

고분자 발광소자(PLED)의 성공 전달총 연구 동향

임보규 · 박두진 · 김동유 · 황진택

1. 서론

최근 수년 동안 디스플레이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 그 중 가장 주목 받고있는 분야 중 하나가 유기 전계 발광소자(organic light-emitting diode, OLED)이다. OLED가 기존의 LCD나 CRT와 비교했을 때 가장 큰 매력은 자체 발광형이라는 점일 것이다. 따라서 OLED는 backlight가 필요하지 않기 때문에 광시야각이 우수하고, 초경량, 초박형

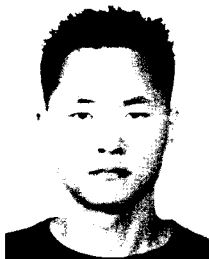
이며, 소비전력이 낮고, 대조비 등이 우수한 특징을 가지고 있다. 또한 응답속도가 빠르고, 높은 해상도를 가지기 때문에 동영상 재생이 우수하다는 장점을 가진다. 뿐만 아니라 OLED를 플라스틱 기판 위에 제작할 경우 얇고 유연한 디스플레이로의 구현이 가능하기 때문에 최근 수년 동안 많은 투자가 이루어져 왔다. 이러한 OLED는 사용되는 물질의 분자량에 따라 저분자 LED(small molecule OLED, SMOLED)와 1-3 고분자 LED(polymer LED, PLED)로⁴ 나눌 수



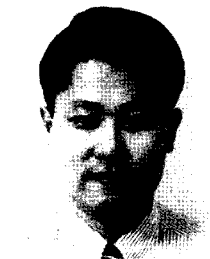
임보규
 2003 충북대학교 공업화학과 (학사)
 2005 광주과학기술원 신소재공학과 (석사)
 2005~ 현재 광주과학기술원 신소재공학과 (박사과정)



김동유
 1986 서울대학교 공업화학과 (학사)
 1988 서울대학교 공업화학과 (석사)
 1989~ 1991 한국과학기술연구원 연구원
 1997 University of Massachusetts Lowell (박사)
 1997~ 1999 University of Massachusetts Lowell (Post-Doc.)
 1999~ 현재 광주과학기술원 신소재공학과 부교수



박두진
 2000 연세대학교 화학과 (학사)
 2002 광주과학기술원 신소재공학과 (석사)
 2002~ 현재 광주과학기술원 신소재공학과 (박사과정)



황진택
 1987 경희대학교 화학과 (학사)
 1989 KAIST 화학과 (석사)
 1991 KAIST 화학과 (박사)
 1991~ 1994 삼성종합화학연구소 선임연구원
 1995~ 2004 삼성종합기술원 전문연구원(부장)
 2004~ 2005 광주과학기술원 신소재공학과 연구교수
 2005~ 현재 (주)이폴리머 연구소장

Current Status of Hole Transporting Polymer for PLEDs

광주과학기술원 신소재공학과 (Bo Gyu Lim, Doo Jin Vak, and Dong Yu Kim, Department of Materials Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, 1 Oryong-dong, Puk-gu, Gwangju 500-712, Korea) (주)이폴리머 기술연구소 (Jin Taek Hwang, e-Polymers Co., Ltd., 217-4, Hwapyung-ri, Ganam-myon, Yeosu-gun, Gyunggi-do 469-885, Korea) e-mail : jthwang@e-polymers.com

있다. SMOLED의 경우, 진공증착을 이용하여 박막을 형성하기 때문에 다층구조로의 제작이 용이한 반면, 제작 공정이 까다롭고 제작비용이 고가라는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 PLED의 경우, 스크린코팅이나 프린팅 방법과 같은 용액공정(solution process)을 통해 박막을 형성하기 때문에 제작 공정이 간단하며 공정성이 우수하고 저가라는 장점을 가진다. 또한, 구동전압이 낮고, 전력소모가 적다는 장점을 가지고 있다.⁵ 그러나 용액공정을 사용하기 때문에 다층구조의 제작이 어렵고, 저분자에 비해 불순물의 제거가 까다롭다는 단점을 가지고 있다. 이미 SMOLED의 경우 휴대폰과 같은 소형 디스플레이로 상업화되어지고 있고, 그 시장 규모 또한 급속히 증가하고 있으며, 향후 2010년까지 연평균 75% 이상의 고성장을 예측하고 있다. 이에 반해, PLED는 상업화를 위해서는 아직 효율과 수명 등의 개선이 필요하다.

본 고에서는 PLED의 원리와 특성에 대해 간단히 소개하고, 정공전달층(hole transporting layer, HTL)에 대한 발전 과정과 최근 연구 동향에 대해 기술하고자 한다.

