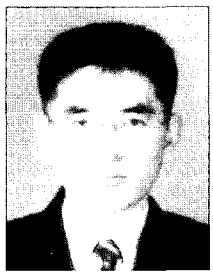
일반총설

OLEDs의 저분자 및 고분자 인광 재료의 연구 동향

강영진 · 이석종

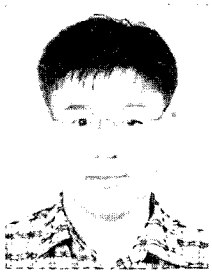
1. 서론

유기물질의 전기적 발광현상은 1963년 안트라센 물질에서 처음 보고되었다.[1] 그 후 1987년에 코닥(Kodak)사의 Tang 등이 발광층과 전하 수송층으로 각각 Alq_3 (tris-(8-hydroxy quinoline)aluminum)와 TPD (*N,N'*-diphenyl-*N,N'*-bis[3-methyl phenyl]-1,1'-biphenyl -4,4'-diamine)라는 이중층 저분자유기물 박막을 형성하여 효율과 안정성이 개선된 녹색의 발광현상을 발견한 이후로 저분자 유기 EL 디스플레이(혹은 저분자 OLED)의 개발이 실용화를 목표로 활발히 연구되기 시작하였다.[2] 1990년도에 들어서는 유기물 재료 중에 전도성 고분자형 재료의 전기적 발광현상이 영국의 케임브리지 대학에서 보고되어 고분자형 유기 EL 소자 연구가 진행되기 시작하였다.[3] 현재는 저 분자형 유기물을 사용하는 저분자 유기 EL 소자와 전도성 고분자를 사용하는 고분자 유기 EL 소자가 유기 EL 디스플레이의 두 분야로 경쟁하면서 연구가 진행되고 있다. 유기 EL 소자는 저 전압 구동, 박형, 자체 발광에 인한 고인식성 및 넓은 시야각, 빠른 응답속도 등의 많은 장점을 갖고 있기 때문에 디스플레이에 적용 시 현재 평판 디스플레이에서 널리 사용되는 액정 디스플레이의 결점들을 해결해 줄 수 있는 차세대 디스플레이로 평가 받고 있다. 이에 1990년도 후반부터 디스플레이로의 연구가 일본에서부터 활발히 진행되면서 수동형(passive matrix) 구동의 OLED가 일본의 Pioneer, 한국의 삼성 SDI, LG 전자, 대만의 RiTdisplay 등에 의해서 상업화 되었다. 현재는 자동차 오디오, 휴대폰의 외부창, MP3 플레이어에 이미 채용이 되고 있으며 일반인들이 쉽게 볼 수 있는 디스플레이로 바뀌어 가고 있다. 또한 향후 중대형 디스플레이로 상업화하기 위하여 일본의 Sony, Sanyo, Toshiba, 한국의 삼성 SDI, LG-필립스 등에서 능동구동 OLED(active matrix OLED (AM OLED))를 경쟁적으로 개발하고



강영진

1991 한국교원대학교 화학교육과(학사)
1995 한국교원대학교 화학교육과(석사)
2000 고려대학교 화학과(박사)
2001~2003 Queen's University 화학과 (Post Doc.)
2003~2004 국립경상대학교 KRF-Research 교수
2004~현재 국립강원대학교 Division of Science Education, 교수



이석종

1995 포항공대 화학과(박사)
1996 포항공대 화학과(Post Doc.)
1996 대웅제약 Senior Researcher
1999 포항공대 Center for Super-functional Materials Senior Researcher
1999~2000 MacGill University 화학과 (Post Doc.)
2005 삼성 SDI Senior Researcher
2005~현재 LG. Philips LCD Co.,Ltd Chief Research Engineer

Research Development Trend of Phosphorescent Materials for OLEDs : Small Molecules & Polymer

국립강원대학교(Youngjin Kang, Division of Science Education, 192-1, Hyoja-2dong, Chuncheon, Gangwondo 200-701, Korea) e-mail: kangy@kangwon.ac.kr

LG. Philips LCD Co.,Ltd(Seok Jong Lee, Advanced Technology Development Department, 642-3, Jinpyung-dong, Gumi-si, Gyungsangbuk-do 730-726, Korea) e-mail: sjonglee@lgphilips-lcd.com

있다(**그림 1**).

유기 EL 디스플레이는 이와 같이 빠른 속도로 발전하고 있으며, 향후 몇 년 내에 우리 주변의 일상적인 디스플레이로 등장할 것으로 판단된다. 본 원고에서는 OLED의 발광 원리 및 구조와 최근에 각광 받고 있는 저분자 및 고분자 인광재료의 연구 동향에 대해서 언급하고자 한다.

