

2,7-Naphthalene Ligand Compounds의 전기화학 및 분광학적 특성

최돈수 · 김무영* · 형경우**†

(주)UPChemical, *경희대학교, **전주대학교 나노신소재공학과

Electrochemical and Spectrum Properties of 2,7-Naphthalene Ligand Compounds

Don Soo Choi, Mu Young Kim*, Kyung Woo Hyung**†

UP Chemical Co., Ltd, 576-2 Chilgwe-dong Pyeongtaek Korea, *Dept. of Chemistry, Kyunghee University,

**Department of Nano-advanced Materials Eng. Jeonju University, 560-759, Korea

(2009년 8월 28일 접수 : 2009년 9월 14일 최종수정 : 2009년 9월 16일 채택)

Abstract The compound of 2,6-Bis[(9-phenylcarbazolyl)ethenyl]naphthalene (BPCEN-1), 2-[6-{1-Cyano-2-(9-phenylcarbazolyl)vinyl}naphthyl]-3-(9-phenylcarbazolyl)acrylonitrile (BPCEN-2), 2,6-Bis[4-(1-naphthyl)phenylamino]styrenyl naphthalene (BNPASN-1), 2-[6-{1-Cyano-2-(naphthylphenylaminophenyl) vinyl}naphthyl]-3-(naphthylphenylaminophenyl)acrylonitrile (BNPASN-2) was analyzed electrochemically and spectroscopically and can be obtained by bonding phenylcarbazolyl, naphthylphenylaminophenyl and -CN ligands to 2,7-naphthalene. The electrochemical and spectroscopic study resulted in the P-type (BPCEN-1, BNPASN-1) being changed to N-type (BPCEN-2, BNPASN-2) according to -CN bonding despite having the same structure. The value of band gap(E_g) was revealed to be small as HOMO had shifted higher and LUMO lower. The E_g value for naphthylphenylaminophenyl ligand was reduced because it has a smaller HOMO/LUMO value than that of phenylcarbazolyl from a structural perspective. The electrochemical HOMO/LUMO values for BPCEN-1, BPCEN-2, BNPASN-1, BNPASN-2 were measured to be 5.55eV / 2.83eV, 5.73eV / 3.06eV, 5.48eV / 2.78eV, and 5.53eV / 2.98eV, respectively. By -CN ligand, the UV max, E_g and PL max were shifted to longer wavelength in their spectra and the luminescence band could be also confirmed to be broad in the photoluminescence (PL) spectrum.

Key words OLED, HOMO/LUMO value, cyclic voltammetry, IP, EA, electroluminescence.

1. 서 론

유기전기발광다이오드(OLED)는 Tang 과 Van Slyke¹⁾에 의해 보고된 이래 평판 디스플레이에 서의 응용이 활발해지면서 다양하고 활발한 연구들이 수행되고 있다.²⁻⁵⁾

그러나 대부분의 연구는 주로 합성과 구동전압 등에 관하여 진행되고 있으며 전기화학적 기초연구는 상당히 부족하다. 유기전기발광다이오드(OLED)는 구동 방식에 따라 PMOLED와 AMOLED로 구분되며, 재료적 측면에서도 조금씩 변화를 보이고 있다. 특히 AMOLED의 경우 디스플레이 크기가 커지면서, 더 선명한 색좌표와 고효율 및 안정성 (T_g) 등이 요구되고 있다. OLED의 재료들에 이용되는 aromatic ring은 벤젠, 나프탈렌, 안트라센, 파이렌, 플루오렌, 스퀴이로 플루오렌, 카바졸 등이며, 말단기 또는 작용기들로는 $-NR_2$, $-O-R$, $-CN$, $-CH_3$,

$-C=R_2$ 등이 도입되어 색 좌표 및 발광 특성을 향상시키려 노력하고 있다.⁶⁻¹⁵⁾ OLED의 효율은 device의 두께, 운반자의 주입장벽(injection barrier), host와 게스트 사이의 에너지 전환 등에 크게 좌우되며, 시스템에 따라 효율은 현저히 달라진다.¹⁶⁻¹⁷⁾

