

OLED 패터닝 및 대면적화 기술

전병두 (단국대학교)

I. 서론

유기 발광 다이오드 (organic light emitting diode, OLED) 소자는 초박형, 풍부한 자연색 재현, 경량 및 기판 일체형 구조 등의 장점으로 액정디스플레이 이상의 우수한 고성능/감성형 디스플레이 및 조명소자로서 자발광형 디스플레이 중 가장 각광받는 차세대 기술이다. 전세계적으로 학계 및 산업체에서 관련된 새로운 고성능 유기재료의 개발, 소자의 전자 물리적 특성, 풀 컬러화 공정기술, 고성능 능동형(active) 소자의 설계 및 제작 공정, 유연(flexible) 박막에의 응용 등 방대한 분야에서의 기술개발이 추진되고 있다. 향후 유연기판에도 적용이 가능한 첨단재료 개발과 고해상도, 색재현성의 대폭적인 개선을 위해서는 무엇보다도 특성이 더욱 우수한 발광재료 등의 개발이 지속적으로 이루어져야 하고 재료의 특성에 대한 이해를 기반으로 한 소자 전기적 구조와 광학구조의 최적화, 유-무기 하이브리드/다양한 interface 구조제어 등도 필요하다. 현재는 효율과 색 재현성이 우수한 증착용 저분자 재료의 개발과 상품화가 활발히 진행되고 있고 향후 대면적 적용에 유리한 습식공정용

저분자 및 안정성이 뛰어난 유-무기 융합구조재료가 구현되면 대형 OLED TV 및 플렉서블 기판에도 손쉽게 제작할 수 있는 OLED가 선보일 것으로 기대한다. 이러한 고성능 OLED 디스플레이의 개발 및 상용화를 앞당기기 위해서는 무엇보다도 우수한 발광 특성과 안정성을 갖는 유기 화합물에 대한 연구개발과 이들 재료를 효과적으로 대면적 박막으로 만들거나 고해상도로 패턴을 형성하는 기술이 중요하다.

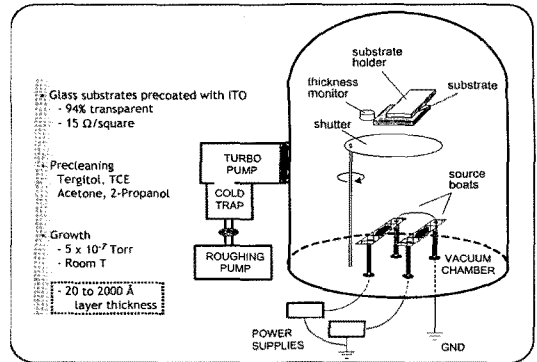
II. OLED 패터닝 기술 동향

재료의 분자량, 용해도 등의 특성에 따라 유기 박막을 형성하는 방법은 진공 증착 공정과 용액 공정, 그 외에 유기 기상 증착법(organic vapor phase deposition OVPD)과 같은 공정으로 분류되어, 분자량에 의한 저분자/고분자의 단순한 분류에 비해 보다 다양하게 구분될 수 있다. 즉, 저분자 OLED 재료의 경우에도 일부는 진공증착법이 아닌 용액공정 및 기타 방법에 의해 소자형성이 가능하게 되었다. 일반적으로는 저분자를 사용하는 경우 양극과 음극 사이에 형성되는 다

