

# 공기 중에서 동작하는 전도성 고분자 액추에이터용 고체 전해질의 특성 분석 및 실험적 검증

論 文  
51C-3-6

## Characterization and Experimental Verification of Solid Polymer Electrolyte for Conductive Polymer Actuator Operated in Air

安浩廷\* · 李承起\*\* · 朴政浩<sup>§</sup>  
(Ho-Jeong Ahn · Seung-Ki Lee · Jungho Pak)

**Abstract** - In order to fabricate stable conductive polymer actuators which can be operated in air, conductivity and solidity of polymer electrolyte materials have been studied. It was found that Nafion+LiCl is appropriate material to be used for conductive polymer actuator. Using the Nafion+LiCl solid polymer electrolyte, single layer PPy actuators have been fabricated and their deflection was measured. Double layer PPy actuators make up for shortcoming of single layer PPy actuator and displacement and frequency response can be improved by fabrication of double layer PPy actuator. This kind of all-solid-polymer actuator can be used for practical applications.

**Key Words** : polypyrrole, conductive polymer actuator, solid polymer electrolyte (SPE)

### 1. 서 론

전도성 고분자는 전도도를 가지는 금속과 가볍고 신축성을 가지는 고분자의 성질을 함께 가지는 물질로서 바이오 관련 분야 등에서 많은 응용이 기대되는 물질이다. 또한 산화환원 반응에 따른 이온의 출입에 따른 부피변화를 이용하여 액추에이터에 응용할 수 있는 가능성이 밝혀지면서 새로운 액추에이터의 물질로서 관심을 받고 있다 [1]. 그러나 이온의 출입을 위해서는 이온의 공급원인 액체 전해질 환경이 필수적이며 전도성 고분자 액추에이터에 관한 대부분의 연구결과들은 액체 전해질 내에서의 응용에 한정되어 왔다 [2, 3]. 이러한 한계를 극복하기 위해 액체 전해질 대신 고체 전해질을 사용하여 공기 중에서 동작할 수 있는 전도성 고분자 액추에이터에 관한 연구가 진행되어 오고 있으나 실제로 공기 중에서 동작하는 액추에이터를 구현한 예는 아직 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 합성이 간편하고 액추에이터 제작이 용이한 폴리피롤(polypyrrole : PPy)을 사용하여 액추에이터를 제작한다. 이를 공기 중에서 동작시키기 위해 액상의 전해질을 대체할 수 있는 적절한 고체 전해질을 선정한다. 이를 위해 다양한 고체 전해질의 특성에 대한 실험을 수행하고 이러한 실험을 통하여 액추에이터에 응용하기에 가장 적합한 물질을 선정하고 이를 실험적으로 검증한다.

또한 선정된 고체 전해질과 폴리피롤로 구성되는 일층형 액추에이터와 이중형 액추에이터를 제작하고 그에 대한 특

성을 정성적, 정량적으로 분석하여 공기 중에서 동작할 수 있는 새로운 전도성 고분자 액추에이터와 이의 응용을 위한 가능성을 검토한다.

### 2. 전도성 고분자

전도성 고분자는 금속처럼 전기 전도성을 가지는 고분자 물질이다. 그림 1(a)는 전도성 고분자 물질 중에서 가장 간단한 구조를 가지는 폴리아세틸렌(polyacetylene) 구조를 보여준다.

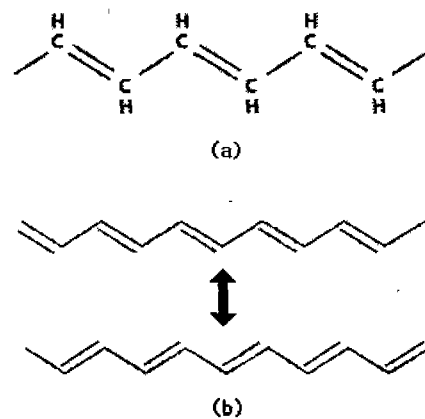


그림 1 (a) 공액 구조 고분자 (polyacetylene) 와 (b) 공액 구조 고분자 사슬의 진동.

Fig. 1 (a) Conjugated polymer (polyacetylene) and (b) vibration of conjugated polymer chain.

전도성 고분자가 고분자 물질이면서 금속처럼 전도성을 가질 수 있는 이유는 그림 1(a)에 보이는 것처럼 탄소원자

\* 準 會 員 : 高麗大 電氣工學科 碩士課程  
\*\* 正 會 員 : 檀國大 工學部 電氣電子컴퓨터工學專攻 副教授 · 工博  
<sup>§</sup> 正 會 員 : 高麗大 電氣工學科 副教授 · 工博  
接受日字 : 2001年 11月 19일  
最終完了 : 2001年 1月 15日

사이에서 단일 결합과 이중 결합이 교차로 나타나는 공액 (conjugated) 구조를 가지면서 그림 1(b)와 같이 단일결합과 이중결합이 진동하는 특성을 가지고 있기 때문이다 [4].

그러나 전도성 고분자 자체만으로는 좋은 전도도를 가지지 못하며 반도체의 도핑과 유사한 원리로 이온이 산화 혹은 환원되면서 고분자 사슬 구조 내에 전자를 공급하거나 빼앗는다. 그림 2는 이렇게 생성된 전자가 진동하는 사슬구조 속에서 이동하여 도전성을 나타내는 원리를 보여준다.

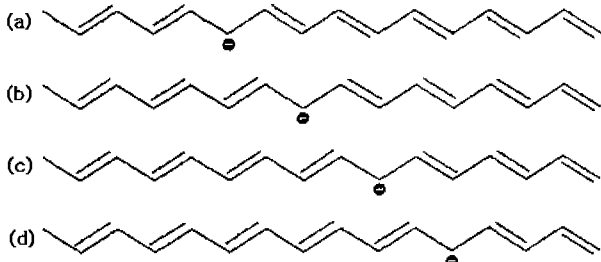


그림 2 (a)에서 (d)로 진행되는 전자의 이동 모습.  
Fig. 2 The electron migration from (a) to (d).

