

Polythiophene 의 전기화학적 도핑과 변색

논문
9-2-6

스위치에 관한 연구

A study on the Color Change Switch and Electrochemical Doping of Polythiophene

구할본*, 김주승*, 김현철*, 김종욱*

(Hal-Bon Gu, Ju-Seung Kim, Hyun-Cheol Kim, Jong-Uk Kim)

Abstract

We prepared polythiophene and poly(3-methylthiophene) films, known as conducting polymer, by electrochemical method. Polythiophene and poly(3-methylthiophene) films were doped and undoped dopant for the studying the understanding of doping mechanism and possible application to the color change switch. We observed that the anodic, cathodic wave and absorption spectra were slightly changed during doping and undoping process in polythiophene. It shows that doping and undoping process were showed some difference by the appearance and disappearance of polaron and bi-polaron.

In the relation of the peak of oxidative current density and potential sweep rate of cyclic voltammograms, the amount of dopant in polythiophene film was homogeneously increased at low scan rate. This also can be applied to the poly(3-methylthiophene).

key words(중요용어) : Conducting polymer(도전성 고분자), Electrochemical method(전기화학적 방법), Color change switch(변색 스위치), Oxidative current density(산화 전류밀도), Potential sweep rate(전위주사속도).

1. 서 론

도전성 고분자중의 하나인 polythiophene¹⁾과 그의 유도체는, 기저 상태에서 2중 결합이 특성의 탄소 원자간에만 존재한 비축퇴계의 전도성 고분자로 분류된다. 기저 상태는 결합성 π 대(가진자대)와 π^* (전도대)로 분열하고, 금지대내에 존재한다. 도판트는 도너 혹은 억셉터이고 분자鎖와 전자를 주고받는 형태로 되어 일종의 결합을 형성한다. 이와 같은 결합은 탄소 원자 수에 따라 존재하고, 분자鎖의 결합고체를 완화하는 동시에 도판트 이온 근처의 분자鎖중에 국재한 상태를 만든다. 이것에 의해서 금지대 중앙에 결합성 polaron과 반결합성 polaron의 전자 준위의 형성이 가능하다. polaron은 스핀을 갖고있기 때문에 하전 입자에서

Electron Spin Resonance(ESR)에 의해서 검지가 가능하고, 또 캐리어로서 전도도에 기여한다. 그리고 도프량을 증가하면 polaron간의 상호작용에 의해 스피네스의 2가로 하전한 bi-polaron이 형성되고^{2,3)}, 금지대에 안정한 결합성 bi-polaron준위와 반결합성 bi-polaron 준위를 형성하고, 대량의 도프량에 따라서 polaron band를 형성한다. 따라서 도핑에 의해 반도체-금속전이를 일어나며, 그에 대응하여 帶間 흡수에 따른 색으로 부터 프라즈마 반사에 따른 색이 변화한다. 스펙트럼의 변화가 가시 영역이면, 變色 스위치 소자로서 응용과 또 p형 또는 n형의 반도체⁴⁾를 얻는 것이 가능하기 때문에 태양전지⁵⁾, 2차전지⁶⁾, 메모리 소자⁷⁾, 전기 광학소자⁸⁾, 방사선 검지⁹⁾ 및 센서^{10,11)}로서의 응용이 기대되고 있다. 그러나 실제 어떠한 메카니즘에서 도핑이 진행하고 전자 상태의 변화를 일으키는가에 대해서 아직 그다지 명확하게 규명되어있지 않다.

따라서 본 연구에서는 polythiophene(PT)과 그의 유도체인 poly(3-methylthiophene)(PMT)의 도

* : 전남대학교 공대 전기공학과

접수일자 : 1995년 10월 28일

심사완료 : 1995년 11월 30일

핑의 메카니즘을 규명하고, 특히 전도성 고분자의 도핑에 의해서 현저하게 변화하는 성질을 이용하여 變色 스위치로서의 응용 가능성에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 polythiophene은 0.05M LiBF₄ / benzonitrile, 0.2M thiophene의 용액에 In-Sn oxide(ITO) glass를 작업 전극으로하고, Ni plate를 대향 전극으로 하여 전해중합 하였다. Benzonitrile과 thiophene monomer는 감압 증류하여 사용하였고, LiBF₄는 60℃로 진공 건조하였다. ITO는 초음파 세척기에서 아세톤과 메탄올에 세척후 사용하였다. 합성전에 용액 중의 용존 산소를 제거하기 위하여 Ar gas로 bubbling 하였고, molecular sieve로 전해액중의 수분을 제거하였다. 전해액의 온도 3℃에서 전류 밀도 0.5mA/cm²로 100mC/cm² 합성하였다.

합성후 합성시에 dope된 음이온을 전기 화학적으로 undope 하기 위하여 2[V]의 역바이어스를 인가한 다음, 암모니아수와 아세톤에 세척한 후 50℃ 진공하에서 건조 하였다. Cyclic voltammogram 측정을 위하여 ITO위에 중합한 필름을 undope하여 양극으로 하고, 對向, 참조(reference) Li전극을 함께 propylene carbonate(PC)/LiClO₄ 용액중에 삽입하여 potentiostat를 이용하여 측정 하였다. 이때 용액은 0.3mol/l의 LiClO₄를 포함한 PC를 사용 하였다.

