



## 전 용액 제조기법에 의한 고분자 발광 다이오드

고평삼<sup>a</sup>, Nguyen Dang Thuan<sup>a</sup>, 권신<sup>b</sup>, 우규희<sup>b</sup>, 이택민<sup>b</sup>, Zhaoyang Zhong<sup>b</sup>, 윤홍석<sup>a\*</sup>

### All Solution-Processed Polymer Light-Emitting Diodes

Pyeongsam Ko<sup>a</sup>, Nguyen Dang Thuan<sup>a</sup>, Sin Kwon<sup>b</sup>, Kyoohye Woo<sup>b</sup>,  
Taikmin Lee<sup>b</sup>, Zhaoyang Zhong<sup>b</sup>, Hongseok Youn<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University,  
125, Dongseodaero-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea<sup>b</sup> Department of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials,  
156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 27 August 2018  
Revised 13 September 2018  
Accepted 17 September 2018

##### Keywords:

PLEDs (polymer light-emitting diodes)  
Solution process  
Lamination  
Silver nanoparticle

#### ABSTRACT

Polymer light-emitting diodes (PLEDs) have great potential toward next generation light source because of their flexibility, facile fabrication, and simple structure. However, the fabrication of low-cost PLEDs is still quite challenging, owing to the vulnerability of cathode and electron injection/transportation materials against the oxygen and moisture in the air. In this paper, we propose an all solution-processable polymer light-emitting diode structure and lamination method. Generally, electrode layers are formed by vacuum deposition; however, in this study, a solution-processed Ag film was developed and used as an electrode. The solution-processed Ag film was transferred to a polymer hot-melt film and then laminated onto the PLED layer. The laminated device exhibited good performances in turn-on voltage (5.0 V), brightness (2500 cd/m<sup>2</sup>) and current efficiency (0.6 cd/A), which were comparable to that of the evaporated device.

## 1. 서론

고분자 발광 다이오드(polymer light-emitting diodes, PLEDs)는 사용되는 유기반도체의 종류에 따라 저분자(small molecular: OLEDs) 및 고분자(polymer, PLEDs)로 구분한다. 특히 본 연구에서의 고분자 발광다이오드는 고분자 반도체를 활용하여 발광시키는 특성으로 인해 낮은 소비 전력, 저렴한 단가, 플렉서블(flexible) 디스플레이 등의 미래형 전자소자에 가장 적합한 디바이스로 지목되고 있다<sup>[1]</sup>. 한편 소자의 제조관점에서 볼 때, 고분자 발광 다이오드는 닥터 블레이딩(doctor blading), 잉크젯(inkjet)

및 스크린(screen) 프린팅 그리고 롤투롤(roll-to-roll) 프린팅 등의 제조기법을 활용하는 용액공정(solution process)을 기반으로 하기 때문에 진공 증착(vacuum evaporation) 공정보다 재료 사용 효율을 높이고 혁신적인 원가절감을 가능케 한다<sup>[2-6]</sup>. 그러나 용액 공정을 적용하는데 필히 극복해야 하는 난제는 바로 소자에 사용되는 전자수송(electron transport), 전자주입(electron injection) 그리고 음극(cathode) 물질이 알칼리 또는 알칼리 토금속인 Li, Na, Cs, Ba, Mg 및 Ca와 같은 낮은 일함수(low work function)의 소재를 사용해야 한다는 점이다. 알칼리 혹은 알칼리 토금속 물질은 최외각전자(valence electron)를 한개 혹은 두개를 가지고 있어

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-1079

Fax: +82-42-821-1587

E-mail address: hsyoun@hanbat.ac.kr (Hongseok Youn).