2. PLED의 구조 및 원리

PLED의 구조를 살펴보면(그림 1), 반도체 성질을 띠는 유기물 또는 공액 고분자를 발광 소재로 사용한 박막을 투명전극인 ITO(indium tin oxide) anode와 Ca, Mg:Ag 합금 등과 같이 낮은 일함수를 가지는 cathode 사이에 놓고 각각의 전극을 통해 주입된 전자(electron)와 정공(hole)이 유기 발광층 내에서 재결합(recombination)하여 여기자(exciton)을 형성하고 이렇게 형성된 여기자의 radiative decay에 의해 특정 파장의 빛을 발생한다. 이때 전자와 정공의 원

활한 주입은 소자의 구동과 수명에 직접적으로 영향을 미치며, 또한 소자의 발광 효율에도 영향을 미친다. 따라서 소자의 높은 발광 효율을 위해선 전자와 정공이 원활하게 주입되어야 하며, 발광층 내에서 주입된 전자와 정공의 재결합이 이뤄져야 한다. 정공과 전자의 주입을 용이하게 하기 위해 정공주입 및 전달층과 전자주입 및 전달층의 도입이 필요하지만, PLED의 경우 용액공정을 통해 박막을 형성하기 때문에 이러한 다층구조의 제작에 제한을 받는다.

3. 정공전달층의 도입

초기 PLED는 양극과 음극 사이에 발광층만 놓인 형태였다. 소자의 효율과 수명은 전극과 고분자 층 사이의 전하 주입에 의존하기 때문에⁶⁻⁹ 소자의 구조적 발전을 통해 소자 효율과 수명, 밝기를 증가시키기 위한 많은 연구가 진행되어져 왔다. 그 예로 원활한 정공 주입을 위해 ITO 위에 acid가 도핑된 polyaniline(PANI)이 도입되었는데, 이러한 PANI의 도입으로 소자의 구동 전압이 낮아졌고, 효율과 수명의 향상을 보였었다.¹⁰⁻¹² 또한 poly(styrene sulfonic acid)(PSS)가 도핑된 poly(3,4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT)을 정공전달층으로 도입했을 때, 소자의 수명과 효율이 월등히 향상되었고 구동전압이 감소됨을 보였었다.¹³⁻¹⁶ 그림 2는 각기 다른 PLED의 구조에 따른 소자의 수명을 나타내고 있다.¹⁴

이후 현재까지 PLED에서 대부분의 경우 정공전달층으로 PANI : PSS 또는 PEDOT : PSS가 사용되어지고 있다.¹⁷ 이러한 도핑된 전도성 고분자의 경우, 높은 전도도와 빠른 정공 이동도를 가지고 있으며, 필름을 잘 형성한다는 우수한 특성을 가지고 있다.¹⁸ PEDOT이 이처럼 우수한 특성을 가지고 있지만 상

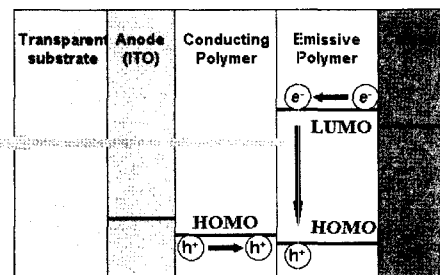
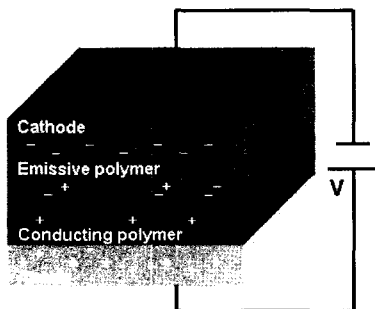


그림 1. PLED의 일반적인 구조와 에너지 도식 및 발광 과정.

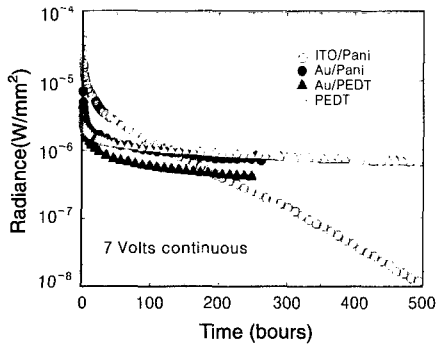


그림 2. PLED 소자 구조에 따른 발광 수명.

업화를 위한 소자의 수명과 효율 측면에서 아직도 개선이 필요하다. 더욱이 최근 얼마 전부터 PEDOT : PSS에 대한 문제점들이 보고되고 있다.

4. 새로운 정공전달층의 필요

PEDOT:PSS의 도입으로 정공의 주입과 전달이 향상되었고 소자 성능도 향상되었다. 하지만 이들은 가시광선 영역에서 광학적 흡수가 있으며, 최근 연구 결과에서 PSS에 의해 발생하는 산에 의해 ITO와 PEDOT:PSS 계면 사이가 불안정한 상태를 가진다고 보고 되었다.^{19,20} 그림 3(a)에서 보는 바에 같이, PSS에서 산이 발생되고, 이러한 산에 의해 ITO 표면이 식각되어 지고, 소량의 인듐(In)이 PEDOT:PSS층과 발광층으로 확산되어진다(그림 3(b)). 또한 Friend 등은 PEDOT:PSS는 일부 발광 고분자의 산화를 유발하여 발광 효율의 감소를 초래한다고 보고하였다.²¹ 따라서 PLED의 상업화를 위해 PEDOT:PSS의 개선 또는 새로운 정공전달층의 개발이 시급하다.