전기 화학적 doping과 undoping에 따른 흡수 스펙트럼은 PC/LiClO₄의 용액중에서 대향 전극으로 Li을 이용 하였다. 도전율의 측정은 2단자법으로 측정 하였고, 투과광의 측정은 He-Ne laser(λ =632.8)를 이용하여 측정 하였다. Poly(3-methylthiophene)도 위와 같은 방법으로 합성 및 실험을 행하였다.

모든 실험은 공기와 접촉을 막기 위하여 글로우 박스 내에서 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. PT와 PMT의 전기 화학적 doping

전기 화학적 방법으로 합성한 PT의 도전율은 2[S/cm]정도이며, 이 필름에 전기 화학적으로 undoping을 하면 도전율은 10⁻⁸[S/cm]까지 감소한다. 그림 1은 암모니아 가스를 doping하면 암모니아 가스 압력 증가에 따라서 도전율은 증가하여,

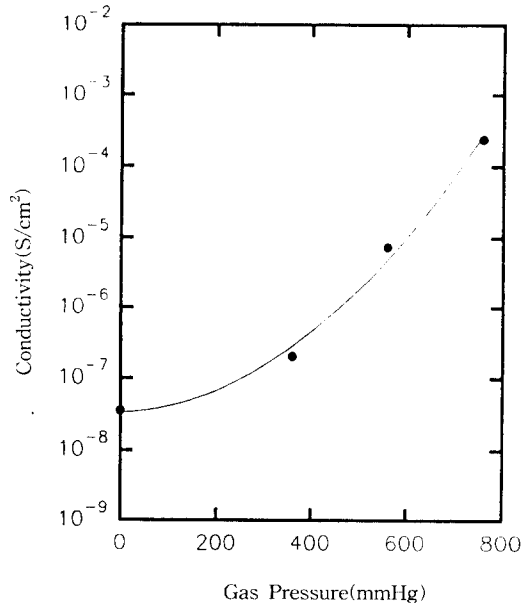


그림 1. 도전율의 NH₃ gas 압력 의존성
Fig. 1. Dependence on NH₃ gas pressure of conductivity.

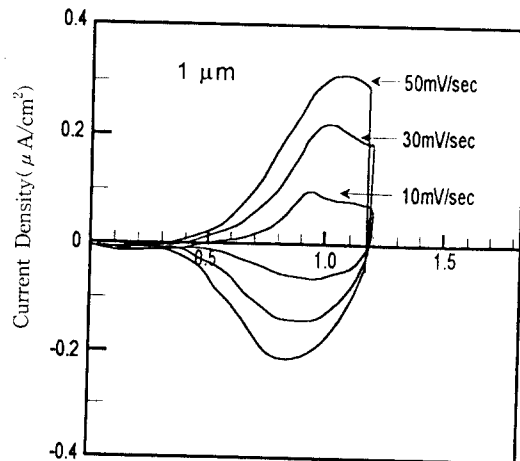


그림 2. PT의 전위주사속도에 따른 cyclic voltammograms.
Fig. 2. Cyclic voltammograms of PT at different potential sweep rate.

760[mmHg]인 경우 도전율은 약 4승 정도 증가하는 것을 나타낸다. 이것은 일반적으로 암모니아 가스에 의해 합성후의 잔류 분순물등에 의해 보상의 효과가 있으나, 여기서는 암모니아 가스가 n형 dopant로서 유효하게 작용하고, 암모니아 가스에 의해 도전율의 현저한 변화는 가스 센서로써의 사

용 가능성을 나타낸다. 그림 2는 0.3mol/l 의 PC/LiClO₄ 용액을 이용하여, PT의 전위주사 속도를 변화시킨 경우의 cyclic voltammograms을 나타낸다. 전위주사 속도에 따라서 산화 전류와 환원 전류의 피크를 나타내고 있다. 따라서 PT 필름 두께의 변화에 따른 cyclic voltammograms의 산화 피크 전류 밀도와 전위 주사 속도의 관계를 그림 3에 나타낸다. 전위 주사 속도를 천천히한 범위에서는 산화 피크 전류밀도와 전위 주사 속도는 직선 관계가 성립함으로, Nerstine법칙¹¹⁾에 따른다. 즉, 필름내에서 dope량이 거의 균일하게 증가 한다는 것을 시사하고 있다. 반면 전위 주사 속도가 빠른 영역에서는 비례 관계가 성립되지 않는다. 이것은 擴散律速으로 되기 때문이라고 생각된다. 이상의 결과에서 어떤 전위에 대하여 필름에 균일하게 dope를 하고자 할 때에는 전위 주사 속도를 천천히 하는 것이 바람직 하다고 생각이 된다.