한편, OLED의 소자는 고체 상태이기 때문에 전기화학적으로도 고체 상태에서 분석을 해야 OLED 소자에서 더 근사치를 얻을 수 있다. 또한 이온상태에서 용액분석은 UV 스펙트럼에서 나타나는 장파장의 미세 봉우리를 산화/환원 전위로 혼동할 수 있으며, 산화/환원전위의 차가 에너지 밴드 갭, E_g 이기 때문에, 용액의 경우 잘못된 분석 오류를 가져올 수 있다. 또한 고체 상태에서도 산화/환원의 차가 잘 맞지 않는 경우가 종종 나타나는데, 그 부분 역시 UV 분광 데이터의 E_g 와 비교를 통해 오류를 감소시킬 수 있다. 더 오차를 줄이려면 기본 골격이 갖는 유사 HOMO/LUMO와 분석 데이터의 비교를 통하면 더 줄일 수 있다. 전기화학적 봉우리와 분광학적 데이터는 산화/환원의 전위차가 E_g 이기 때문에 서로 일

†Corresponding author

E-Mail : kwhyung@jj.ac.kr (K. W. Hyung)

치하여야 한다.

전기화학적으로 많은 봉우리들이 나타나는데 전기화학적 전위와 계도의 전위가 일치할 것으로 사료된다. 즉 한 번 찬 계도는 다른 스핀이 잘 수 있는 계도가 없게 되며, 전위가 넓을수록 많은 계도를 가짐으로써 전자와 정공이 만날 수 있는 기회가 더 많아져, 더 많은 여기자를 낼 수 있다고 생각된다. 따라서 전기화학적으로 산화 전위 확산전류가 나타나는 Onset Potential과 봉우리가 증가하다가 서서히 기울기가 감소하는 변곡점 (봉우리 윗부분의 변곡점)의 차와 반대로 환원전위의 Onset Potential과 변곡점의 차에서 어느 차가 더 크냐에 따라 전기화학적으로 유기물의 N-type과 P-type을 분석할 수 있으며, 기타 전기화학적인 데이터의 봉우리들과 분광학적 데이터의 상호 연관관계를 이해하면 재료 특성의 더 많은 정보를 얻을 수 있다.

본 연구의 목적은 재료의 구조변화에 따른 전기화학적 및 분광학적 분석에 있으며, 그 데이터의 의미를 소자에 적용하고자 한다. 소자 디자인에서 가장 중요한 부분은 재료 자체의 물성이다. 일반적으로 전기화학적 방법을 통해 HOMO/LUMO를 측정하여 소자 디자인에 적용하고 있다. 하지만 전기화학 데이터에는 여러 봉우리들이 나타난다. 따라서 그 봉우리들을 정확히 확인함으로써 효과적인 소자 디자인의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험 방법

시료의 분석방법은 시료를 작업전극 (유기기관 위의 ITO; 산화전위 분석, 유기기관 위의 Al; 환원전위 분석) 위에 필름으로 준비한 다음 전기화학 셀 (기준전극 Ag/Ag+, 보조전극 Pt선, 전해질)에 필름으로 입힌 작업전극을 담가 순환전압전류법 (CV법) 또는 네모파전압전류법 (SW법), 일정전류전위차분석법 (CCP법)을 이용하여 산화/환원반응에서의 전위차를 측정하였다.¹⁸⁾ 이때 시료의 필름 제작은 sputtering 증착 방법과 Dip Coating 법을 사용

하였으며, sputtering 증착 방법과 Dip Coating 방법에 따른 차이 (필름의 두께에 따른 전류량의 크기 차이)점은 없을 것으로 판단한다. 유기용매 acetonitrile (기준전극용)와 DMF/DMSO (전해질 관련)와 전해질 Bu₄NClO₄ 및 표준물질 Alq₃ (Voltage를 eV로 환산하기 위한 물질)은 표준시약 (Aldrich, TCI 등)을 사용하였다. 기준전극은 끝 부분이 다공성 막으로 형성된 유리관에 은선과 0.1M AgNO₃로 구성하였다. 또한 전해질은 유기용매에 1 × 10⁻³ M로 만들었다. 전기화학적 CV법 및 SW법의 조건은 100~20mV/sec이었으며, CCP법의 공급 전류량은 1~10uA를 사용하였다. 전기화학적으로 측정된 Voltage는 eV로 바꾸는 방법은 크게 두 가지가 있다.

