

용액공정 OLED 기술 동향

육경수(성균관대학교 화학공학/고분자공학부)

1. 서 론

용액공정을 이용한 OLED 제조 기술은 OLED 디스플레이와 OLED 조명에 모두 이용이 가능한 기술로, 진공증착 공정과 비교 할 때 높은 재료 사용 효율, 낮은 설비 투자비용, 대면적화에 유리 등의 장점들을 가지고 있어, OLED 제조 단가를 크게 낮출 수 있다. 특히 진공 증착 공정은 대면적화 됨에 따라 생산 장비의 가격이 기하급수적으로 증가하여 제조 단가의 증가는 피할 수 없다. 그렇기 때문에 TV와 같은 대면적 디스플레이 시장의 가격 경쟁력과 저가 양산 공정이 필요한 조명 시장 진출 및 시장 확보를 위해서는 용액공정을 이용한 OLED 제조 기술이 가장 적합한 기술이라고 이야기 할 수 있다. 하지만 용액공정을 이용한 OLED의 경우 증착 공정을 이용한 OLED와 비교 하였을 때 수명 특성과 효율 특성이 아직은 부족한 실정이다. 용액공정을 이용한 OLED의 수명 특성 및 효율 특성을 증착 공정과 유사하게 구현하기 위해서는 용액공정에 적합한 용해도를 가지는 재료기술, 박막 형성과정에서 균일한 막을 형성하기 위한 박막 형성기술, 박막 형성 후 박막 내부에 존재 하는 잔류 용매 제거 기술 등 용액공정 기술 개발이 필요하다.

본 서에서는 용액공정용 OLED 재료의 요구 조건 및 용액공정 OLED 소자와 용액공정용 OLED 재료 개발 동향에 대하여 논하고자 한다.

2. 용액공정 소자 기술

2.1. 용액공정용 OLED의 구조

OLED의 기본적인 구조는 양극(anode), 정공 전달층(hole transport layer), 발광층(emission layer), 전자 전달층(electron transport layer), 음극(cathode)으로 구성되어 있다. 소자의 특성을 향상 시키기 위하여 정공 주입 및 전달에 있어 효과적인 정공 주입을 위하여 정공 주입층(hole injection layer)/정공전달층의 2층 구조를 사용하거나, 발광층에서 생성된 엑시톤이 낮은 에너지를 가지는 전하 전달층에서 소광(exciton quenching) 되는 것을 막기 위하여 발광층과 전하 전달층 사이에 엑시톤 방지층(exciton blocking layer)를 형성한 구조와 같은 다층 박막 구조를 사용 할 수 있다. OLED의 효율 특성을 향상시키기 위해서는 발광층으로 주입되는 정공과 전자의 균형이 중요하며, 발광층 내부의 전하 균형을 조절하는 방법으로는 위에 언급한 다층막 구조와 혼합 호스트 구조가 있다. 혼합호스트 구조는 정공전달 특성을 가지는 호스트 재료와 전자 전달 특성을 가지는 호스트 재료를 혼합하여 사용하는 구조로 발광층으로 정공과 전자를 균있게 주입하여 효율을 증대 시킬 수 있다. OLED의 특성을 향상 시킬 수 있는 다층막 구조와 혼합 호스트 구조는 용액공정 OLED에도 적용이 가능한 기술로 개발 되고 있다.

2.2. 다층막 구성 기술

물리적인 기상 증착법인 진공증착은 다층의 박막 구조를 형성하는데 있어 박막 형성문제가 발생하지 않지만, 용매를 이용하는 용액공정은 다층 구조를 형성하는데 있어 하부에 이미 형성된 박막이 상부막 형성 시 상부막 잉크에 사용 되는 용매에 의해 용해되는 문제가 발생 할 수 있다. 특히 하부막이 완전히 용해되어 제거되지 않더라도 서로 다른 두 층의 일부가 섞이는 현상은 조절이 어려워 소자의 특성을 분석 하는데 어려움이 있을 수 있다.