PT필름의 두께가 1[μm]일때의 cyclic voltammograms을 그림 4에 나타낸다. PT의 doping은

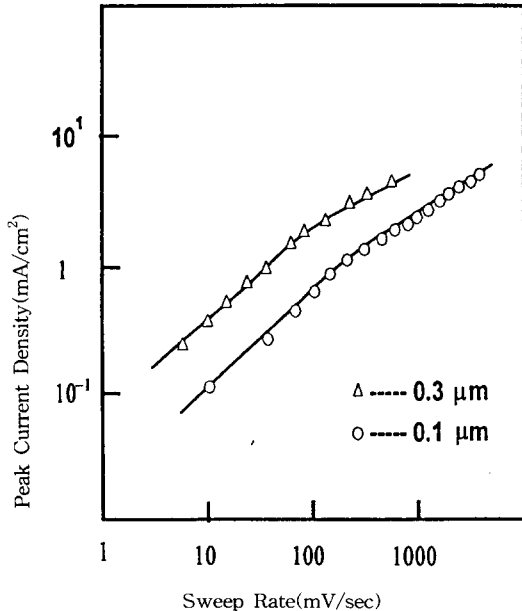


그림 3. PT의 cyclic voltammograms에서 산화 피크 전류 밀도의 전위 주사 속도의 의존성.

Fig. 3. Dependence on potential sweep rate of the peak oxidative current density at cyclic voltammograms of PT.

약 0.5[V]의 전위에서 시작하고, doping의 반응은 약 0.96[V]에서 피크를 나타낸다.

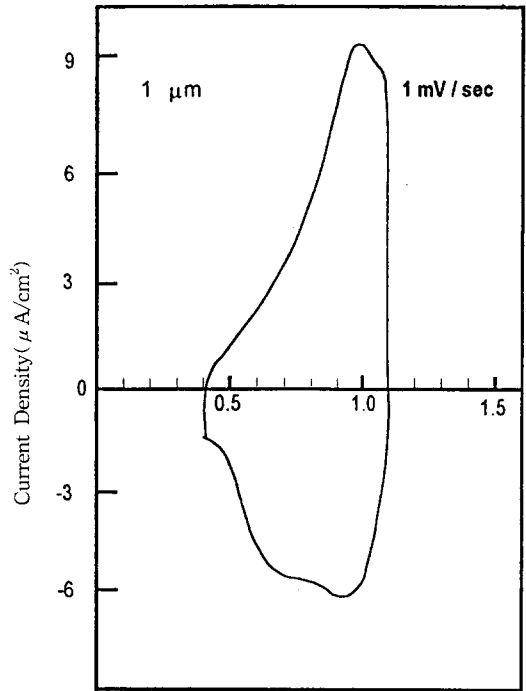


그림 4. PT의 cyclic voltammograms.
Fig. 4. Cyclic voltammograms of PT.

또 undoping(doping상태에서 중성상태로 돌아가는 것)할때는 doping때와 달리 2개의 피크를 나타낸다. 이것은 2단계를 걸쳐 undoping이 일어나고 있다고 생각이 되며, 또 undoping이 끝나는 전위는 약 0.3[V]이다. 이것도 doping이 시작되는 전위와 다르다. 이러한 것은 doping과정과 undoping과정이 서로 다르다는 것을 시사한다. 이것은 전기 화학적 doping에 의한 흡수 스펙트럼의 변화에서 다시 논의 하기로 한다.

약 1.2[V]이상의 전위를 인가하면 안정한 싸이클 곡선을 그리지 않는다. 이것은 아마 고전위에 의해 필름이 열화하기 때문이라고 생각된다. 따라서 PT 필름에서 안정한 전기 화학적 doping의 전위범위는 0~1.1[V] 정도라고 생각된다.

PMT의 전위 주사 속도의 변화에 따른 cyclic voltammograms을 그림 5에 나타낸다. doping이 시작되는 전위는 약 0.2[V]이고, doping상태에서의 전류 밀도 피크는 약 0.65[V]이고, undoping이 끝나는 전위는 0[V]이다.

Doping이 시작되는 전위와 undoping이 끝나는 전위가 다르고, 또 undoping할때 2개의 피크가 나타나는 현상은 PT의 경우와 같다. 따라서 PT의 유도체인 PMT도 PT와 같이 doping 과정과