### 2.1 폴리피롤의 합성

본 연구에서는 액추에이터 제작에 폴리피롤을 사용하였다. 폴리피롤은 합성이 용이하고 사진공정에 의해 패터닝된 금속 필름에 *in-situ*로 증착되어 별도의 패터닝 공정이 필요 없고 미세 패터닝이 가능하므로 MEMS 응용에 적합하다. 폴리피롤의 화학 구조는 그림 3에서 진하게 표시된 것과 같이 기본적인 backbone 구조가 폴리아세틸렌과 동일한 공액 구조의 고분자이다.

폴리피롤은 도판트인 음이온 A<sup>-</sup>가 도핑되면서 탄소 원자는 전자를 잃어 (+) 전하를 가지게 되며 이온의 (-) 전하와 전기적인 중성을 유지한다. 이렇게 발생한 (+) 전하를 폴라론(polaron : radical cation)이라고 부르며 폴라론은 반도체의 정공과 같은 역할을 하여 개념적으로 p 도핑이 일어난 것과 같다 [5].

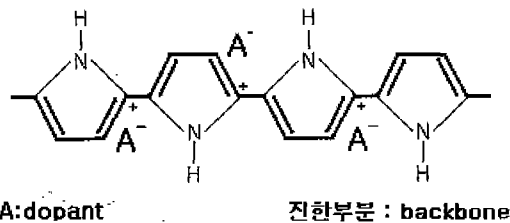


그림 3 폴리피롤의 구조.  
Fig. 3 The structure of polypyrrole.

폴리피롤의 합성은 그림 4에서 보이는 바와 같이 용액 내에서 전기 화학적인 방법에 의해서 이루어지며 합성 용액은 0.1M 피롤(pyrrole), 0.1M dodecyl sodium sulfate(NaDS) 수용액을 사용한다. 합성에 사용된 전극은 산화 전극에는 스테인리스판(STS plate), 상대전극에는 백금선을 사용하고 정전류원을 이용하여 일정한 전류를 인가하면 산화 전극인 서

스판 위에 폴리피롤이 합성된다. 합성된 폴리피롤의 두께는 정전류원에 의해 공급된 전하량에 비례하므로 전류밀도와 합성시간을 조절하여 고분자의 두께를 제어할 수 있다.

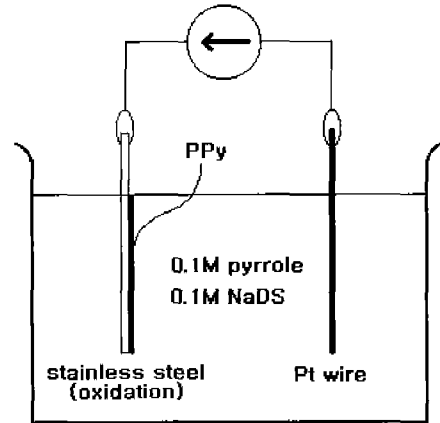


그림 4 폴리피롤의 전기화학적 합성 방법.  
Fig. 4 A setup for electrochemical synthesis of polypyrrole.

### 2.2 액체전해질 내에서 동작하는 전도성 고분자 액추에이터의 구동 원리

저저서 고분자 액추에이터의 구동 원리는 이가치는 저안에 따라서 고분자 내외로 이온이 출입할 때 발생하는 부피 변화를 이용한 것이다. 그림 5는 폴리피롤의 부피변화 원리를 나타낸 그림이다.

폴리피롤을 합성할 때 도핑된 음이온의 분자 크기가 매우 클 경우 음이온은 고분자 사슬 구조 내에 고정화될 수 있다. 이 때 폴리피롤의 산화 혹은 환원 상태에 따라 전기적 중성을 유지하기 위해 액체전해질 내에 존재하던, 분자의 크기가 작은 양이온이 폴리피롤의 내부로 침투하거나 혹은 내부에서 전해용액으로 빠져나간다. 이러한 양이온의 움직임에 의해 고분자의 부피가 변하게 된다 [6].

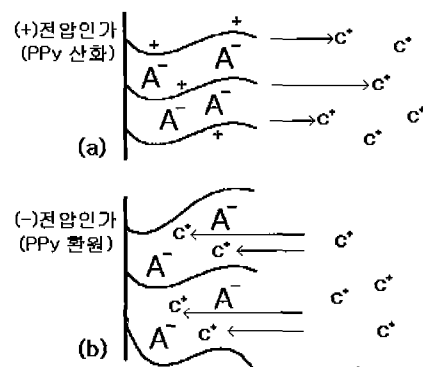


그림 5 폴리피롤의 (a) 산화 상태 및 (b) 환원 상태.  
Fig. 5 (a) Oxidation state and (b) reduction state of PPy.

즉, 전극에 (+) 전압을 인가하면 폴리피롤은 산화되고 전자를 잃어 (+) 전하를 가지게 되고 고정화된 음이온 A<sup>-</sup>와

전기적 중성을 이루게 되며 크기가 작은 양이온  $c^+$ 는 액체 전해질로 빠져나간다. 반대로 (-) 전압을 인가하면 폴리피롤은 환원되어 전자를 얻어 (+) 전하를 잃게 되며 양이온  $c^+$ 는 폴리피롤 내부로 침투하여 음이온  $A^-$ 와 전기적 중성을 이룬다.

그러나 그림 5의 경우와는 반대로 양이온의 분자 크기가 크고 음이온의 분자 크기가 작을 경우에는 양이온이 고분자 내부에 고정화되고 음이온이 산화환원에 따라 폴리피롤 내외로 출입하게 되며 전압의 극성에 따른 부피변화는 반대가 된다.

