

Fabrication of Microactuators Using Conductive Polymer

李承起* · 崔英** · 安浩廷*** · 朴政浩*** · 沈愚英§ · 梁翔植§§
 (Seung-Ki Lee · Young Choi · Ho-Jung An · Jung-Ho Pak · Woo-Young Sim · Sang-Sik Yang)

Abstract - Mechanical performances of beam-shaped and bridge-shaped conductive polymer actuator have been measured and analyzed varying polymerization conditions and operating conditions such as applied current, polymerizing time, frequency of the current and kinds of electrolytes. For the application of conductive polymer actuator to micropump, the diaphragm structure has been fabricated, which is composed of polypyrrole, solid polymer electrolyte and parylene. Measured results show the possibility of the practical application of conductive polymer actuator.

Key Words : Polypyrrole, Solid polymer electrolyte, Parylene, Micropump, Actuator

1. 서 론

전도성 고분자는 전기적 에너지를 직접 기계적 에너지로 변환할 수 있는 물질로서 새로운 액추에이터의 응용 가능성이 기대되는 기능성 재료이다[1-5]. 특히 전기적 에너지와 기계적 에너지간의 직접 변환 특성은 초소형 내시경이나 약제 배달 시스템과 같은 바이오 및 의료 관련 응용 분야에서 유용하게 이용될 수 있다. 이러한 전도성 고분자의 액추에이터 특성은 고분자 자체의 화학적 구조뿐 아니라 고분자의 중합 조건 및 구동 조건 등에 의해서도 크게 영향을 받는다. 따라서 중합 조건 및 구동 조건 등의 변화에 따른 전도성 고분자 액추에이터의 기계적 성능 해석은 고분자 재료 및 소자의 최적화 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 또한 재료 자체에 대한 해석만으로는 바이오 및 의료 등과 관련된 응용 분야에 직접 이용 가능한 소자의 제작이 불가능하며 이러한 기능성 재료를 기존의 MEMS 공정에 포함시킬 수 있도록 소자 제작 공정 전체를 고려하여야 한다.

본 논문에서는 액추에이터로 사용할 수 있는 전도성 고분자의 하나인 폴리피롤(polypyrrole)의 기본적인 기계적 성능을 해석하기 위하여 중합 조건에 따른 고분자 막의 두께 변화를 측정하고, 두께에 따른 기계적 변위를 액체 전해질 및 고체 전해질 내에서 측정한다. 이러한 결과를 바탕으로 마이크로 펌프의 구동 액추에이터로 응용할 수 있는 박막형

폴리피롤 액추에이터를 실리콘 이방성 식각에 의해 제작하고 구동하여 박막의 기계적 변위를 측정함으로써 실제 응용 가능성을 검토한다.

2. 중합 조건에 따른 기계적 성능

2.1 폴리피롤의 중합

폴리피롤은 일반적인 전해중합 방법으로 합성한다. 폴리피롤이 합성되는 작동 전극은 450 μ m의 PET 상에 0.01 μ m의 크롬(Cr)과 0.1 μ m의 금(Au)을 순차적으로 열 증착하여 사용하였다. 상대 전극은 백금(Pt) 선을 사용하고 폴리피롤이 합성되는 영역은 25x1mm²의 면적을 갖는다. 합성을 위한 전해액은 0.1M의 NaDS(sodium dodecylsulfate) 수용액에 0.1M의 피롤 단량체를 첨가하여 사용한다. 폴리피롤의 중합 조건으로는 인가하는 정전류 밀도 및 중합 시간을 1.4, 2.8, 5.4, 8 μ A/mm² 및 30, 60, 90, 120분 등으로 각각 변화시켰다.

중합 과정동안 합성되는 폴리피롤의 표면 조직을 관찰하였으며 고른 표면을 재현성 있게 얻기 위해서는 기판 표면의 전 처리가 매우 중요함을 알 수 있었다. 효과적인 전 처리 방법으로는 아세톤 내에서 초음파 세척기를 이용하는 방법이 가능하며 합성 후 폴리피롤 필름은 30-40 $^{\circ}$ C의 온도에서 건조 과정을 거치게 된다. 이러한 처리 방법에 의해 표면의 크랙 발생이나 거칠기 조건 등을 개선할 수 있었다.

