

Polypyrrole 을 이용한 전기활성 구동기의 제조 및 특성

박정태^{*}·최혁렬^{*}·김훈모^{*}·전재욱^{**}·남재도·이두성·김문선·이영관[†]

기능성고분자 신소재 연구센터, 성균관대학교 응용화학부,

^{*}기계공학부, ^{**}전기전자컴퓨터공학부

(2001년 5월 24일 접수)

Preparation and Characterization of Polypyrrole Electroactive Actuators

J. T. Park, H. R. Choi^{*}, H. M. Kim^{*}, J. W. Jeon^{**},
J. D. Nam, D. S. Lee, M. S. Kim, and Y. Lee[†]

Center for Advanced Functional Polymers,

School of Applied Chemistry and Chemical Engineering,

^{}Mechanical Engineering, ^{**}Electronic Computing Engineering,*

Sungkyunkwan University, Suwon, Kyonggi-do 440-746, Korea

[†]*e-mail : yklee@skku.ac.kr*

(Received May 24, 2001)

요 약 : 본 연구에서는 폴리피롤 (PPy)/gold/mylar 형태의 두 겹의 전기활성 구동기를 제작하였으며, 도판트의 종류에 따른 굽힘 구동 특성에 관한 연구를 수행하였다. 전도성 고분자는 전기적으로 산화/환원이 될 때에는 도판트의 이동에 의하여 부피 변화를 수반하게 된다. 도판트의 크기에 따라, 서로 다른 구동 특성을 나타내었는데, toluene sulfonate와 같은 작은 크기의 도판트는 산화/환원에 따라 PPy 필름의 내외로 자체 이동이 가능하며, 산화시에 PPy의 팽창이 관찰되었다. 그러나, dodecylbenzenesulfonate와 같은 커다란 도판트가 함유된 PPy는 산화/환원시에는 이들의 이온들은 움직임이 없는 것으로 나타났으며 환원시에 작은 양이온(Na⁺)이 필름내부로 유입되며 부피가 증가하는 현상이 관찰되었다.

ABSTRACT : In this study, PPy/gold/mylar type electroactive bi-layer actuator was prepared by the electrochemical polymerization of pyrrole onto the gold/mylar film and the actuation characteristics were studied using bending beam method. Conducting polymer-based actuators undergo volumetric changes due to the movement of dopant ions into the film during the electrical oxidation process. The bilayer films exhibited different actuation characteristics depending on dopant ion size. It was observed that the relatively small dopant ion (i.e. toluene sulfonate) moved into the PPy film at oxidized state, so volume expanded to result in bending motion. In case of the film having large dopant ion (i.e. dodecylbenzenesulfonate), volume expansion was observed at reduced state. This is due to the incorporation of Na⁺ counterion with water molecules, while the large dopant ion was fixed in the film due to the limited mobility during the redox process.

Keywords : PPy/gold/mylar, electroactive bilayer actuator, polypyrrole.

서 론

최근 고분자의 고기능성을 추구하기 위하여 외부로부터의 온도 변화, pH 변화, 또는 전기적인 충격 등과 같은 자극에 부피 감소나 증가에 따른 형태의 변화를 수반하는 자극 감응 고분자에 대한 연구가 많은 관심을 끌고 있다.¹⁻⁴ 이러한 특성을 이용하면 화학적인 에너지를 기계적인 일로써 변환이 가능하게⁵⁻⁸ 되며 이러한 작용은 모든 생체계에서 발생하는 동작의 기본 원리이기도 하다. 이와 같이 자극에 응답할 수 있는 고분자들은 센서, actuator, 또는 인공 근육 등으로 응용이 가능하기 때문에,⁹⁻¹¹ 최근 의료용, 우주항공용, MEMS 및 지능형 마이크로 로봇 등의 다양한 분야에의 응용에 대한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 고분자의 특성상 기존의 다른 재료에 비하여 제조가 수월하고 성형 공정이 간편함을 이용하면 이들의 응용은 실로 무궁무진하다 할 수 있다.