이러한 부피변화를 극대화시키기 위한 액추에이터 응용으로서 금속의 열팽창 계수의 차이를 이용한 bimetal 구조와 유사한 bilayer 구조를 들 수 있다. 즉, 폴리피롤의 한쪽 면에 부피변화를 하지 않는 비활성 막(inactive layer)을 부착하여 폴리피롤에 전압을 인가함으로써 전압의 극성에 따라 휘는 방향이 변화하는 액추에이터를 제작할 수 있다. 그림 6은 이와 같은 액추에이터가 이온의 크기와 산화환원 상태에 따라 움직이는 모습을 나타낸 그림이다.

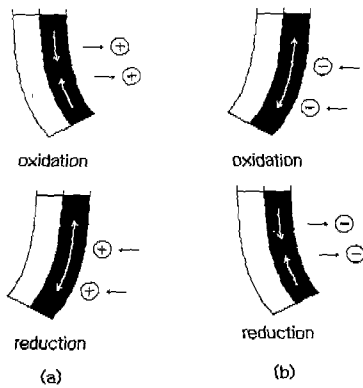


그림 6 (a) 큰 음이온과 작은 양이온인 경우 및 (b) 작은 음이온과 큰 양이온인 경우.

Fig. 6 (a) Large anion and small cation and (b) small anion and large cation.

### 3. 고체 전해질

전도성 고분자 액추에이터는 이온의 출입에 따른 부피변화를 이용하므로 이온의 공급원인 전해질을 반드시 필요로 한다. 따라서 지금까지 보고된 액추에이터는 모두 액체 상의 전해액 내에서만 액추에이터의 동작을 보였으며 이는 양한 응용의 제약조건이 될 수 있다. 이러한 제약을 극복하기 위해서는 액체전해질을 대신할 수 있는 적절한 특성을 가진 고체전해질을 필요로 한다.

본 연구에서는 전도성 고분자에 응용하기 위한 고체전해질의 필요조건으로서 다음에 초점을 두었다. 첫째로 좋은 전도성이 요구된다. 이것은 전해질 내에서 이온의 움직임을 나타내는 것으로 액체전해질을 대체하기 위해서는 역시 좋은 이온 전도성을 가진 고체전해질을 필요로 하며 액추에이터 동작 특성에 크게 영향을 미치는 요소이 두 번째는 표면 마이크로머시닝 공정을 적용하기 위한

안정적인 박막이 되도록 공기 중에서 좋은 경도를 가져야 한다.

그러나 대부분의 고체전해질은 습도 의존성을 보이며 높은 습도에서 좋은 전도성을 가지는 반면 경도는 떨어진다. 따라서 이 두 가지 특징은 일반적으로 서로 양립하지 못하고 실험적 과정을 통해 적절한 조건을 선정해야 한다.

#### 3.1 고체전해질의 전도도 측정

전도성 고분자 액추에이터는 산화환원 반응에 따른 이온의 움직임에 의해 구동된다. 따라서 원활한 이온의 움직임을 필요로 하므로 적합한 고체전해질의 선정을 위해 전기 전도도를 측정하였고 사용된 고체전해질은 PEO(polyethylene oxide), PEG(polyethylene glycol), 내피온(Nafion<sup>®</sup>, perfluorosulfonic acid, Dupont)을 사용하였다.

고체전해질을 이용하여 액추에이터를 제작하기 위해서는 고체전해질을 박막형태로 제작할 필요가 있으므로 액상의 고체전해질 용액을 스핀코팅하여 오븐에서 일정시간 건조시킴으로써 얇은 박막의 고체전해질을 제작할 수 있었다.

그림 7(a)는 전도도를 측정하기 위해 일정한 크기의 유리 기판 양끝에 전극으로 쓰기 위한 Cr/Au를 증착한 후 액체 상태의 고체전해질을 스핀코팅하여 제작한 시편의 구조를 나타낸다. 고체전해질의 이온의 움직임에 의한 저항을  $R_b$ 라고 하고 분극에 의한 커패시터를  $C_b$ , Cr/Au 전극의 표면에서 발생하는 이중층에 의한 커패시터 성분을  $C_e$ 라고 했을 때 고체전해질의 등가 회로는 그림 7(b)와 같이 나타낼 수 있다.

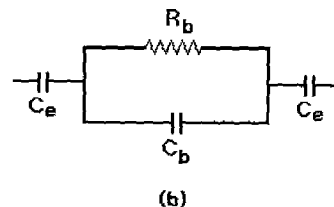
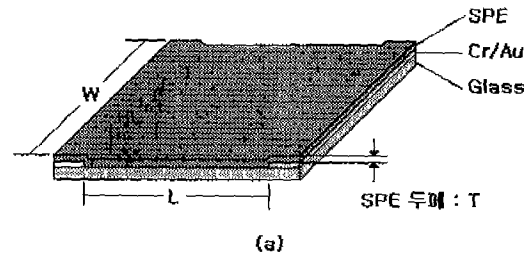


그림 7 (a) 전도도 측정을 위해 제작한 고체전해질 시편 및 (b) 고체전해질의 등가회로 ( $R_b$  : 이온의 움직임에 의한 저항,  $C_b$  : 분극에 의한 커패시터,  $C_e$  : 이중층에 의한 커패시터).

Fig. 7 (a) SPE sample for conductivity measurement (b) equivalent circuit of solid polymer electrolyte( $R_b$  : ionic resistor,  $C_b$  : capacitor by polarization,  $C_e$  : capacitor by double layer).

등가회로에서 전극 계면에서의 이중층에 의한 커패시터 성분은 분극에 의한 커패시터 성분에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다. 그러나 분극에 의한 커패시터 성분은 무시할 수 없을 만한 양이므로 그림 8과 같은 측정회로를 통하여 전류 응답을 측정하였고 실제 측정된 전류응답 특성이 그림 9와 같이 나타난다.