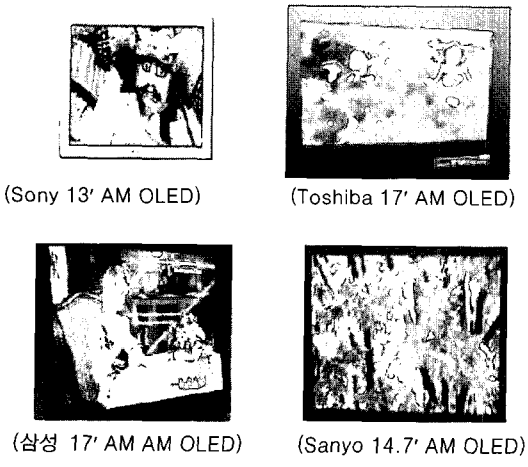


그림 1. 발표된 10인치 이상의 AM OLEDs.

2. 발광의 원리 및 유기 EL 소자 구조

유기 EL 소자의 구조는 **그림 2**에서 보여주는 바와 같이 일반적으로 양극(anode), 정공 주입층(hole injection layer, HIL), 정공 수송층(hole transfer layer, HTL), 발광층(emission layer, EML), 전자 수송층(electron transfer layer, ETL), 전자 주입층(electron injection layer, EIL), 그리고 음극(cathode)으로 구분할 수 있으며 이러한 박막 층들은 고 진공(10^{-6}~10^{-7} Torr)상태에서 가열 증착(thermal evaporation)에 의하여 형성된다.

유기 EL 발광 메커니즘은[4] 유기 EL 소자에 전기를 가했을 때 음극에서는 전자(electron)가, 양극에서는 정공(hole)이 주입되어 유기물층에서 재결합하는 경로를 통하여 발광한다. 유기물층에서는 정공이 잘 전달될 수 있도록 정공 주입 및 정공 수송층을 양극 쪽에 형성하고 음극 쪽에 전자 주입 및 전자 수송층을 형성하여 전자를 주입한다. 전자와 전공이 발광층에서 만나면 재결합(recombination)을 통하여 여기자(exciton)를 형성하며 이 여기자가 기저 상태(ground state)로 전이하면서 발광을 한다. 전자와 정공이 만나 형성되는 여기자의 여기상태(excited state)는 일중항(singlet state) 여기 상태와 삼중항(triplet state) 여기상태가 동시에 생성되는데, 통계적으로 1:3의 비율로 일중항과 삼중항

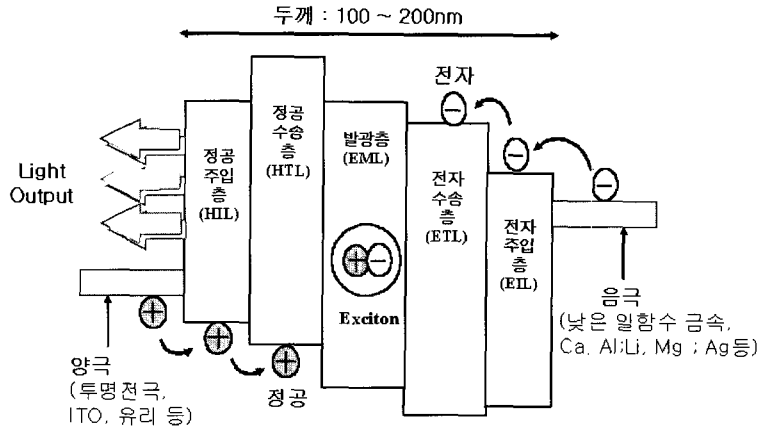


그림 2. 유기 EL 소자의 구조 및 발광 과정.

이 형성된다. 발광은 일중항 상태에서 형광이 관측되며 삼중항에서는 인광이 관측된다. 인광은 상온에서 열적 전이가 일반적이어서 관측이 되지 않으며 극저온 상태에서만 관측되는 것으로 알려져 왔다. 이러한 이유로 유기 EL 소자(OLED)의 내부 양자효율은 최고 25%라고 알려져 있었으며 형광소자 중심으로 연구가 많이 진행되어 왔다. 하지만 Princeton 대학의 S. R. Forrest 교수팀에서 스핀-궤도 결합이 큰 Ir, Pt 등과 같은 무거운 원소를 중심으로 유기물이 배위 결합된 재료가 상온의 삼중항 상태에서 효과적으로 빛을 방출함을 발표함으로서 유기 EL 소자의 양자효율 100%가 가능하게 되었다.[5-8] 이에 따라 인광재료의 개발이 유기 EL 재료 개발자들에게 큰 화두가 되었고, 현재 많은 연구가 진행되고 있으며, 적색과 녹색은 상용화 수준에 와 있다.