1) 표준물질 Ferrocene을 이용하여 Ag/Ag+ 기준전극을 SCE 기준전극으로 전위를 바꾸어 준 후, Alq₃의 5.7eV의 전위 비교를 통해 4.8의 상수를 더해 줌으로 eV로 바꿀 수 있다.

2) 표준물질로 Alq₃의 전위(Oxidation Potential은 +0.61V)를 분석하여, 5.7eV와의 차이 값의 상수를 더함으로 eV로 환산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 이 실험에 사용된 각 분자들의 구조를 나타내었다. Fig. 2는 BPCEN-1의 전기화학적 방법과 분광학적 방법으로 분석한 결과이다. 전기화학적으로는 Cyclic Voltammtery (CV) 법, Square Wave (SW) 법 및 Constant Current Potentiometry (CCP 또는 CC) 법을 사용하였으며, 분광학적으로는 UV, PL spectrum을 사용하였다. 전기화학적인 경우 CV와 SW 법은 유사한 모양을 나타내었으나, CCP의 경우 더 섬세한 봉우리를 형성하였다.

전기화학적 분석방법은 다음과 같다. 잔류전류에서 급격한 확산전류가 나타나는 지점을 Onset Potential [OX₁; +0.75V (5.55eV), Red₁; -1.97V (2.83eV)]이라 정의하고, OX₁과 Red₁의 차는 Band gap [E_g; 2.72eV (456 nm)]에

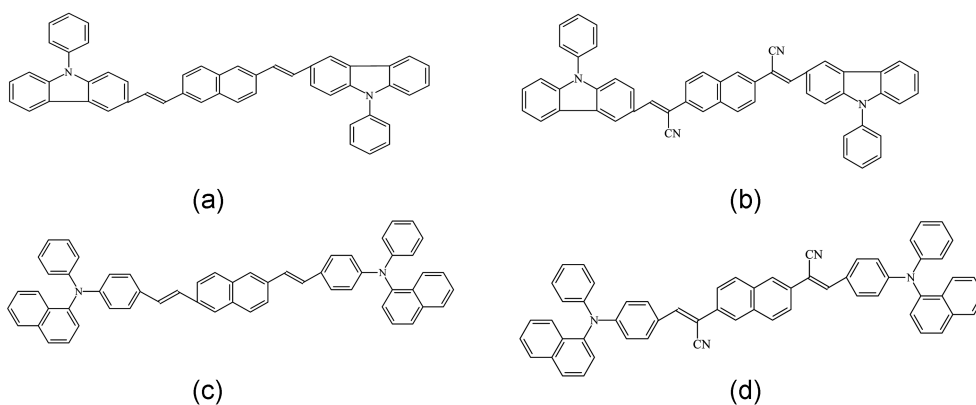


Fig. 1. Molecular structure of (a) BPCEN-1, (b) BPCEN-2, (c) BNPNASN-1 and (d) BNPNASN-2.

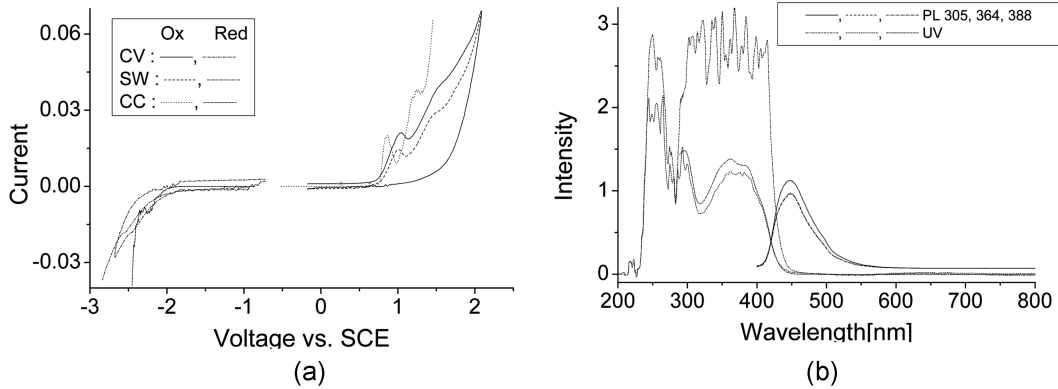


Fig. 2. Electrochemical(a) and spectrum (b) data of BPCEN-1.