잃어버리기 쉽고 수분과 산소와 만나 산화반응을 폭발적으로 일으키면서 자신은 산화된다. 따라서 이들 물질을 다루기 위해서는  $10^6$  mbar 정도의 고진공(high-vacuum level)에서 증착 공정을 통상 수행해야만 한다<sup>7)</sup>. 만약 대기 중에서 공정이 이루어지면 공기중의 산소 또는 수분과 반응이 일어나 산화된 전극이 하부 유기물까지 영향을 미쳐 다크 스팟(dark spot) 등의 문제를 일으키게 된다.

상기 산화문제를 해결하고자 음극, 전자수송(electron transport) 물질과 전자주입(electron injection) 물질을 저진공 공정 혹은 대기 중에서 용액공정으로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 알칼리 금속 혹은 알칼리 토금속 물질을 대체하기 위하여 유기 염(organic salts) 기반의 물질을 액상으로 이온화하고 이들이 이온들이 형성하는 계면 쌍극자(interface dipole) 효과를 유발시켜 대기 중에 안정한 금속인 은(silver), 알루미늄(aluminum) 등의 금속을 사용하도록 하는 방법이 대안으로 알려져 있다. 이 계면 쌍극자를 유발하는 물질은 크게 에틸렌 글리콜을 갖는 고분자 유기 계면활성제(organic surfactants)와 아미노기(amino functional group)를 갖는 친수성 고분자계로 요약할 수 있다. 그 대표적 사례 들로는 PEG(polyethylene glycol)와 같은 유기 계면활성제계 고분자 그리고 친수성 고분자계인 PFN (Poly[(9,9-di(3',N,N'-trimethyl-ammonium)propylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-co-(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)] diiodide salt) PEI (Polyethylenimine) 등이 대표적이다<sup>7-12)</sup>.

한편, 하부에 금속산화물인 산화 아연(zinc oxide)을 사용하여 발광층과 음극 사이에 효과적 전자수송 특성을 갖게 하여 발광층에서 음극으로부터의 전자와 양극으로부터 이동한 정공의 수의 균형을 이루어 소자의 내부양자효율(internal quantum efficiency)을 크게 개선 한다. 이와 같은 특성은 소자 내부에서 전자와 정공이 재결합(recombination)하여 빛으로 방사되지 않고 소진되어 버리는 여기자 소멸(exciton quenching)되는 현상을 차단하고 소자의 발광 효율을 증가 시킬 수 있는 정공 차단층(hole blocking layer) 역할을 수행하기 때문이다<sup>7)</sup>.

본 연구에서는 고분자 발광다이오드를 기능성 층인 정공수송층, 발광층, 전자수송층, 전자주입층을 용액으로 제작하고 더 나아가 용액공정을 적용하기 어려웠던 음극을 용액공정을 적용하여 소자 구동에 성공시키는 일을 목표로 한다. 또한 모든 기능성 레이어를 용액공정을 적용함으로써 필연적으로 저감되는 효율을 극복하는 고분자 발광다이오드의 구조를 제시하고 혁신적인 전사 및 라미네이션 제조기법을 제시한다.

한편, 이 논문에서 제안하는 전자주입물질인 액상의 친수성 PFN 고분자와 액상의 ZnO 나노파티클(nanoparticle) 레이어의 조합이 음극 사이에 계면 쌍극자를 형성하여 금속의 일함수를 효과적으로 변화시키도록 하여 음극으로 은을 사용할 때 필연적으로 발생하는

성능의 저하를 최소화 하는지 조사하였다. 추가적으로 ZnO 나노파티클은 소자 제작시 상부에 코팅할 친수성의 PFN 고분자가 표면에너지가 낮은 유기발광층 위에 신뢰성 있게 코팅이 될 수 있는 표면을 제공할 수 있어 보다 크기가 넓은 디바이스에서의 적용가능성을 타진한다.

