

공기 중에서 동작하는 전도성 고분자 액추에이터의 제작

안호정\*·차승은\*·이상조\*\*·박정호\*·이승기\*\*  
 \*고려대학교 전기공학과  
 \*\*단국대학교 전기공학과

Fabrication of Conducting Polymer Actuators Operating in Air

Ho-Jeong An\*, Seung-Eun Cha\*, Sang-Jo Lee\*\*, James Jungho Pak\* and Seung-Ki Lee\*\*  
 \*School of Electrical Eng., Korea University, Seoul 136-701, Korea  
 \*\*Dept. of Electrical Eng., Dankook University, Seoul 140-714, Korea

**Abstract** - In order to fabricate the stable conductive polymer actuators which are operated in air, Nafion with mixture of LiCl has been used as solid polymer electrolyte material. Based on these materials, beam type and sandwich type actuators have been fabricated and mechanical properties are measured. This kind of all-solid-polymer actuator can be used for practical applications.

1. 서 론

전도성 고분자는 새로운 액추에이터 물질로서 바이오 관련 분야 등에서 많은 응용이 기대되는 기능성 재료이다. 전도성 고분자의 액추에이터로서의 기본 원리는, 전해액 내에서 전도성 고분자에 인가되는 전압의 극성에 따라 전해액 내의 이온들이 출입하게 되고 이에 따라 전도성 고분자의 부피 변화가 발생하는 산화환원 반응에 기초한다 [1]. 따라서 전도성 고분자를 액추에이터로 응용하기 위해서는 전해액 환경이 필수적이다. 그러나 이와 같은 동작 환경에 관한 조건은 전도성 고분자 액추에이터의 실용 가능성에 심각한 제한 조건이 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 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 논문에서는 전해액 대신 고체 전해질을 사용하여 전도성 고분자 액추에이터를 동작시키는 방법에 관한 실험적 결과들을 정리하고 있다. 먼저 가장 우수한 특성을 보이는 고체 전해질을 구성하고 이를 전도성 고분자 액추에이터에 직접 적용함으로써 실제적인 응용 가능성을 실험적으로 검증한다. 또한 고체 전해질을 이용한 동작 특성을 정량적, 정성적으로 분석함으로써 최적의 액추에이터 구조를 설계하기 위한 기초 자료들로 활용될 수 있도록 한다.

2. 본 론

2.1 전도성 고분자의 동작 구조

전도성 고분자를 합성할 때 도판트로 쓰이는 분자의 크기에 따라 다양한 동작 조건이 가능해진다 (그림 1). 분자의 크기가 큰 음이온을 도핑할 경우 고분자의 산화환원 상태에 따라 양이온이 고분자 내로 침투하거나 혹은 빠져나가게 된다 (그림 2(a)). 이에 비해 크기가 작은 음이온이 도핑될 경우에는 반대로 음이온이 침투하거나 빠져나간다(그림 2(b)) [2]. 이때 이온의 침투 혹은 방출에 의해 고분자의 부피가 변화하게 되며 얇은 박막 형태로 고분자를 합성할 경우 이는 전기적 신호를 기계적 에너지로 변화시키는 액추에이터에 응용하기에 적합한 특성을 가지게 된다.

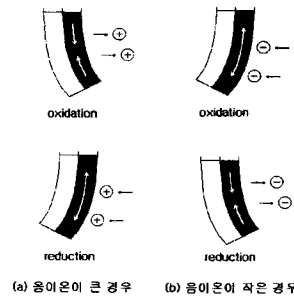
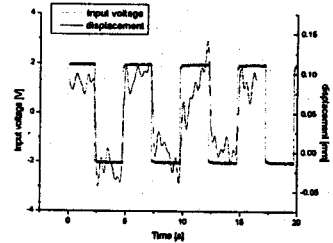
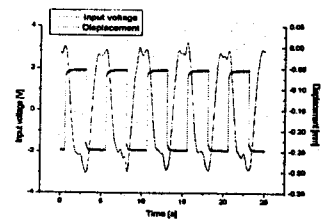


그림 1. 도판트 분자의 크기에 따른 전도성 고분자 액추에이터의 동작 모습.