다양한 종류의 고분자들이 화학적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환 가능한 것으로 알려진 바 있다. 이와 같은 에너지의 변환은 Flory에 의해서 처음 정립되었는데, 그는 가교된 고분자 겔이 용매에 노출되어 팽윤될 때의 상태방정식을 탄성율, 혼합엔트로피, 고분자-용매간 상호인력, 삼투압 등의 항목을 이용하여 전개한 바 있다. 또한 고분자 전해질 겔과 같은 물질들은 전기장 하에서 전해질의 움직임에 따라 굽힘 작동이 가능한 것으로 알려지기도 하였다. 그러나 고분자 전해질 겔은 전기적으로 부도체이므로 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 데에 있어서 높은 작동전압이 필요하며 작동 속도가 낮은 단점이 있다. Baughman 등은 piezoelectric 고분자를 이용한 actuator를 선보인 바 있는데, 이들은 빠르고 가역적인 전하의 양극화에 의하여 작동하는 것으로서 이들은 부피의 변화가 너무 작은 단점이 있어서 실제 응용이 극히 제한적인 단점이 있다.¹²

공액 이중 결합을 포함하는 전기 전도성 고분자는 중성 상태에서 전기 화학적인 산화 반응에 의하여 양전하를 고분자의 주 사슬에 띄게 할 수 있으며, 이때 형성된 양전하를 상쇄시키기 위하여 전해질의 반대이온은 용매와 함께 고분자 내로 침투하게 된다.^{6,13,14} 이와 같은 과정에서 고분자의 구조가 변하게 되면 자유부피가 급격히 증가하게 된다. 환원시에는 전도성 고

분자가 중성 상태로 되며 따라서 고분자 내에 존재하는 음이온 도판트는 용액쪽으로 축출이 되면서 고분자의 부피는 다시 원래의 형태로 복원된다. 이때 전도성 고분자가 다른 형태의 필름과 접착이 되어 bilayer를 형성하게 되면 전도성 고분자의 부피 변화로 인하여 bending 움직임이 발생하게 되며, 이와 같은 구동 특성을 이용하여 고분자 MEMS의 제조가 가능하게 된다.^{1,2,6,15} 본 연구에서는 PPy/gold/mylar의 bilayer 구동기를 제작하여, PPy에 함유되는 dopant 이온의 종류에 따른 구동특성에 관한 연구를 수행하였다.

실 험

시약 및 재료. 피롤(98%, Aldrich)은 중성 알루미늄아를 통과시킨 후 감압 증류하여 사용하였으며, 중합에 사용된 도판트로는 dodecylbenzene sulfonic acid sodium salt (Na-DBS) (Aldrich), sodium perchlorate (Na-ClO₄) (99%, Aldrich), sodium *p*-toluenesulfonate (Na-PTS) (95%, Aldrich)를 정제없이 사용하였다. 중합시 용매로는 1차 증류수에서 이온을 제거한 deionized water를 사용하였다. 작업 전극으로 사용한 필름은 mylar(12 μ m)에 금을 sputtering 방법에 의하여 약 1000 Å 증착시킨 필름을 사용하였다.

피롤의 전기중합 방법. 기준전극으로는 Ag/AgCl 기준전극을 사용하였으며, 카운터 전극으로는 5×70 mm 백금판을 사용하였다. 작업전극으로는 sputtering 방법으로 제조된 5×30 mm mylar/gold 필름을 사용하였다. 수용액 전해조에는 피롤을 0.1 M, 전해질염도판트를 종류에 따라 0.1 M 넣고 1.1 V, 1 mA/cm²의 조건에서 전기중합을 수행하였다. 중합이 끝난 후 얻어진 PPy 필름은 증류수로 충분히 세척한 후에 진공오븐에서 상온으로 건조하였다. 전기중합에 의하여 얻어진 PPy는, 중합후 진공오븐에서 40 °C로 5시간 건조시킨 후 필름의 무게를 측정하여 중합된 PPy의 양을 계산하고, 버어니어 캘리퍼스도 필름의 면적을 구해 단위 면적당 PPy의 양 (mg/cm²)을 계산하였다. 중합시에는 크기에 따른 세 가지의 도판트를 이용하였으며 이들은 다음과 같이 나타낸다.