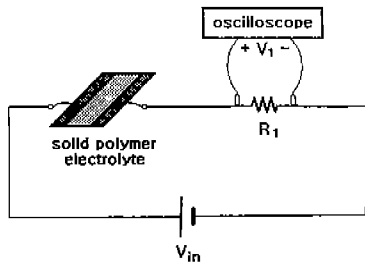


그림 8 고체전해질의 전도도 측정 회로.  
Fig. 8 Measurement circuit for conductivity of solid polymer electrolyte.

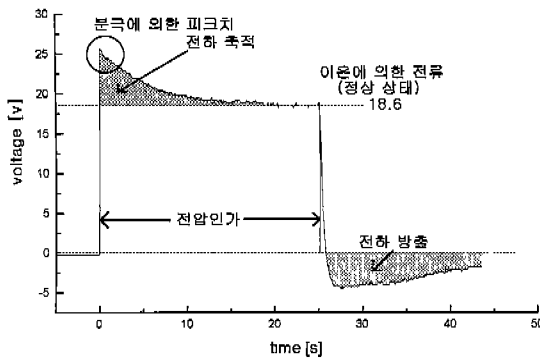


그림 9 고체전해질의 전류응답.  
Fig. 9 Current response of solid polymer electrolyte.

고체 전해질의 전류응답에서 이온의 분극에 의한 전하 축적과 방출현상이 보이며 이것은 등가 회로의  $C_b$  성분과 관련이 된다. 그러나 액추에이터 응용에 중요한 인자인 이온의 전도도와 관련 있는 성분은 전류 응답에서 정상상태에 도달했을 때 나타나는 전류값 또는 그 때의 전도도이다. 전도도를 구하기 위해서는 그림 8의 측정 회로에서  $10M\Omega$ 의 저항( $R_1$ )에 걸리는 전압을 고체전해질 시편에 흐르는 전류값으로 환산하면 전도도( $\sigma_{\text{고체전해질}}$ )를 구할 수 있다.

$$\sigma_{\text{고체전해질}} = \frac{V_1}{(V_{in} - V_1)R_1} \times \frac{L}{WT} \quad (1)$$

- $\sigma_{\text{고체전해질}}$  : 고체전해질의 전도도
- $V_1$  : 오실로스코프에서 측정된 전압
- $V_{in}$  : 인가전압
- $R_1$  : 직렬 연결한 저항
- $L$  : 전극 사이의 거리
- $W$  : 전극의 너비
- $T$  : 막의 두께

### 3.2 고체전해질 - PEO와 PEG의 특성

PEO와 PEG는 메탄올에 녹여서 사용하며 액추에이터의 구동에 참여하는 양이온  $Li^+$ 을 공급해주기 위하여  $LiClO_4$ 를 첨가해 줌으로써 고체전해질의 역할을 하게 된다. PEO와 PEG는 분자량의 차이가 매우 큰 것을 제외하면 기본적으로 거의 같은 물질이다. 본 연구에서 사용한 PEG의 분자량은 4000, 8000, 12000이었고 PEO의 분자량은 60만과 90만이다. 분자량의 차이에서 나타나는 현격한 차이는, 분자량이 작은 PEG는 공기 중에서 안정적이지 못하다는 것이다. 스펀코팅 후 오븐에서 건조시킨 후 꺼내면 비교적 낮은 50% 이하의 습도에서도 금방 물처럼 녹아 내린다. 따라서 PEG는 공기 중에서 동작하는 액추에이터에 응용하기에는 적합하지 않다고 볼 수 있고 주로 PEO를 이용한 고체전해질의 제작 조건 변화에 따른 액추에이터 응용 가능성에 대해 검토해 보았다.

그림 10은 PEO의 건조조건에 따른 PEO 표면 현미경 사진의 비교이다. 그림 10(a)는 오븐에서 급격히 건조시킨 PEO의 표면으로 매끈한 표면을 보이는데 반해 그림 10(b)는 공기 중에서 서서히 건조시킨 PEO의 표면으로 거친 결정을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 급속히 건조시킬 경우 결정의 크기가 작고 고른 표면을 얻을 수 있고 공기 중에서 서서히 건조시킬 경우 결정크기가 큰 고분자로 결정화됨을 보여주는 결과이다. 그러나 얇은 박막으로 코팅하여 사용하기 위해서는 그림 10(b)와 같이 거친 표면은 막의 균일성을 얻기 위해서 적합하지 않으므로 적당하지 않다.

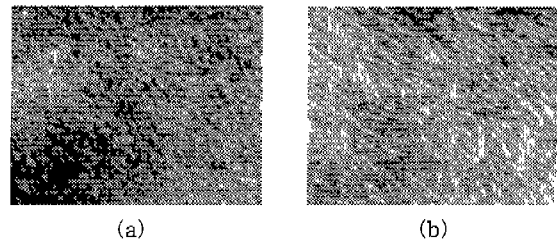


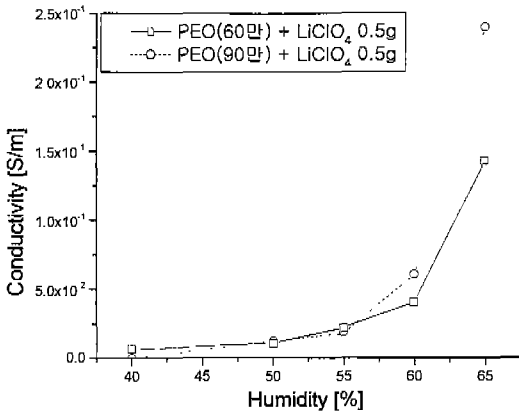
그림 10 (a) 오븐에서 급격히 건조시킨 PEO 표면 및 (b) 공기 중에서 서서히 건조시킨 PEO 표면.  
Fig. 10 (a) Fast dried PEO surface in oven and (b) slowly dried PEO surface in air.