## 2. 본 론

### 2.1 소자 제작

#### 2.1.1 용액 공정기반 Ag 전극

증착이 아닌 용액 공정으로 제작되는 소자에서는 일반적으로 Ag 금속 혹은 Al 금속이 사용된다. 또한 액상으로 금속을 코팅 혹은 인쇄하는 방식은 주로 나노파티클 기반의 잉크를 사용해야 한다. 그러나 알루미늄의 경우 나노입자 기반의 잉크 제조시에 반응성이 매우 크기 때문에 입자가 코팅되는 순간 바로 산화되는 문제가 심각하여 사용할 수 없다<sup>7)</sup>. 따라서 자연히 Ag 기반의 잉크를 사용하는 것이 실용적이다. 그러나 Ag 잉크 기반의 소자는 은이 갖는 큰 일함수 때문에 높은 구동 전압을 보여 효율이 크게 저감되는 문제가 빈번히 발생한다. 한편 액상의 Ag 잉크는 발광다이오드 하부에 존재하는 막의 계면을 오염시키는 문제가 있으며 더 큰 문제는 Ag 나노파티클이 내부로 침투하여 전기적 쇼트(electrical short) 현상이나 과전류 현상을 유발하여 발광 특성을 크게 저해한다. 그러나 하부 박막을 용해시키지 않거나 또는 유기층에 침투하지 않는 용매를 찾는 것은 거의 불가능하다.

라미네이션(lamination) 방법을 이용하면 외부에서 금속잉크를 제조하여 접착필름에 전사한 뒤 고분자 발광 다이오드에 결합시키므로 앞서 말한 용매 대한 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 미리 박막을 제조하여 결합만 하면 되므로 생산 시간을 단축시킬 수 있다. 즉, 제품을 제조시 음극부와 양극부의 다층막 들이 모듈식으로 서로 준비되어 있어 라미네이션 기법으로 결합하는 시간만 필요한 것이다.

기존의 레이저를 이용한 전사 기법들은 전사 중에 발생하는 금속의 크랙, 좌굴 등의 문제가 잦다. PLEDs 소자는 수십 나노두께의 박막 사이에 전계를 형성하게 되므로 박막에 존재하는 금속의 크랙과 좌굴은 소자의 성능을 크게 저해한다. 왜냐하면 그와 같은 금속의 표면에 요철등의 문제는 소자의 누설전류(leakage current) 및 전력 효율(power efficiency)에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

나노파티클 기반의 Ag 전극 film을 제작하기 위해서 은-알킬 카바메이트 복합제(silver 2-ethylhexylcarbamate, Ag-CB) 전구체(precursor) 잉크를 InkTec에서 구입 하였으며 이 전구체 용액을 IPA (isopropyl alcohol)로 희석하여 금속막을 형성하였다. 전구

체 용액으로부터 금속의 Ag 나노파티클이 형성되는 과정은 다음과 같다. 먼저, Ag-CB 전구체 용액으로 유리기판에 박막을 스펀코팅(spin coating)하게 되면 용액 내 IPA는 증발하게 된다. 다음 박막을 고온(140°C)에서 가열하면 카바메이트와 아민과 이룬 킬레이트 결합이 Fig. 1의 반응식처럼 분해되며 결국 유기물질 부분과 Ag 이온이 분리되어 유리된 Ag가 환원된다<sup>[13-15]</sup>. 이때 가열하는 온도가 충분하지 않거나 혹은 열처리하는 시간이 충분하지 않으면 유기물이 Ag 전극에 잔류되어 충분한 전기전도성을 갖게 되지 않는다. 그리고 순수한 Ag는 유리 기판으로부터 잘 떨어지지만 유기물이 잔류된 Ag 금속은 유리기판으로부터 떼어내기 어렵다. 따라서 유리 기판에는 순수한 은이 형성될 수 있도록 130~200°C의 고온에서 가열하면서 충분히 환원시켜 순수한 금속박막을 형성한다. 본 연구에서 최적화된 방법으로는, Ag 전구 액막을 140°C에서 5분간 가열하여 환원을 시킨 후 나노파티클의 결정이 잘 성장되도록 이후 200°C에서 추가로 5분간 어닐링(annealing) 과정을 수행한다. 다음 Ag 금속 필름을 유연한 접착 필름에 전사하는 방법은 Fig 2에서 보는 바와 같이 Ag전극을 PA (polyamide) 필름에 롤러를 이용하여 압력을 가해 PA 필름으로 전사시켜 Ag film을 제작한다. 이 Ag/PA 필름은 PLEDs 소자의 기능성 층의 제작이 완

