시작품으로는 그림 18의 중간에 나타낸 CDT사와 Seiko-Epson사가 공동 개발한 PPV로 제작한 2인치급 녹색 디스플레이와 맨 아래 쪽에 나타낸 Eastman Kodak과 Sanyo가 공동 개발한 5.5인치급 풀칼라 디스플레이가 있다.

## 6.2. 칼라화 방법

풀칼라 유기전기발광 디스플레이를 제작하기 위해서는 다음과 같은 대표적인 칼라화 방법 중의 한가지를 적용해야 한다. 가장 이상적인 방법은 그림 19에 나타난 개별 화소형(Individual Pixel Type) 방법이다. 개별 화소를 만들기 위해서는 단분자 발광체를 사용할 경우 일반적으로 Shadow Mask를 사용하여 원하는 화소 이외의 부분을 가린 후 증착하는 것을 반복해야 한다. 따라서 화소의 크기가 작아지고 디스플레이의 전체 면적이 넓어질수록 어렵게 된다. 발광 고분자를 사용할 경우 Ink-Jet으로 용액 방울을 기판 위에 코팅하여 화소를 만드는 방법이 개발 중이나 낮은 점착력 및 불균일한 두께 등 여러가지 해결 해야 할 문제점들이 남아 있다.

두 번째 방법으로 적색, 녹색, 청색의 파장에 해당하는 DBR을 각각 기판에 삽입하고 그 위에 넓은 영역의 발광 파장을 가진 유기박막층을 설계하여 디스플레이를 제작하면 해당하는 DBR에서 각각의 색상을 얻을 수 있기 때문에 풀칼라 디스플레이를 구현할 수 있다. 그러나 이미 앞에서 언급한 것처럼 시야각이 작은 문제 때문에 일반적인 용도 이외의 특수한 곳에 응용하는 것이 바람직하다.

세 번째 방법은 기판과 양극전극 사이에 청색, 녹색, 그리고 적색에 해당하는 색변환필름(Color Converting Film-CCF)을 각각 삽입하고 그 위에 청색 OLED를 제작하여 구성한 것이다. 그러나 각 색상별 CCF를 만드는 공정은 LCD에서 사용하는 칼라필터필름(Color Filter Film-CFF)을 제작하는 공정과 동일한 과정을 거쳐야 하므로 생산 비용이 증가되는 단점이 있다. 또한 기본 원리가 에너지가 높은 청색 발광을 이용한 색변

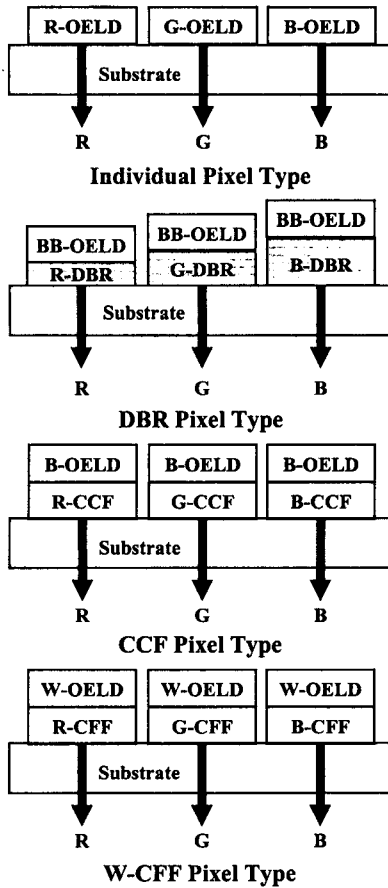


그림 19. 유기전기발광 디스플레이의 칼라화 방법.

환 이므로 이웃하는 화소가 일부 접등되는 Cross-Talk 현상이 발생할 수 있다.

네 번째는 LCD와 유사한 방법으로서 각 색상별 CFF를 기판에 부착하고 그 위에 백색발광 OELD를 형성하는 것이다. 그러나 칼라필터가 해당 색상의 일부 및 그 외의 빛을 모두 흡수하기 때문에 효율이 매우 낮아져서 전력소모가 높은 단점이 있다.