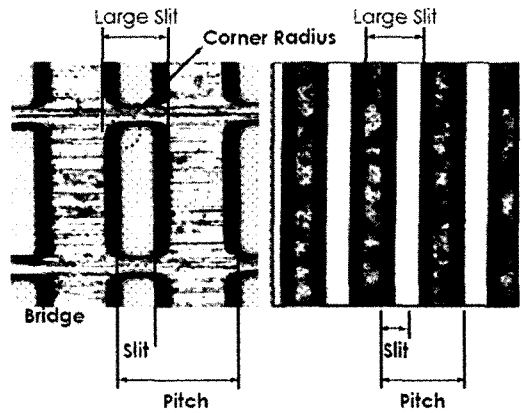
층의 유기박막은 각각의 기능이 매우 세분화되어 있고 고효율의 호스트/도판트형 발광재료, 우수한 정공/전하 수송재료와 주입재료 등이 개발되어 있다. 최근의 저분자 OLED 디스플레이 소자의 급속한 특성과 수명개선은 박막의 두께와 도핑농도 제어에 의한 발광영역의 조절 등 소자의 물리현상에 대한 이해와 그에 기초한 재료 최적화에 힘입은 바 크다. 이에 비해 고분자 OLED에서는 발광고분자의 단일 층에 코팅을 통한 필름 형성성을 높이는 역할, 전하 주입 및 수송능력, 여기자 발생과 발광 등의 여러 기능이 집적화되어있기 때문에, 저분자 OLED에서처럼 combinatorial 적인 해석수법을 취하기 어렵다는 약점이 있다. 그럼에도 불구하고, 본래 고분자와 저분자 모두 기술적으로는 밀접하게 얽혀 있어, 저분자 OLED 에서 연구/개발되는 새로운 인광 발광재료나 엑시톤 밀폐 등의 기법이 고분자 및 하이브리드 형의 소자에 적용되어 대면적의 소자기술 발전을 앞당길 것으로 기대할 수 있다. 본 절에서는 OLED의 풀컬러화를 위해 가장 핵심이 되는 발광층의 RGB 패터닝 기술에 적용되는 다양한 기법의 개발 동향을 소개하고 재료의 종류에 따른 적용 범위를 설명하고자 하였다.

1. 진공/유기 기상 증착용 mask patterning

OLED에서 가장 일반적인 화소 형성방식은 진공챔버 안에서 fine metal mask (FMM)를 기판에 대해 align 하여 원하는 영역에만 발광층을 형성하는 방식이다. <그림 1> 이러한 방식을 적용할 수 있는 최대 기판 크기는 현재의 액티브형 소자의 양산 공정에서는 4세대 기판의 절반 크기인 460 x 730 mm² 이나 그 이상의 기판 크기에



(a)



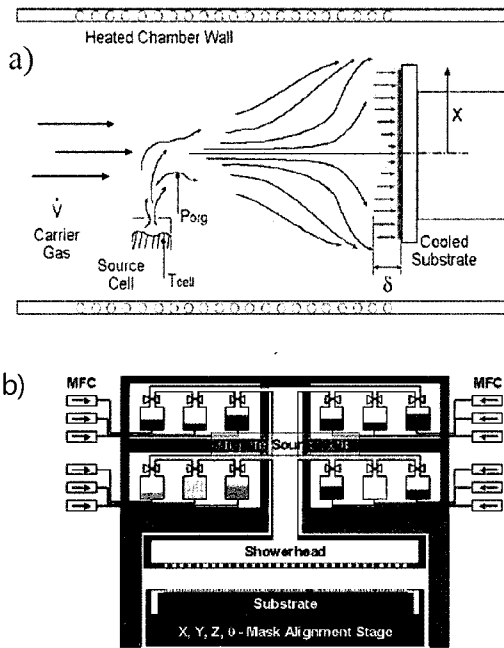
(b)

(c)

<그림 1> 유기물 진공증착 chamber (a), RGB 패턴형성을 위한 FMM의 형상 : dot방식(b) 및 stripe 방식(c)

대응할 수 있는 기술이 개발되고 있다. 기판 크기를 제한하는 요인은, FMM 기술의 특성상 마스크 프레임의 무게, 마스크 스트레칭의 어려움, 마스크 자체의 처짐, 온도에 따른 팽창 등의 원인이 있는데 5 세대 이상의 대면적 적용에 아직까지는 넘어야 할 장벽이 많다고 할 수 있으며, OLED의 대면적 화소 형성을 위해서는 새로운 개념의 공정 및 장비 기술의 개발이 절실히 요구된다.

유기 기상 증착법(OVPD)기술은 캐리어 가스를 이용하여 약한 진공에서 가열, 승화된 증착재료를 이송시키고 기판의 온도를 낮게 하여



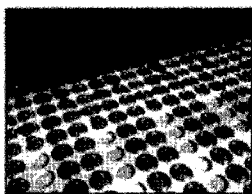
<그림 2> OVPD process의 개념도(a) 및 장비에서 다양한 유기물 source의 위치도(b)

deposition시키는 방법으로, chamber 내벽은 고온으로 유지하여 이송되는 재료가 침착되지 않도록 하여 준다. 변 증착원이 기관의 하부에 위치할 필요가 없이 <그림 2>-(a) 와 같이 기관 옆이나 위쪽에서 재료의 이송이 이루어지도록 구성할 수 있으므로 FMM을 사용하더라도 처짐 등의 문제가 없이 기관 옆이나 위에 위치시켜 대면적이 용이하기 때문에 대면적의 OLED 패터닝 공정에 적용할 수 있다. <그림 2>-(b)에서는