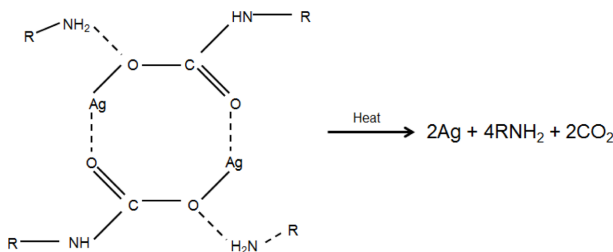


Fig. 1 The chemical structure of Ag-CB (Silver 2-ethylhexyl carbamate) and reaction diagram. Ag ion and organic complex separated then Ag is reduced by heat treatment

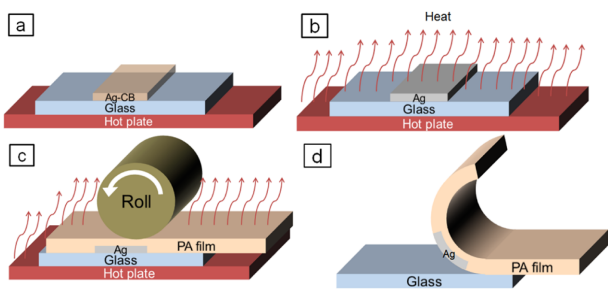


Fig. 2 Illustration of the transfer process for Ag/PA lamination film: (a) coating the Ag precursor solution on glass substrate then baking, (b) heat treatment of Ag film which is fully reduced into nanoparticle based silver film, (c) attachment of PA hotmelt film and applying pressure to join the Ag film with PA film on the hotplate, (d) removal of the Ag/PA film from the glass substrate after cooling sufficiently

료된 후 결합하는 데 사용하게 된다.

일반적인 라미네이션 기법은 주로 두 필름 사이의 약한 접착에 따라 좌우되기 때문에 유연한 소자를 개발하기 위해서는 기계적 굽힘 및 열 변화에도 견딜 수 있는 충분한 계면 접착력을 가지는 PA 접착필름을 사용한다. 한편 PA 필름은 접착성을 부여하는 역할 뿐만 아니라 PLEDs가 공기 중에 존재하는 수분과 산소로부터 보호하는 배리어 필름의 역할도 수행한다<sup>[16]</sup>.

### 2.1.2 용액공정 기반 기능성 레이어 제작 및 라미네이션

본 연구의 유기 발광 다이오드의 기능성 레이어들인 정공주입층, 발광층, 전자수송층, 전자주입층의 스택(stack) 구조 및 물질은 아래 Fig. 3과 같다. 구체적 제조 과정은 다음과정을 따른다. 먼저, 투명 양극인 ITO (indium tin oxide) 유리기판을 준비하는 과정으로써 아세톤, IPA 용액에 ITO 기판을 담가 각각 5분동안 초음파 세정을 수행 하였다. 정공 주입층은 PEDOT:PSS (AI4083)를 0.45  $\mu\text{m}$ 의 PVDF필터를 이용하여 2,500 rpm에 40초의 조건으로 스펀 코팅하였다. 그 후 용매를 증발 시키기 위해 핫플레이트 위에서 200°C에서 5분 열처리를 하였다. 발광층은 톨루엔(toluene)에 1wt%의 농도로 F8BT (Poly[(9,9-di-n-octylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(benzo[2,1,3]thiadiazol-4,8-diyl)])를 희석시킨 용액을 2,000 rpm에 20초의 조건으로 스펀 코팅하고 80°C에서 20분간 건조 열처리를 하였다. 전자 수송층은 나노입자가 10-15 nm의 사이즈를 가지는 Zinc Oxide nanoparticle 용액을 0.45  $\mu\text{m}$ 의 PVDF필터를 사용하여 2,000 rpm에 30초의 조건으로 스펀 코팅하였다<sup>[17]</sup>. 그 후 잔류용매 및 유기 불순물을 증발 시키기 위해 핫플레이트 위에서 150°C에서 열처리를 하였다. 전자 주입층에는 PFN을 DMF (dimethyl form amide)에 희석시킨 후 ethanol을 섞어 0.4%의 농도로 혼합된 용액을 사용하여 2,500 rpm에 20초의 조