2.2 합성 조건의 변화에 따른 두께의 변화

다양한 중합 조건에서 합성한 폴리피롤의 두께를 측정하였다. 두께 측정 방법은 비접촉식 레이저 단면 형상 측정기(VF7510, Keyence), 접촉식 단차 측정기(α -step, Temcor), 표면 조도 측정기(surfcoder, Kosaka Lab.) 등을 사용하여 3회 이상씩 측정하고 그 평균값을 구하였다.

* 正 會 員 : 檀國大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 三星 綜合技術院

*** 正 會 員 : 高麗大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 高麗大 電氣工學科 副教授 · 工博

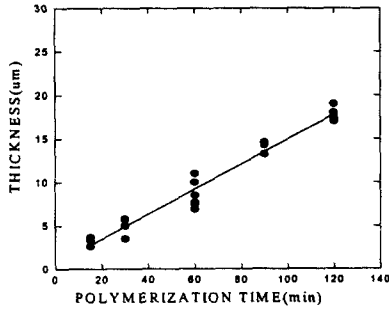
§ 正 會 員 : 亞洲大 電子工學部 碩士課程

§§ 正 會 員 : 亞洲大 電子工學部 教授 · 工博

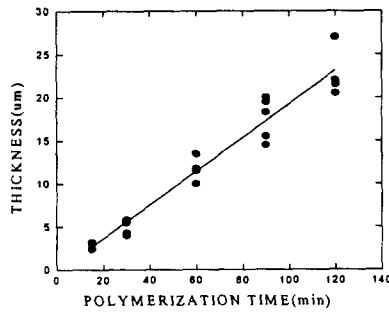
接受日字 : 2000年 9月 18日

最終完了 : 2000年 11月 10日

그림 1에는 인가 전류 밀도가 각각 5.4, 8 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ 일 때의 중합 시간에 따른 두께 변화를 나타내었다. 두께는 중합 시간에 비례하여 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며 인가 전류 밀도가 1.4, 2.8 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ 일 때에도 같은 양상을 보였다. 이는 합성되는 폴리피롤의 전도도가 피롤 단량체를 산화시키는 데 충분히 커 중합 과정 동안 전류 밀도의 감소가 나타나지 않기 때문이다.



(a)



(b)

그림 1. 중합시간의 변화에 따른 폴리피롤의 두께변화. 인가 전류 밀도 : (a) 5.4 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$, (b) 8 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$.

Fig. 1. Thickness change of polypyrrole varying polymerization time. Applied current density : (a) 5.4 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$, (b) 8 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$.

이에 비해 인가 전류 밀도 변화에 따른 두께의 변화는 그림 2에 나타난 바와 같이 5.4 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ 이상의 전류 밀도에서 조금씩 포화됨을 알 수 있다. 이는 증가한 전류가 전부 폴리피롤의 합성에만 사용된 것이 아니라 다른 전기화학적 반응에 관여하게 됨을 의미한다. 실제로 5.4 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ 이상의 전류를 흘려줄 때에는 백금 전극의 표면에서 전기분해 반응이 일어남을 관찰할 수 있었다.

2.3 두께 변화에 따른 기계적 변위의 변화

제작한 폴리피롤 박막을 폭 2mm, 길이 20mm의 브릿지 형태로 구성하여 전해액 내에서 동작시키고 그때의 브릿지의 중앙 부분에서의 변위를 측정하였다. 전해액은 0.1M NaDS 수용액을 사용하고 $\pm 2\text{V}$ 의 전압을 인가하였으며 동작 주파수를 0.1, 0.2, 0.5Hz로 변화시켰다. 필름의 기계적 변위는 레이저 변위계(LC2450, Keyence)로 측정하였다.

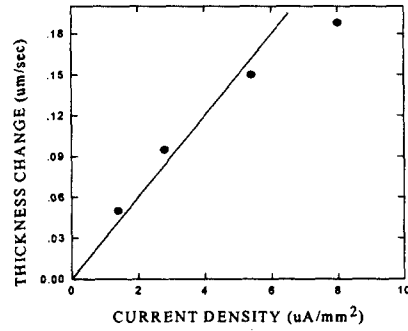


그림 2. 인가 전류밀도의 변화에 따른 폴리피롤의 두께 변화율.

Fig. 2. Thickness change ratio of polypyrrole varying applied current density.