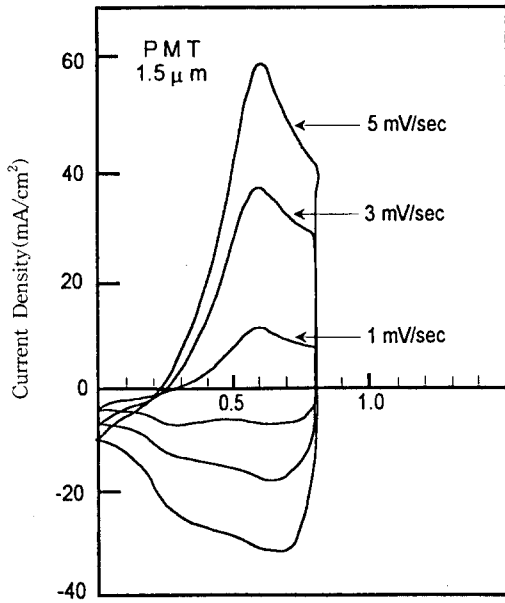


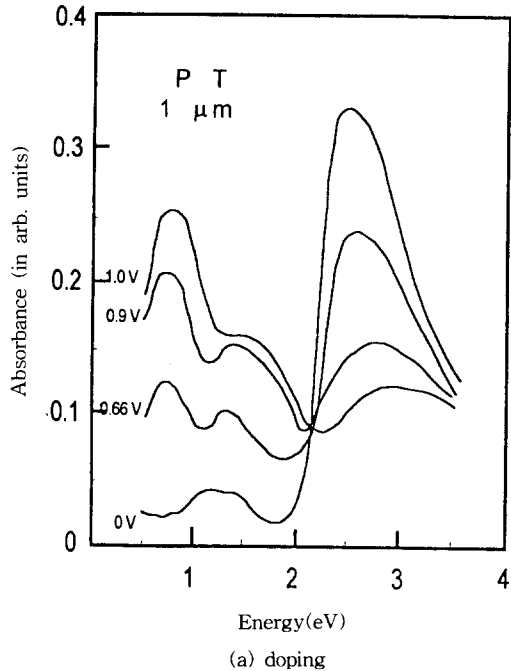
그림 5. Cyclic voltammograms의 전위 주사 속도의 의존성.

Fig. 5. Dependence on potential sweep rate of cyclic voltammograms.

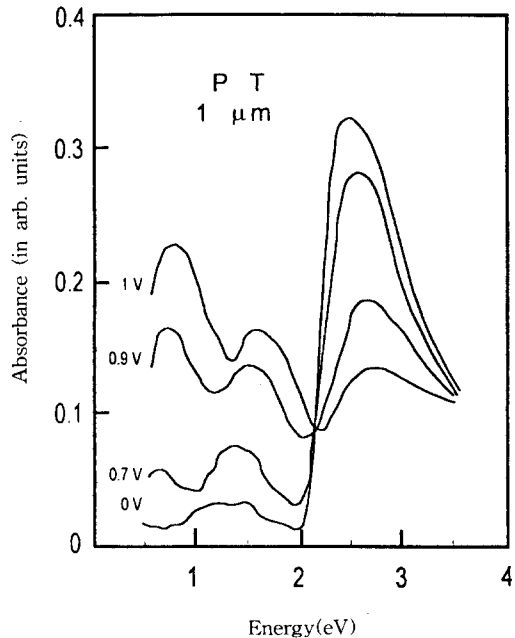
undoping 과정이 서로 다르다는 것을 알았다. 또 0.8[V] 이상의 전위에서는 PT와 같이 안정한 사이클을 그리지 않으므로, PT와 같이 열화가 일어나는 것으로 판단된다. 따라서 PMT의 전기 화학적으로 안정한 doping의 전위범위는 0~0.8[V]라고 생각이 된다. 이상적인 산화, 환원인 경우에는 산화파와 환원파의 면적이 거의 같지만, 도전성 고분자인 경우는 산화파와 환원파는 일치하지 않는다.¹²⁾ 이것은 도전성 고분자에서 산화가 시작되는 것은 가전자대에서 전자의 방출 및 환원은 polaron과 bi-polaron 과 soliton준위에 전자 주입되는 특수한 경우이기 때문이다. 전기 화학적 doping에 의해서 필름의 색이 적자색에서 청색으로 변색되었다.

3-2. PT와 PMT의 전기 화학적 doping에 의한 흡수 스펙트럼의 변화

PT에 ClO_4^- 를 전기 화학적 doping과 undoping 때의 흡수 스펙트럼의 변화를 그림 6의 (a), (b)에 나타낸다. doping을 진행함에 따라서 약 2.6[eV]의 흡수 피크는 감소하면서 고에너지 측으로 이동하고, 저에너지 측의 약 0.8[eV]와 1.5[eV] 부근의 흡수 피크는 증가한다. 즉, doping이 진행함에 따라 band간 흡수에 상당하는 피크치는 감소하면서 고에너지 측으로 이동하고, 등흡수점



(a) doping



(b) undoping

그림 6. Doping과 undoping 때의 흡수 스펙트럼의 변화

Fig. 6. Changes of absorption spectra at doping and undoping process.