5. 새로운 정공전달층 재료

PLED에서 정공전달층으로 사용되기 위해서는 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 우선, 용액공정을 통해 박막을 형성하기 때문에 정공전달층 위에 놓일 발광층의 용매에 용해되지 않고 우수한 필름 상태를 유지해야 한다. 즉, 용매에 대한 강한 저항력을 가지고 있어야 한다. 그리고 정공의 원활한 주입을 위해서 정공전달층의 HOMO(highest occupied molecular orbital) level은 anode인 ITO의 일함수(4.7~4.8

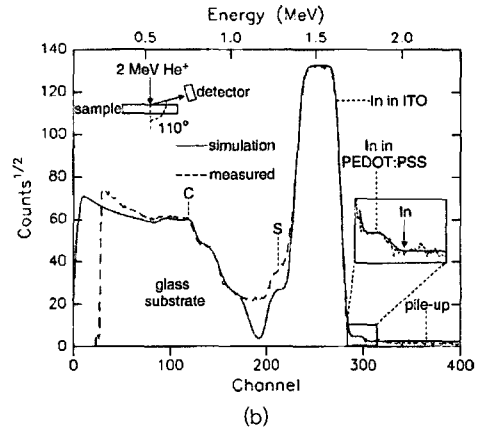
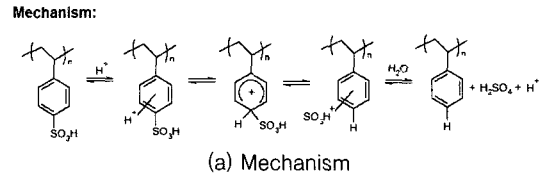


그림 3. (a) PSS의 분해과정, (b) Glass/ITO/PEDOT:PSS/PV 샘플의 RBS 스펙트럼.

eV)와 발광층의 HOMO level 사이의 적절한 값을 가져야 한다. 이 외에도 열적, 기계적 및 전기화학적으로 안정해야 하며, ITO 전극 표면 및 발광층과의 점착력(adhesion)이 좋아야 한다. 또한 빛 투과도가 우수해야 하며, 매끄러운 표면의 필름을 형성할 수 있어야 한다. 다양한 접근사례를 통하여 향후 연구방향을 예측하고자 한다.

5.1 자기조립 단분자막을 이용한 정공전달층

자기조립 단분자막(self-assembly monolayer SAM)은 주어진 기질(substrate) 표면과의 자발적인 상호작용에 의해 형성된 유기 분자막을 말한다. 이러한 자기조립방법(self-assembly method)를 이용하여 PLED의 전극과 고분자 계면 사이의 성질을 조절하려는 많은 연구가 되어왔다.^{22,23} Smith 등은 conjugated-thiol based SAM을 이용하여 금속 전극과 고분자층 사이의 에너지 장벽을 조절하여 전자 주입을 향상시켰다.²²

또한 alkylsiloxane SAM을 이용하여 PLED 소자의 수명을 향상시켰다.²³ 그림 4는 ITO 표면을 *n*-octyltrichlorosilane과 (tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydrooctyl)-trichlorosilane과 같은 silane으로 SAM을 형성하였을 때와 그렇지 않았을 때의 소자 발광 수명을 비교한 결과이다.²³

Marks 등은 SAM-based anode modification을 통해 정공의 주입을 향상시키고, 소자의 밝기와 양자 효율을 증가시키는 연구를 수행해왔다.²⁴⁻³⁰ **그림 5**에서 보듯이 정공전달 성질을 가지는 아릴아민 구조에 siloxane 유도체(TPD-Si₂)를 도입하여 ITO 표면에 초박막 SAM을 형성하고, poly(9,9-dioctylfluorene)를 발광층으로 사용하여 소자를 제작하였고, 이때 SAM을 도입한 경우와 기존의 도핑된 전도성 고분자인 PEDOT:PSS를 사용하였을 때를 비교하였다.²⁹ 결과에서 보는 바와 같이 TPD-Si₂ SAM을 도입하였을 때, 소자의 양자효율과 I-V-L 특성이

PEDOT:PSS를 사용하였을 때보다 훨씬 향상되었음을 알 수 있다.