3. 인광재료

앞서 인광과 형광의 차이점을 서술한 바와 같이 인광은 이론적으로 형광 대비 4배의 효율 달성(이론적 효율 100%)이 가능하다. 그러나 대부분의 유기화합물은 극 저온(77 k)에서는 인광이 관찰되지만 상온에서는 관찰되지 않으므로 유기 EL 디스플레이로의 적용이 불가능하다고 여겨져 왔다. 그러나 USC의 Thompson 교수와 Princeton 대학의 Forrest 교수는 원자 번호가 큰 이리듐(Ir)이나 플라티늄(Pt) 금속 착물을 사용하면 상온에서도 효율적으로 인광을 얻을 수 있다고 보고한 이후, 많은 유기화학 및 무기화학 화학자들이 인광에 대한 연구를 하고 있다. 현재까지 보고된 금속으로는 Ir, Pt, Os,[9] Re, Eu, Tb 등을 이용한 유기금속화합물이 알려져 있으며, 대표적인 적색, 녹색 및 청색 인광 재료의 구조는 **그림 3**과 같다.

특히 Ir 착물을 이용한 인광 재료의 연구가 가장 활발히 이루어져 적색 및 녹색 발광 재료는 상업화하기에 충분한 수명(>20,000 h) 및 효율(Red~12 cd/A, Green ~40 cd/A)이 달성되었으며, 일본의 Pioneer사에서는 녹색 인광을 사용한 카오디오 제품을 판매하고 있다.

본 원고에서는 Ir 착물을 이용한 인광 재료들과 그들의 제조방법을 소개함으로써 유기화학자들에게 관심을 고취시켜 이 분야의 연구에 대한 자극제가 될 수 있기를 바란다.

1999년 University of Southern Califonia의 M. E. Thompson 교수와 Princeton University의 Forrest

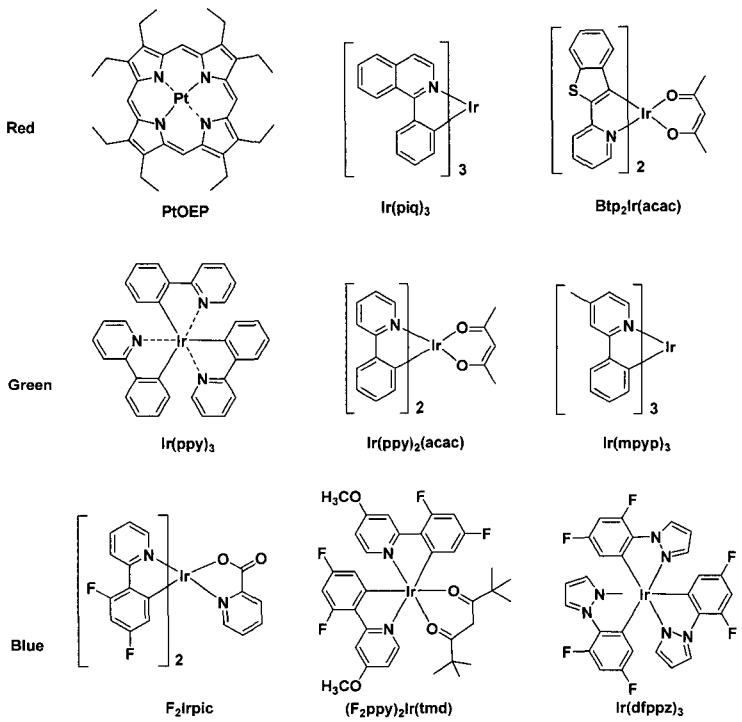


그림 3. 대표적인 적색, 녹색, 청색, 인광 도판트 구조들.

교수는 휘도 100 cd/m^{2}에서 외부양자효율(7.5%, 26 cd/A)와 전력효율이 19 lm/W(4.3 V)를 갖는 녹색 인광 소자를 발표하였다. 소자 구조는 ITO/a-NPD/CBP-6%Ir(ppy)$_3$/BCP/AlQ$_3$/MgAg이며 유기물증착은 10^{-6} Torr의 고 진공하에서 가열 증착하여 소자를 제작하였다. *a*-NPD(4,4′-bis[*N*-(1-napthyl)-*N*-phenyl-amino] biphenyl)는 정공 수송층, BCP (2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline)는 정공 저지층, Alq$_3$는 전자 수송층으로 사용하였으며, 발광층으로 CBP(4,4′-*N,N*′-dicarbazole-biphenyl)를 호스트, Ir(ppy)$_3$ (*facial*-tris(2-phenylpyridine) iridium)를 도판트로 사용하였다. 여기에 사용된 적층구조 및 화학구조는 **그림 4**와 같다.