$\text{PPy}^+(\text{PTS}^-)$: 도판트로 Na - PTS를 사용.

$\text{PPy}^+(\text{ClO}_4^-)$: 도판트로 NaClO_4 를 사용.

$\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$: 도판트로 Na - DBS를 사용.

전도성 고분자의 산화/환원에 따른 도판트 성분 분석. 건조가 끝난 필름을 각각의 도판트만 들어있는 용액에서 5회 정도 구동시킨 후 산화시와 환원시에서 각각 5초 정도 머무른 후에 정지시켜 꺼내어 다시 증류수로 세척하고, 진공오븐에서 상온으로 건조시킨 후 Philips사의 XL30 FEG - ESEM (environmental scanning electron microscopy)/EDS (energy dispersive spectroscopy)를 이용하여 필름 내에 존재하는 조성을 분석하였다.

구동 특성 측정. 중합후에 건조가 끝난 필름은 단량체 없이 도판트만을 포함하는 수용액 전해조에서 중합시와 동일한 방법으로 전극을 장치하고 -1.1 1.1 V를 가하여 산화/환원에 따른 부피 변화로 인하여 굽힘이 일어나는 현상을 bending후의 각도를 측정하였다.

결과 및 고찰

PPy의 전기중합. PPy는 전해질과 피롤 단량체를 포함하는 수용액 상에서 gold/mylar 필름을 작업전극으로, 백금판을 상대전극으로, Ag/AgCl을 기준전극으로 하여 1.1 V의 조건에서 중합하였다. Figure 1에 피롤을 DBS^- 이온을 도판트로 하여 전기 중합을 할 때 중합 시간에 따라서 얻어진 $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ 필름의 두께의 변화를 나타내었다. Figure 1에 나타난 바와 같이 중합 초기에는 두께가 서서히 증가하다 20분 정도 경과 후부터 급속하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 반응 초기에 단량체를 산화시키는 산화 전류가 고분자를 산화시키는 산화 전류보다 높기 때문에 중합초기에 서서히 증가하고, 시간이 경과하여 공액 이중 결합의 길이가 증가하게 되면 더 빠른 속도로 산화하며 고분자가 형성되기 때문이다. 중합 시간이 50분 정도 되었을 때에 전극에 코팅된 $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ 고분자 필름의 두께는 약 $30\mu\text{m}$ 이상 되는데 이후로는 아주 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, PPy 필름의 두께는 중합 시간에 따라서 증가를 하는데 반응 중반의 증가 속도가 반응 초기보다 큰 것을 확인할 수 있었으며, 두께의 증가를 선형적으로 계산하

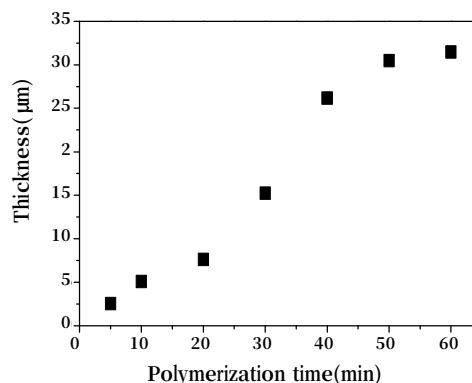


Figure 1. PPy film thickness vs. reduction time.

면 분당 $0.69\mu\text{m}$ 씩 증가함을 알 수 있다. 중합된 PPy는 검은색의 광택을 띄는 필름의 형태로 얻어졌다.

전도성 고분자의 산화/환원에 따른 도판트 성분 분석 및 구동 특성. 피롤은 전기 중합에 의해서 작업전극에서 $\text{PPy}^+(\text{Dopant}^-)$ 의 형태로 중합되어진다. 이때 사용한 도판트의 종류에 따라 다른 형태의 도판트가 PPy의 중합 반대 이온으로 고분자 필름에 침투하게 된다. 이와 같은 조성의 필름을 산화 환원시키면서 산화/환원시의 PPy 필름의 구동현상과 필름표면의 성분을 ESEM/EDS로 분석하여 산화/환원시의 도판트의 움직임을 관찰하고자 하였다.