PEO의 분자량과 첨가된  $LiClO_4$ 의 양이 고체전해질의 전도도에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 11에서 보이는 바와 같이 첨가된  $LiClO_4$ 의 양에 대하여 분자량이 각각 60만과 90만인 PEO의 전도도를 비교하였다. 그러나  $LiClO_4$ 의 양에 대한 영향은 특별한 경향성을 보이지 않는 반면에 분자량이 90만인 것이 60만인 것에 비해 높은 전도도를 보인다. 이는 고분자 사슬이 긴 PEO에서 이온의 움직임이 더 활발하다는 것을 보여주는 반면 첨가된 이온의 양에 대한 영향은 습도에 의한 영향에 비해 무시할 만큼 작다는 것을 보여주는 것으로 판단된다.

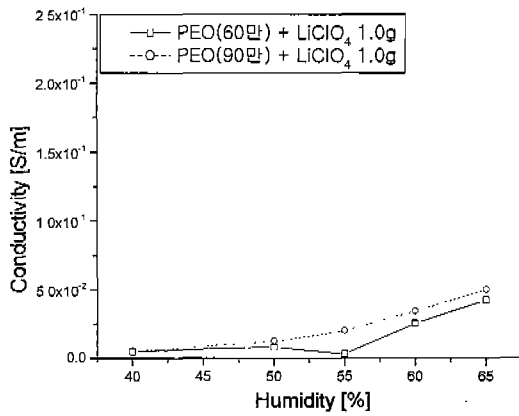
PEO를 이용한 고체전해질은 공기 중 습도가 70% 이상이 되면 고체상태에서 액체상태로 변화하며 액추에이터로 사용되기에는 무리가 따른다. 따라서 공기 중에서 좀 더 안정적인 고체전해질을 필요로 하였다.

3.3 고체 전해질 - 내피온, 내피온 + LiCl의 특성

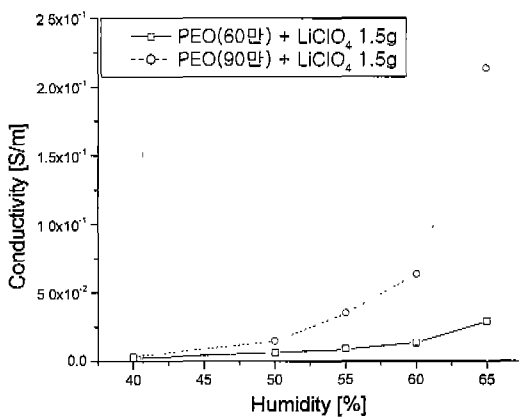
내피온은 이온 전도성 고분자이며 전도성 고분자 형태의 고체 전해질이고 습기에 강하여 80% 이상의 습도에서도 좋은 경도를 가진다. 그러나 높은 전도성을 가지기 위해서는 수화 과정을 필요로 한다는 단점을 가지고 있다 [7]. 그림 12는 PEO와 내피온의 습도에 따른 전도도 측정 결과를 나타낸다. 여기에서 PEO는 내피온보다 좋은 전도도를 나타내지만 흡습성으로 인해 70% 이상의 습도에서 박막의 경도가 떨어져 안정적인 박막 형태를 유지하기 어렵다. 반면에 내피온은 습도에 강하여 비교적 뛰어난 안정성을 보이지만 전도도가 낮게 나타났다. 이는 내피온이 좋은 전도성을 갖기 위해서는 수화 과정을 필요로 하기 때문인데 수화 과정을 거친 후에도 수분의 증발에 의한 전도도 감소를 억제할 수 있어야 한다.



(a)



(b)



(c)

그림 11 분자량이 각각 60만과 90만인 PEO의 습도와 LiClO<sub>4</sub>의 양에 따른 전도도 비교. (a) 0.5g LiClO<sub>4</sub> (b) 1.0g LiClO<sub>4</sub> (c) 1.5g LiClO<sub>4</sub>.  
 Fig. 11 Comparison of conductivity varying humidity and LiClO<sub>4</sub> with formula weight  $6 \times 10^5$  and  $9 \times 10^5$  each. (a) 0.5g LiClO<sub>4</sub> (b) 1.0g LiClO<sub>4</sub> (c) 1.5g LiClO<sub>4</sub>.

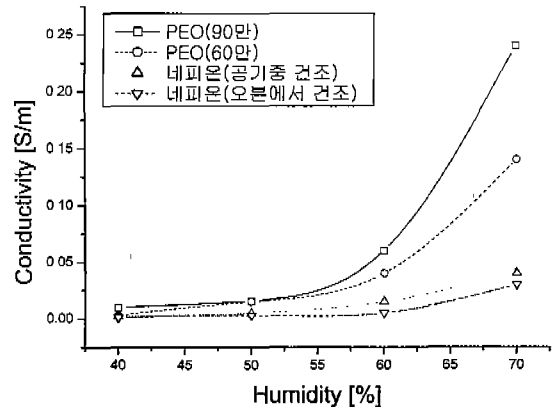


그림 12 습도에 따른 PEO와 내피온의 전도도 비교.  
 Fig. 12 Comparison of conductivity of PEO and Nafion varying humidity.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 높은 흡습성 시약인 LiCl을 내피온에 첨가하였다. LiCl은 흡습성이 매우 크므로 수분의 증발을 억제하여 내피온을 항상 수화된 상태로 유지시켜 줄 수 있다.

그림 13은 내피온 용액에 LiCl의 양을 10, 30, 50mg/ml로 변화시키며 첨가했을 때 나타나는 전도도 변화이다. 그림에서 첨가된 LiCl의 양이 증가하면서 전도도가 커지는 것을 알 수 있으며 습도가 증가할 때 전도도 역시 커지는 것을 알 수 있다.

그림 12와 13의 전도도를 비교했을 때 LiCl을 첨가한 내피온은 넣지 않은 것에 비해 100배 이상의 급격한 전도도 향상을 가져왔고 PEO에 비해서도 수십 배의 전도도 향상을 보여준다.