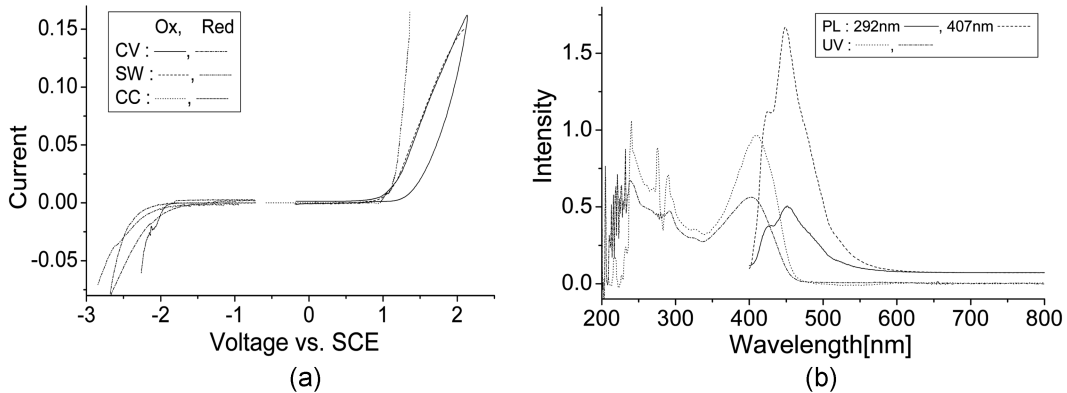


Fig. 3. Electrochemical (a) and spectrum (b) data of BPCEN-2.

해당된다. 그리고 증가하던 전류량이 감소하는 지점 (즉, 봉우리 윗부분의 변곡점)의 산화/환원전위 $+0.97\text{V}$ (5.77eV) / -2.17V (2.63eV)의 차를 UV max_1 [3.14eV (395 nm)]이라 정의한다. 또한 Fig. 2에서처럼 전기화학 데이터는 여러 봉우리를 나타낸다. 따라서 두 번째 또는 세 번째 나타나는 Onset Potential과 변곡점의 산화/환원의 차는 E_{g2} [$+0.89\text{V}$ (5.69eV) / -2.04V (2.76eV) = 2.95eV (420 nm)]와 UV max_2 [$+1.32\text{V}$ (6.12eV) / -2.26V (2.54eV) = 3.58eV (346 nm)] 및 E_{g3} 과 UV max_3 등에 해당된다. 그리고 Onset Potential과 변곡점의 차를 비교하여 P-type 또는 N-type을 얻을 수 있는데, P-type의 경우 산화반응이 환원반응보다 큰 값을 나타낸다. 즉 첫 번째 봉우리에서 산화의 경우 Onset Potential은 $+0.75\text{V}$ 이었고, 변곡점은 $+0.97\text{V}$ 이었다. 따라서 그 차는 $0.97\text{V} - 0.75\text{V} = 0.22\text{V}$ 이었으며, 환원의 경우 $2.17\text{V} - 1.97\text{V} = 0.20\text{V}$ 이었다. 또한 첫 번째와 두 번째 Onset Potential과 변곡점을 비교하면 산화의 경우 $1.32\text{V} - 0.75\text{V} = 0.57\text{V}$ 이었으며, 환원의 경우 $2.26\text{V} - 1.97\text{V} = 0.29\text{V}$ 로 산화가 더 큰 차 값을 나타낸다. 따라서 BPCEN-1의 경우 정공 특성이 좋은 P-type임을 관찰 할 수 있었다.