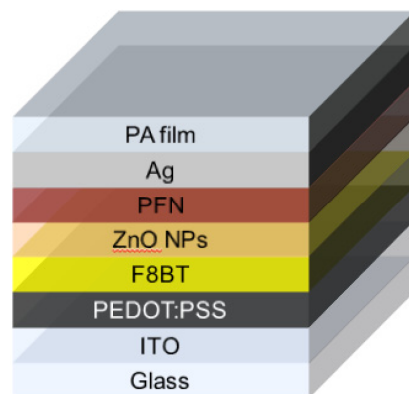


Fig. 3 Device structure of PLEDs. ITO is the transparent anode, PEDOT:PSS is the hole transport layer, F8BT is the emissive layer (green light-emitting polymer), ZnO NPs is the hole blocking and electron transport layer and Ag is laminated silver cathode via Ag precursor ink

건으로 코팅한 후 100°C에서 열처리 하였다. ADS사로부터 구매한 PFN의 화학적 구조는 Fig. 4와 같다. 음극으로 사용될 Ag film은 소자에 모든 면에 접촉이 되고 좌굴 및 크랙이 발생되지 않게 롤러를 이용하여 압력을 가하면서 100°C 온도의 핫플레이트 위에서 Fig. 5와 같이 소자 위에 부착시켰다. 여기서 PFN 고분자의 역할은 일함수가 큰 금속인 은과 같은 금속을 음극으로 사용할 때 금속과 반도체 사이의 접촉에서 형성되는 전자 주입장벽인 쇼트키 배리어(schottky barrier)를 효과적으로 낮추는 것이다<sup>[11]</sup>.

## 2.2 소자 성능 결과

본 논문에서 제시한 전 용액공정으로 제작한 소자의 효율을 측정하기 위해 테스트 셀(cell)을 제작하였다. 소자의 테스트 셀의 면적은 6 mm<sup>2</sup>이며, 소자의 구동 및 소자에서 소모되는 전압 전류는 키슬리(Keithley) 2400 소스미터(source meter)를 사용하여 데이터를 획득하였다. 소자의 광(luminance) 효율을 계산을 위한 휘도는 소스미터와 연동된 미놀타 CS100a 제품을 사용하여 측정되며 그때의 J(current density)-V(voltage)-L(luminance) 특성을 분석하였다.

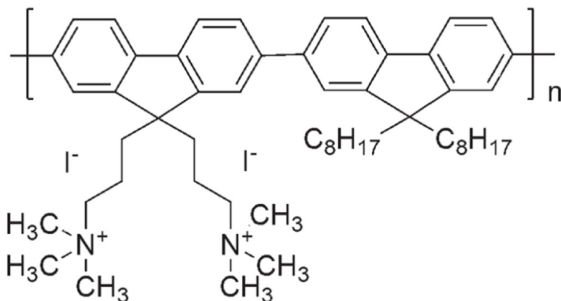


Fig. 4 The chemical structure of PFN. Water soluble or alcohol soluble PFN is neutralized with iodide