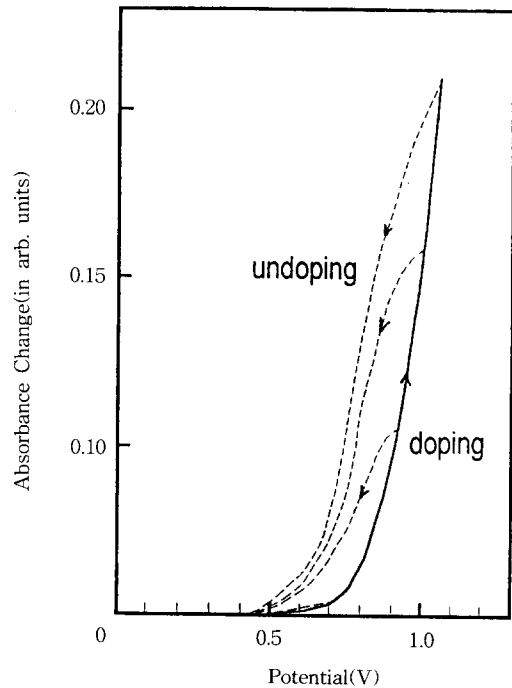
(doping을 하여도 흡수가 변하지 않는점)이하 저

에너지 측에 새로운 2개의 흡수 피크가 나타나고, doping량의 증가에 따라서 피크치도 증가 하였다. 이것은 doping에 의해 저농도 영역에서는 polaron, 고농도에서는 동일 chain상의 2개의 polaron이 상호작용하여 보다 안정한 bi-polaron의 형성과 혹은 polaron과 bi-polaron이 공존하고 있을 가능성을 시사하다. 또, doping에 의해 band간 흡수 피크의 감소와 저에너지 측의 흡수 피크의 증대는 가전자대와 전도대에 속해있던 결합성 π 궤도와 반결합성 π^* 가 갭중에 준위를 형성하는 결합성 궤도 $[P^+, BP^-]$ 와 반결합성 궤도 $[P^-, BP^+]$ 로 이동하였기 때문이라 생각된다.

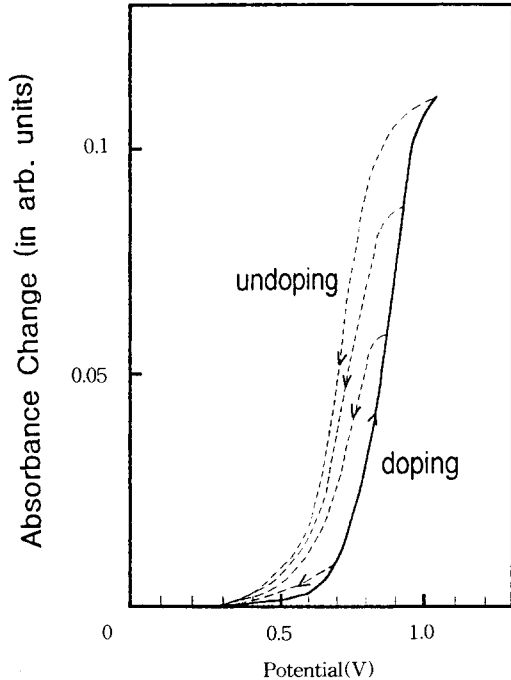
이와 같이 doping에 의해 polaron과 bi-polaron이 형성되면 대량의 dope영역에서는 bi-polaron이 중복되어 polaron band를 형성하게 되고, 이 polaron band가 형성되면, 캐리어는 대단히 움직이기 쉬운 상태가 되어 도전율이 대폭 증가 하게 되어, 반도체에서 금속으로 전이하는 현상이 일어나게 된다.¹³⁾ 따라서 등흡수점 이상의 피크는 가전자대에서 P^- 혹은 BP^+ 로 천이 하였다고 생각된다.

그림 (a)와 (b)를 비교하면, 같은 전위에서도 흡수 스펙트럼의 변화는 서로 다르다. 이것은 앞에서 언급한 것과 같이 doping과정과 undoping과정이 다르기 때문이다. 이것은 doping과정에서는 우선 polaron이 형성되고, 계속 doping을 진행하면 2개의 polaron에 의해서 bi-polaron 혹은 polaron과 bi-polaron이 공존할 때, undoping을 하면, 우선 undoping과정에서는 전자 주입은 에너지 준위가 낮은 polaron준위 부터 일어나기 쉽다. 따라서 bi-polaron보다 먼저 polaron이 소멸되기 때문이라 생각이 된다.

그림 7의 (a)와(b)는 1300[nm]와 800[nm]에 있어서 흡광도의 전위 의존성을 나타낸다. 전위에 대하여 히스테리시스를 나타내고, 그림 8은 doping과정과 undoping과정에서의 전위에 대한 dopant농도를 나타내는데 역시 히스테리시스가 나타났다. 각 파장에서의 dopant농도에 대한 doping과정과 undoping과정에서의 흡광도는 같았다. 2 mol% 이하의 dopant농도에서는 히스테리시스가 나타나지 않고, 2 mol%이상의 dope영역에서 나타나며, 고 dope영역일수록 현저하게 나타난다. 즉, 2mol%이하의 저농도 영역에서는 polaron의 형성을 기대하기 어렵다. 그러나 2 mol%이상 dope되면 polaron 혹은 bi-polaron 준위가 형성되고, 특히 고 dope영역에서는 bi-polaron이 형성 되었다고 생각된다. 따라서 히스테리시스의 현상은 다음과 같이 생각할 수 있다.



(a) 파장 1300(nm).



(b) 파장 800(nm)

그림 7. PT의 각 파장에서의 흡광도의 전위 의존성.

Fig. 7. Dependence on potential of absorbance of PT at each wave length.