이러한 전도성 고분자는 폴리아닐린(polyaniline), 폴리티오펜(polythiophene) 등 여러 가지가 있으나 [5] 그 중에서 폴리피롤(polypyrrole, PPy)은 합성이 용이하고 고분자의 패턴 과정이 따로 필요하지 않으며 다른 전도성 고분자에 비해 좋은 전도도를 가지는 장점이 있다



(a)



(b)

그림 2. (a) DS<sup>-</sup>이온을 도핑했을 때 양이온에 의한 변위, (b) Cl<sup>-</sup>이온을 도핑했을 때 음이온에 의한 변위.

전도성 고분자 액추에이터는 산화환원 반응에 참여하는 이온을 포함하는 전해질을 필요로 한다. 따라서 현재까지 많은 액추에이터들은 액체 전해질 내에서 구동되어야 했다 [3-4]. 그러나 좀 더 다양한 분야에 응용하기 위해서는 액체 전해질 환경이라는 단점을 극복해야 하고 따라서 가장 일반적인 환경인 공기 중에서 안정적인 고체 전해질을 필요로 한다.

## 2.2 고체 전해질

고체 전해질을 이용하여 MEMS 구조에 적용시키기 위해서 요구되는 특징은 크게 두 가지다. 첫째로 좋은 전도성이 요구된다. 이것은 전해질 내에서 이온의 움직임을 나타내는 것으로 액추에이터 움직임에 중요한 요소이다. 두 번째는 표면 마이크로머시닝 공정을 적용하기 위한 안정적인 박막이 되도록 좋은 경도를 가져야 한다. 그러나 대부분의 고체 전해질은 습도 의존성을 보이며 높은 습도에서 좋은 전도성을 가지는 반면 경도는 떨어진다. 따라서 이 두 가지 특징은 일반적으로 서로 양립하지 못한다. 따라서 최적화된 지점에서 적절한 타협점이 요구된다.

그림 3은 PEO와 Nafion의 습도에 따른 전도도를 나타낸다. 여기에서 PEO는 Nafion보다 좋은 전도도를 나타내지만 흡습성으로 인해 70% 이상의 습도에서 박막의 경도가 떨어져 안정적인 박막 형태를 유지하기 어렵다. 반면에 Nafion은 습도에 강하여 비교적 뛰어난 안정성을 보이지만 전도도가 낮으며 좋은 전도성을 가지기 위해서는 수화과정이 필요하며 수화 과정을 거친 후에 도 수분 증발에 의한 문제점이 남는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 높은 흡습성 시약인 LiCl을 첨가시켜 줄 수 있으며 여기에서 이온화된 Li<sup>+</sup> 이온은 액추에이터의 구동에도 참여한다.

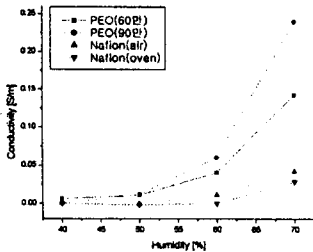


그림 3. 고체 전해질의 전도도 비교.

그림 4는 순수한 Nafion에 LiCl의 농도를 각각 10, 30, 50mg/ml로 변화시켰을 때 전도도 특성이 좋아지는 것을 보여준다. 그러나 50mg/ml의 LiCl을 첨가시켰을 때 70% 이상의 습도에서 흡습성에 의해 안정적인 박막의 경도를 유지하지 못했다. 그러나 30mg/ml의 LiCl을 첨가했을 경우가, 전도도와 박막 경도의 습도 의존성을 고려했을 때 가장 안정적인 실험결과를 보여준다.

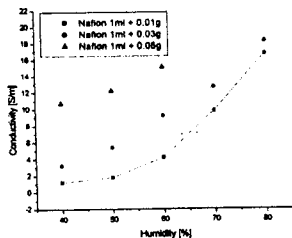


그림 4. Nafion+LiCl의 전도도 특성.

## 2.3 공기 중에서 동작하는 액추에이터

전도성 고분자 액추에이터의 가장 기본적인 구성은 전도성 고분자 박막과 전해질 그리고 박막과 전해질 사이의 산화 환원 상태를 바꿔주기 위한 두 개의 금속 전극이다. 이러한 기본 구조를 이용하여 그림 5와 같이 두 가지 형태의 beam형 액추에이터를 제작하였다.