이러한 고효율 특성은 인광 도판트인 Ir(ppy)$_3$의 삼중항 여기자의 Life time이 2 μs로 짧고, Ir 이온의 강한 스핀-오비탈 결합에 의한 일중항 여기상태(^{1}MLCT)에서 삼중항 여기 상태(^{3}MLCT)로의 계간 전이(Intersystem Crossing)가 일어나기 때문이다. 형광(일중항으로부터의 발광)의 이론적 최고 외부 양자 효율이 5% 내외인(내부양자효율 25%) 점을 감안할 때 혁신적인 결과로 생각된다.

이리듐(Ir) 착물의 입체 화학 구조는 팔면체 구조를 가지며, 색을 결정하는 주 리간드(CN)와 색의 미세 조정(수 나노미터 파장 이동)을 할 수 있는 보조 리간드(LX)로 나눌 수 있다. 주 리간드만으로 이루어진 Ir 착물(Ir(CN)$_3$)이 열역학적으로 안정할 뿐만 아니라 발광효율이 우수하기 때문에 실제 유기 EL디스플레이에 사용되고 있는 것은 대부분 IrL$_3$이다. 그러나 합성이 어려운 단점이 있다. **그림 5**와 같이 Ir 착물의 합성 방법은 두 가지 방법이 있다.[10,11]

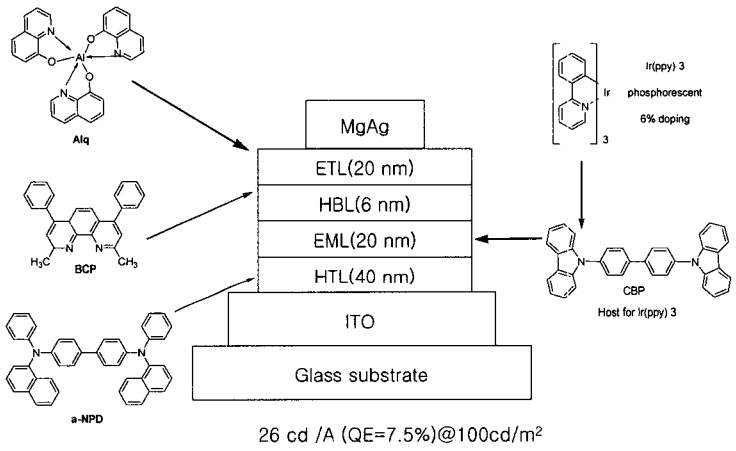


그림 4. 인광 도판트로 Ir(ppy)$_3$를 이용한 녹색 인광 소자 구조.

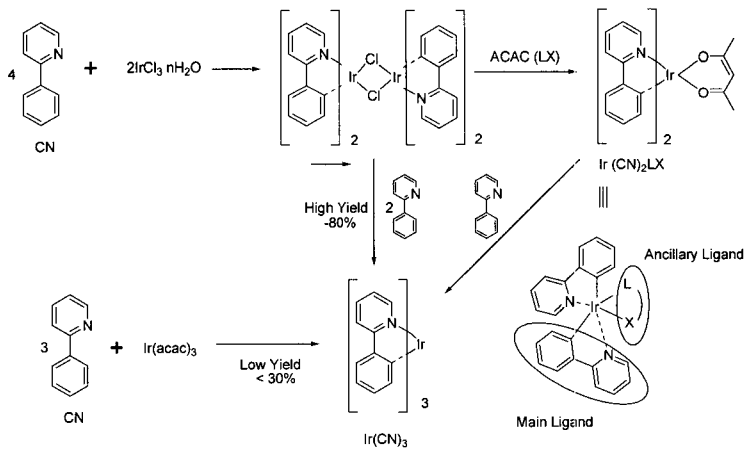


그림 5. Ir(CN)$_2$LX 및 Ir(CN)$_3$의 합성 방법.

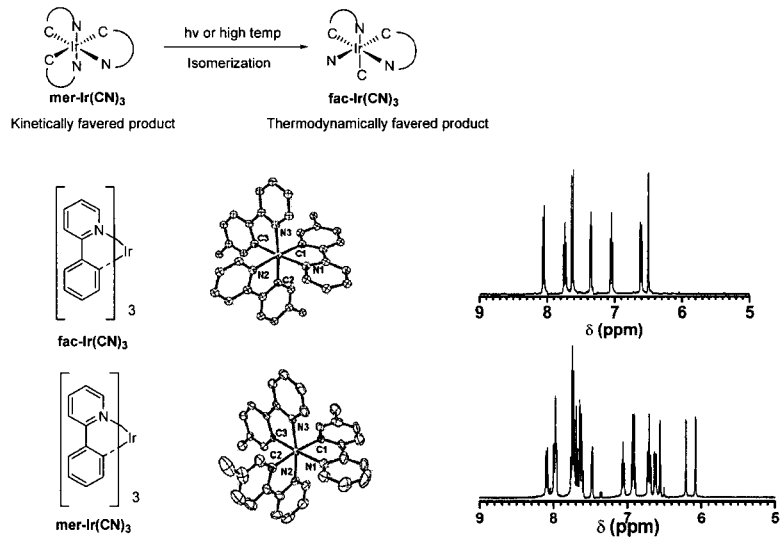


그림 6. $Ir(CN)_3$의 *facial* 및 *meridional* 이성질체의 구조 및 NMR 스펙트럼.