또한 Marks 등은 정공전달층의 필름 특성을 향상시키기 위해 TPD-Si₂와 정공전달 고분자인 TFB {poly(9,9-dioctylfluorene-co-N-(4-butylphenyl)diphenylamine)}를 혼합하여 정공전달층을 형성하였다.³⁰ 이때 TPD-Si₂는 정공전달의 역할과 필름을 가교시켜 용매에 대한 저항을 증가시키는 역할을 하며, TFB는 정공전달의 역할과 함께 혼합 용액의 점도를 증가시켜 필름 특성을 향상시키는 역할을 한다. 두 물질을 1:1 질량비로 혼합한 후, 스핀코팅을 통해 우수한 특성을 가지는 가교된 필름을 형성한 후 poly(9,9-dioctylfluorene-co-benzothiadiazole) (BT)와 TFB를 4:1 비율로 혼합하여 발광층을 형성하였다. 이렇게 제작된 소자의 I-V-L 특성을 **그림 6**에 나타내었다. 결과에서 TPD-Si₂+TFB를 정공전달층으로 사용하였을 때 PEDOT:PSS보다 2배 이상의 발광효율과 더 안정적인 소자 특성을 보여주었다. 더욱이 이 경우에는, 발광층에 사용되는 물질에 따라 혼합방법을 통해서 정공전달층의 HOMO level을 발광층의 HOMO level에 맞추어 조절이 가능하기 때문에 정공의 주입을 더욱 효율적으로 진행시킬 수 있다.

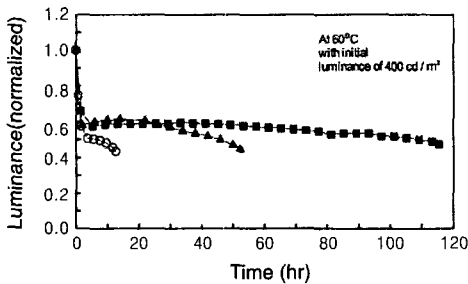


그림 4. 세척된 ITO(open circle), *n*-octyltrichlorosilane으로 처리된 ITO(dark triangle), (tridecafluoro-1,1,2,2,4-tetrahydrooctyl)-trichloro silane으로 처리된 ITO(dark square)로 제작한 소자의 수명.

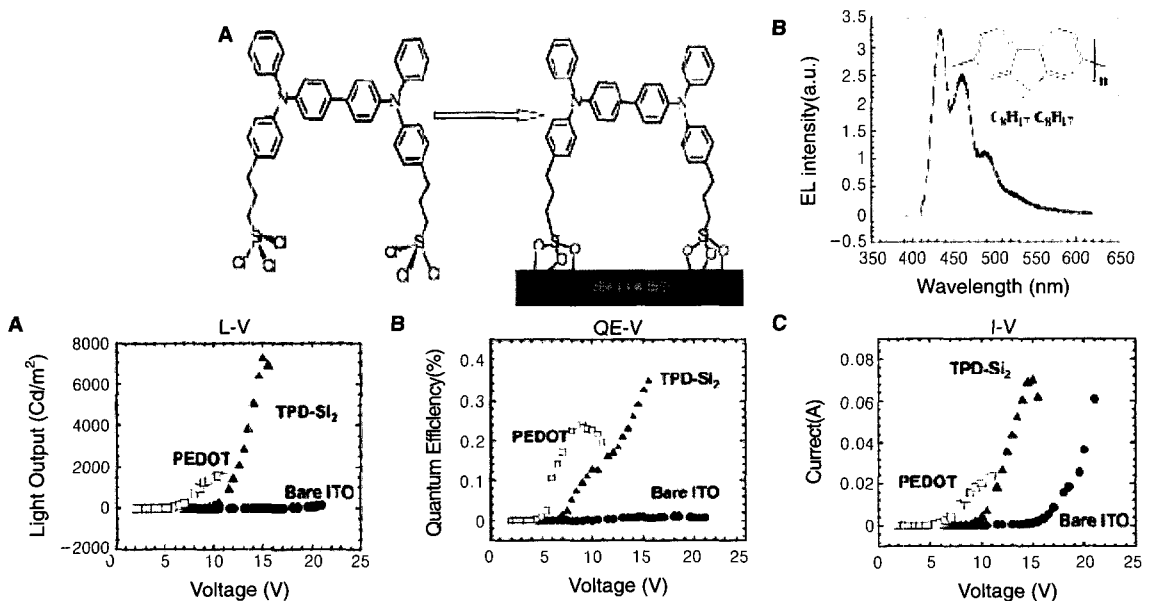


그림 5. ITO 위에 가교되어진 TPD-Si₂ SAM과 ITO/TPD-Si₂ SAM/PFO/Ca/Al 구조로 제작된 소자의 electroluminescence(EL) spectrum, L(luminance)-V(voltage), QE-V, 및 I(current)-V 특성.