분광학적인 경우 UV max 는 360 nm , 380 nm 에서 나타

났으며, E_g 는 430 nm 에서 나타났다. 또한 305 nm , 364 nm , 388 nm 에서 여기 시킨 PL spectrum의 max 는 450 nm 에서 나타났으며, PL 봉우리의 폭은 $415\sim 550\text{ nm}$ 에서 135 nm 폭의 발광이 나타났다. 전기화학/분광학적 방법의 데이터를 비교하면 E_g 의 경우 2.72eV (456 nm) / 430 nm 이고, UV max_1 은 3.14eV (395 nm) / 380 nm 이며, UV max_2 는 3.58eV (346 nm) / 360 nm 이었다. 따라서 PL의 여기 에너지 305 nm , 364 nm , 388 nm 에 따른 PL 봉우리의 크기 변화를 고려할 때 전기화학적으로 얻은 3.14eV (395 nm)에 맞는 HOMO/LUMO (5.77eV / 2.63eV) 값을 소자 디자인에 이용할 (ITO/HIL/HTL/EL/HBL/ETL/LiAl의 구조) 경우 Hole Blocking Layer (HBL)의 HOMO는 5.77eV 이고, Hole Transport Layer (HTL)의 LUMO는 2.63eV 가 적합함을 알 수 있다.

Fig. 3은 BPCEN-2의 전기화학적 방법과 분광학적 방법으로 분석한 결과이다.

전기화학적인 방법에서 Onset Potential의 OX_1 는 $+0.93\text{V}$ (5.73eV), Red_1 는 -1.74V (3.06eV)이고, E_{g1} 은 2.67eV (464 nm)이었으며, UV max_1 은 $+1.09\text{V}$ (5.89eV) / -1.98V (2.82eV) = 3.07eV (404 nm)에서 나타났다. 그리고 E_{g2} 는 $+0.97\text{V}$ (5.77eV) / -1.87V (2.93eV) = 2.84eV (437 nm)이

었으며, UV max₂는 +1.19V (5.99eV)/-2.11V (2.69eV) = 3.30eV (376 nm)에서 나타났으며, Eg₃는 +1.05V (5.85 nm) /-1.96V (2.84 nm)=3.01eV (412 nm)와 UV max₃는 +1.26V (6.06eV)/-2.24V (2.56eV)=3.50eV (354 nm)이었다. 또한 BPCEN-2의 경우 -CN 음이온에 의해 N-type을 나타냈었는데, 산화전위의 변곡점과 Onset Potential들의 차, 즉 1.09V - 0.93V = 0.16V 또는 1.19V - 0.93V = 0.16V 및 1.26V - 0.93V = 0.33V 값을 나타냈으며, 환원전위의 차는 1.98V - 1.74V = 0.24V 또는 2.11V - 1.74V = 0.43V 및 2.24V - 1.74V = 0.50V로 환원전위의 차가 산화전위의 차보다 더 큰 값을 나타냈다.

분광학적인 경우 UV max는 405 nm에서 나타났으며, Eg는 460 nm에서 나타났다. 또한 292 nm, 407 nm에서 여기 시킨 PL spectrum의 max는 425 nm, 450 nm에서 나타났으며, PL 봉우리의 폭은 410~560 nm에서 150 nm폭의 발광이 나타났다. 따라서 -CN에 의해 더 장파장으로 이동함을 알 수 있었다.

전기화학/분광학적 방법의 데이터를 비교하면 Eg의 경우 2.67eV (464 nm) / 460 nm이고, UV max₁은 3.07eV (404 nm) / 405 nm이었다. 따라서 PL의 여기 에너지 292 nm, 407 nm에 따른 PL 봉우리의 크기 변화를 고려할 때 전

기화학적으로 얻은 UV max₃의 3.50eV (354 nm)에 맞는 HOMO/LUMO (6.06eV / 2.56eV) 값을 소자 디자인에 이용할 경우 HBL의 HOMO는 6.06eV이고, HTL의 LUMO는 2.56eV임을 알 수 있다.

Fig. 4는 BNPASN-1의 전기화학적 방법과 분광학적 방법으로 분석한 결과이다.

전기화학적인 방법에서 Onset Potential의 OX₁과 Red₁ 및 Eg₁은 각각 +0.68V (5.48eV)와 -2.02V (2.78eV) 및 2.70eV (459 nm)이었고, UV max₁은 +1.13V (5.93eV) / -2.21V (2.59eV) = 3.34eV (371 nm)이었으며, Eg₂는 +0.73V (5.53eV) / -2.25V (2.55eV) = 2.98eV (416eV) 이었다. UV max₂는 측정할 수 없었다. 그리고 BNPASN-1의 산화전위의 변곡점과 Onset Potential의 차는 산화의 경우 1.13V - 0.68V = 0.45V이었으며, 환원의 경우 2.21V - 2.02V = 0.19V 임으로 BNPASN-1은 P-type임을 알 수 있었다.