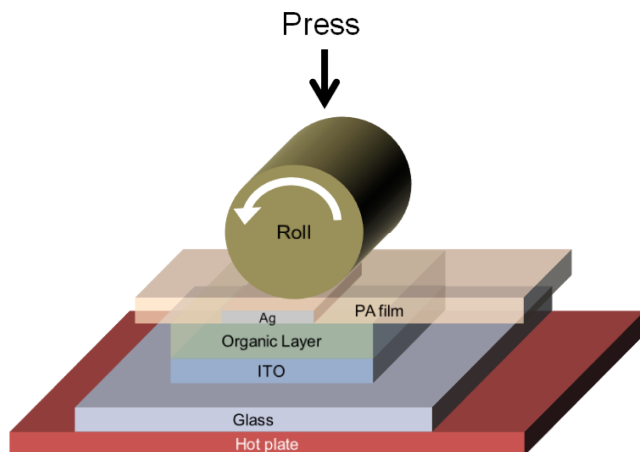


Fig. 5 Attachment the Ag/PA film onto the organic layers which were prepared separately. Both of the two parts were joined by soft roller with mild pressure on the hotplate

우선, 발광 문턱전압(turn-on voltage)는 증착으로 형성한 Ag전극 소자의 경우 5.0 V, 증착형 Al 전극 소자는 5.2 V 그리고 전용 액공정 및 라미네이션 공정으로 형성된 Ag 전극은 5.0 V로 아래 Table 1에서와 같이 모두 비슷한 결과를 나타내었다. 발광 문턱전압 조사는 고분자 발광다이오드의 계면에서의 전기적 에너지 장벽(energy barrier)의 존재여부를 조사하기 위함이며, 상기 결과는 라미네이션 디바이스가 증착형 디바이스와 비교 시 Ag 전극과 PFN 전극에서의 접촉이 문제없이 전기적 접촉이 되었음을 의미한다. 최대 휘도는 Ag 전극이 2,520 cd/m<sup>2</sup>, Al은 2,790 cd/m<sup>2</sup>, 라미네이션 공정으로 형성된 Ag 전극은 2,500 cd/m<sup>2</sup>로 Al 전극이 가장 높게 측정되었으나 증착한 Ag 전극 디바이스 대비 비교할 만한 결과치를 기록하였다. 마지막으로 소자의 최대 전류효율은 공급된 전류밀도 대비 얼마나 높은 빛을 방출했는가를 나타내는 척도이며 증착형 Ag 전극 0.9 cd/A, 증착형 Al은 1.3 cd/A, 용액 및 라미네이션 공정으로 형성된 Ag전극은 0.6 cd/A이다. 효율과 최대 휘도는 Al이 가장 높게 나왔으나 Fig. 6을 보면 최대 휘도까지 가장 먼저 도달하는 전압은 라미네이션 공정이 우수함을 알 수 있다. 이는 Al 전극이 안정한 발광 특성을 보이기는 하나 대기 중에서 구동 시 산화 등의 영향에 민감성의 영향으로 평가 된다. 한편, 디바이스를 테스트 셀의 크기에서 벗어나 보다 큰 영역에서의 제조성을 판

Table 1 Device characteristics and performances among the laminated device and control devices

Device Fabrications	Turn-on Voltage (V)	Maximum Luminance (cd/m <sup>2</sup> )	Maximum Current Efficiency (Cd/A)
Ag Evaporated Device	5.0	2,520	0.9
Al Evaporated Device	5.2	2,790	1.3
Ag Ink Laminated Device	5.0	2,500	0.6