또 첨가한 LiCl의 양이 커질수록 높은 전도도를 보이지만 50mg/ml의 LiCl을 첨가했을 경우 전도도는 매우 높지만 LiCl의 매우 큰 흡습성으로 인해 60% 이상의 습도에서는 습기를 너무 많이 흡수하여 고체로서 안정성을 잃고 녹아 내린다. 그러나 30mg/ml의 LiCl을 첨가했을 경우에는 전도도와

박막 정도의 습도 의존성 등에서 가장 안정적인 실험결과를 얻을 수 있었으며 폴리피롤 액추에이터에 사용되는 전도성 고분자로서 가장 적절한 특성을 갖는 것으로 판단된다. 따라서 이후의 모든 액추에이터 제작과정에서는 내피온에 LiCl이 30mg/ml 혼합되어 있는 고체 전해질을 사용하였다.

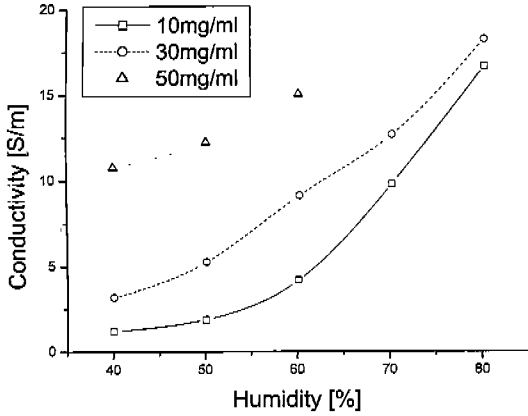


그림 13 내피온 + LiCl의 습도에 따른 전도도.  
Fig. 13 Comparison of conductivity of Nafion + LiCl varying humidity.

4. 공기 중에서 동작하는 액추에이터

전도성 고분자 액추에이터의 가장 기본적인 구성은 전도성 고분자 박막과 전해질 그리고 박막과 전해질 사이의 산화환원 상태를 바꿔주기 위한 두 개의 금속 전극이다. 여기서 2.2절에서 설명한 바와 같이 작은 부피 변화로 큰 움직임을 얻을 수 있는 bilayer 구조를 얻기 위하여 비활성 막을 추가하면 작은 부피 변화로 큰 변위를 얻을 수 있게 된다. 그림 14는 이러한 기본 구조를 고체 전해질을 이용한 액추에이터에 응용시킨 구조를 보여준다.

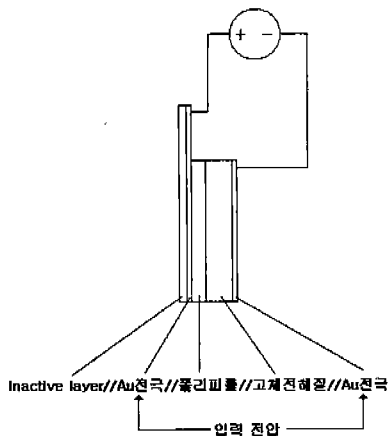


그림 14 고체 전해질을 이용한 전도성 고분자 액추에이터의 기본 구성.  
Fig. 14 Basic structure of conductive polymer actuator using solid polymer electrolyte.

이러한 기본 구조를 이용하여 그림 15와 같이 폴리피롤 층이 하나만 존재하는 일층형 액추에이터를 제작하였다. Bilayer 구조를 얻기 위하여 비활성 막으로 PET와 Au 박막을 각각 사용한 두 가지 형태의 일층형 액추에이터를 제작하였다.

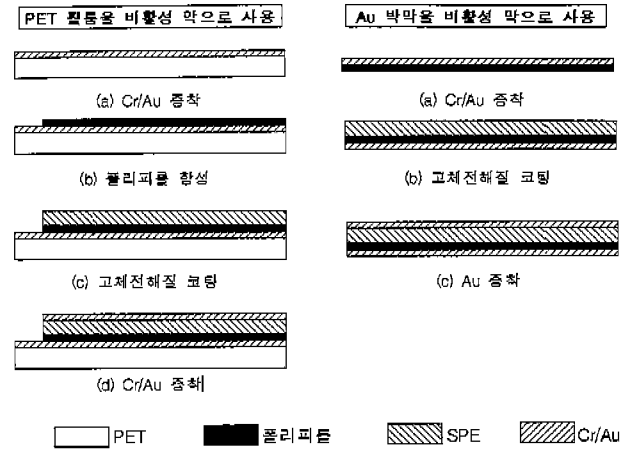


그림 15 일층형 액추에이터의 제작 과정.  
Fig. 15 Fabrication of single layer Actuator.

이렇게 제작한 액추에이터 양쪽의 Au 전극 중에서 하나를 기준으로 하여 접지하고 다른 하나의 Au 전극에 +2V/-2V의 구형파를 인가한다. 이때 폴리피롤의 산화 환원 상태가 변화하며 부피가 증가 혹은 감소하여 액추에이터가 동작한다.

그림 16은 이렇게 동작시킨 액추에이터 변위를 비교한 결과이며, Au 박막을 사용한 경우 PET 필름을 사용한 경우보다 더 큰 변위를 보여준다. 이는 50μm의 PET 필름이 13μm의 폴리피롤의 두께에 비해 너무 두꺼워 액추에이터 구동을 방해하기 때문이다.

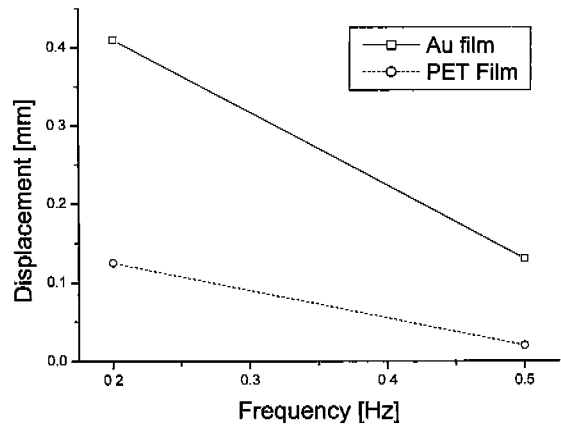


그림 16 PET 필름과 Au 박막을 비활성 막으로 사용한 일층형 액추에이터의 변위 (2mm×20mm).  
Fig. 16 Displacement of single layer actuator using PET film and Au film (2mm×20mm).