각 동작 주파수에서 두께에 따른 기계적 변위의 측정 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 결과에서 흥미로운 점을 관찰할 수 있는데 이는 동작 주파수에 상관없이 두께가 17-19 μm 일 때 변위가 최대가 된다는 점이다. 이러한 결과는 단순히 기계적 변위뿐 아니라 기계적 변위로부터 계산한 부피 변화율의 경우에도 동일하게 나타났다. 폴리피롤 두께가 얇을수록 폴리피롤 내에 존재하는 도판트 이온의 수도 적으므로, 부피 변화를 일으키는 양이온이 들어갈 수 있는 자유 공간도 크지 않다고 생각할 수 있다. 따라서 두께가 얇은 경우에는 단순히 두께의 증가가 자유 공간의 증가를 의미하므로 부피 변화율도 증가하여 기계적 변위는 증가하는 양상을 보이게 된다. 그러나 양이온들이 계속 폴리피롤 내부로 들어가면 양이온과 도판트 이온과의 결합은 폴리피롤 내에서의 양이온의 확산 과정에 의존하게 된다. 필름의 두께가 어느 특정값에 이르면 충분한 부피 변화에 필요한 양이온의 확산에 필요한 시간이, 주어진 전류 인가 시간보다 길어지게 된다. 즉, 부피 변화에 필요한 충분한 시간이 주어지지 않게 되는 것이다. 따라서 기계적 변위는 오히려 감소하는 현상을 나타내게 되는 것으로 해석할 수 있다.

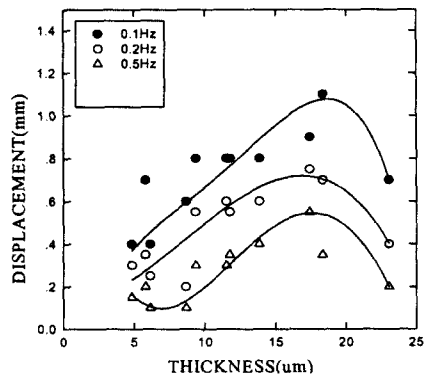


그림 3. 폴리피롤의 두께 및 인가 주파수의 변화에 따른 굽힘 변위의 변화.

Fig. 3. Bending displacement change varying polypyrrole thickness and applied frequencies.

만일 전류 인가 시간을 충분히 주게 된다면 변위의 최대 값이 나오게 되는 두께가 좀 더 증가할 것으로 보이나 현재 인가 주파수가 1Hz 이하인 것을 고려하면 의미있는 결과로 해석하기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 최대 변위가 나오는 17-19 μ m의 두께는 액추에이터를 설계함에 있어서 최적의 중합조건을 설정하기 위한 실험적인 결과로 해석하는 것이 타당할 것으로 보인다.

3. 고체 전해질을 이용한 빔의 기계적 변위

폴리피롤 액추에이터의 동작을 위해서는 전해질이 필요하다. 그러나 액체 전해질을 사용하면 액추에이터의 응용에 상당한 제약이 따르게 된다. 따라서 액체 전해질 대신 고체 전해질을 사용하여 공기 중에서 동작이 가능한 액추에이터의 제작에 많은 연구가 집중되고 있으나[6-8] 뚜렷한 변위를 측정할 예는 극히 드물다.

본 논문에서는 2절에서의 결과를 이용하여 폴리피롤의 두께를 18 μ m로 고정하고 고체 전해질을 사용하여 빔 형태의 액추에이터를 제작하였다. 폴리피롤 합성을 위한 기판으로는 SUS를 사용하였는데 이는 합성 후 폴리피롤만을 벗겨내기 위함이다. 빔의 면적은 20x2mm²이고 고체 전해질로는 액상의 내피온(Nafion[®], perfluorosulfonic acid, Dupont)을 폴리피롤 위에 코팅하여 사용하였다. 전극으로는 톨루엔에 희석한 은 페이스트(Ag paste)를 폴리피롤 위와 내피온의 위양쪽에 코팅하여 사용하였다. 양쪽 전극에 2, 3, 4V의 전압을 인가하였으며 전압의 주파수는 0.1, 0.2, 1Hz로 변화시키며 빔의 끝단에서 발생하는 변위를 측정하였다. 고체 전해질의 두께에 따른 변위의 변화를 해석하기 위해서는 고체 전해질의 두께를 정확하게 측정해야 한다. 그러나 내피온은 표면이 무르고 투명하여 정확한 두께의 측정이 곤란하므로 고체 전해질의 두께에 의한 영향은 단순히 내피온의 코팅 회수로 분류하여 해석하였다.