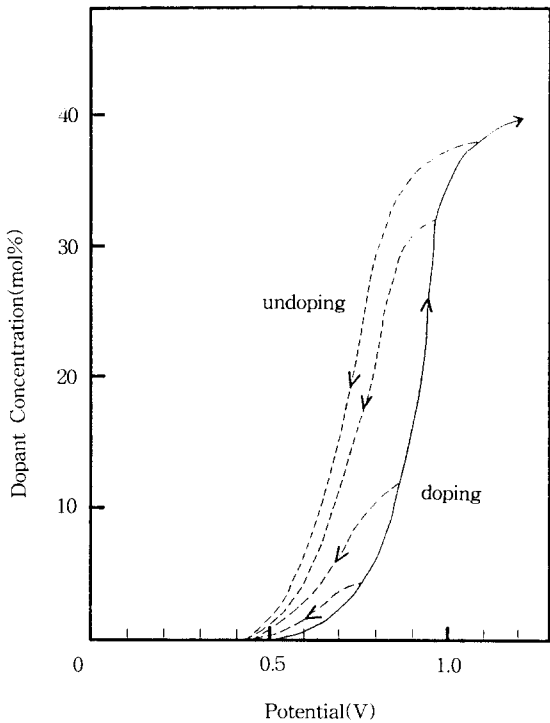


그림 8. PT의 전위에 대한 dopant 농도의 변화
 Fig. 8. Changes of dopant concentration of PT against potential.

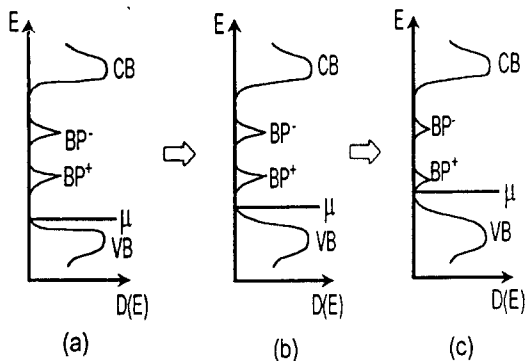


그림 9. Undoping할 때 에너지 상태 밀도의 변화 예상도.
 Fig. 9. Schematic diagrams of changing process of energy state density at undoping process.

Doping은 전위를 인가하면 가전자대에서 전자를 여기 시키므로 일어나고, dope상태에서는 그림 9와 같이 된다. 여기서 undoping을 하면 그림 9의 (a)→(b)→(c)와 같은 과정에 의해서 undoping이

일어난다고 생각된다. (a)→(b)는, 전위가 변화해도 상태 밀도가 적기 때문에 undoping이 그다지 활발하게 일어나지 않지만 (b)→(c)로 이동하면 polaron준위에 전자가 주입되어 undoping이 활발하게 일어난다.

앞에서 언급한것과 같이 cyclic voltammograms의 환원파에서의 전류 밀도의 피크가 2개 나타나는것도 이와 같은 과정 때문에 일어난다고 생각이 된다.

PMT에 ClO_4^- 를 전기 화학적 doping에 의한 흡수 스펙트럼의 변화를 그림 10에 나타낸다. 흡수 피크는 약 1.5[eV]와 0.7[eV]에서 2개의 새로운 피크가 형성된다. 이러한 현상은 PT의 유도체인 PMT에서도 PT의 경우와 같이 doping에 의해 polaron 혹은 bi-polaron이 형성되는 것으로 생각할 수 있다. 등흡수점이 약 2.0[eV]에서 나타나지만 PT인 경우는 저농도 영역에서는 약 2.1[eV]에서 나타난다. 경험적으로 볼때 등흡수점이 band gap에 해당된다.

PT와 PMT의 등흡수점의 차이는 고분자 체인의 길이 차이에 기인 한다고 생각이 된다. 실제 동일

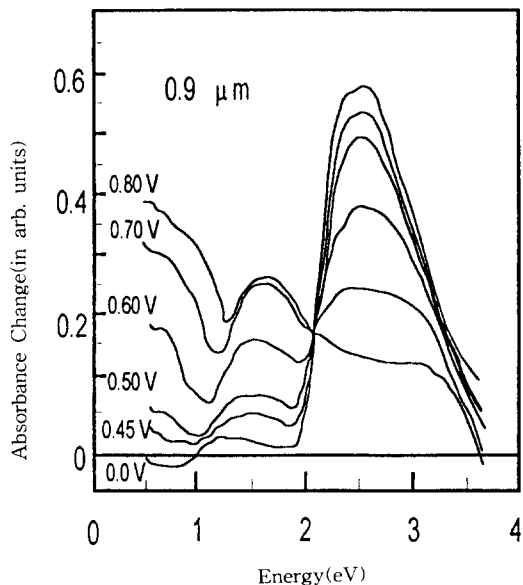


그림 10. PMT의 전위에 대한 흡수 스펙트럼의 변화

Fig. 10. Changes of absorption spectra of PMT against potential.

분자라도 중합 방법과 체인의 길이에 따라서 도전율과 흡수 스펙트럼의 변화가 상당한 차이를 나타

낸다.¹⁴⁾

그림5에 나타난 cyclic voltammograms에서 환원과에서의 2개의 전류 밀도 피크가 나타나는 것도 앞절에서 언급한 것과 같이 doping과 undoping 과정이 PT와 같기 때문이라고 생각된다.