그러나 얇은 Au 박막으로는 충분한 비활성 막의 역할을 기대하기는 힘들기 때문에 변위는 액추에이터의 크기에 비해 200 $\mu\text{m}$ ~400 $\mu\text{m}$ 로 매우 작으며 최대 동작 주파수도 0.5Hz로 매우 낮다. 이러한 단점은 미세 구조물에 적용되었을 경우 실제적인 효용성을 기대하기 어렵도록 작용한다. 따라서 그림 17과 같이 기본 구조물로부터 변형된 이중형 액추에이터를 제작하였다.

이중형 액추에이터는 비활성 막을 사용하지 않고 고체전해질 양쪽으로 폴리피롤이 존재하는 형태이다. 이러한 이중형 액추에이터는 별도의 기준전극 없이 양쪽 폴리피롤의 산화 환원 상태가 서로 교차하여 변화한다. 따라서 한쪽 폴리피롤의 부피가 감소할 때 반대편 폴리피롤은 증가하므로 좀 더 안정적인 변위를 얻을 수 있다.

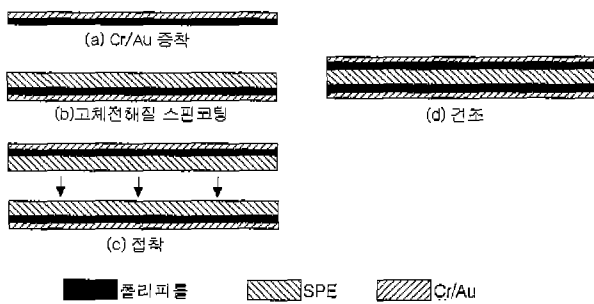


그림 17 이중형 액추에이터의 제작.

Fig. 17 Fabrication of double layer actuator.

그림 18의 0.5Hz의 입력 신호에 대한 변위 파형에서 이중형 액추에이터의 변위는 약 4mm인 것으로 측정되며 이는 일층형의 경우 200~400 $\mu\text{m}$ 의 변위를 나타낸 것에 비해 훨씬 향상된 결과다.

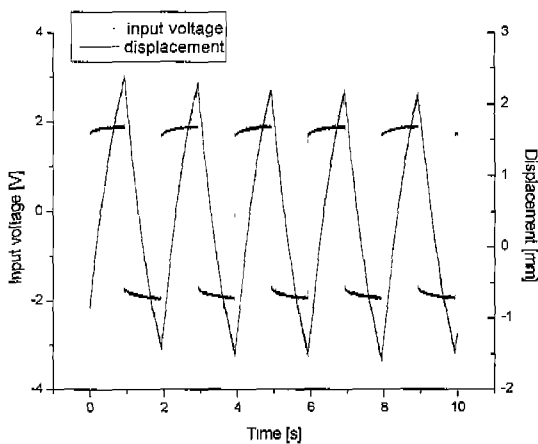


그림 18 이중형 액추에이터의 변위 파형 (0.5Hz).

Fig. 18 Displacement plot of double layer actuator (0.5Hz).

그림 19는 동일한 조건에서 여러 시편을 동일한 크기로 제작하여 각각 주파수에 따른 변위를 측정하였다. 시편에 따라 변위의 차이가 있고 최대 동작 주파수도 차이가 나

는 것은 그림 17의 제작과정 중 집합과정에서 재현성이 떨어지기 때문인 것으로 보이며 좀 더 재현성 있는 액추에이터를 제작하기 위해서는 일정한 힘으로 집합할 수 있는 도구의 제작이 필요할 것으로 보인다. 그러나 일반적인 일층형 액추에이터에 비해 10배 가량의 변위 증가를 얻을 수 있었던 것은 그림 5의 구조에서 매우 얇은 비활성 막의 단점을 극복하였고 또한 이중형 구조를 통해 입력 신호에 따라서 교차되어 작용하는 부피 변화로 인해 성능을 개선시킬 수 있었기 때문인 것으로 판단된다. 그림 20은 이와 같이 제작한 이중형 액추에이터의 동작 모습이다.

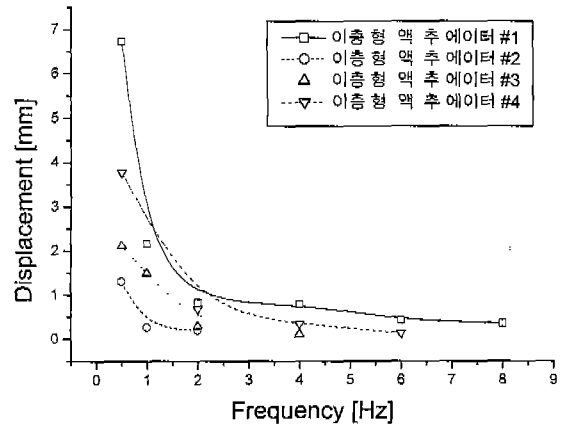


그림 19 이중형 액추에이터의 변위.

Fig. 19 Displacement of double layer actuator.

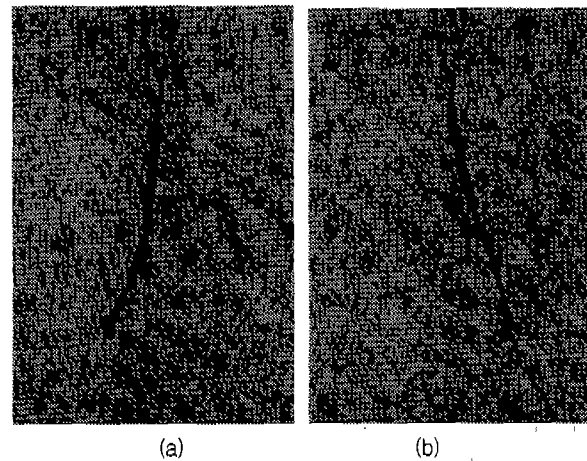


그림 20 이중형 액추에이터의 동작 모습 (a) +2V 인가했을 때 및 (b) -2V 인가했을 때.