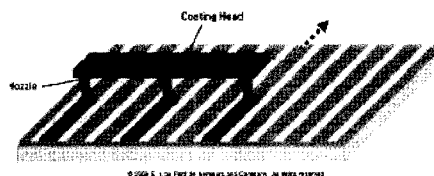
OVPD 증착에 의해 다양한 재료의 박막 형성이 가능하도록 할 수 있는 장비의 개념도를 보여주고 있다

2. 잉크젯 및 용액공정용 patterning

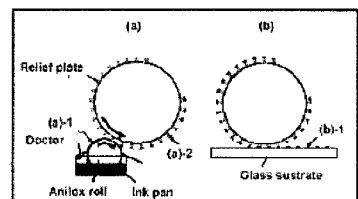
이미 많은 종류의 RGB인쇄방법이 용액형 full color AMOLED의 제작을 위한 공정기술로 보고되었으며 [2~4], 그라비어 인쇄법 등은 저가격/고속생산이 가능한 OLED 조명소자용 공정으로 매우 적합하다. 이들 중 잉크젯 인쇄공정의 기술 개발이 가장 먼저 시작되었고 Cambridge Display Technology (CDT) Seiko-Epson, Sumitomo 화학, 삼성전자 등의 산업계에서 현재까지 150~200ppi급의 고해상도 및 40인치 이상의 대면적 디바이스의 시연에 성공하였으나 상업화를 위한 고분자 발광재료의 개발이 미흡한 수준이다. 또한 잉크젯의 경우에는 용액으로 형성된 고분자 또는 저분자 재료를 사용할 수 있는데 이 기술 또한 현재 사용 가능한 재료의 특성 문제와, 프린팅 시 노즐 막힘, 픽셀 내 불균일도 등의 문제로 대형화에 어려움을 겪고 있다. 용액인쇄(solution printing) 기법이다. 잉크젯/그라비어 공정에서는 용액과 기관 사이의 표면장력이 잘 제어되어야 하고 인쇄된 패턴의 형상을 균일하게 만들기 위하여 최적용매의 선택이 매우 중요하다. 듀폰



SID09 Digest, EPSON



FINETECH JAPAN 2009, DuPont



SID06 Digest, Toppan Printing, p.1467

<그림 3> 잉크젯, nozzle jetting 및 gravure printing에 의한 RGB 패터닝 공정도

사에서 최근 발표한 용액공정 OLED를 위한 노즐프린팅(nozzle printing)은 기판/유기막과 액적(drop) 사이의 표면장력에 민감한 잉크젯 공정의 대안으로서 제시되고 있으며 성공적으로 개발이 이루어지면 용액공정 OLED의 대형화 및 full color화에 기여할 것으로 생각된다.

3. 레이저 전사형 패터닝

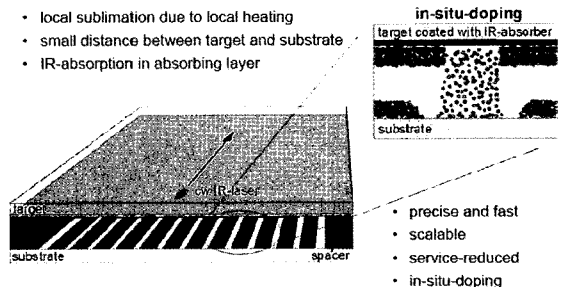
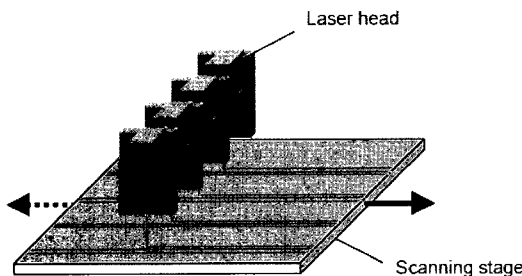
레이저 전사법은 도우너 기판 상에 증착 재료나 용액 재료를 성막한 후 하부 기판과 합착하여 광학 스테이지 위에서 레이저의 스캔에 의해 패터닝이 이루어지는 방법으로써, 현재 많은 관심을 끌고 있는 방법이다. 그러나, 레이저 전사법도 도우너 기판이라는 부가적인 부품이 필요하고, 전사 시 계면열화에 의한 디바이스의 특성 저하 등의 문제가 남아 있다. 또한 도우너 기판 뿐 아니라 레이저 시스템, 그리고 전사용 재료 등 여러 가지 인프라가 다른 기술에 비해 약하다는 단점이 있다. 레이저 전사법을 이용한 용액공정 AMOLED의 제작은 삼성/3M, 듀폰사 등에서 전개되었으나 현재는 레이저 전사용 필름에 증착 재료를 도포하여 형성하는 소자 기술로 개발 방향이 집중되고 있다. LIPS (Laser Induced Pattern-wise Sublimation) 라고 명명된 공정은