3-3. PT의 싸이클 특성

주사 전위 폭은 0~1.0[V]와 0~1.2[V]로 하여, PT의 cyclic voltammograms을 그림 11의 (a)와 (b)에 나타낸다. 이때 전위 주사 속도는 50 mV/sec로 하였고, 632.8(nm)에서의 투과광의 변화를 조사하였다. 그림에서 위의 곡선은 투과광의 변화이고, 아래의 곡선은 전류 밀도의 변화를 나타내고, 실선은 전위 주사를 시작하였을 때이고, 파선은 40싸이클 이후의 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 (a)의 경우는 대단히 안정하게 전기 화학적 doping이 되고 있으나 (b)의 경우는 전류 밀도의 곡선이 실선에서 파선으로 변화하였다. 그러나 투과광의 변화는 일어나지 않았다.

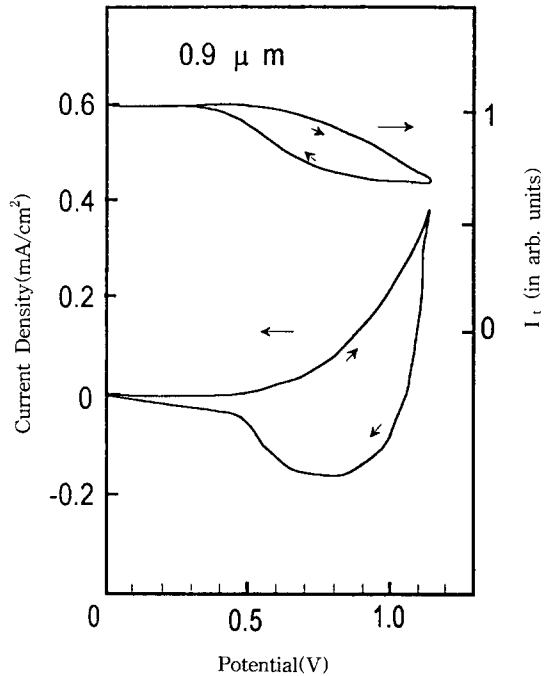
과형을 측정된 결과, 투과광의 진폭이 doping과 undoping에서 조금씩 작게되기 때문에 열화가 일어나고 있다고 생각이되고, 전류의 변화는 doping 때의 과형은 싸이클이 수가 많아지면 피크가 조금 작아지지만 전체적으로 형태가 변화하지 않는다. 그러나 undoping때의 과형은 상당히 변화하였다. 이러한 변화는 doping에 사용되어진 전하량의 감소를 나타내고, 또 열화가 진행되고 있다고 생각되어진다.따라서 doping(I_{do})과 undoping(I_{un})의 싸이클 수의 의존성을 그림 12에 나타낸다. 싸이클의 수가 증가할수록 I_{do} 와 I_{un} 의 차이는 점점 작아진다. 이것은 doping과 undoping을 반복함으로써 음이온이 전부 빠지지 않고 조금씩 누적되기 때문이라고 생각이 되어진다.

PT는 undope상태에서는 적색에서 dope상태에서 청색으로, PMT의 경우는 자색에서 청색으로 변한다. 필름의 두께가 얇으면 색의 변화가 적고, 낮은 전압에서는 변색 시간이 길었다.

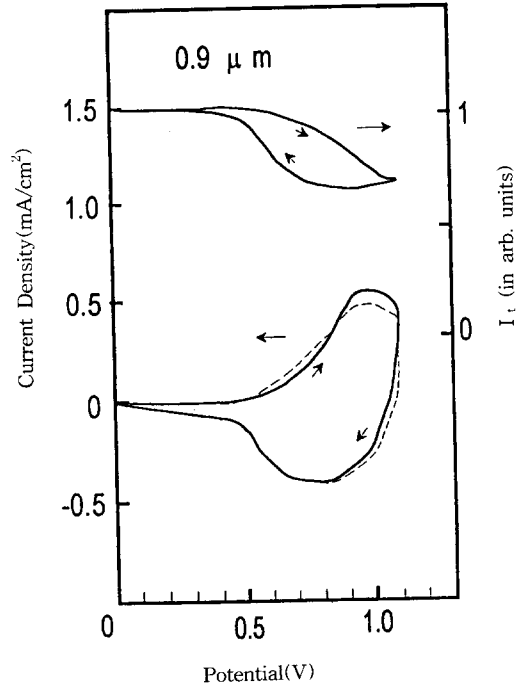
4. 결 론

도전성 고분자인 PT와 유도체인 PMT를 전해 중합법으로 합성하여 전기 화학적 doping기구와 변색 스위치로서의 응용 가능성에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PT와 PMT는 전해 중합법에 의해 합성한 필름에 안정하게 전기 화학적 doping이 가능하다. 그러나 doping의 전위는 PMT 보다 PT가 높고,



(a) 주사전위폭 0~1.2[V].



(b) 주사전위폭 0~1.0[V].

그림 11. 각 파장에서 cyclic voltammograms와 투과광의 변화

Fig. 11. Changes of cyclic voltammograms and transmittance at each wave length.