## 7. 맺음말

유기박막에 대한 꾸준한 연구 및 주변 기술의 발달로 인하여 유기물을 이용한 전기발광소자가 연구되기 시작하지 약 30년 만에 상품이 시장에 나왔다. 그러나 일부 논문에서 유사한 결과들을 발표하였음에도 불구하고 여전히 고휘도에서 순수한 청색 및 적색 발광이 가능한 재료 및 소자 구조의 개발이 부진한 상태이다. 또한 무기물의 경우 상당히 많은 종류가 표준화된 물리적 값을 가진 반면 유기 재료의 경우 이러한 자료들이 체계화 되어 있지 않기 때문에 재현성 및 응용성이 매우 낮아져 있다. 따라서 안정한 풀칼라 OELD의 개발 뿐만 아니

라 향후 전개될 분자수준의 제어가 가능한 유기 반도체 시대를 준비하기 위해서 체계화된 유기 재료의 구조 설계 및 합성, 정확한 물성 및 소자 특성 평가 확립, 다양한 유기박막 제조 공정 개발, 그리고 관련 전자제어회로의 개발이 강력히 요구된다.

## 감사의 글

본 글의 작성에 도움을 주신 고등기술연구원 네스센터 OELD팀의 모든 연구원들과 부산대학교 고분자공학과와 하창식 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. M. Pope, H. P. Kallman, and P. Magnate, *J. Chem. Phys.*, **38**, 2042(1963).
2. W. Helfrich and W. G. Schneider, *Phys. Rev. Lett.*, **14**, 229(1965).
3. W. Helfrich and W. G. Schneider, *J. Chem. Phys.*, **44**, 2902(1965).
4. W. Mehl and W. Bucher, *Z. Phys. Chem.*, **47**, 76(1965).
5. J. Dresner, *RCA Rev.*, **30**, 322(1969).
6. N. V. Vityuk and V. V. Mikho, *Soc. Phys. Semicond.*, **6**, 1479(1973).
7. F. Lohmann and W. Mehl, *J. Chem. Phys.*, **50**, 500(1969).
8. D. F. Williams, M. Schadt, *Proc. IEEE*, **58**, 475(1970).
9. H. P. Schwob, J. Funfschilling, and I. Zchokke-Granacher, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **10**, 39(1970).
10. M. Kawabe, K. Masuda, S. Namba, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **10**, 527(1971).
11. N. I. Wakayama, N. Wakayama, and D. F. Williams, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **26**, 275(1974).
12. J. G. Basurto and Z. Burshtein, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **31**, 211(1975).
13. J. Kalinowski, J. Godlewski, and R. Singnerski, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **33**, 247(1976).
14. K. C. Kao and W. Hwang, *Electrical Transport in Solids*, Pergamon Press, Oxford(1981).
15. C. W. Tang, *US Patent* 4,356,429(1982).
16. C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913(1987).
17. C. Adachi, S. Tokito, T. Tsutsui, and S. Saito, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L269(1988).
18. C. Adachi, S. Tokito, T. Tsutsui, and S. Saito, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L712(1988).
19. C. W. Tang, S. A. VanSlyke, and C. H. Chen, *J. Appl. Phys.*, **65**, 3610(1989).
20. J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. MacKay, R. H. Friend, P. L. Burn, and A. B. Holmes, *Nature*, **347**, 539(1990).
21. D. Braun and A. J. Heeger, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1982(1991).
22. N. C. Greenham and R. H. Friend, *Solid State Phys.*, **49**, 1(1995).
23. L. J. Rothberg, A. J. Lovinger, *J. Mater. Res.*, **11**, 3174(1996).