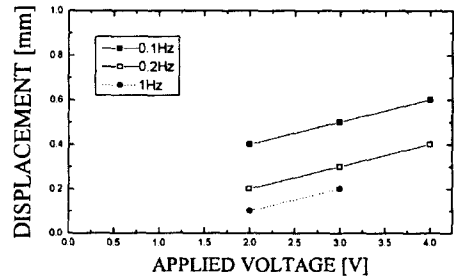
그림 4에는 인가 전압, 구동 주파수, 내피온의 코팅 회수에 따른 변위의 측정 결과가 나타나 있다. 대체적으로 인가 전압이 클수록, 구동 주파수가 낮을수록 변위가 크게 나타나고 있으며 이는 액체 전해질에서의 동작과 동일한 경향인 것으로 해석할 수 있으나 내피온의 코팅 회수는 변위와 분명한 의존 관계를 보이지 않았다. 이는 내피온의 코팅 회수가 내피온의 두께에 정확하게 비례한다고 보기 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 내피온 자체의 기계적 특성 또한 두께에 따라 달라질 수 있고 이 영향도 배제할 수 없으나 이러한 모든 요인들을 분석하기 위해서는 일단 두께를 정확히 측정하는 것이 필요하다고 판단된다.

고체 전해질을 사용한 경우의 대체적인 변위는 100-800 μ m 정도이며 빔 형태인 점을 감안하면 액체 전해질 내에서 동작시킨 브릿지 형태의 변위 0.1-1.1mm보다 상당히 감소한 것으로 볼 수 있다. 이는 일반적으로 양이온의 이동이 고체 내에서 좀 더 느려지기 때문에 나타나는 일반적인 현상이기도 하지만 내피온 자체의 특성에 기인하기도 한다. 내피온은 내부에 양이온으로 쓰일 수 있는 Na⁺ 이온을 가지고 있기는 하나 그 특성을 극대화하기 위해서는 이온 교환 및 수화 등의 몇 가지 전 처리 과정을 거쳐야 하는데 본 실험에

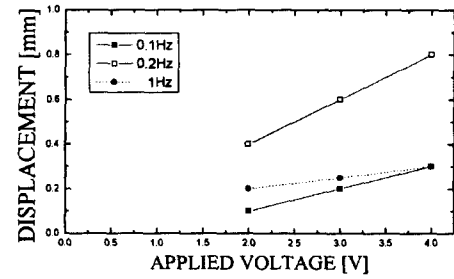
서는 이러한 과정이 생략되었다. 따라서 고체 전해질로서의 충분한 역할을 다 하지 못하는 상태에서 측정된 변위이므로 적절한 전 처리 과정을 거친다면 훨씬 향상된 특성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 마이크로 펌프 응용을 위한 박막 형태 액추에이터의 제작 및 측정

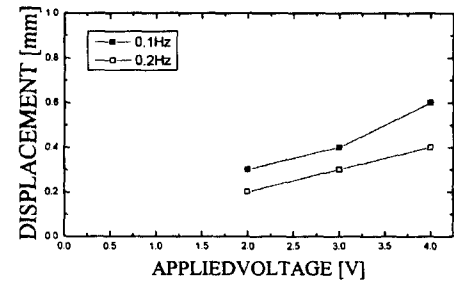
4.1 파릴렌 박막의 제작



(a)



(b)



(c)

그림 4. 고체 전해질에서 작동하는 폴리피롤의 인가 전압 및 주파수 변화에 따른 변위. 내피온 코팅 회수 : (a) 10회, (b) 20회, (c) 30회.

Fig. 4. Displacement change of polypyrrole with solid polymer electrolyte varying applied voltage and frequency. Nafion is coated (a) 10 times and (b) 20 times and (c) 30 times.

전도성 고분자는 생체 적합성이 우수하고 이를 이용한 액추에이터는 낮은 구동 전압과 구동 시 열이나 가스 등의 발생을 수반하지 않는 장점 등으로 바이오 및 의료 관련 응용이 기대되는 물질이다. 이러한 장점은 약제 배달 시스템 등에서 응용이 가능한 마이크로 펌프의 구동 액추에이터로서 전도성 고분자가 유용하게 이용될 수 있음을 의미한다.