일본의 Sony사에서 발표하여, 레이저 스캔기술을 동일하게 RGB 유기물질의 대면적 patterning에 적용하였다. 이와 유사하지만 LILT (Laser Induced Local Transfer) 라고 하는 기술은 진공 중에서 IR 레이저가 유기막이 증착되어 있는 기판을 스캐닝하면 금속층이 빛에너지를 흡수하여 열이 발생하고, 이 열에 의해 증착된 유기막이 하부의 기판으로 성막되는 원리를 이용한 것이다.

III. 대면적 OLED용 습식재료의 기술동향

1. 발광층 형성을 위한 용액용 OLED재료

발광층의 형성을 위한 형광 고분자계 재료의 경우 Poly(phenylene vinylene)계 재료 <그림 3> 사용시 발광 색깔은 녹색(G), 황색(Y), 주황색(O), 진홍색(OR)을 구현할 수 있다. [5] Orange-red 재료는 alkoxy 등 electron donating 그룹을 phenyl ring에 붙여 얻을 수 있으며 green 발광재료는 electron donating 그룹이 없거나 silyl 치환체를 갖는 구조로 제작이 가능하다. 대표적인 황색(Y)재료에서는 발광스펙트럼이 넓기 때문에 컬러필터로 분광을 해 R과 G의 표시



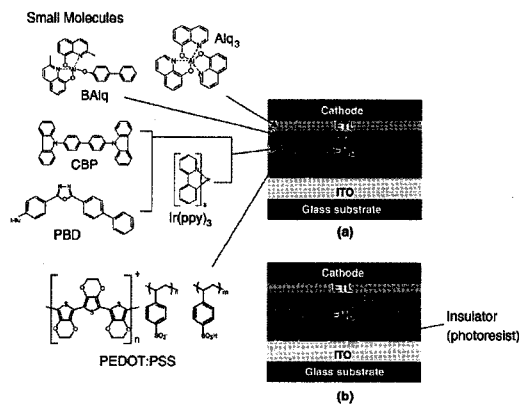
〈그림 4〉 LIPS (left) 및 LILT (right) 공정기술의 개념도

도 가능하며, 고분자 유기 EL 재료 중에서도 가장 긴 수명을 갖는 재료 중 하나이다. Polyfluorene 계 재료는 9-alkyl 혹은 9,9-alkyl-fluorene 계로 출발하였으나 이후 Suzuki coupling 방법에 의한 고분자량, 고순도의 재료들의 합성이 가능하게 되면서 많은 종류의 발광재료들이 보고되기 시작하였다.^[6] Poly-Spiro-Fluorene (폴리스피로 플루오렌)계 재료는 Merck사에서 개발되고 있으며, 상하 2개의 플루오렌 고리가 직교한 부피가 큰 모노머 유닛을 특징으로 한다. 이로 인한 입체장해 효과는 방향고리의 스택킹을 불가능하게 해, 고분자 사슬의 회합을 막아, 화학안정성과 색도좌표 온도안정성에 기여한다. 또한, 유리전이온도가 높기 ($T_g=160\sim 230^\circ\text{C}$) 때문에 막의 열 안정성이 높다. 나아가, 측면사슬인 플루오렌 고리를 색도조정과 전자수송능력 개선에 이용할 수 있다는 점도 뛰어나다. PF계 고분자는 뛰어난 발광재료로서, 호모폴리머계 재료는 청색발광을 나타내며 이후 여러 가지 공중합체가 합성되면서 황, 녹, 적색에 이르기까지 장수명의 재료가 보고되고 있다. 따라서 풀컬러용 RGB삼색의 조색이 가능해졌으나, 녹색 재료의 색도와 청색 재료의 색도와 수명이 과제이다. Poly(phenylene):(PPP)계 재료는 분자의 밴드갭 (band-gap, E_g) 이 넓으므로 폴리플루오렌계 고분자와 함께 주로 청색 발광 재료 쪽의 연구가 많이 진행되었다^[7]. 역시 유기 용매에의 용해도가 낮아 precursor route에 의한 PPP합성 및 bulky한 치환체를 도입한 PPP의 합성 등의 방향으로 연구가 이루어지고 있다.