분광학적인 경우 UV max는 405 nm, 420 nm에서 나타났으며, Eg는 450 nm에서 나타났다. 또한 291 nm, 410 nm, 426 nm에서 여기 시킨 PL spectrum의 max는 468 nm에서 나타났으며, PL 봉우리의 폭은 430~570 nm에서 140 nm 폭의 발광이 나타났다.

전기화학/분광학적 방법의 데이터를 비교하면 Eg의 경

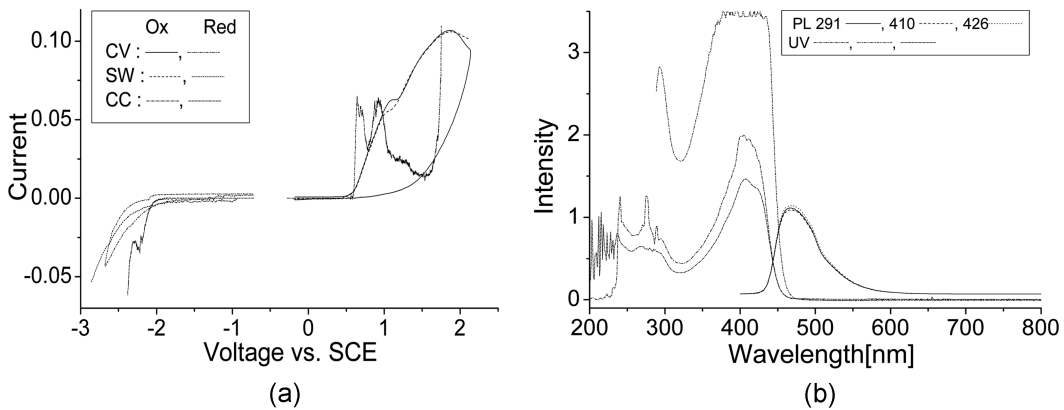


Fig. 4. Electrochemical(a) and spectrum(b) data of BNPASN-1.

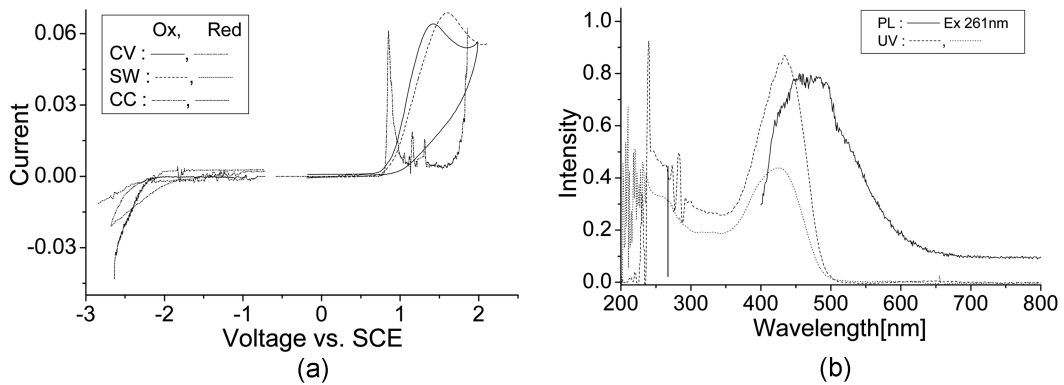


Fig. 5. Electrochemical(a) and spectrum (b) data of BNPASN-2.

우 2.70eV (459 nm) / 450 nm이고, UV max₁은 3.34eV (371 nm) / 420 nm이었다. 따라서 PL의 여기 에너지 291 nm, 410 nm, 426 nm에 따른 PL 봉우리의 크기 변화를 고려할 때 전기화학적으로 얻은 UV max₁의 3.34eV (371 nm)에 맞는 HBL의 HOMO는 5.93eV이고, HTL의 LUMO는 2.55eV임을 알 수 있다.

또한 BPCEN-1과 BNPASN-1의 HOMO/LUMO를 비교한 결과 phenylcarbazolyl보다 naphthylphenylaminophenyl 리간드가 더 작은 HOMO/LUMO 값을 나타내었다.

Fig. 5는 BNPASN-2의 전기화학적 방법과 분광학적 방법으로 분석한 결과이다.