본 논문에서는 2절에서 측정된 폴리피롤의 최적 두께에 관한 결과와 3절에서 실험적으로 입증한 고체 전해질의 이용 가능성 결과를 이용하여 공기 중에서 동작이 가능한 마이크로 펌프용 폴리피롤 박막 액추에이터를 제작하였다. 일반적으로 마이크로 펌프의 구조는 펌핑 챔버의 한쪽 벽이 구동 액추에이터로 작용하게 된다. 구동 액추에이터로 작용하는 한쪽 벽은 실리콘 마이크로머시닝에 의해 박막(diaphragm) 형태로 제작하고 박막의 구동에는 전자력, 열공압, 전기 분해 등 많은 방법이 이용되고 있다. 폴리피롤을 박막의 구동원으로 이용하기 위해서는 우선 폴리피롤의 합성이 가능한, 즉 전도성을 갖는 박막의 제작이 필요하다. 전도성을 갖는 박막 중 가장 쉽게 제작할 수 있는 것 중의 하나가 붕소(B) 도핑 식각 정지를 이용한 p⁺ 박막이다. 그러나 이 경우 폴리피롤의 합성을 위하여 전해액 내에서 p⁺ 박막에 전압을 인가하면 양극 산화[9]가 발생하고 박막의 표면에 산화막이 형성되어 더 이상의 합성이 진행되지 않는다. 또 다른 전도성 박막으로는 금속 박막을 생각할 수 있다. 그러나 이 경우에는 박막이 기계적으로 매우 약하고 후속 사진식각 공정을 위한 취급이 상당히 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 파릴렌(parylene) 박막을 제작하였다. 파릴렌 박막에 의해 폴리피롤 액추에이터를 제작하는 전체 공정을 그림 5에 나타내었다. 양면 사진 식각 공정을 위해 정렬 구멍을 식각한 후(a-b) 파릴렌을 화학 기상 증착법에 의해 코팅한다(c). 그림에는 표시되어 있지 않으나 파릴렌 코팅을 하기 전에 산화막을 패터닝하여 실리콘을 등방성 식각함으로써 박막에 주름을 형성하는 경우도 있다. 파릴렌의 두께는 약 2 μ m 정도이며 파릴렌 박막은 부드러우면서도 기계적으로 상당히 강인하여 후속 사진 식각 공정 등의 취급에 전혀 문제점을 보이지 않았다. 폴리피롤 합성을 위하여 파릴렌 위에 크롬과 금을 증착하고 패터닝한다(d). 여기서 형성된 금속 층은 폴리피롤 합성을 위한 전극으로도 사용되지만 액추에이터의 구동 전극으로도 사용된다. 실리콘의 뒷면을 패터닝하여 EPW 용액에서 실리콘 이방성 식각을 수행한다(e). 이후 파릴렌 박막 하부의 산화막을 제거하고(f) 금속 층 위에 폴리피롤을 전해 중합 방법으로 합성한다(g). 액체 전해질 내에서의 동작 특성을 살펴보기 위해서는 여기까지 진행된 시료를 이용한다. 고체 전해질을 이용하는 경우에는 폴리피롤 위에 고체 전해질을 코팅하고(h) 고체 전해질 위에 구동을 위한 전극을 형성한다(i). 전극의 형성은 사용한 고체 전해질의 종류에 따라 크롬과 금의 증착 및 패터닝도 가능하나 본 실험에서는 은 페이스트를 이용하였다. 제작한 박막의 크기는 5x5mm²이고 박막에 주름을 형성한 것을 측정에 이용하였다.

그림 6은 이와 같이 제작한 박막의 표면 사진이다. 박막 표면에 주름이 형성되어 있으며 폴리피롤을 증합하기 전까지, 즉 그림 5의 (f)까지 공정이 완료된 상태이다.