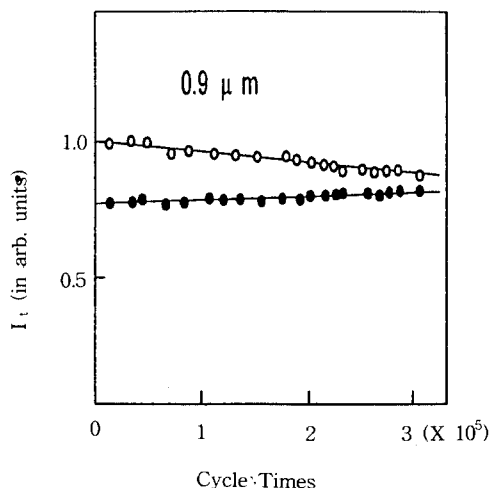


그림 12. Doping과 undoping의 사이클 의존성
 Fig. 12. Dependence on cycle of doping and undoping.

- 또 PT와 PMT의 undope상태에서 나타나는 필름의 색은 차이가 있지만, dope 상태에서는 같았다. 이것은 분자설계에 의해서 필름의 성질과 색 등의 제어가 가능하다는 것을 시사하고 있다.
2. Doping을 진행하면 doping과정과 undoping과정에서 흡수 스펙트럼이 일치하지 않는다. 이것은 doping과 undoping과정에서의 polaron과 bipolaron의 생성과 소멸 과정을 반영하기 때문이다. 또 이들의 생성에 의해서 band구조의 변화를 예상할 수 있고, PMT도 PT와 같이 적용하는 것이 가능하다.
 3. PT를 변색 스위치 소자로써 응용할 때 문제가 되는 사이클 수명은 10^5 정도의 아주 양호한 결과를 얻었다. 그러나 최적의 조건을 만족하면 사이클 수명은 개선할 수 있다고 생각이 되므로 표시 소자로써의 실용 가능성이 있는 것으로 판단된다.

* 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. T. C. chung, J. H. Kaufman, A. J. Heeger, and F. Wudl, "Charge storage in doped poly(thiophene) ; Optical and electrochemical studies", Phys. Rev. B, Vol.30, 2, pp.702-710, 1984.

2. J. C. Scott, P. Pfluger, M. T. Krounbi and G. B. Street, "Electron-spin-resonance studies of pyrrole polymer ; Evidence of for bipolarons", Phys. Rev. B, Vol.28, 4, pp.2140-2145, 1983.
3. Z. Vardeny, E. Ehrenfreund and O. Brafman and M. Nowak, H.Schaffer, A. J. Heeger, and F. Wudl, "Photogeneration of confined soliton pairs(Bipolarons) in polythiophene", Phys. Rev. Lett., pp.671-674, 1986.
4. 共立出版株式會社, "光機能材料", 高分子學會, pp.161, 1991.
5. 三川 禮, 艸林成和, "高分子半導體", 講談社サイエンティフィック, pp.308, 1991.
6. P. Nigrey, D. Macinnes, Jr. D. Nairon, A. G. MacDiarmid and A. J. Heeger, "Lightweight Rechargeable Storage Batteries using polyacetylene, (CH)_x as the Cathode-Active Material", J. Electrochem. Soc., Vol.128, pp. 1651-1654, 1981.
7. K.Yoshino, R. Sugimoto, J. G. Rabe and W. F. Schmidt, "Optical Spectral Change in Conducting Polymer due to Insulator-Metal Transition Induced by Light Irradiation and Proposal as Optical Memory Element", Jpn. J. Appl. phys., Vol.24, pp.L33-34, 1985.
8. K. Yoshino, K. kaneto and Y. Inuishi, "Proposal of Electro-optical Switching and Memory Devices Utilizing Doping and Undoping Processes of Conducting Polymer", Jpn. J. Appl. phys, Vol.22, pp.L157-158, 1983.
9. 先端材料應用事典 편찬위원회, "先端材料應用事典", pp.342, 1990.
10. T. Oshawa, K. Kaneto, and K. Yoshino, "Electrical and Optical of Electrochemically prepared polyfuran", Jpn. J. Appl. phys., Vol.23, pp.L663-665, 1984.
11. H. B. Gu and K. Yoshino, "Effect of Ammonium Gas on Electrical property of Conducting polymer", Jpn. J. Appl. phys., Vol.25, pp.1064-1068, 1986.
12. A. J. Band and L. R. Faulkner, "Electrochemical Methods", Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.
13. 緒方直哉, "導電性 高分子", 講談社サイエンティフィック, pp.21, 1990.
14. 吉野勝美, 化學, 化學同人, Vol.40, pp.317-323, 1985.

15. H. B. Gu, S. Nakajima, R. Sugimoto and K. Yoshino, "Doping Effect in Solution of

poly(3-Alkylthiophene)", Jpn. J. Appl. phys., Vol.27, pp.311-313, 1988.

저자소개



구활분
1951년 10월 24일생. 1974년 2월 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 2월 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 3월 일본 Osaka대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993년 6월 - 8월 일본 Osaka대 객원교수. 현재 전남대학교 전기공학과 부교수.



김주승
1969년 8월 15일생. 1995년 2월 전남대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 전남대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학중.



김현철
1968년 12월 17일생. 1994년 2월 전남대학교 전기공학과 졸업. 1996년 현재 전남대학교 대학원 재학중.



김종욱
1966년 5월 26일생. 1993년 2월 전남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1995년 2월 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 전기재료연구부 전기기술연구팀 위촉연구원.