용액공정을 이용한 다층막 구성 기술로는 재료의 용해도 차이를 이용하는 방법이 있다. 정공주입층 재료로 가장 많이 이용되고 있는 poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate(PEDOT:PSS)는 물에 용해 가능한 재료로써 정공전달층 및 발광층에 주로 사용되는 유기 용매에는 용해되지 않는 특성을 가지고 있어 PEDOT:PSS 박막 위에 유기 용매에 용해한 정공 주입층 또는 발광층을 용액공정을 이용하여 쉽게 다층 박막 구조를 형성 할 수 있다[1]. 또한 고분자 재료의 분자량 차이에 따른 용해도 차이를 이용하여 다층 구조를 형성 할 수 있다. Toluene에 대한 용해도가 매우 낮은 중량평균분자량 1,100,000의 poly(n-vinyl carbazole)(PVK)를 chlorobenzene에 용해하여 정공전달층으로 사용하고 toluene에 대한 용해도가 높은 중량평균분자량 43,000~90,000의 PVK를 발광층의 호스트로 이용하여 다층 구조의 소자를 개발 하였다[2]. PVK를 정공전달층 또는 발광층으로 사용하고 PVK 박막 위에 저분자 발광층 재료를 2-propanol에 용해하여 다층 구조를 개발 하였으며, 고분자 재료인 PVK가 알코올에 용해되지 않는 특성을 이용한 다층 구조 형성방법이다[3]. 앞선 연구들은 발광층까지 용액공정을 이용하여 다층 구조를 형성 하였으며, 전자전달층은 진공 증착 공정을 이용하여 소자를 개발 하였다. 전자전달층까지 용액공정을 이용하여 형성하기 위해서는 전자전달층에 사용되는 용매는 발광층을 용해시키지 않는 용매를 사용하여야 한다. formic acid와 물의 혼합 용매는 PVK를 이용한 발광층을 용해시키지 않으며, 저분자 물질을 formic acid와 물의 혼합 용매 또는 methanol과 물의 혼합 용매에 용해하여 전자 전달층을 용액공정으로 형성한 OLED 소자를 개발 하였다[4,5]. 이 연구에서는 금속 음극을 제외한

모든 박막층을 용액공정을 이용하여 형성 하였으나, 물을 용매로 사용하여 소자의 안정성 확보는 어려울 것으로 판단된다. 고분자를 사용하지 않은 저분자 재료만을 이용하여 다층막을 구성할 경우 재료가 용매에 대해 용해도가 매우 작다고 하여도 상부막 형성과정에서 용해되는 문제는 피할 수 없는 것이 일반적이다. 하지만 최근 저분자 재료의 분자량에 따른 알코올에 대한 용해도 연구를 통해 저분자 재료의 분자량이 일정 이상일 경우 알코올 용매에 대한 용해도를 최소화 할 수 있다는 연구 결과가 보고되었다[6].

용액공정을 이용하여 다층막을 구성할 수 있는 또 하나의 방법은 경화를 통해 용해 가능한 박막의 용해도를 최소화 시키는 방법이다. 고분자 또는 저분자 재료 화학 구조 말단에 perfluorocyclobutane, styrene, oxetane과 같은 경화 가능한 단위체를 도입함으로써 박막 형성 후 열경화 또는 광경화 공정을 통해 용매에 녹지 않는 막을 형성 하는 것이 가능하다. 경화형태의 박막공정은 주로 정공전달층 재료에 사용 되어 다층 OLED 박막 구조를 형성한다. 정공 전달층 재료 부분에서 경화형 재료에 대해 더 살펴보도록 하겠다.