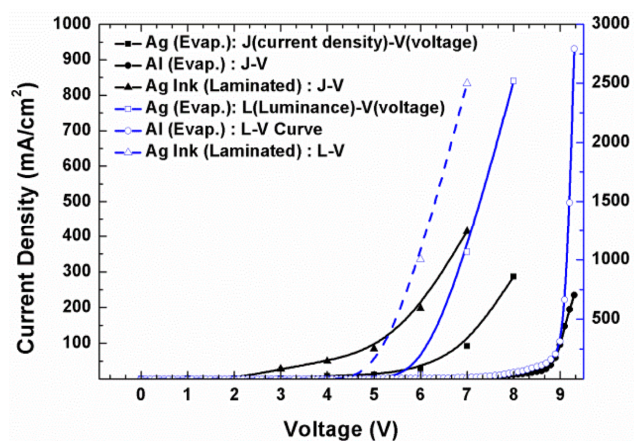
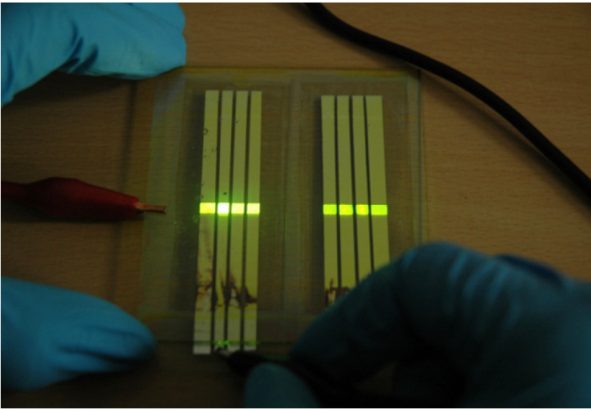


Fig. 6 Device characteristics curve: J(current density)-V(voltage)-L(luminance) data acquired by source meter synchronized with luminance camera



**Fig. 7 Device driving image fabricated by lamination process, which are emitting yellow green light**

단하기 위하여 7 cm × 8 cm 크기의 픽셀형태로 소자를 제조하여 그 실용성 여부를 제고하였다(Fig. 7 참고).

### 3. 결론

이 논문에서는 유기 발광 다이오드의 제작에 흔히 사용되고 있는 증착 공정의 단점인 오랜 공정 시간, 낮은 재료의 이용률, 높은 공정비용 등의 문제를 개선하기 위하여 고분자 발광 다이오드의 모든 공정을 용액 공정으로 제조가능한 소자구조를 제시하였으며, 이를 통하여 앞서 언급한 문제점들을 해결하였다.

특히, 전극 레이어는 산화물제로 인하여 진공에서 증착으로 제작하는 경우가 일반적이다. 하지만 이 논문에서는 대기 중에서 용액으로 제조가능한 환원형 Ag박막을 개발하여 PLEDs의 전극으로 사용하였다. 용액 및 라미네이션 기반의 Ag 음극을 사용한 전 용액 제조된 고분자 발광다이오드는 증착으로 이루어진 Ag 박막 혹은 Al 박막과 견줄 수 있을 정도의 문턱치 전압, 휘도 및 효율을 얻었다. 게다가 모든 공정을 진공에서 이루어지지 않아 대면적화에도 적합하다. 기존의 PLEDs 공정은 진공에서 제작되기 때문에 오랜 공정시간 및 대면적화를 하기 위해서는 매우 큰 챔버가 필요하여 생산설비 비용, 생산 속도 등에서 한계가 있었다.

본 연구에서 제시한 대기 중에서 소자를 모두 용액으로 공정을 수행하는 제조기술은 PLEDs 디스플레이 뿐 아니라 OLEDs 조명의 저가 실현을 앞당기는 데 기여할 수 있을 것이다.

### 후 기

이 논문은 2015년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었음.