중합조건에 따라 얻어진 $\text{PPy}^+(\text{Dopant}^-)$ 필름을 -1.1 V 1.1 V하에서 산화/환원시켜 도판트 성분별에 따른 각각의 필름의 구동 각도 변화를 살펴보면 Figure 2와 같다. Figure 2에서 x축은 시간을 y축은 구동각도를 나타내었는데, 구동각도는 PPy/mylar double layer actuator 필름이 수직인 상태에서 mylar쪽으로 bending을 하는 것을 +로 나타내었다. 필름이 수직인 상태를 0° 로 하고 필름의 맨 끝부분이 위치한 각도를 구동각도로 하였다. 필름이 완전히 한바퀴 돌면 180° 로 하였다. 이때 산화시에 구동이 되기 시작하여 더 이상의 움직임이 관찰되지 않으면 환원모드로 전환하였다. Figure 2에서 보듯이 완전히 한 바퀴 클의 bending을 하는데 $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ 의 경우에는 32초(0.033Hz), $\text{PPy}^+(\text{PTS}^-)$ 의 경우에는 24초(0.042Hz), $\text{PPy}^+(\text{ClO}_4^-)$ 의 경우에는 21초(0.048Hz)가 걸린다. $\text{PPy}^+(\text{PTS}^-)$, $\text{PPy}^+(\text{ClO}_4^-)$ 필름에 비하여 $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ 는 환원시에 굽힘이 많

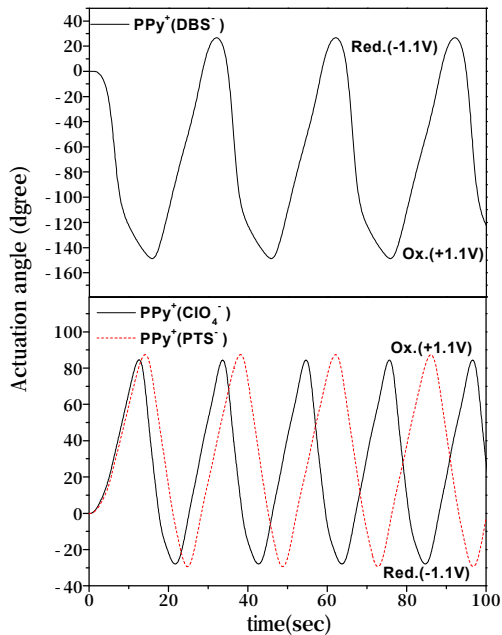


Figure 2. Actuation angle variation at redox potential(-1.1 1.1V).

이 일어나기 때문에 보다 오랜 시간을 필요로 하게 된다.

PPy⁺/PTS⁻ 필름. PPy 중합시 도판트로 PTS⁻를 사용하였을 경우에는 중합이 완료되고 나면 PPy⁺(PTS⁻) 필름을 얻을 수 있다. 이 필름을 Na - PTS를 포함하는 전해질 수용액에 침지시킨 후 전기적으로 산화/환원 반응을 유도하며 각각의 상태에서 전위를 정지시켜 산화/환원된 상태에서의 PPy 필름의 표면조성을 분석하였으며 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. PPy⁺(PTS⁻) 필름을 산화시켰을 때(위)에는 EDS 결과에서 나타내었듯이 S가 검출되는 것을 알 수 있으며, 이는 PTS⁻ 이온이 PPy 필름내에 존재함을 나타내고 있다. 반대로 환원시(아래)에는 S의 함량이 감소되는 것으로 나타났는데, 이는 산화 상태에서 양이온을 주쇄에 포함하는 PPy⁺가 환원에 의하여 중성 상태로 변하게 되며, 따라서 반대이온으로 작용하고 있던 PTS⁻ 이온이 필름 바깥쪽으로 방출되는 것을 알 수 있다. 이때, Na의 함량은 산화 시에만 약간 검출되었으며 산화/환원에 따른 양이온의 이동은 아주 미약한 정도로 사료된다. 산화/환원에 따른 필름의 bending 구동특성을