마지막으로 언급 할 다층 박막 구성 기술은 스탬프를 이용한 스탬프 전사법이다. 스탬프 전사법은 다른 기관에 용액공정으로 박막을 형성 한 후 스탬프를 이용하여 기관으로부터 떼어내어 이미 박막이 형성된 기관에 전사하는 방법과, 스탬프 위에 용액공정을 이용하여 박막을 형성한 후 이미 박막이 형성된 기관위에 전사하는 방법이 주로 사용되며, 스탬프에서 기관위로 전사하는 과정에서 열과 압력을 가하여 하부 박막의 손상 없이 상부 박막을 형성 할 수 있는 기술이다. 스탬프 재료로는 poly(dimethylsiloxane)(PDMS)와 polyurethane acrylate(PUA) 같은 재료가 주로 사용 되며, 전사 공정에 따라 UV-Ozone 또는 plazma 공정을 통해 표면 개질 후 사용 되기도 한다. 스탬프 전사 공정은 고분자 재료와 저분자 재료 모두에 이용이 가능한 공정으로 각각 연구 결과가 보고되었다. 고분자 재료를 스탬프 공정을 이용하여 전사 할 경우 스핀 코팅 방법을 이용하는 것 보다 수명 특성이 향상된 연구 결과가 보고되었다[7]. 저분자 재료의 경우는 표면 개질한 PDMS 스탬프 위에 직접 전자 전달층 잉크를 코팅 하였고 코팅된 전

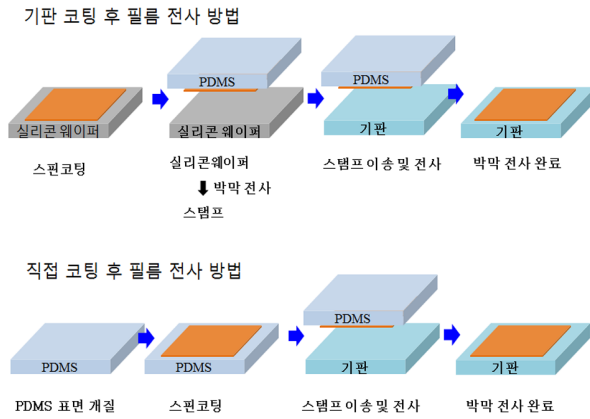


그림 1. 스탬프 전사 방법 모식도

자 전달층을 발광층 위에 전사 하는 방법으로 다층막을 형성하였다[8]. 저분자 재료를 이용한 스탬프 전사 방법은 연구 결과를 쉽게 찾아보기가 어렵다. 이와 같은 다층막 형성 기술은 용액공정을 이용한 OLED 개발에 있어 소자의 특성을 향상시키기 위한 기술로 많이 연구되고 있다.

3. 용액공정 재료 기술

용액공정은 재료를 용매에 용해하여 잉크화 한 후 스프인코팅, 잉크젯 프린팅, 그라비아 프린팅, 노즐 프린팅, 슬릿 코팅, 스크린 프린팅과 같은 습식 공정을 통해 박막을 형성 할 수 있다. 재료를 잉크화 하는데 있어 가장 중요한 필요 요건은 재료의 용해도이다. 위에 나열한 공정 방법에 따라 용매와 재료의 비율이 달라 질 수 있으나, 용액공정용 재료는 용매 1ml에 대해 10mg 이상의 용해도가 요구 된다. 재료의 용매에 대한 높은 용해도는 박막을 형성하는데 있어 중요한 조건이기는 하지만 앞서 언급한 바와 같이 다층 박막 구조를 형성하는데 있어 걸림돌로 작용 할 수 있어 소자의 특성 향상에 어려움을 준다. 용액공정을 이용하여 박막을 형성하기 위해 재료의 용해도를 증가 시키는 방법으로는 methyl기, tert-butyl기와 같은 alkyl기 또는 phosphine oxide와 같은 극성 치환기를 도입하는 방법이 있다. 또한 용액공정을 이용하여 박막을 형성한 후 열처리 공정을 통해 박막에 존재하는 잔류 용해 제거 공정이 꼭 필요하며, 열처리 공정을 진행함에 용액공정용 OLED 재료는

공정상 안정성 확보를 위하여 높은 유리 전이온도 및 열 안정성이 요구된다.