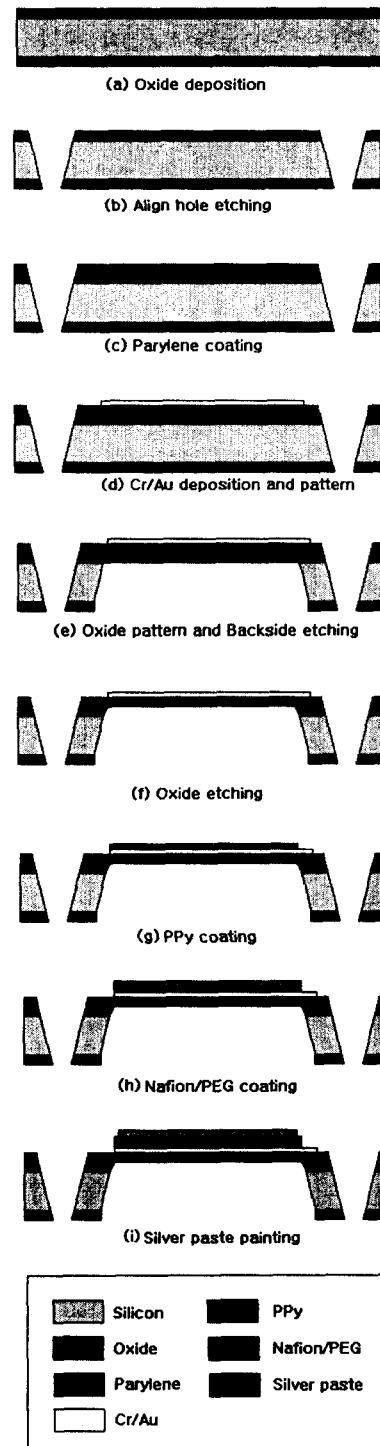


그림 5. 폴리피롤 박막의 제작 공정.
Fig. 5. Fabrication process of polypyrrole diaphragm.

4.2 액체 전해질 내에서의 박막의 동작

그림 5의 (g)까지 진행된 시료를 0.1M NaDS 수용액에서 동작시키고 박막의 변위를 측정하였다. 개략적인 측정 방법을 그림 7에 나타내었다.

인가 전압은 $\pm 2, \pm 3, \pm 4V$ 이고 $5V$ 를 넘어가면 폴리피롤이 해리되는 현상이 나타났다. $0.1Hz$ 의 주파수에서 측정된 결과인 그림 8을 보면 박막의 움직임이 그다지 깨끗하게 나타나지는 않으나 인가한 전압을 따라가고 있음을 알 수 있다. 특히 $\pm 4V$ 의 전압에서는 박막의 변위가 약 $200\mu m$ 에 가까운 매우 큰 값으로 나타난다. 즉, 박막의 변위가 반복적인 동작에는 적합하지 않으나 단일 동작으로는 매우 큰 변위를 얻을 수 있다. 이러한 특성은 약제 배달 시스템에 응용할 수 있는 일회용 마이크로 주사기 등에 쓰이는 마이크로 펌프에 직접 이용이 가능한 특성이다. 또한 약제는 일반적으로 전해액 내에 용해되어 있으므로 액체 전해질 내에서 동작시킨 이러한 결과는 실제적인 응용 가능성을 지닌다고 할 수 있다.

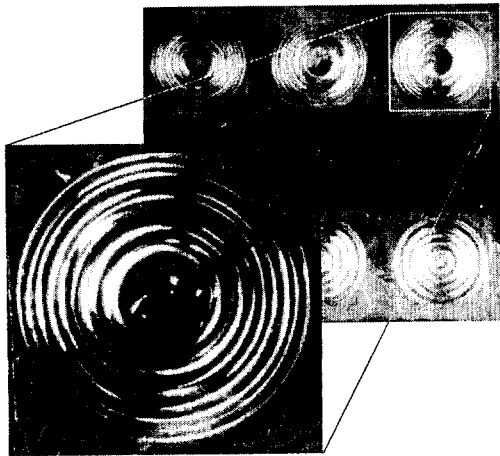


그림 6. 제작된 폴리피롤 박막.
Fig. 6. Fabricated polypyrrole diaphragm.

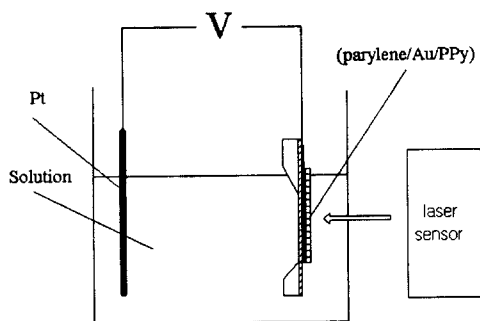


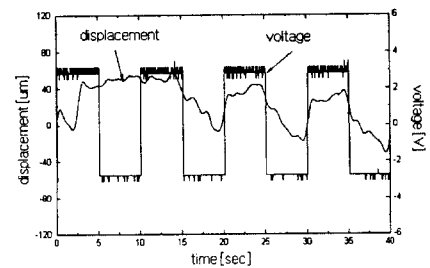
그림 7. 액체 전해질 내에서 제작된 폴리피롤 박막의 변위 측정.
Fig. 7. Displacement measurement of fabricated polypyrrole diaphragm in liquid electrolyte.