$Ir(CN)_2LX$의 합성은 4몰의 리간드(CN)와 2몰의 $IrCl_3$로부터 얻어지는 이합체 화합물인 중간체인 $(CN)_2Ir(u-Cl)_2Ir(CN)_2$를 통해서 쉽게 얻을 수 있으며, 주 리간드(CN)로 이루어진 tris-cyclometalated Iridium (III)착물인 $Ir(CN)_3$의 경우에서는 $Ir(acac)_3$로부터 1단계를 거쳐서 얻는 것보다 이합체 중간체를 통해서 얻는 것이 합성 수율이 높다. 그러나 우리의 실험 경험에 의하면 리간드의 구조에 따라 facial 이성질체와 meridional 이성질체의 혼합물이 얻어지며, 반응조건에 따라 한 이성질체를 얻을 수 있다. 리간드(CN)가 phenyl pyridine 유도체의 경우 150도 미만에서는 meridional 이성질체가 주생성물로 얻어지며 200도 이상에서는 facial 이성질체가 주생성물로 얻어진다. **그림 6**과 같이 meridional 이성질체는 광 반응 또는 열 반응을 시키면 열역학적으로 안정한 facial 이성질체로 전환 시킬 수 있으며, 두 이성질체간의 구조 확인은 NMR 스펙트럼으로 쉽게 구분이 가능하다.

4-Methylphenyl pyridine 리간드를 이용한 $Ir(CN)_3$의 경우 facial 이성질체(PL 효율: 0.50)가 meridional 이성질체(PL 효율: 0.05)보다 광효율이 10배 이상이다. 따라서 고효율, 장수명 인광소자를 얻기 위해서는 열역학적으로 안정한 facial 이성질체를 얻어야 한다.

대표적인 주 리간드는 페닐피리딘 계열이며 페닐 부분의 전자 밀도를 낮추어 주거나 피리딘 부분의 전자 밀도를 낮추어 주거나, 피리딘 부분의 전자 밀도를 증가시켜 주면 색이 단파장(blue shift)이동, 그 반대인 경우 장파장(red shift)으로 이동한다. 그리고 리간드의 공액

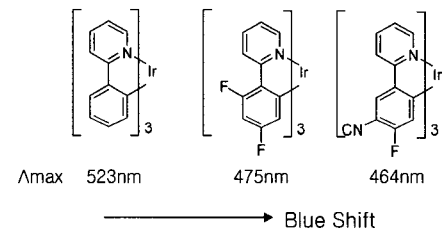


그림 7. 페닐피리딘 리간드의 페닐부분의 전자 당김 치환기에 따른 발광 파장 변화.

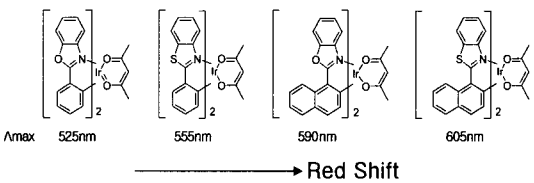


그림 8. 페닐피리딘 리간드의 페닐부분의 전자 당김 치환기에 따른 발광 파장 변화.

정도에 따른 HOMO-LUMO의 에너지 벤드 갭에 따라 색이 변한다. **그림 7**에서와 같이 $Ir(CN)_3$의 리간드의 전자주게 및 당기기 치환기를 도입하여 발광 파장을 조절할 수 있다. 또한 **그림 8**과 같이 리간드의 공액 정도에 따라서도 발광 파장을 조절할 수 있다.

현재까지 개발된 인광 재료의 효율 및 수명 특성은 **표 1**과 같이 적색 및 녹색 인광 재료는 상용화 수준의 수명을 나타내고 있으나 청색 인광 재료는 아직 개발되지 않았다.

청색인광재료의 개발을 위한 현재의 문제점 및 해결되어야 하는 것들에 대해서 간략히 언급하고자 한다. 우선 청색 인광 도판트(발광파장:430~450 nm)에 적합한 호스트의 개발이 이루어져 있지 않다. 적색 및 녹색 인광 호스트로 사용하고 있는 CBP를 청색 인광 호스트로 사용하고 인광 도판트는 색좌표가(0.17, 0.34)를 갖는 하늘색(sky blue)의 F_2Irpic를 사용하였을 경우, 인광 도판트의 삼중항의 LUMO 에너지가 호스트의 삼중항 에너지보다 작아서 효율적인 에너지 전이가 일어나지 않으므로 효율이 낮다.[12] 그래서 2003년도에 Tokito 등은 CBP에 메틸을 치환시켜 삼중항의 LUMO 에너지를 높인 CDBP를 사용하였다. 예상대로 외부 양자효율이 10.4%, 전류효율 20.4 cd/A로 높은 전계 발광 특성을 얻었다(**그림 9**).[13] 그러나 이 경우 수명이 전혀 나오지 않았을 뿐만 아니라 색깔이 하늘색 수준이므로 실제 상용화 수준에 이르기에는 매우 부족하다.