Fig. 20 Deflection of double layer actuator (a) under input is +2V and (b) under input is -2V.

고체전해질은 시간이 지날수록 일정한 열화 현상이 발생한다. 그림 21은 계속하여 1Hz의 입력 신호를 인가했을 때 나타나는 변위의 변화를 시간의 흐름에 따라 기록한 그래프이다. 입력신호 인가 후 3분 동안 큰 변위의 낙차를 보이지

만 이 후 1시간동안 비교적 균일한 변위를 보여주며 1시간 이 지난 후에는 급격히 변위가 낮아짐을 알 수 있다.

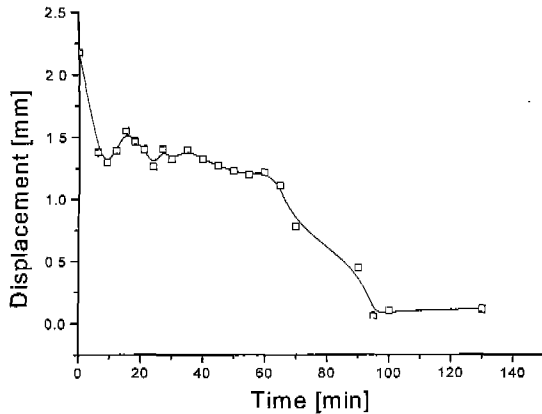


그림 21 시간에 따른 이중층 액추에이터의 변위 변화.  
Fig. 21 Displacement variation of double layer actuator with time.

### 5. 결 론

전도성 고분자는 전도성을 가지는 고분자 물질로서 응용이 될 뿐만 아니라 산화환원 반응에 따른 부피변화 특성을 이용한 액추에이터 물질로 이용될 수 있다. 그러나 산화환원 반응을 위해서는 전해액이 필요하기 때문에 전해액 내에서 동작이 한정된다는 단점을 가지고 있으므로 이를 극복하기 위해 이온 전도성이 뛰어나며 반도체 공정에 적용할 수 있는 안정적인 고체 전해질을 제작하기 위한 실험을 수행하였다. 여러 종류의 고체전해질에 대해 전기전도도 특성을 실험을 통하여 분석한 결과 내피온과 LiCl의 혼합물이 가장 적합한 고체전해질 물질임을 알 수 있었다. 또한 이를 이용하여 이중층 액추에이터를 제작하였으나 작은 변위와 낮은 최대 동작 주파수를 가지고 있었기 때문에 이를 보완하기 위해 새로운 구조의 이중층 액추에이터를 제작하여 특성을 측정함 결과 일반적 형태의 액추에이터에 비해 10배 가량의 동작 변위의 향상을 가져왔고 1시간 가량의 안정적인 동작 시간을 얻었다. 이를 통해 내피온이 공기 중에서 동작하는 전도성 고분자 액추에이터 제작을 위한 적절한 물질임을 실험적으로 검증하였다. 이러한 고체 전해질을 이용하면 공기 중에서 동작하는 다양한 형태의 액추에이터 제작 및 이의 응용이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 초미세 생체전자 시스템 연구센터와 교육부 BK21 사업의 부분적 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. B. Kaner and A. G. MacDiarmid, "Plastics that conduct electricity," *Scientific America*, vol. 258, Feb., pp. 60-65, 1988.
- [2] E. Smela, O. Inganäs and I. Lundström, "Micro-robots controlled byconducting polymer muscles : multi-hinged, folding actuator," *Proc. of Int. Symp. on MIMR*, pp. 79-82, 1995.
- [3] Q. Pei and O. Inganäs, "Electrochemical muscles : bending strips build from conjugated polymers," *Synthetic Metals*, vol. 55-57, pp. 3718-3723, 1993.
- [4] G. G. Wallace, G. M. Spinks and P. R. Teasdale, "Conductive electroactive polymers," Technomic Publishing Company, Inc., 1997.
- [5] M. R. Gandhi, P. Murray, G. M. Spinks and G. G. Wallace, "Mechanism of electromechanical actuation in polypyrrole," *Synthetic Metals*, vol. 73, pp. 247-256, 1995.
- [6] E. W. H. Jager, E. Smela, O. Inganäs and I. Lundström, "Polypyrrole microactuators," *Synthetic Metals*, vol. 102, pp. 1309-1310, 1999.
- [7] T. F. Otero and J. M. Sansiñena, "Bilayer dimensions and movement in artificial muscles," *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, vol. 42, pp. 117-122, 1997.



저 자 소 개



**안 호 정 (安浩廷)**

1973년 6월 14일생. 2000년 고려대학교 전기공학과 졸업. 현재 고려대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 02-3290-3238

Fax : 02-921-0544

E-mail : irian@hananet.net



**이 승 기 (李承起)**

1963년 5월 15일생. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사), 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1992년~1993년 일본 Tohoku 대학교 기계전자 공학과 특별연구원(JSPS fellow), 1994년~현재

단국대학교 공학부 전기전자컴퓨터공학전공 부교수

Tel : 02-709-2785

Fax : 02-795-8771

E-mail : skilee@ns.dankook.ac.kr



**박 정 호 (朴政浩)**

1960년 2월 5일생, 1985년 미국 Purdue 대 전기공학과 졸업(학사), 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1992년~1995년 미국 Intel사 책임연구원, 현재 고려대 공대 전기공학과 부교수.

Tel : 02-3290-3238

Fax : 02-921-0544

E-mail : pak@korea.ac.kr