3.1. 용액공정 정공 주입층

PEDOT:PSS 높은 전도성, 높은 가시광 투과도, 용액공정 이용 시 우수한 막특성을 가지고 있지만, 강한 산도를 띄고 있어 양극 재료로 주로 이용되는 indium tin oxide(ITO)를 식각하여 indium이 유기막 내부로 침투하여 OLED 효율 및 수명을 저하 시키는 문제가 있다고 이미 보고되어 있다[9]. PEDOT:PSS는 정공 주입층 재료로 가장 많이 이용되고 있지만 이러한 이유로 PEDOT:PSS를 대체하기 위한 재료 연구가 진행 되고 있다. 고분자 형태의 재료로는 polyaniline, polythienothiophene 계열의 공중합체가 보고되었다[10]. 특히 Plextronic에서 개발한 정공 주입층 재료인 Plexcore® OC AQ1200은 PEDOT:PSS를 정공 주입층으로 사용한 결과 보다 향상된 수명 특성 결과를 나타내었다[11].

저분자 재료의 경우 용액공정용 정공주입층 재료로써 보고된 경우는 연구 보고 결과가 매우 드물며, 2013년 증착공정용 재료인 hexaazatriphenylene-hexacarbonitrile을 2-propanone에 용해하여 정공주입층 재료로 사용한 결과가 보고되었다.

금속 산화물 형태의 재료는 박막 형성 후 불용성 박막을 형성하여 정공 주입층으로 사용이 가능한 재료이다. 금속산화물 전구체 형태로서 molybdenum(V) ethoxide, tungsten(VI) ethoxide, vanadium(V) oxitriisopropoxide의 대기 중에 존재하는 수분과의 수화 반응으로 금속산화물을 형성하여 정공 주입층으로 사용된 연구 결과가 보고되었다[12-14]. 이러한 재료들은 상온 또는 200°C 이하의 온도에서 공정이 이루어진다. 태양전지 정공 주입층으로 먼저 개발된 nickel acetate tetrahydrate는 nickel oxide 전구체로써 nickel acetate tetrahydrate을 코팅 후 박막 열처리 공정을 통해 nickel oxide가 형성된다. 형성된 박막의 열처리 온도 조절을 통해 전하 이동도를 조절 할 수 있었으며, 500°C의 높은 열처리 온도에서 높은 전하 이동도 특성을 나타내었다. 온도에서 열처리 공정을 이용한다. 용액공정을 이용한 tungsten(VI) oxide를 정공 주입층으로 사용한 소자에서는 10만 시간 이상의 수명 특

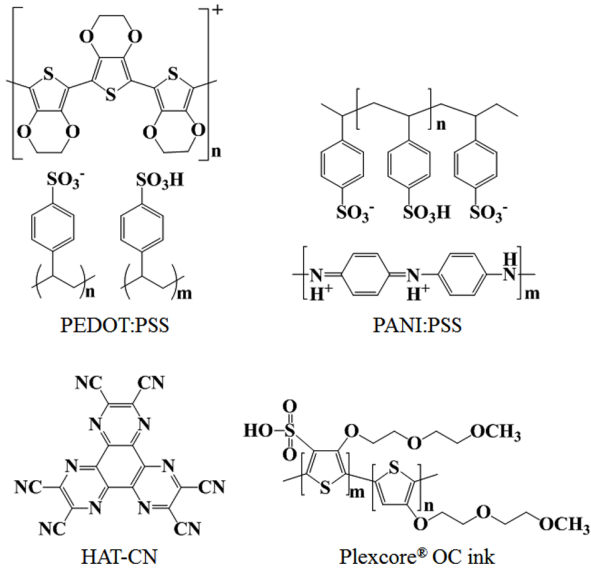


그림 2. 용액공정용 정공 주입층 재료 구조

성을 보여주어 PEDOT:PSS와 비교 하였을 때 금속 산화물이 용액공정 OLED의 수명특성 향상에 유리하다는 결과를 보여 주고 있다.