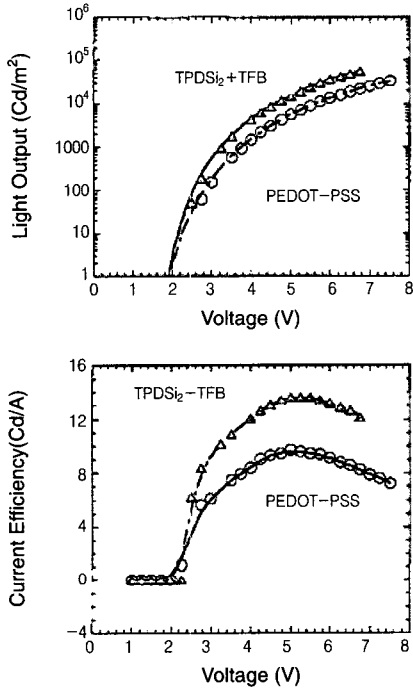
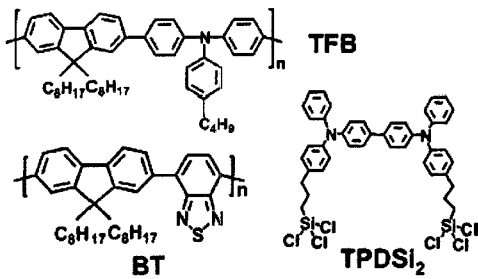


그림 6. TPD-Si₂, TFB, BT의 화학적 구조와 ITO/TPD-Si₂+TFB HTL or PEDOT:PSS/TFB+BT 혼합/Ca/Al 구조로 제작된 소자의 L-V 특성 및 I-V 특성 비교.

5.2 가교된 정공전달 고분자

앞서 말했듯이, PLED는 용액공정을 통해 각각의 층을 형성하기 때문에 정공전달층은 발광층 형성에 사용되는 용매에 강한 저항력을 가지고 있어야 한다. 이러한 조건을 충족시켜주기 위해 가교가 가능한 고분자를 도입하여, 소자 제작 동안 soluble한 상태를 유지하다가, curing 후 불용성으로 변화시키는 방법이 연구되어졌다. 가교 방법은 photo cross-linking 또는 thermal cross-linking 등의 방법이 사용된다.

Marder 등은 thermal cross-linking을 이용하여 아릴아민이 도입된 정공전달 고분자를 보고하였다 (그림 7).^{31,32}

그 외에도 photo cross-linking을 이용하여 정공

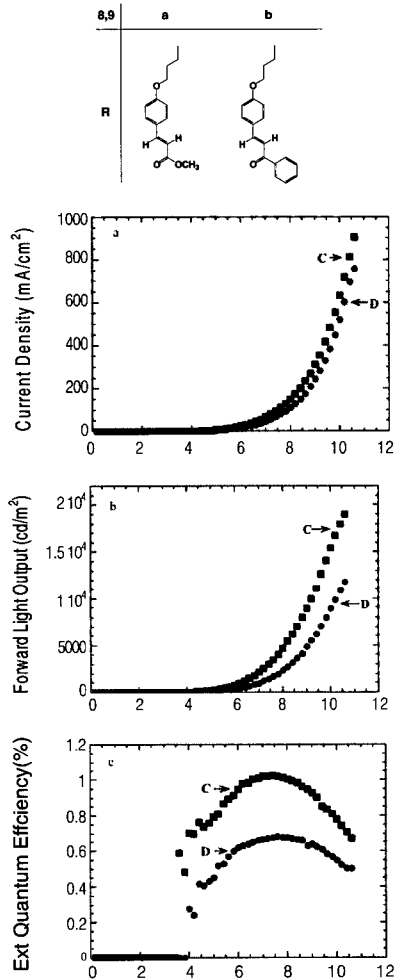
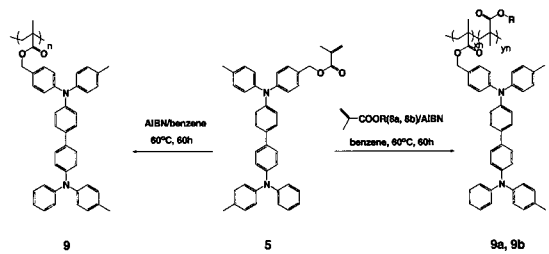


그림 7. Thermal cross-link되는 고분자의 합성 모식도와 이러한 고분자를 정공전달층으로 적용하였을 때의 I-V, L-V, 및 QE-V 특성.

전달층을 가교시켜 용매에 대한 저항력을 증가시켜 용액공정으로 소자를 제작하는 연구가 많이 진행되어왔다.³³⁻³⁵

Scott 등은 thermal cross-linking을 통한 정공전달층을 보고하였다.³⁶ 그는 정공전달 물질인 tri-phenylamine, 청색발광 물질인 polyfluorene의 각