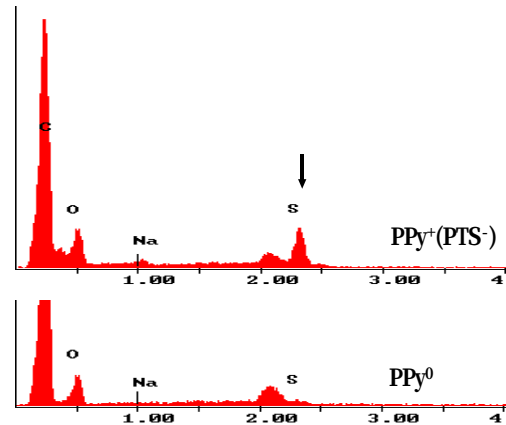


Figure 3. EDS results of PPy⁺(PTS⁻) at oxidation(top) and reduction(bottom).

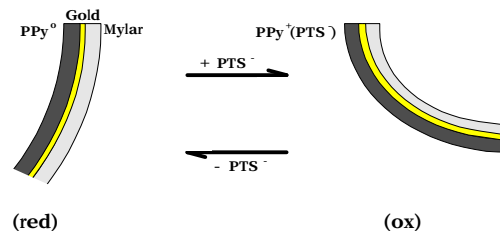


Figure 4. PPy⁺(PTS⁻)film actuation at redox potential.

Figure 4에 나타내었다. Figure 4에서 나타낸 바와 같이 산화시에 PPy 필름의 부피가 도입된 PTS⁻ 반대이온에 의하여 팽창하여 mylar 필름 쪽으로 굽힘이 일어남을 알 수 있다. 반대로 환원시에는 PPy 필름으로부터 PTS⁻ 이온이 방출되며 PPy 필름의 부피가 수축하여 PPy쪽으로 굽힘이 일어남을 알 수 있다.

PPy⁺/ClO₄⁻ 필름. PPy 중합시 도판트로 ClO₄⁻를 사용하였을 경우에는 중합이 완료되고 나면 PPy⁺(ClO₄⁻) 필름을 얻을 수 있다. 이 필름을 Na - ClO₄를 포함하는 전해질 수용액에 침지시킨 후 전기적으로 산화/환원 반응을 유도하여 각각의 상태에서 전위를 정지시켜 PPy 필름의 표면조성을 분석한 결과를 Figure 5에 나타내었다. PPy⁺(ClO₄⁻) 필름을 산화시켰을 때의(위) 조성은 EDS 결과에서 나타난 바와 같이 Cl이 검출되었으며, 이는 필름내에 ClO₄⁻ 이온이 존재함을 알 수 있다. 반대로 환원시(아래)에는 Cl의 함

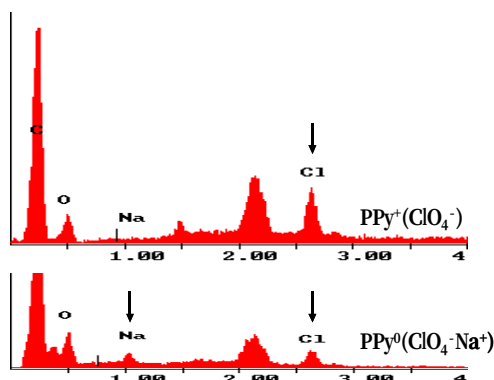


Figure 5. EDS results of $\text{PPy}^+(\text{ClO}_4^-)$ at oxidation(top) and reduction(bottom).

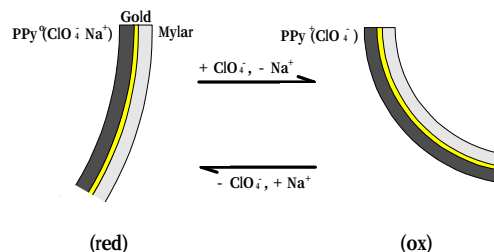


Figure 6. $\text{PPy}^+(\text{ClO}_4^-)$ film actuation at redox potential.