Au 전극을 통하여 기준전극인 2nd Au에 대해 1st Au에 +2V/-2V의 구형파를 인가한다. 이때 PPy의 산화 환원 상태가 변화하며 부피가 증가 혹은 감소하며 액추에이터가 동작한다.

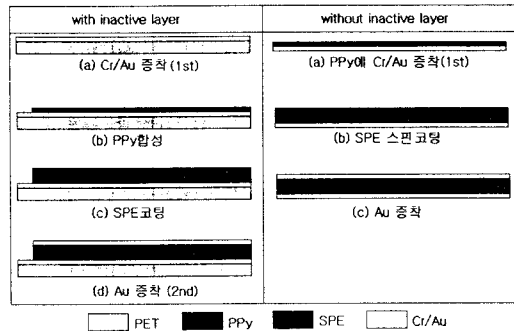


그림 5. Beam형 액추에이터의 제작 과정.

그림 6은 beam형의 액추에이터에서 기반층으로 쓰이는 inactive layer가 있는 경우와 없는 경우의 변위를 비교한 결과이며, 없는 것이 있는 것에 비해 큰 변위를 보여준다. 이는 PET film의 두께(50 $\mu$ m)가 PPy(약 13 $\mu$ m)의 두께에 비해 너무 두꺼워 움직임을 방해하기 때문이며 얇은 Au 박막이 inactive layer의 역할을 대신해주고 있다는 사실을 알 수 있다. 그러나 2000Å의 얇은 Au 박막으로 충분한 inactive layer의 역할을 기대하기는 힘들기 때문에 변위는 액추에이터의 크기에 비해 매우 작으며 최대 동작 주파수도 매우 낮다. 이러한 단점은 micro 구조물에 적용되었을 경우 큰 효율성을 기대하기 힘들도록 한다. 따라서 그림 7과 같이 기본 구조물로부터 변형된 sandwich형 액추에이터를 제작하였다.

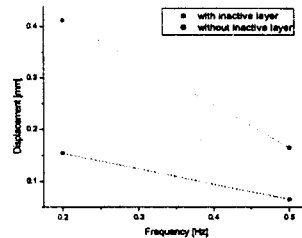


그림 6. Inactive layer 유무에 따른 beam형 액추에이터의 변위 (2mm×20mm).

Sandwich형 액추에이터는 별도의 기준 전극 없이 양쪽 PPy의 산화 환원 상태가 서로 교차하여 변화한다. 따라서 한쪽 PPy의 부피가 감소할 때 반대편 PPy는 증가하므로 좀 더 안정적인 변위를 얻을 수 있다.

그림 8에서 sandwich형 액추에이터의 변위와 전류 파형의 측정값을 볼 수 있다. 전도성 고분자 액추에이터의 구동원리는 이온의 움직임이므로 전류 파형은 중요한 의미를 갖는다. 그래프로부터 전류 파형은 마치 커패시터와 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있으며 이는 고체 전해질 내에서도 이온의 움직임이 매우 빠르다는 것을

의미한다.

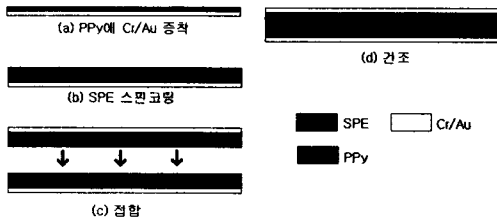
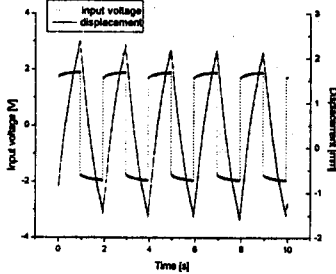
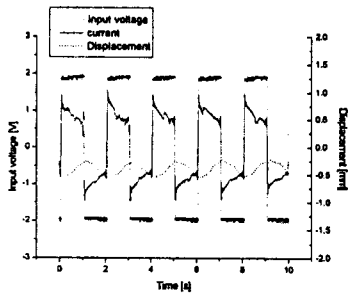


그림 7. Sandwich형 액추에이터의 제작.



