논문 2003-12-3-02

이온성 고분자-금속 복합물 액추에이터의 제작 및 이동형 액추에이터에의 응용

이승기*, 이상조*

Fabrication of Ionic Polymer-Metal Composite Actuator and Application to Moving Mechanism

Seung-Ki Lee* and Sang-Jo Lee*

요 약

이온 전도성 고분자와 금속의 복합물을 제작하고 이를 액추에이터로 이용하였다. 이온 전도성 고분자의 양면에 백금을 무전해 도금하여 전극으로 사용하고 이 두 개의 전극에 교류전압을 인가하면 구부러지는 형태의 빔 형 액추에이터를 제작할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 액추에이터의 제작 과정을 상술하고 이를 이용하여 이동형 액추에이터를 제작하였다. 이동형 액추에이터는 전선이 없는 형태로 하단의 전극 레일을 이용하여 전압을 인가하며 진동하는 빔 형 액추에이터의 충격을 흡수하며 앞으로 진행한다. 제작한 이동형 액추에이터는 최대 약 24cm/min 정도의 속도를 갖는 것으로 측정되었다.

Abstract

The composite of ionic polymer and metal has been fabricated and used for actuators. Platinum is deposited by electroless plating method onto the both sides of ionic polymer where ac voltage is applied. This results in the bending motion of a beam type actuator. In this paper, the fabrication method of ionic polymer-metal composite has been explained and the moving mechanism has been fabricated and measured using the ionic polymer-metal composite actuator. The moving mechanism is wireless type and the power is supplied through the rail electrodes in base plate. The maximum speed of the moving mechanism was about 24cm/min.

Key Words : IPMC, Polymer Actuator, Moving mechnism

Ⅰ. 서 론

전기활성고분자(electroactive polymer)의 일종인 이온성 고분자-금속 복합물(ionic polymer metal composite: IPMC)은 최근 몇 년간 액추에이터 구성 물질로서 새롭게 부상하고 있는 물질이다.

전기활성 고분자는 크게 IPMC, 전도성 고분자(conducting polymer), 겔(gel), 그리고 전왜 고분자(electrostrictive polymer)의 네 가지로 나눌 수 있다. 이 중 전도성 고분자는 고분자의 산화/환원 시에 부피의 변화를 수반하는데 이러한 부피의 변화를 액추에이터의 구동원리로 이용하고 있다. IPMC는 고분자막의 양 표면에 금속 전극을 형성한 후에 전계를 인가하면 막

* 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 (School of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Dankook Univ.)

<접수일자 : 2003년 3월 24일>

내부에서 이온의 이동에 의한 부피의 변화가 일어나며 결과적으로 전계의 방향에 따라 휘어지는 액추에이터이다.

전도성 고분자 액추에이터와 IPMC는 기존의 액추에이터에 비해 저전압 구동이 가능하고 동작 시 열이나 전자기파 등을 발생하지 않으며 이러한 성질을 이용하여 인공 근육의 제작 또는 팔다리의 동작을 모방하는데 이용된다[1]. IPMC는 플루오르로 치환된 이온성 고분자 막과 전도성 금속(Pd, Pt, Au 등)의 복합물로서 그 일반적인 구성은 내피온(Nafion® perfluorosulfonate ionomer, Dupont社)막의 양면에 백금 전극을 입힌 형태로 되어 있다. 내피온과 같은 이온 교환 막은 물과 같은 수용액 내에서는 팽창하고 친수성을 띄게 되므로, 막을 수용액에 담그고 막의 양 표면에 근접하게 두 개의 전극을 위치시킨 후 전압을 가하면 막 내부의 이온의 이동에 따라 막이 부분적으로 팽창하고 구부러지게 되는데, 이러한 막의 특성에 기인하여 전기장 내에서 막의 변형이 일어나게 되며 그 변형 정도는 막의 양 표면에 위치한 전극에 인가하는 전압의 크기나 주파수에 따라 조절이 가능하다.

전극 형성은 막의 표면 위에 전도성 물질을 여러 가지 방법으로 피복 시키는데 막의 표면에 금속을 증착 하는 물리적인 방법 외에, 전기화학 침전[2, 3], 무 전해 도금[4] 등의 화학적 방법으로 가능하며 본 실험에서 전극물질로 사용한 백금은 전도성 물질의 하나로 무 전해 도금 방법을 이용하여 IPMC의 내부 그물 망 또는 외부 표면에 석출시킬 수 있다[5]. 전도성 물질에 의해 도금된 내피온 막의 양 표면에 일정 전압을 가하면 막의 조각이 구부러지며[5, 6] 이러한 현상은 1992년에 Oguro 등에 의해서 발견되었다.