3.2. 용액공정 정공 전달층

용액공정 OLED 소자에서 정공 전달층의 도입은 소자의 효율 특성과 수명 특성을 위하여 반드시 필요한 층으로써 주로 경화형 고분자 재료 및 저분자 재료가 보고되었다. 우수한 정공 전달 특성을 가지는 arylamine 형태의 화학 구조에 경화형 단위체를 결합한 구조의 경화형 정공 전달재료가 많이 개발 되어 보고되었다. Oxetane 단위체를 포함한 경화형 정공 전달 재료는 광 경화성 재료로서, oxetane을 포함하는 저분자 또는 고분자 재료와 광 개시제를 혼합하여 용해하여 잉크를 형성한 후 박막을 자외선에 노출시켜 광중합 과정을 통해 불용성 박막을 형성하게 된다. 이때의 중합 메커니즘은 양이온 중합을 통해 경화 구조를 가지게 된다. 광중합 공정을 이용한 이층구조의 정공전달층 구조는 정공의 효율적인 주입 뿐만 아니라 발광층에서 생성된 엑시톤의 소광현상을 막을 수 있어 우수한 효율 특성을 구현 할 수 있다. 하지만 광중합 공정을 이용한 정공 전달층 형성은 불용성 박막 형성 후 개시제의 제거가 어려운 단점을 가지고 있고, 개시제가 박막 내 불순물로 작용하여 소자의 특성을 저

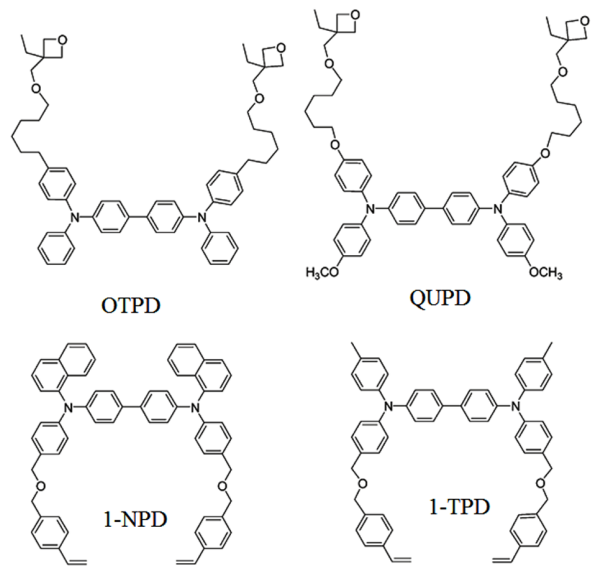


그림 3. Oxetane, styrene계 경화형 정공 전달재료 구조

하 시킬 가능성이 있다[15].

광 개시제에 의해 야기되는 문제는 열경화 공정을 통해 극복 할 수 있으며, styrene 구조를 포함하는 정공 전달 재료는 열경화 공정을 통해 불용성 막을 형성 할 수 있다. Styrene 계열의 경화성 재료의 열경화 온도는 주로 200°C 부근에서 이루어지고, 중합 메커니즘은 라디칼 중합 메커니즘을 따른다. Styrene 구조를 이용한 열경화 공정은 개시제를 필요로 하지 않기 때문에 광경화와 같이 첨가물이 필요하지 않으며 반응 부산물도 생성되지 않아 우수한 특성의 용액공정 OLED 개발에 적합한 소재이다. 증착 공정용 정공 전달 재료로 잘 알려진 TCTA 및 NPB에 styrene기를 도입함으로써 열경화가 가능한 정공전달 재료에 대한 연구가 보고 되었다 [9,15].