24. J. Salbeck, Ber. Bunsenges. Phys. Chem., **100**, 1667(1996).
25. J. R. Sheats, H. Antoniadis, M. Hueschen, W. Leonard, J. Miller, R. Moon, D. Roitman, and A. Stocking, *Science*, **273**, 884(1996).
26. C. H. Chen, J. Shi, and C. W. Tang, *Macromol. Symp.*, **125**, 1(1997).
27. J. Kalinowski, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, R179(1999).
28. V. Bulovic, P. E. Burrows, and S. R. Forrest, *Semiconductors and Semimetals*, **64**, 255(2000).
29. V. Bulovic and S. R. Forrest, *Semiconductors and Semimetals*, **65**, 1(2000).
30. T. Wakimoto, R. Murayama, K. Nagayama, Y. Okuda, H. Nakada, and T. Tohma, *SID Digest*, **27**, 849(1996).
31. Pioneer Electronics Co., <http://www.pioneerelectronics.com/>
32. CDT, <http://www.cdttld.com/>
33. UNIAX, <http://www.uniax.com/>
34. NESS, <http://www.ness.co.kr/>
35. UDC, <http://www.univeraldisplay.com/>
36. eMagine, <http://www.emagincorp.com/>
37. Covion, <http://www.covion.com/>
38. Syntec, <http://www.syntec-synthon.com/>
39. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2<sup>nd</sup> Edn., John Wiley & Sons, Republic of Singapore(1981).
40. Y. A. Ono, *Electroluminescent Displays*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Republic of Singapore(1995).
41. S. Miyata and H. S. Nalwa, *Organic Electroluminescent Materials and Devices*, Gordon and Breach Publishers, The Netherlands (1997).
42. Y. Kim, J. G. Lee, and S. W. Kim, *Adv. Mater.*, **11**, 1463(1999).
43. W. B. Im, H. K. Hwang, J. G. Lee, and Y. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, submitted(2000).
44. T. Virgili, D. G. Lidzey, and D. D. C. Bradley, *Adv. Mater.*, **12**, 58 (2000).
45. Y. Kim, J. G. Lee, K. Han, H. K. Hwang, D. W. Choi, Y. Y. Jung, J. H. Keum, S. W. Kim, S. S. Park, and W. B. Im, *Thin Solids Films*, **363**, 263(2000).
46. J. G. Lee, S. W. Kim, D. K. Choi, Y. Kim, S. C. Kim, M. H. Lee, and K. Jeong, *J. Kor. Phys. Soc.*, **35**, S604(1999).
47. J. Kido, *Proc. IDW*, 601(1998).
48. C. -M. Bouche, P. Berdague, H. Facoetti, P. Robin, P. Le Barny, and M. Schott, *Synthetic Metals*, **81**, 191(1996).
49. J. M. Son, Y. Sakaki, K. Ogino, and H. Sato, *IEEE Trans. Electron Devices*, **44**, 1307(1997).
50. S. E. Shaheen, G. E. Jabbour, B. Kippelen, N. Peyghambarian, J. D. Anderson, S. R. Marder, N. R. Armstrong, E. Bellmann, and R. H. Grubbs, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3212(1999).
51. J. Kido, K. Hongawa, M. Kohda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, L960 (1992).
52. E. Kang, J. Keum, Y. Kim, W. J. Cho, C. S. Ha, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **316**, 261(1998).
53. J. G. Lee, Y. Kim, S. H. Jang, S. N. Kwon, and K. H. Jeong, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1757(1998).
54. H. Lim, H. Park, J. G. Lee, Y. Kim, W. J. Cho, and C. S. Ha, *Proc. SPIE*, **3281**, 345(1998).
55. Y. Kim, J. G. Lee, H. Hwang, S. H. Jang, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **316**, 251(1998).
56. J. H. Keum, E. Kang, Y. Kim, W. J. Cho, and C. S. Ha, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **316**, 297(1998).
57. T. Dantas de Moraes, F. Chaput, K. Lahlil, and J. -P. Boilet, *Adv. Mater.*, **11**, 107(1999).
58. M. Schneider, J. Hagen, D. Haarer, and K. Mullen, *Adv. Mater.*, **12**, 351(2000).
59. G. Gu, G. Parthasarathy, P. E. Burrows, P. Tian, I. G. Hill, A. Kahn, and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **86**, 4067(1999).
60. G. Gu, G. Parthasarathy, P. Tian, P. E. Burrows, and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **86**, 4076(1999).
61. G. Parthasarathy, G. Gu, and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **11**, 907 (1999).
62. J. G. Lee and Y. Kim, *Korean Patent Appl. No.* 15780(1998).
63. N. C. Greenham, R. H. Friend, and D. D. C. Bradley, *Adv. Mater.*, **6**, 491(1994).
64. T. Tsutsui and K. Yamamoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 2799(1999).
65. M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **403**, 750(2000).
66. T. Tsutsui, M. -J. Yang, M. Yahiro, K. Nakamura, T. Watanabe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L1502(1999).
67. S. A. VanSlyke and C. W. Tang, *Digest of LEOS Summer Topical Meetings*, 3(1995).
68. P. Hrdlovic, *Polymer News*, **22**, 356(1997).
69. B. H. Cumpston, I. D. Parker, and K. F. Jensen, *J. Appl. Phys.*, **81**, 3716(1997).
70. T. Tohma, *Proc. of Electronic Journal 6<sup>th</sup> FPD Seminar(Japanese)*, 19(1999).
71. C. W. Tang, *US Patent* 5,550,066(1996).

#### 저자약력

성 명 : 김영규

근 무 처 : 고등기술연구원 네스센터 / 주식회사 네스

최종 학력 : 1996, 부산대학교, Polyimide and OLED, Ph.D.

1993, 부산대학교, 고분자공학, M.S.

1991, 부산대학교, 고분자공학, B.S.

주요경력 : 1993-1995, POSTECH, Dept. of Chemistry, Research Scientist

1997-현재, 고등기술연구원 네스센터, 책임연구원

2000-현재, 주식회사 네스, 수석연구원

E-mail : ykim@iae.re.kr