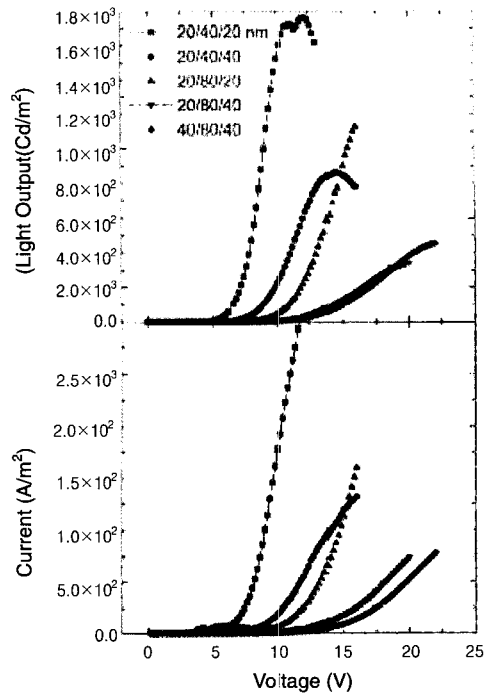
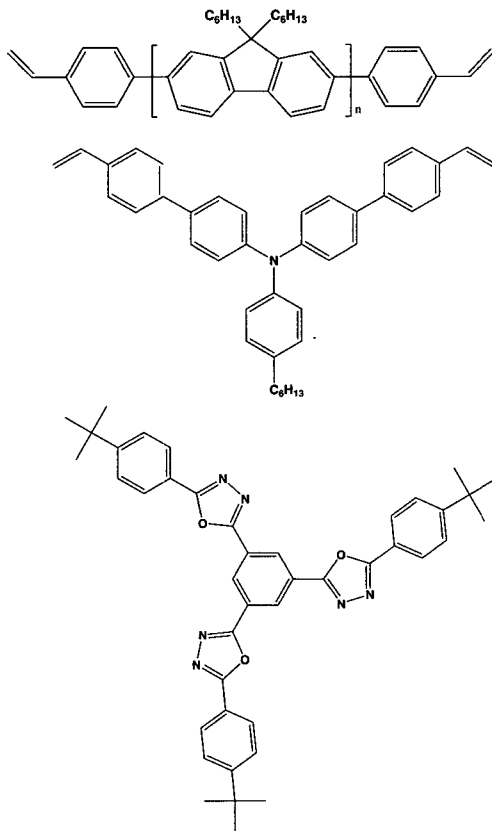


그림 8. Thermal cross-linking되는 정공전달, 발광 고분자 및 전자전달 물질의 화학 구조식과 이것을 이용한 소자의 I-V 및 L-V 특성.

말단기에 비닐 그룹을 도입하여 열에 의한 가교를 이용하여 용액공정으로 3중 막을 형성하였다. **그림 8**은 정공전달 물질과 발광 물질, 전자전달 물질의 화학적 구조와 이를 적용하여 각기 다른 두께로 소자를 만들었을 때의 소자 특성을 보이고 있다.

5.3 PFCB가 도입된 정공전달 고분자

Jen 등은 perfluorocyclobutane(PFCB)을 도입하여 새로운 형태의 정공전달 물질을 발표하였다.³⁷⁻⁴⁰ **그림 9**에서와 같이 불소가 도입된 2중 결합이 열에 의해 열리게 되고, 중간 상태를 거쳐 최종적으로 고리를 형성하게 되는데, 이러한 고리를 PFCB라고 한다. PFCB는 중합될 때 개시제나 촉매가 필요하지 않고, 중합과정 동안 어떠한 부산물도 형성하지 않는 장점을 가지고 있다. 또한 PFCB 고분자는 내구성과 공정성이 우수하고, 높은 화학적 저항성과 열적 안정성, 그리고 우수한 광학 특성을 가지고 있기 때문에 광학재료로 주목받고 있는 소재 중 하나이다.⁴¹⁻⁴⁶

그들은 **그림 10**과 같은 단계를 거쳐, PFCB를 정

공전달 특성을 가지는 아릴아민에 도입하여 새로운 형태의 정공전달 고분자를 합성하였다. 각각의 모노머들은 세척된 ITO 위에 스핀 코팅되고, 225 °C에서 1시간 동안의 베이킹 과정을 통해 ITO 위에서 중합되어 고분자 박막을 형성한다. 이렇게 형성된 정공전달층은 PEDOT : PSS 필름보다 빛 투과율이 더욱 우수하고, 유기 용매에 강한 저항력을 가지고 있다. 이러한 정공전달층에 다양한 발광 고분자를 이용하여 소자를 제작하고, 같은 조건의 PEDOT : PSS 소자와 비교하였을 때, PFCB가 도입된 정공전달층을 사용하였을 경우, 소자 특성이 더욱 향상됨을 보였다. 또한 PFCB가 도입된 정공전달층의 경우, 산을 유발하지 않기 때문에 ITO와 유기층 사이의 계면이 안정적이며, 게다가 backbone 내에 Si를 포함하고 있기 때문에 ITO 표면과의 접착력(adhesion)은 더욱 향상되었다. 따라서 소자 수명과 안정성 또한 향상될 것으로 예상된다.

본 연구실에서도 PFCB를 도입한 새로운 형태의 정

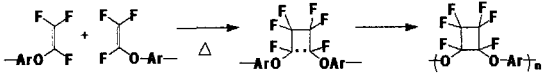


그림 9. PFCB의 중합 과정.