### References

- [1] Burroughes, J. H., Bradley, D. D. C., Brown, A. R., Marks, R. N., Mackay, K., Friend, R. H., Burns, P. L., Holmes, A. B., 1990, Light-Emitting Diodes Based on Conjugated Polymers, *Nature*, 347 539-541.
- [2] Shin, S., Yang, M., Guo, L. J., Youn, H., 2013, Roll-to-Roll Cohesive, Coated, Flexible, High-Efficiency Polymer Light-Emitting Diodes Utilizing ITO-Free Polymer Anodes, *Small*, 9 4036-4044.
- [3] Youn, H., Jeon, K., Shin, S., Yang, M., 2012, All-Solution Blade-Slit Coated Polymer Light-Emitting Diodes, *Org. Electron*, 13 1470-1478.
- [4] Youn, H., Park, H. J., Guo, L. J., 2015, Organic Photovoltaic Cells: From Performance Improvement to Manufacturing Processes, *Small*, 11 2228-2246.
- [5] Youn, H., Park, H. J., Guo, L. J., 2015, Printed Nanostructures for Organic Photovoltaic Cells and Solution-Processed Polymer Light-Emitting Diodes, *Energy Technology*, 3 340-350.
- [6] Sandstrom, A., Dam, H. F., Krebs, F. C., Edman, L., 2012, Ambient Fabrication of Flexible and Large-Area Organic Light-Emitting Devices Using Slot-Die Coating, *Nature Communications*, 3 1002.
- [7] Ma, W., Iyer, P. K., Gong, X., Liu, B., Moses, D., Bazan, G. C., Heeger, A. J., 2005, Water/Methanol-Soluble Conjugated Copolymer as an Electron-Transport Layer in Polymer Light-Emitting Diodes, *Adv. Mater.*, 17 274-277.
- [8] Wu, H., Huang, F., Mo, Y., Yang, W., Wang, D., Peng, J., Cao, Y., 2004, Efficient Electron Injection From a Bilayer Cathode Consisting of Aluminum and Alcohol-/Water-Soluble Conjugated Polymers, *Adv. Mater.*, 16 1826-1830.
- [9] Youn, H., Yang, M., 2010, Solution Processed Polymer Light-Emitting Diodes Utilizing a ZnO/Organic Ionic Interlayer With Al Cathode, *Appl. Phys. Lett.*, 97 243302.
- [10] Zhang, Y., Huang, F., Chi, Y., Jen, A. K. Y., 2008, Highly Efficient White Polymer Light-Emitting Diodes Based on Nanometer-Scale Control of the Electron Injection Layer Morphology Through Solvent Processing, *Adv. Mater.*, 20 1565-1570.
- [11] Oh, S. H., Vak, D., Na, S. I., Lee, T. W., Kim, D. Y., 2008, Water-Soluble Polyfluorenes as an Electron Injecting Layer in PLEDs for Extremely High Quantum Efficiency, *Adv. Mater.*, 20 1624-1629.
- [12] Garcia, A., Brzezinski, J. Z., Nguyen, T. Q., 2009, Cationic Conjugated Polyelectrolyte Electron Injection Layers: Effect of Halide Counterions, *J. Phys. Chem. C*, 113 2950-2954.
- [13] Park, J. H., Park, O. O., Yu, J. W., Kim, J. K., Kim, Y. C., 2004, Effect of Polymer-Insulating Nanolayers on Electron Injection in Polymer

Light-Emitting Diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 84 1783.

- [14] Kim, K. Y., 2012, Preparation of Highly Stabilized Silver Nanopowders by the Thermal Reduction and Their Properties, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 33 3987-3992.
- [15] Park, H. S., Park, H. S., Gong, M. S., 2010, Preparation of Silver/Polystyrene Nanocomposites by Radical Polymerization Using Silver Carbamate Complex, *Polymer Korea*, 34 144-149.
- [16] Kim, K. Y., 2012, Preparation of Silver Nano Powders and Properties of Their Reverse Off-Set Ink, Master Thesis, Dankook University, Republic of Korea.
- [17] Hasan, S. A. U., Youn, H., 2017, Multi-Layer Transfer and Lamination (MTL) Process Assisted by a High-Pressure Air Jet for Highly Efficient Solution-Processed Polymer Light Emitting Diodes, *Nanoscale*, 9 9716-9722.
- [18] Hong, J., He, Y., 2012, Effects of Nano Sized Zinc Oxide on the Performance of PVDF Microfiltration Membranes, *Desalination*, 302 71-79.