(a)



(b)

그림 8. Sandwich형 액추에이터의 (a) 변위 파형 (0.5Hz) 과 (b) 전류 응답.

그림 9는 세 개의 시편을 제작하여 각각 주파수에 따른 변위를 측정하였다. 시편에 따라 변위의 차이가 심하고 최대 동작 주파수도 차이가 나는 것은 그림 7(c)와 같이 재현성이 떨어지는 접합 과정에 기인하는 것으로 추측되며 좀 더 재현성 있는 액추에이터를 제작하기 위해서는 일정한 힘으로 접합할 수 있는 제작 도구의 제작이 선행되어야 할 것으로 보인다. 그러나 일반적인 beam형 액추에이터에 비해 10배 가량의 변위 증가가 보인다. 이는 그림 5의 구조에서 매우 얇은 inactive layer의 단점을 극복하였고 또한 sandwich 구조를 통해 입력 신호에 따라 서로 교차되어 작용하는 부피 변화로 인해 성능을 개선시킬 수 있었기 때문인 것으로 판단된다.

그림 10은 이와 같이 제작한 sandwich형 액추에이터의 동작 모습이다.

### 3. 결 론

공기 중에서 동작하는 액추에이터를 제작하기 위해 이온 전도성이 뛰어나며 반도체 공정에 적용할 수 있는 안정적인 고체 전해질로서 Nafion과 LiCl의 혼합물을 사용하였다. 이를 이용하여 일반적인 beam형 액추에이터를 제작하였으나 작은 변위와 낮은 최대 동작 주파수를 가지고 있었기 때문에 이를 보완하기 위해 새로운 구조의 sandwich형 액추에이터를 제작하여 특성을 측정하고 결과 일반적 형태의 액추에이터에 비해 10배 가량의 동작 변위의 향상을 가져왔다. 이러한 고체 전해질을 이용하여 공기 중에서 동작하는 다양한 형태의 액추에이터 제작 및 이의 응용이 가능할 것으로 판단된다.

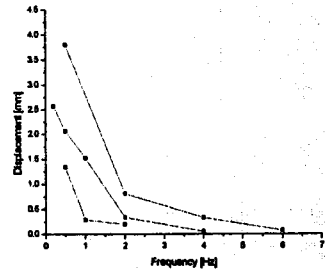
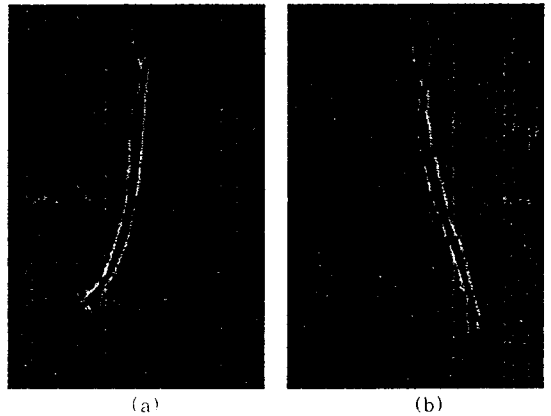


그림 9. Sandwich형 액추에이터의 변위.



(a)

(b)

그림 10. 실제 액추에이터의 동작모습 (a) 좌 : +2V 우 : -2V (b) 좌 : -2V 우 : +2V

### 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Q. Pei and O. Inganas, "Electrochemical Muscles: Bending Strips Build from Conjugated Polymers", *Synthetic Metals*, vol. 55-57, pp. 3718-3723, 1993.
- [3] E. W. H. Jager, E. Smela, O. Inganas and I. Lundstrom, "Polypyrrole Microactuators," *Synthetic Metals*, vol. 102, pp. 1309-1310, 1999.
- [4] T. F. Otero and J. M. Sansinena, "Bilayer Dimensions and Movement in Artificial Muscles," *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, vol. 42, pp. 117-122, 1997.
- [5] G. G. Wallace, G. M. Spinks and P. R. Teasdale, *Conductive Electroactive Polymers*. Technomic Publishing Company, Inc., 1997.