3.3. 용액공정 발광층

용액공정용 OLED의 발광층 재료의 분자량에 따라 저분자 재료와 고분자 재료로 나눌 수 있고, 발광 메커니즘에 따라 형광 발광재료, 인광 발광재료, 최근의 지연형광 재료로 나눌 수 있다. 용액공정 소자의 호스트 재료로서 고분자 중심으로 소재 개발이 이루어 졌다. 하지만 고분자 재료는 중합 시 분자량이 증가함에 따라 재료 내부의 불순물 제거가 어려워져, 높은 순도의 재료

를 얻기 어렵고, 불순물에 의해 소자의 안정성 효율이 감소할 가능성이 크기 때문에 단점으로 작용하게 된다. 그래서 최근의 용액공정 OLED 발광 재료는 저분자 재료를 중심으로 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 특히 발광층 재료에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

용액공정 인광 호스트 재료로서 가장 빈번히 사용되는 재료는 PVK이다. PVK는 2.7~3.0 eV의 높은 삼중항 에너지를 가지고 있어 청색, 녹색, 적색 인광 호스트로 모두 사용이 가능하다. PVK의 carbazole 단위는 정공전달 특성을 가지는 단위로서 PVK와 함께 전자전달 특성을 가지는 저분자 재료를 사용함으로써 발광층 내부의 전하 균형 향상으로 소자의 효율 특성을 개선할 수 있다[16]. 고분자 재료인 PVK 뿐만 아니라 정공전달 특성을 가지는 저분자 재료와 전자전달 특성을 가지는 저분자 재료를 함께 사용한 혼합 호스트 구조의 용액공정 OLED 연구 결과들이 꾸준히 발표 되고 있다.

4,4'.bis(N-carbazolyl)biphenyl(CBP)는 carbazole 단위를 가지는 증착용 재료로서 넓게 이용되는 저분자 인광 재료로 용액공정을 위한 재료로도 사용되고 있으나 우수한 특성의 소자를 개발하는 데는 한계가 있다 [17,18]. Carbazole 단위체에 전자 전달 특성을 가지는 단위체를 도입함으로써 호스트 재료의 바이폴라 특성을 구현하여 고효율 특성을 나타낸 결과들이 많이 보고되었고, 이들 재료는 모두 용액공정에 적합한 용해도와 높은 열안정성 특성을 가지고 있는 재료들이다. 단일 호스트 재료를 사용하여 소자의 특성을 구현하기 위해서는 발광층으로 효과적인 전하 주입을 위하여 바이폴라 특성이 필요하다. 그렇기 때문에 다음과 같이 정공 전달 특성을 가지는 전자 주개 단위체인 carbazole, diphenylamine, indole, indolocarbazole 등과 전자 전달 특성을 가지는 전자 받게 단위체인 diphenylphosphine oxide, benzimidazole, imidazole, triazine, pyridin 등을 한 분자 안에 구성되도록 디자인하고 있다. 특히 용액공정용 재료는 호스트 재료의 용해도 확보를 위한 methyl, tert-butyl 단위를 재료 구조에 함께 디자인한 결과가 보고되었다[19].

인광 도판트 재료의 경우 iridium 착화합물형태의 재료를 가장 많이 이용하고 있다. 녹색 인광 호스트 재료로 가장 잘 알려진 fac-tris(2-phenylpyridine) iridium(III)