비공액 고분자를 이용하는 경우 인광재료의 고효율 특성을 얻기 위하여 호스트-도판트의 이중 블렌드 혹은 호스트-도판트 일체형태의 재료 등이 개발되었다. Band Gap이 넓은 고분자 재료

를 호스트로, 인광 발광재료를 도판트로 이용하는데 공액계 고분자에서는 일반적으로 E_g 가 작기 때문에, 녹색-청색의 발광 인광도판트의 호스트에는 쓰기 어렵다. 비교적 E_g 가 낮은 비닐폴리머인 poly(vinyl carbazole):PVK를 이용하는데^[8]가 있으나 단순히 저분자 인광 발광재료를 PVK 안에 용해 분산시킨 것, 측면사슬에 통합시킨 것 등 모두 효율과 수명이 아직까지는 좋지 못하는데, 이후 다양한 올리고머로 구성된 호스트 재료가 시도되고 있다 (다음 절에 소개) 4,4'-N,N'-dicarbazole-biphenyl (CBP) 나 2-Phenyl-5-(4-biphenyl)-1,3,4-oxadiazole (PBD) 와 같은 저분자 호스트 재료와 PVK등의 고분자를 혼합하여 박막형성 및 소자특성을 향상시키고 전사법 등을 통해 풀칼라 소자의 패터닝을 가능하게 만든 연구^[9]도 시도되었다 <그림 5>.

저분자형 일반적인 적색/녹색 인광소자용 호스트의 경우 카바졸(carbazole) 단위를 포함하는 재료들이 많이 사용되고 있으며 이는 전자수송성에 비해 정공수송성이 큰 호스트로 분류될 수 있다. 반면 TPBi(1,3,5-tris(phenyl-2-benzimidazolyl))



<그림 5> 저분자 (CBP 혹은 PBD) 및 고분자(PVK) 호스트를 사용한 용액공정 OLED의 소자구조 (a) 스펀코팅 (b) 레이저전사법으로 패터닝을 위한 소자

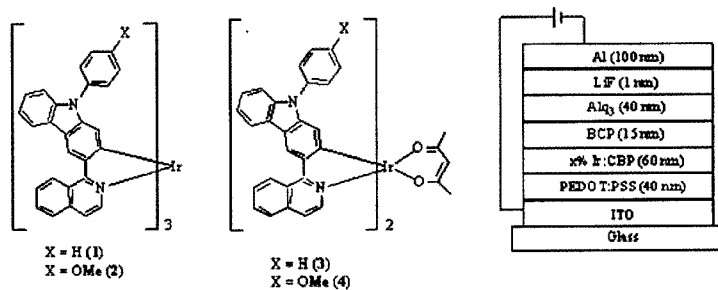
-Benzene), TAZ(3-(4-Biphenyl)-4-phenyl-5-tert-butylphenyl-1,2,4-triazole), PBD 계열의 재료들은 전자 수송특성이 더 우수한 호스트 재료들이다. 이외의 새로운 인광호스트용 재료로 quinoline 및 pyridine 유도체를 포함하는 화합물도 개발이 추진되고 있다. 이들 저분자 호스트에 용액공정이 가능하도록 알킬기 등의 가용성 부분을 도입할 수 있으나, 성능 및 열안정성 저하가 쉽게 나타날 수 있고, 특히 비정질성을 향상시키기 위하여 비대칭구조를 갖도록 분자구조를 설계하는 것이 필요하다. 아래 도와 같이 호스트 고유의 성질을 유지하는 function unit과 용해성 유지를 위한 soluble wing의 위치배열에 대한 최적화를 통해 우수한 특성의 저분자 호스트를 개발하고자 하는 연구가 국내외 학계 및 연구기관에 의해 활발히 추진되고 있다.