최근에 인광 재료에 대한 원천특허를 갖고 있는 미국의 UDC(Universal Display Company)사가 색좌표(0.15, 0.15) 수준의 청색 인광 도판트를 개발하였다고 비공식적으로 발표하였으나 아직 효율이나 수명은 미비한 수준이라고 이야기하고 있다. 참고로, 청색 발광재료의 상용화 수준은 색좌표(0.15, 0.15)에 수명이 600 cd/m^{2}에서 20,000 시간 정도가 필요하다.

표 1. 인광 재료의 특성 : 수명은 적색 800 cd/m^2, 녹색 1,000 cd/m^2, 청색 600 cd/m^{2}의 밝기에서의 값

색	색좌표(x,y)	전류 효율(cd/A)	수명(h)
적색	0.65, 0.33	12	>20,000
녹색	0.28, 0.63	30~40	>20,000
청색	0.14, 0.21	19	<100

청색의 자료는 2004년 SID에서 UDC사가 발표한 자료임.

4. 고분자 인광 재료

고분자 인광 재료를 사용하는 OLEDs는 spin-coating 방법이나 printing 방법으로의 소자 제작이 가능하기 때문에 경제성 및 대면적화에서 저분자형 OLEDs 보다 유리한 장점을 가지고 있다. 고분자 물질을 사용한 OLEDs는 주로 고분자를 호스트로 사용하고, 저분자 인광재료를 호스트에 도핑하여 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 2001년 Adachi 그룹에서는(TAZ) 3-phenyl-4-(1′-naphthyl)-5-phenyl-1,2,4- triazole에 bis(2-phenylpyridine)iridium(III)acetylacetonate [(ppy)$_2$Ir(acac)]를 도핑하여 제작한 녹색의 OLEDs가 매우 우수한 효율을 나타내었다고 보고하였다.[14] 외부 양자 효율은 19%(ph/el(photo /election))이었으며, power efficiency는 60 lm/W 이었다. 그 외 다른 연구 내용들을 살펴보면, 2002년 Heeger 그룹에서는 (PVK) 2-*tert*-butylphenyl-5-biphenyl-1,3,4-oxadiazole과 nonconjugated poly(vinylcarbazole)에 [Ir(dpf)$_3$]tris(9,9-dihexyl-2-(pyridinyl-2')fluorene)iridium(III)를 도핑하여 외부 양자효율 10% 그리고 전류 효율(luminous efficiency : LE) 이 36 cd/A인 yellow-green PLEDs를 보고 하였다.[15] O'Brien 그룹에서는 호스트 물질로 poly(9,9-dioctylfluorene) 사용하고 도판트로 platinum(II) porphyrins(PtOEP) 사용하여 외부 양자효율 3.5% 그리고 전류효율(LE)가 1.0 cd/A 약간 미치지 못하는 red PLEDs를 보고하였으며,[16] Jiang 그룹에서는 (PFO) poly(9,9-dioctyl-fluorene)와 (PBD) 2-(4-biphenyl)-5-(4-*tert*-butylphenyl)-1,3,4-oxadiazole를 호스트로 사용하고, [(piq)$_2$Ir(acac)] iridium(III)bis(1-phenylisoquinolyl)-N,C$^{2'}$) acetylacetonate를 도핑하여 우수한

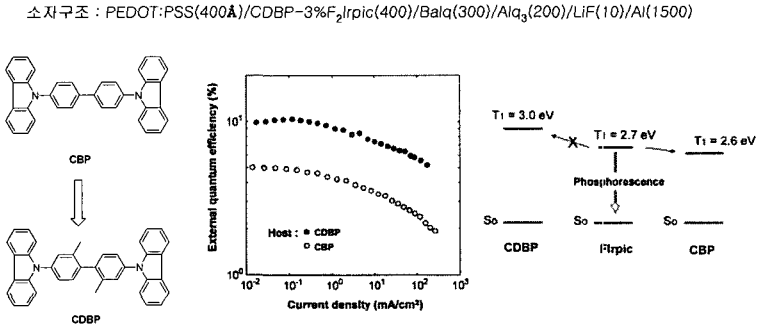


그림 9. 호스트의 밴드갭 증가를 통한 효율 향상.