전기화학적 방법에서 Onset Potential의 Ox₁과 Red₁ 및 Eg₁은 각각 +0.73V (5.53eV)와 -1.82V (2.98eV) 및 2.55eV (486 nm)이었고, UV max₁은 +0.81V (5.61eV) / -2.06V (2.74eV) = 2.87eV (432 nm)이었으며, Eg₂와 UV max₂는 각각 2.88eV (431 nm), 3.60eV(344 nm)이었다. 그리고 BNPASN-2의 산화전위의 변곡점과 Onset Potential의 차는 산화의 경우 0.81V - 0.73V = 0.12V이었으며, 환원의 경우 2.06V - 1.82V = 0.24V임으로 BNPASN-2은 N-type임을 알 수 있었다.

분광학적인 경우 UV max는 425 nm에서 나타났으며,

Eg는 480 nm에서 나타났다. 또한 261 nm에서 여기 시킨 PL spectrum의 max는 450~500 nm에서 나타났으며, PL 봉우리의 폭은 390~650 nm에서 170 nm폭의 발광이 나타났다.

전기화학적으로 얻은 UV max₁의 = 2.87eV (432 nm)에 맞는 HBL의 HOMO는 5.61eV이고, HTL의 LUMO는 2.74eV임을 알 수 있다. 또한 BPCEN-2과 BNPASN-2의 HOMO/LUMO를 비교한 결과 phenylcarbazolyl보다 naphthylphenylaminophenyl 리간드가 더 작은 HOMO/LUMO 값을 나타내었다.

다음의 Table 1~3은 앞서 분석한 자료들의 표이다.

Table 1. The electrochemical influence of band gap.

Materials	Ox (HOMO-eV)	Red (LUMO-eV)	Ox - Red = Eg (eV)
BPCEN-1	+0.75V (5.55eV)	-1.97V (2.83eV)	2.72eV (456eV)
BPCEN-2	+0.93V (5.73eV)	-1.74V (3.06eV)	2.67eV (464eV)
BNPASN-1	+0.68V (5.48eV)	-2.02V (2.78eV)	2.70eV (459eV)
BNPASN-2	+0.73V (5.53eV)	-1.82V (2.98eV)	2.55eV (486eV)

Table 2. Electrochemical Onset Potential and inflection point.

Materials	Ox-Red	Eg ₁	UV max ₁	Eg ₂	UV max ₂
BPCEN-1	Ox	+0.75V (5.55eV)	+0.97V (5.77eV)	+0.89V (5.69eV)	+1.32V(6.12eV)
	Red	-1.97V (2.83eV)	-2.17V (2.63eV)	-2.04V (2.76eV)	-2.26V(2.54eV)
	Diff.	2.72eV (456nm)	3.14eV (395nm)	2.95eV (420nm)	3.58eV(346nm)
BPCEN-2	Ox	+0.93V (5.73eV)	+1.09V (5.89eV)	+0.97V (5.77eV)	+1.19V(5.99eV)
	Red	-1.74V (3.06eV)	-1.98V (2.82eV)	-1.87V (2.93eV)	-2.11V(2.69eV)
	Diff.	2.67eV (464nm)	3.07eV (404nm)	2.84eV (437nm)	3.30eV(376nm)
BNPASN-1	Ox	+0.68V (5.48eV)	+1.13V (5.93eV)	+0.73V (5.53eV)	-
	Red	-2.02V (2.78eV)	-2.21V (2.59eV)	-2.25V (2.55eV)	-
	Diff.	2.70eV (459nm)	3.34eV (371nm)	2.98eV (416nm)	-
BNPASN-2	Ox	+0.73V (5.53eV)	+0.81V (5.61eV)	+0.87V (5.67eV)	+1.05V(5.85eV)
	Red	-1.82V (2.98eV)	-2.06V (2.74 eV)	-2.01V (2.79eV)	-2.55V(2.25eV)
	Diff.	2.55eV(486nm)	2.87eV (432nm)	2.88eV (431nm)	3.60eV(344nm)

Table 3. Spectrum and electrochemical Eg & UV max and semiconductor type by means of electrochemical analysis.