량이 감소하고, 대신에 Na의 함량이 약간 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 산화 상태에서 양이온을 주쇄에 포함하는 PPy^+ 가 환원에 의하여 중성 상태로 변하게 되면서 반대이온으로 작용하고 있던 ClO_4^- 이온이 필름 바깥쪽으로 방출되는데 ClO_4^- 이온이 전부 방출되기 전에 크기가 작은 상대이온인 Na^+ 이온이 전기적인 인력에 의해서 필름의 안쪽으로 소량 들어 오기 때문이다. 따라서 PTS가 도판트로 사용된 경우와는 달리, 환원시에 ClO_4^- 가 용액 쪽으로 빠져나 감과 동시에 필름내부에 잔류하고 있는 ClO_4^- 이온을 상쇄시키기 위하여 소량의 Na^+ 이온이 필름 내부로 들어움을 알 수 있다. 이때 들어오는 Na의 함량은 아주 미량으로 $\text{PPy}^+/\text{ClO}_4^-$ 필름의 산화/환원시 볼륨의 변화에는 직접적인 영향을 주지 못하는 것으로 사료 된다. 산화/환원에 따른 필름의 bending 구동특성을 Figure 6에 나타내었다. Figure 6에서 나타낸 바와 같이 산화시에 PPy 필름의 부피가 도입된 ClO_4^- 반

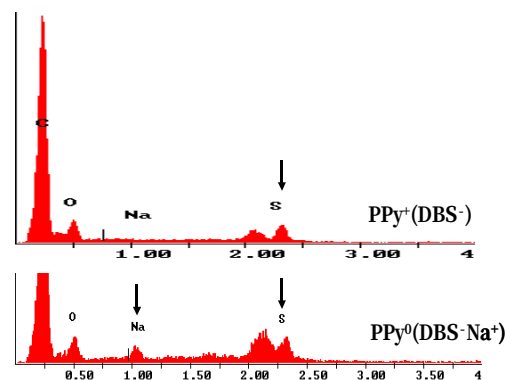


Figure 7. EDS results of $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ at oxidation(top) and reduction(bottom).

대이온에 의하여 팽창하여 mylar쪽으로 굽힘이 일어 남을 알 수 있다. 반대로 환원시에는 PPy 필름으로 부터 ClO_4^- 이온이 방출되면 PPy 필름의 부피가 수 축하여 PPy쪽으로 굽힘이 일어남을 알 수 있다.

$\text{PPy}^+/\text{DBS}^-$ 필름. PPy 중합시 도판트로 DBS-를 사 용하였을 경우에는 중합이 완료된 후에 $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ 필름이 얻어진다. 이 필름을 Na-DBS를 포함하는 전 해질 수용액에 침지시킨 후 전기적으로 산화/환원반응 을 유도하여 각각의 상태에서 전위를 정지시켜 산화/ 환원된 상태에서의 PPy 필름의 표면조성을 분석하여 그 결과를 Figure 7에 나타내었다. $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ 필 림을 산화시켰을 때(위)에는 EDS 결과에서 나타내 듯이 S가 검출되는 것을 알 수 있으며, 이는 DBS- 이온이 PPy 필름내에 존재함을 나타내고 있다. 반대 로 환원시(아래)에는 S의 함량은 산화시와 마찬가지로 그대로 존재하고, Na의 함량이 늘어난 것을 볼 수 있다. 이는 산화 상태에서 양이온을 포함하는 PPy^+ 가 환원에 의하여 중성 상태로 변하게 되면서 반대이 온으로 작용하고 있던 DBS- 이온이 필름의 바깥쪽 으로 방출되어야 하는데 DBS- 이온은 그 크기가 커 서 쉽게 PPy 사슬을 통과해 밖으로 나가지 못하므로 상대 이온인 Na^+ 이온이 전기적인 인력에 의해서 PPy 필름 안으로 들어오는 것으로 사료된다. 이때 산화/환원에 따른 필름의 bending 구동특성을 Figure 8에 나타내었다. Figure 8에서 나타낸 바와 같이 환원시에 PPy 필름이 DBS- 이온의 상대이온 으로 도입된 Na^+ 이온에 의하여 팽창하여 mylar 쪽