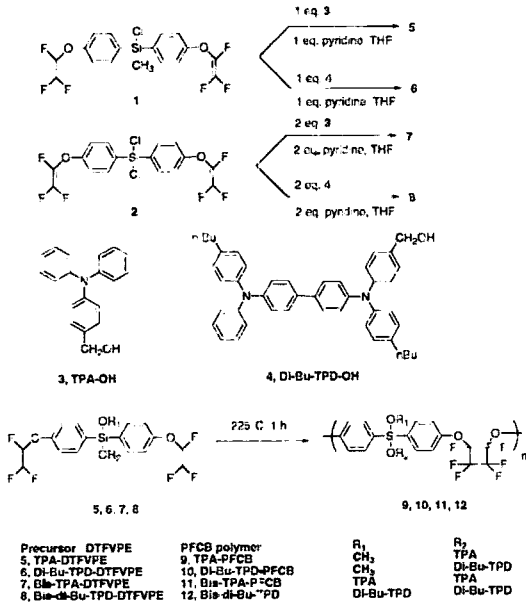


그림 10. PFCB가 도입된 새로운 정공전달 고분자의 합성 과정.

공전달 물질을 합성한 바 있다. 정공전달 특성을 가지고 있는 아릴아민과 카바졸에 PFCB를 도입하여 높은 열적 안정성을 가진 새로운 형태의 물질을 합성하였고, 이를 이용하여 필름을 형성하였다. 필름 특성을 관찰하였을 때, PEDOT:PSS보다 더욱 매끄러운 표면을 가지고, 불소의 영향에 의해 hydrophobic한 특성을 가짐을 알 수 있었다. 따라서 향후 용액공정을 통해 PLED의 정공전달층으로의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

6. 결론

PLED에서 정공전달층으로 현재 가장 보편적으로 사용되어지고 있는 PEDOT : PSS 또는 PANI : PSS는 PLED의 상용화를 위한 소자의 안정성과 수명 측면 등에서 개선되어지거나 새로운 정공전달 물질로 대체가 필요하며, 자기조립법을 이용한 정공전달층의 형성방법 또는 가교를 통한 정공전달층의 형성방법 등 새로운 정공전달층에 대한 다양한 연구 결과와 응용

사례를 살펴보았다. 현재 PLED를 실용화하기 위해 고효율, 장수명 및 고색순도가 필요하며, 이것을 달성하기 위해서는 우수한 발광재료와 새로운 소자 구조뿐만 아니라 새로운 정공전달층 등 다양한 연구가 필요하다. 우리나라는 공정기술 측면에서 세계 1위의 자리를 지키고 있지만, 핵심 원천 기술과 특허 측면 등은 선진국에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 디스플레이 선진국으로 발돋움하기 위해서는 재료분야의 핵심 기술 개발 및 신기술 개발에 더욱 박차를 가해야 할 것이다. 본 고를 통해 앞으로 디스플레이 분야에서의 다양한 연구개발이 더욱 활발하게 이루어지길 필자들은 기대해 본다.

참고문헌

1. C. W. Tang and S. A. Vanslyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
2. M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **395**, 151 (1998).
3. B. W. D'Andrade, M. A. Baldo, and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1045 (2001).
4. J. H. Borroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns, and A. B. Holmes, *Nature*, **347**, 539 (1990).
5. J. Y. Lee and S. T. Lee, *Adv. Mater.*, **16**, 51 (2004).
6. I. D. Parker, *J. Appl. Phys.*, **75**, 1656 (1994).
7. D. Braun and A. J. Heeger, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1982 (1991).
8. R. N. Marks, D. D. C. Bradley, R. W. Jackson, P. L. Burn, and A. B. Holmes, *Synth. Met.*, **57**, 4128 (1993).
9. J. C. Scott, J. Kaufman, P. L. Brock, R. Dipietro, J. Salem, and J. A. Goitia, *J. Appl. Phys.*, **79**, 2745 (1996).
10. G. Gustafsson, Y. Cao, G. M. Treacy, F. Klavetter, N. Colaneri, and A. J. Heeger, *Nature*, **357**, 477 (1992).
11. G. Gustafsson, G. M. Treacy, Y. Cao F. Klavetter, N. Colaneri, and A. J. Heeger, *Synth. Met.*, **57**, 4123 (1993).
12. G. Yu, *Synth. Met.*, **80**, 143 (1996).
13. S. Karg, J. C. Scott, J. R. Salem, and M. Angelopoulos, *Synth. Met.*, **80**, 111 (1996).
14. S. A. Carter, T. Grizzi, S. Karg, P. J. Brock, and J. C. Scott, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 2067 (1997).