4.3 고체 전해질을 이용한 박막의 동작

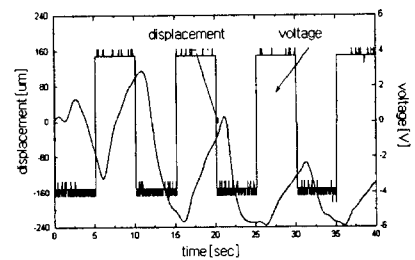
박막 액추에이터를 공기 중에서 동작시키기 위해 고체 전

해질을 사용하였다. 즉, 그림 5의 (i)까지 공정을 진행하였으며 고체 전해질로는 내피온과 PEG(polyethylene glycol)를 혼합하여 사용하였다. 전압은 $+1.5/-1.2V$ 를 인가하였고 동작 주파수는 $0.05, 0.1, 0.25, 0.5Hz$ 등으로 변화시켰다. 이때의 변위 측정 결과를 그림 9에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 고체 전해질을 이용한 경우는 $10-15\mu m$ 의 변위를 나타내어 액체 전해질에서 동작시킨 경우에 비해 변위는 훨씬 작으나 반복 동작에 따라 변위의 감소나 열화가 보이지 않아 반복 특성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 그리고 $10-15\mu m$ 정도의 변위 자체도 일반적인 마이크로 펌프의 관점에서 보면 그다지 작은 값이 아니며 인가한 전압이 $3V$ 미만인 것을 감안하면 이러한 특성은 마이크로 펌프에 응용이 가능한 매우 우수한 특성인 것으로 판단된다.



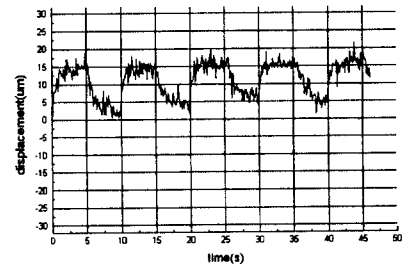
(a)



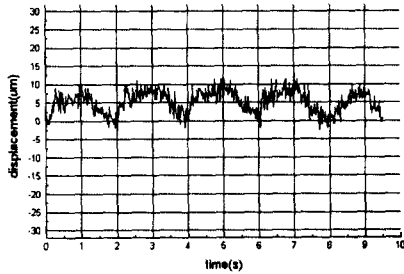
(b)

그림 8. 액체 전해질 내에서 측정된 폴리피롤 박막의 변위. (a) $\pm 3V, 0.1Hz$, (b) $\pm 4V, 0.1Hz$.

Fig. 8. Measured displacement of polypyrrole diaphragm in liquid electrolyte at voltage of (a) $\pm 3V$ and (b) $\pm 4V$ with $0.1Hz$.



(a)



(b)

그림 9. 고체 전해질로 동작하는 폴리피롤 박막의 변위.

(a) +1.5V/-1.2V, 0.1Hz, (b) +1.5V/-1.2V, 0.5Hz.

Fig. 9. Measured displacement of polypyrrole diaphragm in solid electrolyte. (a) +1.5V/-1.2V, 0.1Hz, (b) +1.5V/-1.2V, 0.5Hz.

5. 결 론

전도성 고분자의 기본적인 액추에이터 특성을 측정하고 폴리피롤과 고체 전해질로 구성된 마이크로 펌프의 구동부를 제작하여 기계적인 변위를 측정하였다.

폴리피롤의 중합 조건에 따라 합성된 필름의 두께를 측정하고 두께에 따른 변위의 변화를 측정하였다. 발생하는 변위는 두께가 17-19 μm 일 때 최대인 것으로 나타났다. 또한 변위는 구동 주파수는 물론 액추에이터의 형태와 전해질의 종류에 따라 서로 달라지게 되는데 액체 전해질 내에서 동작시킨 브릿지 형태의 액추에이터는 0.1-1.1mm의 변위를, 고체 전해질을 이용한 빔 형태의 액추에이터는 0.1-0.8mm의 변위를 나타내었다.

이러한 전도성 고분자 액추에이터를 마이크로 펌프에 이용하기 위하여 실리콘 이방성 식각을 이용하여 파릴렌 박막을 제작하고 박막 위에 폴리피롤을 합성하였다. 폴리피롤만을 합성하여 액체 전해질 내에서 동작시킨 결과는 반복 특성은 좋지 않으나 약 200 μm 정도의 큰 변위를 보여 마이크로 주사기 등과 같이 한번의 동작에서 큰 변위가 필요한 경우에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 보인다. 또한 합성한 폴리피롤 위에 고체 전해질을 코팅하여 공기 중에서 동작시킨 경우는 약 10-15 μm 의 변위가 재현성 있게 연속적으로 나타나 일반적인 마이크로 펌프의 구동 액추에이터로서 응용이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 논문에서의 전도성 고분자 액추에이터에 관한 특성 자료는 전도성 고분자의 다양한 응용에 필수적으로 필요한 자료들이며 박막을 이용한 마이크로 펌프의 구조에 관한 실험