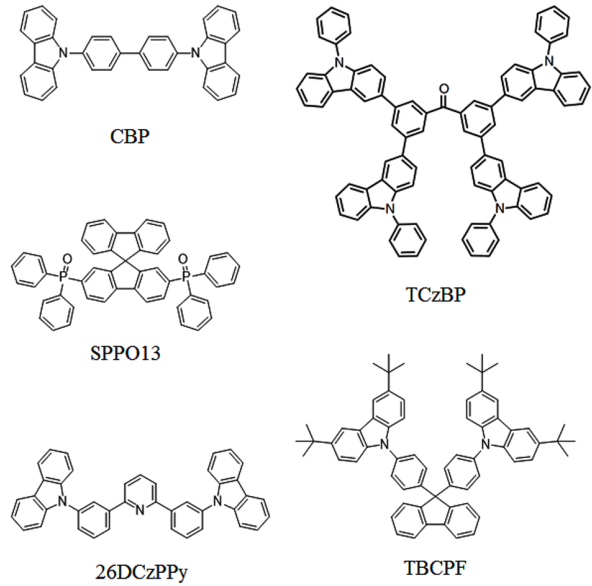


그림 4. 용액공정용 호스트 구조

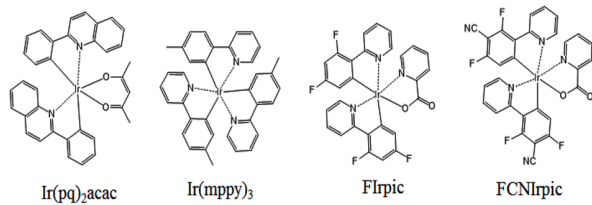


그림 5. 용액공정용 인광 도판트 구조

(Ir(ppy)₃)는 유기 용매에 대한 용해도가 매우 낮아 용액공정에 사용하기에 적합하지 못한 특성을 가지고 있다. Ir(ppy)₃의 용해도 특성을 개선하기 위하여 페닐 단위에 methyl기를 도입한 tris(2-(p-methylphenyl)pyridine) iridium (Ir(mppy)₃)는 유기 용매에 대한 용해도가 높아 용액공정에 사용이 적합하다. Iridium 도판트 재료로서 주리간드와 보조 리간드를 가지는 heteroleptic 구조에서 보조리간드로 acetylacetonate를 도입한 구조는 유기 용매에 대한 용해성을 가지며 picolinic acid를 도입한 구조는 유기 용매 뿐만 아니라 알코올 용매에 대한 용해도도 가지기 때문에 알코올 용매를 이용한 다층구조에 이용될 수 있다.

3.4. 용액공정 전자 전달층

용액공정 OLED 소자에서 전자 전달층은 대부분 진공 증착공정을 이용하여 박막을 형성하게 된다. 발광층

재료로 저분자 재료를 사용할 경우 용액공정을 이용하여 전자 전달층을 구성 하는 것이 어렵기 때문이다.

1,3,5-tris(N-phenylbenzimidazol-2-yl)benzene(TPBi)의 benzimidazol 단위는 극성을 띄는 단위로 극성 용매에 대한 용해도를 증가시켜 극성 용매인 알코올계 용매에 대한 용해성을 가진다. 이러한 전자 전달 재료의 극성용매에 대한 용해성을 이용하여 2절에서 언급한 다층막 구조의 용액공정 OLED 개발이 이루어지고 있다 [8].

저분자 이외 고분자와 금속 산화물을 전자 전달층으로 적용 가능하다. 고분자를 이용한 전자 전달층 재료로써 고분자 전해질 형태의 재료가 개발 보고 되었으며, 전해질 형태의 전자 전달층은 사용하는 용매로 물과 알코올을 사용 할 수 있기 때문에 다층 구조를 형성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. Zinc oxide는 전자 전달 재료로 사용 할 수 있는 금속 산화물로 소자의 효율 특성을 개선 할 수 있다.

용액공정에 이용되는 전자 전달층의 가장 큰 문제점은 박막을 형성하는데 있어 물을 이용한다는 것이다. 수분은 OLED 안정성 측면에서 지양해야 할 성분으로 물을 사용할 경우 소자의 안정성에 큰 영향을 줄 가능성이 크기 때문이다.

4. 결 론

용액공정 OLED 기술에 대해 살펴보았다. 용액공정 OLED 기술은 저가 양산 공정이 필요한 조명에 매우 적합한 기술이면서 대면적화 되어가고 있는 OLED 디스플레이의 경쟁력을 확보하기 위해 매우 중요한 기술이다. 용액공정을 이용한 소자 기술은 이제 막 효율적인 측면에서 진공증착과 유사한 특성을 보이고 있지만 안정성 측면에서는 아직 연구 개발해야 할 것들이 많이 있다. 특히 용액공정 OLED 재료 측면에서 기존의 진공 증착용 재료에서 벗어난 용액공정에 적합한 재료의 개발이 필요하다. 용액공정의 강점을 활용하기 위해서는 정공 주입층부터 음극인 금속 전극까지 모두 용액공정을 이용할 수 있어야 한다. 기존의 용액공정으로 박막을 형성하고 전자 전달층과 금속전극을 진공증착을 이용하

여 형성하는 방법은 기존의 진공 증착법과 크게 다르지 않아 대면적화에 적합하지 못하다. 앞으로 모두 용액공정으로 형성한 OLED 재료와 소자를 기대해 본다.