액추에이터로서 IPMC의 장점으로는 가볍고 유연하다는 물리적 특성 외에도 1-2V의 낮은 전압 하에서 구동 가능, 빠른 반응시간(120Hz 이상), 연속적인 구부러짐(약 100,000회 이상) 및 비교적 큰 변위의 산출, 그리고 마이크로 구조물로의 제작이 용이하다는 점 등이 있다. 또한 IPMC의 동작 능력이 고분자 막 내부의 이온 함유량에 의존하므로 작동 시 물 속에서 방수 처리를 하지 않고 사용할 수 있다는 장점이 있는 반면 수용액 내에서 또는 젖어있는 상태에서 동작하는 작동환경의 제한이 따른다[7, 8].

본 연구에서는 내피온 필름을 백금으로 무 전해 도금하여 제작하고 제작한 IPMC 액추에이터를 이용하여 이동형 액추에이터를 제작한다. 이동형 액추에이터는 로봇 응용이나 배관 검사 등의 산업용 응용 등 다양한 응용 가능성을 갖고 있는 액추에이터이며 전선을 통한 전원 공급이 아닌 전극 레일을 이용하는 형태로 설계하여 관내 주행 등의 실제 응용 가능성을 고려하도록 한다. IPMC 액추에이터에 인가하는 전압의 크기와 주파수를 변화시키며 이동형 액추에이터의 특성을 분석한다.

II. IPMC 액추에이터의 동작원리

실험에 사용한 이온성 고분자막은 미국의 듀폰(Dupont)社의 내피온 117(Nafion 117 : perfluorosulfonate ionomer membrane, thickness 0.007 inch)이다.

내피온은 PTFE(polytetrafluoroethylene)의 3차원 구조로 되어있으며, 여기에 부분적으로 술폰산 이온기(sulfonic ionic functional group : -SO3H)가 곁가지처럼 매달려 규칙적으로 공간을 차지하고 있다. 내피온의 일반적인 구조는 그림 1에 나타내었는데 X는 술폰 이온기이고, M은 금속 양이온(Na+, Li+ 등)으로 중화되어 있거나 수소 이온(H+)으로 산성화되어 있다. 내피온은 물의 함유량 및 양이온에 크게 영향을 받는데 그 원인으로는 친수성을 띄는 술폰산 이온기와 소수성을 띄는 플루오르화 탄소(fluorocarbon)의 반대되는 두 성분이 결합된 구조로 되어 있어 친수성 영역과 소수성 영역의 상 분리(phase-separation) 형태를 가지기 때문으로 보인다[6].

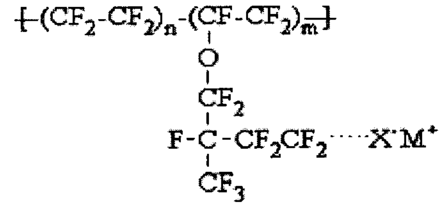


그림 1. 내피온의 분자구조
Fig. 1. Molecular structure of Nafion.

IPMC의 변형을 유도하는 기본 원리는 이온을 포함한 액체로 채워진 내피온의 양 표면에 전기

장이 가해졌을 때 막 내부에 채워진 양이온이 음극(cathode) 방향으로 이동하는 전기-삼투(electro-osmosis) 현상으로부터 얻어진다.

그림 2에서와 같이 제작된 IPMC의 양 표면에 전기장을 가하면 양이온이 물분자와 함께 음극 쪽으로 이동하게 된다. 따라서 음극 면에서 물분자의 증가에 의해 부피가 팽창하고 반대로 양극(anode)면에서 물분자의 감소에 의한 수축이 일어나게 되며 결국에는 막이 양극 쪽으로 구부러지게 된다[4, 5].

Ⅲ. IPMC 액추에이터의 제작

전기적인 장치에 의하여 물이나 식염수 내의 내피온 막 으로부터 구부러짐 효과를 얻기 위해서는 막의 양 표면에 금속의 도금이 필요하다.

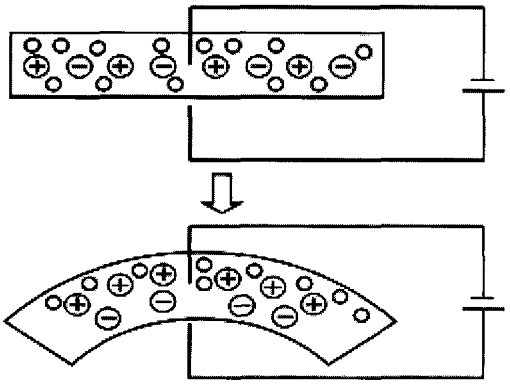


그림 2. 전기장에서의 IPMC의 구부러짐
Fig. 2. Bending of IPMC in electric field.