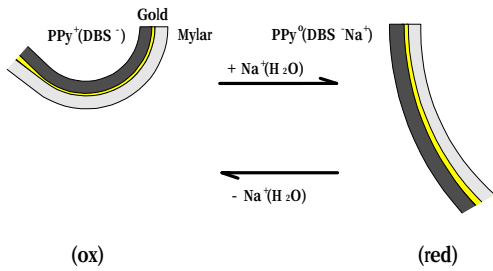


Figure 8. $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ film actuation at redox potential.

으로 굽힘이 일어남을 알 수 있다. 반대로 산화시에는 PPy 필름으로부터 Na^+ 이온이 방출되면 PPy 필름의 부피가 수축하여 PPy 쪽으로 굽힘이 일어남을 알 수 있다. 산화/환원시의 구동각도는 다른 도판트에 비하여 크게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 산화시에 Na^+ 이온이 물과 함께 PPy 필름을 빠져나갔다가, 환원시에 다시 약 세분자의 물과 함께 유입되면서 더 많은 부피의 변화를 일으키는 것으로 보고된 바 있다.¹⁶

위의 실험에서 알 수 있듯이 도판트의 종류가 다른 각각의 필름이 산화/환원시 이온의 이동에 따른 필름의 조성과 구동특성을 정리하면 Table 1과 같다.

중합 시간에 따른 구동 각도 변화. 얻어진 PPy 필름은 전해질만을 포함하는 수용액에 다시 함침하여 전기적으로 산화/환원반응을 유도하여 구동특성을 관찰하였다. Figure 9는 $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$, $\text{PPy}^+(\text{PTS}^-)$, $\text{PPy}^+(\text{ClO}_4^-)$ 각각의 필름에 대하여 단위면적당 중합량 (mg/cm^2)에 따른 구동각도의 변화를 나타낸 것이다. 구동각도는 필름이 산화시에서 환원시까지 움직인 각도를 측정하였다.

우리가 쉽게 예상할 수 있는 대로 중합시간에 따라서 중합된 $\text{PPy}^+(\text{Dopant}^-)$ 의 단위면적당 중합량 (mg/cm^2 로 대체)이 중합 초기에는 서서히 증가하다가 고분자가 생성이 되면 그 이후로는 좀더 빠른 속도로 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. PPy 필름의 두께가 증가함에 따라 반대 음이온이 들어올 공간이 상대적으로 더 많아지므로 구동각도는 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 도판트의 크기에 따른 구동각도를 비교하여 보면, DBS^- 가 사용되었을 때가 PTS^- 나 ClO_4^- 에 비하여 큰 것을 알 수 있다. 이는 $\text{PPy}^+(\text{DBS}^-)$ 의 경우에는 환원시에 PPy 필름내부에

Table 1. Actuation Characteristics of PPy Films Depending on Dopants Variation

dopant	oxidation	reduction	actuation characteristics
Na-PTS	$\text{PPy}^+(\text{PTS}^-) \rightleftharpoons$	PPy^0	PPy volume increases at oxidized state
Na- ClO_4	$\text{PPy}^+(\text{ClO}_4^-) \rightleftharpoons$	PPy^0 $\text{PPy}^0(\text{ClO}_4^- \text{Na}^+)$	PPy volume increases at oxidized state
Na-DBS	$\text{PPy}^+(\text{DBS}^-) \rightleftharpoons$	$\text{PPy}^0(\text{DBS}^- \text{Na}^+)$	PPy volume increases at reduced state

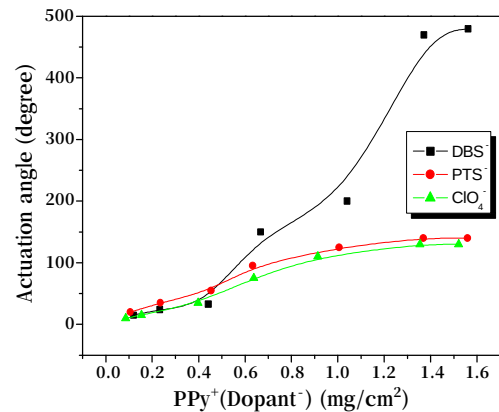


Figure 9. Actuation angle variation depending on PPy content.