참고문헌

[1] C. Zhong, *Chem. Mater.* **23**, 326 (2011).
 [2] H. A. Al-Attar and A. P. Monkman, *J. Appl. Phys.* **109**, 074516 (2011).
 [3] K. S. Yook and J. Y. Lee, *Org. Electron.* **12**, 1595 (2011).
 [4] T. Earmme, E. Ahmed, and S. A. Jenekhe, *Adv. Mater.* **22**, 4744 (2010).
 [5] F. Huang, P.-I. Shih, C.-F. Shu, Y. Chi and A. K.-Y. Jen, *Adv. Mater.* **21**, 361 (2009).
 [6] N. Aizawa, Y.-J. Pu, M. Watanabe, T. Chiba, K. Ideta, N. Toyota, M. Igarashi, Y. Suzuri, H. Sasabe and J. Kido, *Nat. Commun.* **5**, 5756 (2014).
 [7] C. W. Joo, S. O. Jeon, K. S. Yook and J. Y. Lee, *Org. Electron.* **10**, 372 (2009).
 [8] F.-S. Juang, A. Chittawanij, L.-A. Hong, Y.-S. Tsai and K.-K. Huang, *IEICE trans. Electron.* **E98-C**, 66 (2015).
 [9] C. Zhong, C. Duan, F. Huang, H. Wu and Y. Cao., *Chem. Mater.* **23**, 326 (2011).
 [10] J. Jang, J. Ha and K. Kim, *Thin Solid Films* **516**, 3152 (2008).
 [11] S. Ho, C. Xiang, R. Liu, N. Chopra, M. Mathai and F. So., *Org. Electron.* **15**, 2513 (2014).
 [12] S. Hofle, H. Do, E. Mankel, M. Pfaff, Z. Zhang, D. Bahro, T. Mayer, W. Jaegermann, D. Gerthsen, C. Feldmann, U. Lemmer and A. Colmann., *Org. Electron.* **14**, 1820 (2013).
 [13] S. Hofle, M. Bruns, S. Strassle, C. Feldmann, U. Lemmer and A. Colmann., *Adv. Mater.* **25**, 4113 (2013).
 [14] H. Lee, Y. Kwon and C. Lee., *J. Soc. Info. Display* **20**, 640 (2012).
 [15] S. Ho, S. Liu, Y. Chen and F. So., *J. Photon. Energy* **5**, 057611 (2015).
 [16] H. Wu, G. Zhou, J. Zou, C.-L. Ho, W.-Y. Wong, W. Yang, J. Peng and Y. Cao, *Adv. Mater.* **21**, 4181 (2009).
 [17] C.-L. Ho, W.-Y. Wong, G.-J. Zhou, B. Yao, Z. Xie and L. Wang, *Adv. Funct. Mater.* **17**, 2925 (2007).
 [18] 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. Funct. Mater.* **18**, 319 (2008).
- [19] K. S. Yook and Y. J. Lee. *Adv. Mater.* **26**, 4218 (2014).
- [20] A. Garcia, E. C. Bakus II, P. Zalar, C. V. Hoven, J. Z. Brzezinski and T.-Q. Nguyen, *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 2492 (2011).

저 자 약 력

육 경 수



- 2015년~ 현재 : 성균관대학교 공과대학 화학공학/고분자공학부 조교수
- 2012년~2014년 : 단국대학교 공과대학 고분자공학과 연구전담교수
- 2012년~2013년 : Postdoctoral visiting scholar, University of Michigan
- 2012년 : 단국대학교 고분자공학과 박사
- 2009년 : 단국대학교 고분자공학과 석사
- 2007년 : 단국대학교 고분자공학과 학사
- 관심분야 : OLED 소재 및 소자