15. J. C. Carter, I. Grizzi, S. K. Heeks, D. J. Lacey, S. G. Latham, P. G. May, O. R. de los Paños, K. Pichler, C. R. Towns, and H. F. Wittmann, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 34 (1997).
16. A. Berntsen, Y. Croonen, C. Liedenbaum, H. Schoo, R. J. Visser, J. Vleggaar, and P. van de Weijer, *Opt. Mater.*, **9**, 125 (1998).
17. J. C. Scott, S. A. Carter, S. Karge, P. J. Brock, and M. Angelopoulos, *Synth. Met.*, **85**, 1197 (1997).
18. A. Elschner, F. Bruder, H. W. Heuer, F. Jonas, A. Karbach, S. Kirchmeyer, and S. Thurm, *Synth. Met.*, **111**, 139 (2000).
19. M. P. de Jong, L. J. van IJzendoorn, and M. J. A. de Voigt, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2255 (2000).
20. K. W. Wong, H. L. Yip, Y. Luo, K. Y. Wong, W. M. Lau, K. H. Low, H. F. Chow, Z. Q. Gao, W. L. Yeung, and C. C. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2788 (2002).
21. R. H. Friend, *Material Research Society, Lecture*, **B4.6** (2002).
22. I. H. Campbell, J. D. Kress, R. L. Martin, D. L. Smith, N. N. Barashkov, and J. P. Ferraris, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3528 (1997).
23. B. Choi, J. Rhee, and H. H. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2109 (2001).
24. W. Li, Q. Wang, J. Cui, H. Chou, S. E. Shaheen, G. E. Jabbour, J. Anderson, P. Lee, B. Kippelen, N. Peyghambarian, N. R. Armstrong, and T. J. Marks, *Adv. Mater.*, **11**, 730 (1999).
25. J. E. Malinsky, G. E. Jabbour, S. E. Shaheen, J. D. Anderson, A. G. Richter, T. J. Marks, N. R. Armstrong, B. Kippelen, P. Dutta, and N. Peyghambarian, *Adv. Mater.*, **11**, 227 (1999).
26. J. Cui, Q. Huang, Q. Wang, and T. J. Marks, *Langmuir*, **17**, 2051 (2001).
27. Q. Huang, J. Chi, H. Yan, J. G. C. Veinot, and T. J. Marks, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 3528 (2002).
28. J. Chi, Q. Huang, J. G. C. Veinot, H. Yan, and T. J. Marks, *Adv. Mater.*, **14**, 565 (2002).
29. H. Yan, Q. Huang, J. Chi, J. G. C. Veinot, M. M. Kern, and T. J. Marks, *Adv. Mater.*, **15**, 835 (2003).
30. H. Yan, Q. Huang, B. J. Scott, and T. J. Marks, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3873 (2004).
31. Y.-D. Zhang, R. D. Hreha, G. E. Jabbour, B. Kippelen, N. Peyghambarian, and S. R. Marder, *J. Mater. Chem.*, **12**, 1703 (2002).
32. B. Domercq, R. D. Hreha, Y.-D. Zhang, N. Larribeau, J. N. Haddock, C. Schultz, S. R. Marder, and B. Kippelen, *Chem. Mater.*, **15**, 1491 (2003).
33. A. Bacher, C. H. Erdelen, W. Paulus, H. Ringsdorf, H. W. Schmidt, and P. Schuhmacher, *Macromolecules*, **32**, 4551 (1999).
34. T. Braig, D. C. Müller, M. Groß, K. Meerholz, and O. Nuyken, *Macromol. Rapid Commun.*, **21**, 583 (2000).
35. E. Bacher, S. Jungemann, M. Rojahn, V. Wiederhirn, and O. Nuyken, *Macromol. Rapid Commun.*, **25**, 1191 (2004).
36. J. P. Chen, G. Klaerner, J.-I. Lee, D. Markiewicz, V. Y. Lee, R. D. Miller, and J. C. Scott, *Synth. Met.*, **107**, 129 (1999).
37. S. Liu, X. Jiang, H. Ma, M. S. Liu, and A. K.-Y. Jen, *Macromolecules*, **33**, 3514 (2000).
38. X. Jiang, S. Liu, M. S. Liu, H. Ma, and A. K.-Y. Jen, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2985 (2000).
39. X. Jiang, S. Liu, M. S. Liu, P. Herguth, A. K.-Y. Jen, H. Fong, and M. Sarikaya, *Adv. Funct. Mater.*, **12**, 745 (2002).
40. X. Gong, D. Moses, A. J. Heeger, S. Liu, and A. K.-Y. Jen, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 183 (2003).
41. D. W. Smith, Jr., and A. Babb, *Macromolecules*, **29**, 852 (1999).
42. R. Traiphol, H. Shah, D. W. Smith, Jr., and D. Perahia, *Macromolecules*, **34**, 3954 (2001).
43. D. W. Smith, Jr., D. A. Babb, H. V. Shah, A. Hoeglund, R. Traiphol, D. Perahia, H. W. Boone, C. Langhoff, and M. J. Radler, *Fluorine Chem.*, **104**, 109 (2000).
44. M.-C. Oh, M.-H. Lee, J.-H. Ahn, H.-J. Lee, and S. G. Han, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1559 (1998).
45. J. Ghim, D. S. Lee, B. G. Shin, D. Vak, D. K. Yi, M.-J. Kim, H. S. Shim, J.-J. Kim, and D.-Y. Kim, *Macromolecules*, **37**, 5724 (2004).
46. R. Schwdiauer, G. S. Neugschwandtner, S. Bauer-Gogonea, and S. Bauer, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3998 (1999).