Materials	method	Eg ₁	Eg ₂	UV max ₁	UV max ₂	Type
BPCEN-1	Spectrum	430nm	-	380nm	360nm	-
	electrochemical	456nm	420nm	395nm	346nm	P-Type
BPCEN-2	Spectrum	460nm	-	405nm	-	-
	electrochemical	464nm	437nm	404nm	376nm	N-Type
BNPASN-1	Spectrum	450nm	-	420nm	405nm	-
	electrochemical	459nm	416nm	371nm	-	P-type
BNPASN-2	Spectrum	480nm	-	425nm	-	-
	electrochemical	486nm	431nm	432nm	344nm	N-type

4. 결 론

2,7-naphthalene에 -phenylcarbazolyl과 naphthylphenyl-aminophenyl리간드 및 -CN이 결합된 BPCEN-1, BPCEN-2, BNPASN-1, BNPASN-2 화합물들을 전기화학적 분석 결과 -CN 결합에 의해 P-type (BPCEN-1, BNPASN-1)이 N-type (BPCEN-2, BNPASN-2)으로 바뀌었으며, HOMO 값이 더 큰 값을 나타내었으며, LUMO 값은 더 작아짐으로 밴드갭이 작아졌다. 구조적으로 phenylcarbazolyl과 naphthylphenylaminophenyl 리간드에 따른 HOMO/LUMO 영향을 살펴보면, phenylcarbazolyl보다 naphthylphenylaminophenyl 리간드가 더 작은 HOMO/LUMO 값을 나타내었다. 또한 분광학적으로도 -CN에 의해 UV max와 Eg 및 PL max는 더 장파장으로 이동하였으며, PL에서 -CN에 의해 발광 폭이 더 넓어짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. C Tang and S Van Slyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
2. S. Tao, S. Xu and X. Zhang, *Chem. Phys. Lett.*, **429**, 622 (2006).
3. S. Jeon, Y. Jeon, J. Kim, C. Lee and M. Kong, *Synth. Met.*, **157**, 558(2007).
4. Y. Zhang, F. He, G. Cheng, C. Ruan, Y. Lin, Y. Zao, Y. Ma and S. Liu, *Semicond. Sci. Technol.* **22**, 214 (2007).
5. Y. Wang, Y. Hua, X. Wu, L. Zhang, Q. Hou, F. Guan, N. Zhang, S. Yin and X. Cheng, *Organic Electronics*, **9**, 101 (2008).
6. S. Hsu, C. Lee, S. Hwang, H. Chen, C. Chen and A. T. Hu, *Thin Solid Films*, **478**, 271 (2005).
7. H. Li, Y. Lin, P. Chou, Y. Cheng and R. Liu, *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 520 (2007).
8. J. Jou, M. Wu, C. Wang, Y. Chiu, P. Chiang, H. Hu and R. Wang, *Organic Electron.*, **8**, 735 (2007).
9. M. Ho, C. Chang, T. Chu, T. Chen and C. Chen, *Organic Electron.*, **9**, 692 (2008).
10. Z. Xie, W. Xie, F. Li, L. Liu, H. Wang and Y. Ma, *J. Phys. Chem. C*, **112**, 9066 (2008).
11. F. He, L. Tian, W. Xie, M. Li, Q. Gao and M. Hanif, *J. Phys. Chem. C*, **112**, 12024 (2008).
12. G. Cheng, F. He, Y. Zhao, Y. Duan, H. Zhang, B. Yang, Y. Ma and S. Liu, *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, L78 (2004).
13. F. He, H. Xu, B. Yang, Y. Duan, L. Tian, K. Huang, Y. Ma, S. Liu, S. Feng and J. Shen, *Adv. Mater.*, **17**, 2710 (2005).
14. Y. Duan, Y. Zhao, P. Chen, J. Li and S. Liu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 263503 (2006).
15. P. J. Chung and M. J. Cho, *Mol. Liq. Cryst.*, **405**, 153 (2003).
16. J. H. Lee, H. L. Choi and B. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **15**(8), (2005).
17. J. G. Jang, S. J. Shin, E. J. Kang, H. W. Kim, H. J. Chang, M. H. Oh, Y. S. Kim, J. Y. Lee, M.S. Gong and Y.K. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **16**(4), 253 (2006).
18. D. Choi, T. Kim, *Mol. Liq. Cryst.*, **405**, 153(2003).