결과들은 전도성 고분자 액추에이터의 구체적인 응용 분야를 제시하는 유용한 결과로 판단된다. 특히 고체 전해질을 이용하여 공기 중에서 동작시킨 10-15 μm 의 변위는 반복 특성이 우수하여 지금까지 발표된 결과들 중에서도 상당한 의미를 갖는 것이며 이러한 전도성 고분자의 구체적인 액추에이터 응용에 좀 더 많은 연구가 집중되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. W. Gardener and P. N. Battlett, "Application of Conducting Polymer Technology in Microsystem," *Sensors and Actuators*, vol. 51A, pp. 57-66, 1995.
- [2] R. H. Baughman, "Conducting Polymer Artificial Muscle," *Synthetic Metals*, vol. 78, pp. 339-353, 1996.
- [3] O. Ingnas and Q. Pei, "Conjugated Polymers and Bending Cantilever Method : Electrical Muscles and Smart Devices," *Advanced Materials*, vol. 4, pp. 277-278, 1992.
- [4] O. Ingnas and Q. Pei, "Electrochemical Muscles : Bending Strips built from Conjugated Polymer," *Synthetic Metals*, vol. 55-57, pp. 3718-3723, 1993.
- [5] J. N. Barisci, T. W. Lewis, G. M. Spinks, C. O. Too and G. G. Wallace, "Responsive Systems based on Conducting Polymer," *Proc. of SPIE on Smart Materials, Structures and Integrated Systems*, vol. 3241, pp. 10-19, 1997.
- [6] D. De Rossi and A. Mazzoldi, "Linear Fully Dry Polymer Actuators," *Proc. of SPIE on Smart Structures and Materials*, vol. 3669, pp. 35-44, 1999.
- [7] T. F. Otero, I. Cantero, J. M. Sansinena and M. De Paoli, "Artificial Muscles working in Both Aqueous Solutions or Air," *ibid*, pp. 98-108, 1999.
- [8] H. B. Schreyer, M. Shahinpoor and K. J. Kim, "Electrical Activation of PAN-Pt Artificial Muscle," *ibid*, pp. 192-198, 1999.
- [9] 江刺正喜 外, *マイクロマシーニンクとマイクロメカトロニクス*, 培風館, Tokyo, 1992.

저 자 소 개



이 승 기 (李 承 起)
1963년 5월 15일 생. 1986년 서울대 전기 공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1992~1993년 일본 동북대 기계 전자공학과 특별연구원(JSPS fellow). 1994년~현재 단국대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-709-2785, Fax : 02-795-8771
E-mail : skilee@ns.dankook.ac.kr



박 정 호 (朴 政 浩)
1960년 2월 5일 생. 1985년 미국 퍼듀대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1992년 - 1995년 Intel Corp. 근무. 1995년 - 현재 고려대 전기공학과 부교수

Tel : 02-3290-3238
E-mail : pak@mail.korea.ac.kr



최 영 (崔 英)
1974년 7월 25일 생. 1997년 단국대 고분자 공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 삼성 종합기술원 연구원
Tel : 031-280-8089, Fax : 031-280-9357
E-mail : daisey@channeli.net



심 우 영 (沈 愚 英)
1973년 10월 24일 생. 1998년 아주대 전자 공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정. 주 관심분야 : Medical-MEMS, Bio-MEMS, Micro Power Supply, Micro Robotics
Tel : 0331-219-2488, Fax : 0331-212-9531
E-mail : wooral@mems.ajou.ac.kr



안 호 정 (安 浩 廷)
1973년 6월 14일 생. 1999년 고려대 전기 공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학교 전기 공학과 석사과정
Tel : 02-3290-3238
E-mail : irian@mail.korea.ac.kr



양 상 식 (梁 翔 植)
1958년 1월 16일 생. 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1983년 동 대학원 기계 공학과 졸업(석사). 1988년 U. C. Berkeley 졸업(공학). New jersey Institute of Technology 연구 조교수. 현재 아주대 공대 전자공학부 교수. 주 관심분야 : 마이크로 소자의 Mechanism과 Actuation, Motion Control과 Nonlinear Control
Tel : 0331-219-2481, Fax : 0331-212-9531
E-mail : ssyang@madang.ajou.ac.kr