효율의 red PLEDs를 보고하였다(외분 양자효율 : 12%, 전류 효율(LE) : 5.2 cd/A).[17] 이러한 공액 고분자를 호스트 물질로 이용한 고분자 OLEDs(PLEDs)는 비교적 높은 효율을 보여준다고 인식되고 있다. 그러나 이와 같은 고분자 호스트와 저분자 인광재료의 도핑 시스템은 디스플레이의 제작 과정 중의 나타나는 비경제성, 복잡성 및 높은 전류 밀도 하에서 효율이 빠르게 감소되는 문제점이 해결되어야만 하는 과제로 남아있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 최근의 연구는 iridium 계열의 인광체를 고분자의 주 골격에 직접 도입하여 효율을 개선하려는 연구가 진행되고 있다. Tokito 그룹에서는 알킬 주골격에 diketone을 도입하여 red, green, blue의 인광 고분자를 제조하였다(**그림 10**). 이때 외부 양자효율은 적색은 5.5%, 녹색은 9%, 청색은 3.5%로 높은 양자효율을 보여주고 있다.[18]

그 밖에도 polyfluorene을 주 골격으로 하고, fluorene의 9번 위치에 diketone을 도입한 경우[19] (외부 양자효율 : 1.59% pl/el, 전류효율 : 2.8 cd/A)와 두개의 oligomeric 혹은 poymeric fluorene의 주 골격에 금속 iridium으로 연결한 bis-cyclometalated Ir(III) 착물형태의 인광 고분자(외부 양자효율 1.5% pl/el) 시스템이 보고되었다.[20] 최근에 Yang 그룹에서는 fluorene과 carbazole의 교차 형태를 주 골격으로 하고 carbazole의 *N* 위치에 diketone을 도입하여 노란색에서 적색까지의 인광 고분자 공중합체를 제조(**그림 11**)하여 보고 하였다[21] [적색; 외부 양자 효율:2.3%, 전류 효율 : 1.9 cd/A, 노란색 : 외부 양자 효율 : 1.2%, 전류 효율 : 1.4 cd/A, 소자구조 : ITO/PEDOT/copolymer/Ba/Al].

이와 같은 다양한 형태의 iridium 계열의 인광 고분자는 소자구조의 단순화 및 디바이스 제작 시 경제성 등의 장점을 지니고 있음에도 불구하고, 효율 개선 및 인광

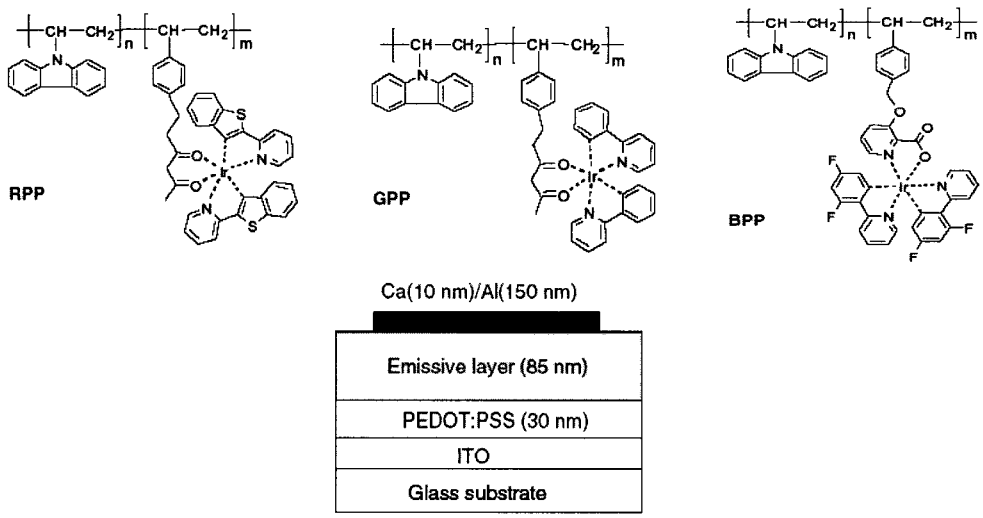


그림 10. 적색, 녹색, 청색 인광 고분자(RPP :red, GPP: green, BPP : blue) 및 소자구조.

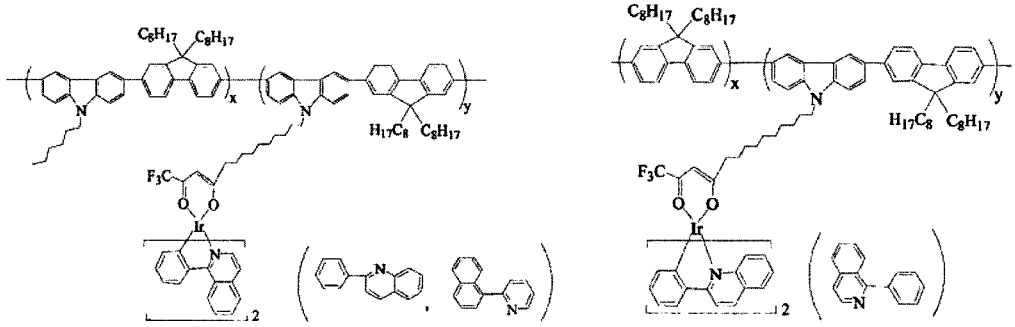


그림 11. Fluorene과 carbazole을 주 골격으로 갖는 인광 고분자.