인광소자의 경우 여기자의 lifetime 및 확산거리와 정공확산이 아무래도 형광소자에 비해 크기 때문에 발광층 내에 전하 및 여기자를 효과적으로 분포하도록 하기 위해서는 정공/전자 이동도를 대략적으로 맞춘 용액공정용 재료를 개발하거나 두가지 이상의 호스트재료를 혼합하여 이동도를 적절히 맞추면서 다양하게 분포하는 전하트랩(trap)에 의한 발광영역 제한 구조를 설계하는 방법이 효율 및 수명의 향상에 유리하다.

이와 같은 복합 호스트 구조 및 전하트랩 제어구조는 도판트의 전하수송특성, 도판트의HOMO/LUMO, 삼중항 에너지 준위, 도판트의 극성 등 과도 밀접하게 연관되어 있다. 도판트의 경우 일반적으로 발광층 내에 소량 들어가므로 증착용 재료와 함께 용액공정이 가능한 화학구조들이 제안되었다. <그림 6>에 홀 전도성을 갖는 9-Arylcarbazole 기가 포함된 적색 인광 Ir-complex의 화학구조 및 소자형성도를 나타내었다. 증착형은 12%, 용액공정형은 8% 수준의 외부양자효율과 CIE 1931 (0,67, 0,33)~(0,68, 0,32)의 순적색을 보고하였다^[10].

2. 용액공정 OLED를 위한 수송층/Buffer재료

PEDOT:PSS에서 고분자발광층으로의 S 혹은 SO₂기의 확산으로 인해, 고분자가 가교 내지 용매 난용성으로 변화해 발광효율이 떨어진다고 생각되며, 인듐의 확산으로 인한 특성 저하도 보고되고 있다. 이를 피하기 위해서 공액고분자를 사용한 홀주입/수송층용액을 적층으로 도포하는 방법이 제안되었다. poly(9,9'-dioctylfluorene-co-N-(4-butylphenyl) diphenylamine) (TFB), poly(9,9'-dioctylfluorene-co-bis-N,N'-(4



<그림 6> 진공증착 및 용액공정이 가능한 Ir-complex계열의 적색 인광도판트^[14]

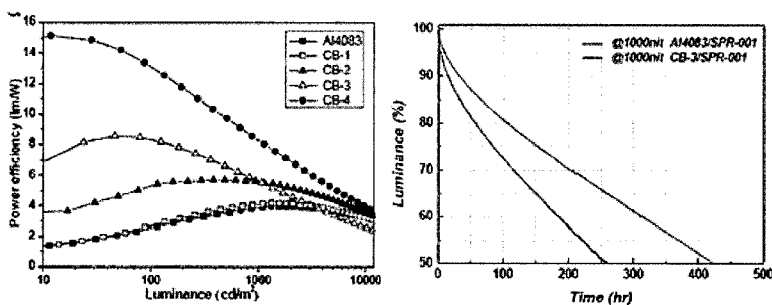
-ethoxycarbonylphenyl)-bis-N,N'-phenyl-benzidine (BFEC) 혹은 4,4-bis[(p-trichlorosilyl-propylphenyl)phenylamino] biphenyl (TPDSi₂) 등의 고분자 박막을 PEDOT:PSS와 용액공정용 발광층 사이에 1~5nm 사이의 계면층(Interfacial layer) 두께로 연속 코팅공정에 의해 형성하여 소자의 효율과 수명을 상당히 향상시킬 수 있는데^[11], 이 방법은 대면적 소자에도 재현성 있게 사용될 수 있으나 용액용 인광소자에도 적용할 수 있도록 높은 삼중항 에너지를 갖는 interface 층 재료는 아직 미흡하다. 따라서 새로운 전하수송재료의 탐색개발도 필요하다. 유기용매를 사용하는 정공주입/수송층을 형성하고 열처리에 의해 이를 가교시켜 적층이 가능하도록 할 수 있으며 옥사텐(oxatene) 기를 사용한 가교성질의 홀수송층을 도입하여 58lm/W의 용액공정 녹색인광소자 효율이 보고되었다^[12]. 수용성/유기용매성 용매직교(solvent orthogonality) 성질을 그

대로 사용하는 경우에는 앞서 소개한 것처럼 미국의 듀폰(Du Pont)사에서 보고한 정공수송재료가 기존의 PEDOT:PSS에 비해 세 배 이상의 소자 수명과 높은 발광효율을 보고하고 있다^[13]. PEDOT:PSS의 이온 complex 타입의 전도성 고분자 구조를 변형시켜 고유결합이 전도성 고분자 unit과 고분자 산(polymeric acid) 사이에 존재하도록 하여 전기화학적 안정성 및 PSS의 해리를 방지하도록 하는 재료합성 기법이 사용되었고, <그림 7>에 나타낸 바와 같이 PH와 일함수(work function)의 조절이 가능하며 최적 조성의 buffer를 홀주입층으로 사용한 용액공정형 고분자 OLED에서 효율과 수명이 크게 향상되는 결과를 보고하고 있다^[14].