내피온에 마이크론 단위 두께의 백금을 도금하는 방법은 Takenaka 등[9]에 의해 개발된 독창적인 공정 방법이 사용되어왔으며 본 실험에서 시행한 IPMC 제작을 위한 내피온의 도금 공정은 크게 다음의 두 단계로 나눌 수 있다.

1단계 :	깊이 방향으로의 분자의 금속화 (in-depth molecular metalization)
2단계 :	표면 도금 및 전극화 (surface plating and electroding)

이 중 복합물 형성에 중요한 역할을 하는 과정은 1단계이며 다음 화학 반응에 따라 일어난다고 가정할 수 있다.

$$[Pt(NH3)4]2+ + 2e- \rightarrow Pt0 + 4NH3 \cdots\cdots (1)$$

$$NaBH4 + 8OH- \rightarrow BO2- + Na+ + 6H2O + 8e- \cdots\cdots (2)$$

(1)과 (2) 로부터

$$NaBH4 + 4[Pt(NH3)4]2+ + 8OH- \rightarrow 4Pt0 (s) + 16NH3 (g) + BO2- + Na+ + 6H2O(l) \cdots\cdots (3)$$

와 같이 전체 반응을 정리할 수 있다.

준비한 내피온 117을 K. Oguro[10]가 제시한 공정 방법에 의하여 백금으로 무 전해 도금하였다. 본 실험에서 시행한 무 전해 도금 공정은 크게 내피온 막의 표면처리(surface roughening), 이온흡착(adsorption), 환원(reduction)의 세 과정으로 나눌 수 있으며 표면 전극화를 위한 2차 도금(developing) 과정을 추가하였다.

이온 흡착 및 환원을 기본으로 한 도금 과정은 고분자-금속 복합물 형성의 주 과정이며, 고분자의 내부의 깊이 방향으로 금속화에 중요한 역할을 한다. 실험에서는 K. Onishi 등[4]이 제시한 방법에 근거하여 흡착/환원 과정을 하나의 주기로 한 도금 과정을 연속적으로 6회 이상 반복하여 막 내부에 적절하게 백금이 축적될 수 있도록 하였다.

표면 전극화 과정은 도금 과정을 거친 후 깊이 방향으로 전극화가 된 고분자의 표면 전극화를 위한 목적으로 시행하였다. 이 과정은 IPMC의 표면 저항 감소 및 표면 전극화에 적지 않은 영향을 준다고 판단되나 충분한 흡착/환원 과정을 거친 후라면 생략해도 무방할 것으로 보인다.

내피온의 무 전해 도금 과정

1. 표면처리(surface roughening)
↓
2. 이온흡착(adsorption)
↓
3. 환원(reduction : 깊이 방향 금속화)
↓
4. 2차 도금(developing : 표면 전극화)

1. 표면 처리 (surface roughening)

내피온 필름은 플루오르화 구조(fluorinated structure)로 되어있기 때문에 PTFE(polytetrafluoroethylene)와 유사한 특성을 가지며 표면 접착력이 낮다. 따라서 IPMC 제작 시 표면 처리를 하지 않고 금속의 도금을 하면 도금이 잘 되지 않거나 쉽게 제거된다.

본 연구에서는 내피온의 접착력을 개선시키기 위해 sandblasting 하거나 abrasive paper를 사용하는 등의 물리적인 방법을 사용하였으며 그 처리 과정은 다음과 같다.

① 220mesh Al_2O_3 입자를 이용하여 3kg/㎠ 이상의 압력으로 sandblasting 하거나 abrasive paper로 막의 양 표면을 긁어 막의 표면 접착력을 높인다.

② 초음파 세척으로 기타 잔류물을 제거한 후 2N의 HCl 용액에서 약 30분간 끓인 후 D.I. water로 세척한다.

③ 남아있는 산 성분을 제거하고 막을 팽창시키기 위해 D.I. water에서 30분간 끓인다.

2. 이온 흡착 (adsorption)

내피온의 친수성을 띠는 술폰산기(-SO_3H)를 백금 화합물과 반응시켜 H+를 $[Pt(NH_3)_4]^{2+}$으로 이온교환 시키는 흡착 과정이다.

일정 면적의 내피온을 $[Pt(NH_3)_4]Cl_2$ 용액에 담궈 실온에서 8시간 이상(보통 하룻밤) 방치한다.

3. 환원 (reduction)

내피온 내부로 흡착된 백금염을 백금 금속으로 환원시키는 과정이다.

① 백금염이 흡착된 내피온을 D.I. water에 담근 후(40℃, stirring) 온도를 서서히 올려가면서(40~60℃) 일정량의 5% 수소화붕소나트륨($NaBH_4$) 수용액을 30분 간격으로 7회 에 걸쳐 나누어 넣어준다.