체의 높은 전류 밀도에서 triplet-triplet annihilation 인한 효율 감소 등이 여전히 해결해야 될 문제점으로 남아있다.

5. 결론

인광 재료를 이용한 유기 EL 디스플레이를 상용화하기 위해서는 청색 인광 재료의 개발이 반드시 이루어져야 하며 이것은 삼성 SDI, LG전자, Sony, Pioneer, Sanyo-kodak, RiTdisplay 등 유기 EL 디스플레이 회사들에게 있어서 최대 이슈 사항이 되고 있다. 따라서 국내 유기 화학자 및 무기 화학자들이 이 분야의 연구를 수행하여 고효율, 장수명 청색 인광 재료를 개발한다면 TFT-LCD에 이어 우리나라가 명실공히 세계 최고 품질의 유기 EL 디스플레이(OLED) 제품을 생산하는 국가가 되리라 확신한다.

참고문헌

1. M. Pope, H. P. Kallmann, and P. Magnate, *J. Chem. Phys.*, **38**, 2042 (1963).
2. C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
3. J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Maackay, R. H. Friend, P. L. Burns, and A. B. Holmes, *Nature*, **347**, 539 (1990).
4. L. S. Hung and C. H. Chen, *Materials Science and Engineering.*, **R 39**, 143 (2002).
5. M. A. Baldo, D. F. O'Brien, M. E.Thompson, and S. R. Forrest, *Phys. Rev.*, **60**, 14442 (1999).
6. M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **397**, 151 (1998).
7. M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **403**, 750 (2000).
8. M. A. Baldo, S. Lamansky, P. E. Burrows, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 4 (1999).
9. Y.-L. Tung, P.-C. Wu, C.-S. Liu, Y. Chi, J.-K. Yu, Y.-H. Hu, P.-T. Chou, S.-M. Peng, G.-H. Lee, Y. Tao, A. J. Carty, C.-F. Shu, and F.-I. Wu, *Organometallics*, **23**, 3745 (2004).
10. S. Lamansky, P. Djurovich, D. Murphy, F. Abdel-Razzaq, H.-E. Lee, C. Adachi, P. E. Burrows, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *J. Am Chem. Soc.*, **123**, 4304 (2001).
11. A. B. Tamayo, B. D. Alleyne, P. I. Djurovich, S. Lamansky, I. Tsyba, N. N. Ho, R. Bau, and M. E. Thompson, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 7377 (2003).
12. C. Adachi, R. C. Kwong, P. Djurovich, V. Adamovich, M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2082 (2001).
13. S. Tokito, T. Iijima, Y. Suzuri, H. Kita, T. Tsuzuki, and F. Sato *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 569 (2003).
14. C. Adachi, M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **90**, 5048 (2001).
15. X. Gong, M. R. Robinson, J. C. Ostrowski, D. Moses, G. C. Bazan, and A. J. Heeger, *Adv. Mater.* **14**, 581 (2002).
16. (1) D. F. O'Brien, C. Giebeler, R. B. Fletcher, A. J. Cadby, L. C. Palilis, D. G. Lidzey, P. A. Lane, D. D. C. Bradley, and W. Blau, *Synth. Met.*, **116**, 379 (2001). (2) P. A. Lane, L. C. Palilis, D. F. O'Brien, C. Giebeler, A. J. Cadby, D. G. Lidzey, and A. J. Campbell, W. Blau, and D. D. C. Bradley, *Phys. Rev. B*, **63**, 235206 (2001).
17. C. Y. iang, W. Yang, J. B. Peng, S. Xiao, and Y. Cao, *Adv. Mater.*, **16**, 537 (2004).
18. S. Tokito, M. Suzuki, F. Sato, M. Kamachi, and K. Shirane, *Org. Electron.*, **4**, 105 (2003).
19. X. W. Chen, J. L. Liao, Y. M. Liang, M. O. Ahmed, H.-E. Tseng, and S.-A. Chen, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 636 (2003).
20. A. J. Sandee, C. K. Williams, N. R. Evans, J. E. Davies, C. E. Boothby, A. Kohler, R. H. Friend, and A. B. Holmes, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 7041 (2004).
21. J. Jiang, C. Jiang, W. Yang, H. Zhen, F. Huang, and Y. Cao, *Macromolecules*, **38**, 4072 (2005).