3. 용액공정용 올리고머 및 덴드리머

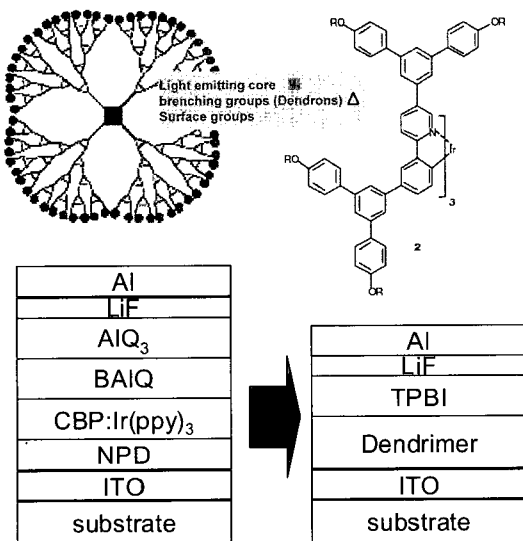
여러 가지 올리고머/폴리머 형태의 인광호스트

Sample code	Hydrophobic moiety (mol%)	Ratio (polymer/EDOT)	pH	Work-function (eV)
AI4083	0	6/1	1	5.2
CB-1	5	6/1	2	5.5
CB-2	5	4/1	3	5.5
CB-3	>30 ^a	6/1	3	5.6
CB-4	30	4/1	3	5.6



<그림 7> PEDOT:PSS에 소수성기 성분을 함유한 첨가물을 고분자산 형태로 도입하여 만들어진 buffer재료의 물성 및 소자 특성 향상의 결과 [14]

재료를 이용하여 PVK와 저분자 호스트의 혼합물의 단점인 낮은 소자효율 및 수명을 극복하고자 하는 연구가 발표되었다. 카바졸(carbazole)계의 단일 및 공중합체를 이용하여 합성된 용액 공정용 고분자 인광 호스트들의 삼중항 에너지 준위/밴드갭 특성과 이를 이용한 소자효율 등의 관계가 보고된 바 있다^[15]. Core, branching, Surface group으로 구성되는 덴드리머 기반의 인광재료의 경우에는 기본적으로 삼중항-삼중항 여기자 소멸(triplet-triplet annihilation)이 적고 전하수송 특성과 발광효율의 간섭을 적게 할 수 있는 분자구조 설계가 가능하여 높은 색순도와 고효율 특성을 얻을 수 있다. 호스트가 없는 단일성분의 덴드리머 발광층만을 사용하여 보다 간단한 소자 제작 공정을 구현할 수 있다는 것을 장점으로 내세울 수 있으나 <그림 8> 아직까지는 연구개발 초기단계로 전세계적으로 몇몇 그룹만이 연구에 참여하고 있어 소자의 작동수명 등에 대한 보고는 거의 이루어지지 않았다.



<그림 8> Dendrimer 발광층의 구성 및 단순화된 OLED 소자구조^[16]