존재하는 DBS^- 이온을 상쇄시키기 위하여 Na^+ 이온이 물과 함께 유입이 되는데 물에 의한 부피 증가 효과가 PTS^- 나 ClO_4^- 의 경우에서와 같이 도판트 음이온이 필름내부로 유입되는 양에 비해 매우 크기 때문으로 사료된다. $\text{PPy}^+(\text{Dopant}^-)$ 필름의 두께가 어느 정도 이상이 되면 PPy 자체의 stiffness와 필름이 구동할 수 있는 각도의 한계 등으로 인하여 더 이상 구동각도가 선형적으로 증가하지 않는 것이 관찰되었다.

결론

1. 본 연구에서는 PPy 필름을 이용하여 여러 가지 도판트 용액에서의 산화/환원 실험을 통해서 PPy 필름이 수용액상에서 actuator로서 구동이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

2. PPy 필름의 두께는 중합시간에 따라서 분당 약 0.7 μm 씩 증가함을 알 수 있다.

3. PPy 필름에 PTS⁻와 같은 작은 도판트가 도입된 경우에는 산화/환원시 자체 움직임이 있어 산화시에 PPy 필름의 팽창이 관찰되었으며, DBS⁻와 같은 큰 도판트의 경우에는 PPy 필름내에서 유출될 수 없으므로 환원시에 Na⁺ 이온이 도입되어 부피가 팽창하는 것으로 나타났다.

4. PPy⁺(Dopant⁻)의 두께가 두꺼울수록, 즉 단위면적당 중합량이 증가할수록 구동각도가 증가한다.

감사의 글 : 본 연구는 프론티어연구개발 사업 중 지능형 마이크로시스템 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. H. Baughman and L. W. Shacklette, "Science and Applications of Conducting Polymers", eds. by W. R. Salaneck, D. T. Clack, and E. J. Samuelsen, Adam Hilger, Bristol, 1991.
2. K. Yoshina, K. Nakao, M. Onada, and R. Sugimoto, *Solid State Commun.*, 70, 609 (1989).
3. R. H. Baughman, *Makromol. Chem., Macromol. Sym.*, 51, 193 (1991).
4. T. F. Otero and J. M. Sansinena, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 38, 411 (1995).
5. R. H. Baughman, L. W. Shacklette, and R. L. Elsenbaumer, *Molecular Electronics*, 7, 267 (1991).
6. Q. Pei and O. Inganäs, *Journal of Physical Chemistry*, 96(25), 10507 (1992).
7. M. Kaneko, M. Fukui, W. Takashima, and K. Kaneto, *Synthetic Metals*, 84, 795 (1997).
8. T. F. Otero and H. S. Nalwa, "Handbook of Organic and Conductive Molecules and Polymers", vol. 4. Wiley, Chichester, 1997.
9. P. Chiarelli, A. Della Santa, D. DeRossi, and A. Mazzoldi, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 6, 32 (1995).
10. E. Smela, O. Inganäs, Q. Pei, and I. Lundström, *Adv. Mater.*, 5, 630 (1993).
11. T. F. Otero and J. M. Sansinena, *Bioelectrochem. Bioenerg.*, 42, 117 (1997).
12. R. H. Baughman, *Synthetic Metals*, 78, 339 (1996).
13. R. Yang, D. F. Evans, L. Christensen, and W. A. Hendrickson, *J. Phys. Chem.*, 94, 6117 (1990).
14. M. Ghandi, P. Murray, G. M. Spinks, and G. G. Wallace, *Synthetic Metals*, 73, 247 (1995).
15. B. S. Berry and W. C. Pritchett, *IBM J. Res. Dev.*, 28, 662 (1984).
16. G. Maia, R. M. Torresi, E. A. Ticianelli, and F. C. Nart, *J. Phys. Chem.*, 100, 15910 (1996).