IV. 결론

다른 디스플레이와는 달리 OLED 소자의 고품질화는 우수한 유기재료의 개발 성과에 크게 의존하고 있다. Mobile 뿐 아니라 대형/대면적 디스플레이에서 TFT-LCD를 능가하는 성능을 얻고 최근 개발필요성이 대두되고 있는 OLED 면광원 소자를 성공적으로 상업화하기 위해서는 낮은 구동전압과 저전력, 고효율/장수명 특성이 확보되어야 하며, 이를 위해서는 인광 발광재료의 채용이 필수적이다. 최근의 저분자 AMOLED의 성공적인 사업화에 따라 관련소재를 사용하는 디바이스의 시장 진입이 더욱 늦어질 가능성도 있으며, 세계적으로는 OLED 및 유기트랜지스터용 재료 부분에서 용액공정이 가능한 물질을 연구/개발하는 회사의 수가 줄거나 타회사에 합병되는 사례가 많다. 그러나 이들 용액공정용 소재는 손쉽게 대형 면적에 도포할 수 있고 상대적으로 간단한 인쇄법에 의해 정밀한 패턴 형성이 가능하므로 차세대 대형, 그리고 유연기판 소자의 적용을 위한 원천기술 획득을 위해서는 절대로 용액공정용 발광 및 기능소재의 개발에 관련된 노력을 게을리해서는 안 된다. 국내 기업 및 연구소, 학계에서는 저분자계 소재를 이용한 상품개발에 보조적으로 사용될 수 있는, 예를 들면 일부 소재의 대체품이나 봉지재, 표면개질 등으로 사용되는 기능성 소재의 상품화부터 시작하여 점차 고효율 발광재료 및 핵심소재의 사업화에 기여할 수 있는 연구개발이 필요하다.

참고문헌

[1] M. Baldo, M. Deutsch, P. Burrows, H.

- Gossenberger, M. Gerstenberg, V. Ban, S. Forrest, *Adv. Mater.*, 10, 1505 (1999).
- [2] Y. Iizumi, Y. Kobayashi, T. Tachikawa, H. Kishimoto, K. Itoh, H. Kobayashi, N. Itoh, S. Handa, D. Aoki, and T. Miyake, *SID 2007 Digest*, Vol.38, 1660 (2007).
- [3] M.C. Suh, B. D. Chin, M.-H. Kim, T.M.Kang, S. T.Lee, *Adv. Mater.*, 15, 1254 (2003).
- [4] S. T. Lee, M. C. Suh, T. M. Kang, Y. G. Kwon, J. H. Lee, H. D. Kim, and H.K. Chung, *SID 2007 Digest*, Vol.38, 1588 (2007).
- [5] H. Becker, H. Spreitzer, K. Ibrom, W. Kreuder, *Macromolecules*, 32, 4925 (1999).
- [6] M. T. Bernius, M. Inbasekaran, J. O'Brien, W. Wu, *Adv. Mater.* 12, 737 (2000).
- [7] D. Gin, V. Conticello, *Trends Polym. Sci.* 4, 217, (1996).
- [8] S. Tokito, M. Suzuki, F. Sato, M. Kamachi, K. Shirane, *Organic Electronics* 4, 105 (2003).
- [9] M.-H. Kim, M. C. Suh, J. H. Kwon, B. D. Chin, *Thin Solid Film*, 515, 4011 (2007).
- [10] C.-L. Ho, W.-Y. Wong, Z.-Q. Gao, C.-H. Chen, K.-W. Cheah, B. Yao, Z. Xie, Q. Wang, D. Ma, L. Wang, X.-M. Yu, H.-S. Kwok, Z. Lin, *Adv. Func. Mater.* 18, 319 (2008).
- [11] B. D. Chin, N. S. Kang, J.-W. Yu, S. M. Jo, J. Y. Lee, *J. of Appl. Phys.*, 102, 024506 (2007).
- [12] N. Rehmann, C. Ulbricht, A. Koehnen, P. Zacharias, M. C. Gather, D. Hertel, E. Holder, K. Meerholz, U. S. Schubert, *Adv. Mater.* 20, 129 (2008).
- [13] S. H. Kim, *Digest of Technical Papers, International Meeting of Information Display (IMID)* 1044 (2005).
- [14] D.H.Huh, J. W.Lee, E. S. Kang, M. Chae, *SID 2008 Digest*. Vol.39, 1985 (2008) Los Angeles.
- [15] A. vanDijken, J. J. A. M. Bastiaansen, N. M. M. Kikken, B.M. W. Langeveld, C. Rothe, A. Monkman, I. Bach, P. Stossel, K. Brunner, *J. AM. CHEM. SOC.* 126, 7718 (2004).
- [16] S.-C. Lo, R. E. Harding, S. G. Stevenson, R. N. Bera, P.L. Burn, I.D.W. Samuel, *Adv. Funct. Mater.* 18, 3080 (2008).

저자소개



진 병 두

1994년 연세대학교 공학사
2000년 한국과학기술원 공학박사
2000년~2001년 University of Massachusetts at
Amherst, Post-doc
2001년~2005년 삼성SDI 책임연구원
2005년~2009년 한국과학기술연구원 선임연구원
2009년~현재 단국대학교 고분자시스템공학과 조교수