② 과량의 $NaBH_4$ 용액을 더 가하고 60℃에서 1.5 시간 동안 계속 저어주면서 반응시킨다.

4. 표면 전극화 (developing)

흡착/환원의 도금 과정에서 생겨난 고분자 표면의 백금층 위에 금속을 추가하는 표면 전극화를 위한 과정이다.

① 일정 농도의 백금염 용액에 위에 열거한 이온 흡착-환원의 도금 과정을 거친 내피온을 넣고 온도를 서서히 올려가면서(40~60℃) 일정량의 5% NH_2OH-HCl 용액과 20% NH_2NH_2 용액을 매 30분마다 넣어준다.

② 4시간 후 1의 백금염 용액을 소량 채취하여 물중탕에서 $NaBH_4$ 수용액을 소량 가하여 반응시킨 후 백금 성분이 용액 내에 남아있는지 여부를 확인한다.

③ 반응이 모두 완료된 후 내피온을 D.I. water로 헹구어내고 0.1N의 염산에서 끓여(30분) NH_4^+ 이온을 제거한다.

5. 이온 교환 (ion exchange)

제작한 고분자-금속 복합물 내부에 존재하는 H+ 이온을 양이온으로 교환시키는 과정이다. 도금된 막을 1.5N의 NaCl 또는 LiCl 용액에 담궈 원하는 양이온(Na+ 또는 Li+)으로 이온 교환 시킨다.

Ⅳ. IPMC 액추에이터를 이용한 이동형 액추에이터의 제작 및 특성 측정

백금 무 전해 도금 과정을 거쳐 제작한 IPMC 액추에이터를 이동형 액추에이터로 이용하기 위하여 폭 2-3㎜, 길이 25-30㎜ 정도의 크기를 갖는 스트립 형태로 절단하였다. 이러한 스트립 형태의 액추에이터는 양 표면 전극에 교류 전압을 인가함으로써 연속적인 구부러짐 동작을 얻을 수 있고 이때 변위 등과 같은 기본적인 특성은 그림 3과 같은 기본적인 변위 측정 장치를 통해 측정할 수 있다.

연속적인 구부러짐 동작의 속도는 인가하는 전압의 주파수를 변화시킴으로써 조절이 가능한데 공기 중에서 20Hz 정도가 최대 인가 주파수인 것으로 측정되었다.

이동형 액추에이터는 스트립 형태의 IPMC 액추에이터가 만들어내는 연속적인 구부러짐 동작, 즉 진동하고 있는 운동을 선형적인 운동으로 변환시킬 수 있도록 설계하였다.

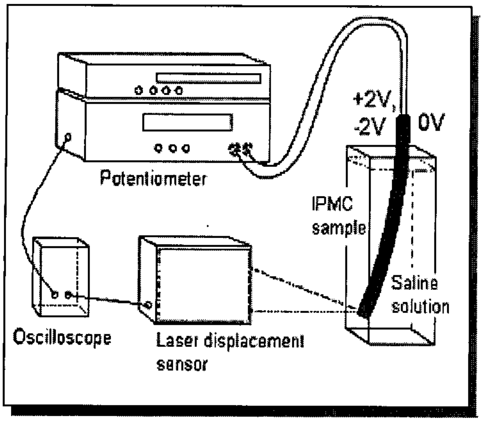


그림 3. IPMC 스트립의 변위 측정 장치 구성
Fig. 3. Displacement measurement set-up of IPMC strip.

IPMC 액추에이터는 기본적으로 재료 내부의 이온들의 움직임에 의해 기계적 변위가 발생하는 형태이므로 변위나 힘의 크기에 있어서 정밀한 재현성을 유지하기가 쉽지 않다. 따라서 이러한 특성상의 불균일성을 극복하고 안정적인 선형 운동을 얻기 위해서는 반복 동작을 선형 운동으로 변환시키는 형태의 설계가 필요하다. 또한 선형 운동의 추력(thrust force)이 크지 않기 때문에 전원 공급을 위한 전선 자체가 운동에 심각한 영향을 줄 수 있는 요소로 작용할 수 있다. 따라서 선이 없는 형태의 설계도 필요하다. 이러한 관점에서 그림 4와 같은 구조의 이동형 액추에이터를 설계하고 제작하였다.

그림 4(a)는 이동형 액추에이터를 구성하는 각 부품과 그것들의 크기를 나타낸 것이다. 몸체는 두께 0.05㎜를 갖는 구리판을 폭 1.5㎜, 수평 부분 길이 7.5㎜, 수직 부분 길이 31㎜를 갖는 ㄱ자 모양으로 자른 것으로서 수직 부분은 다시 반으로 자른다. IPMC 액추에이터는 폭 2.5㎜, 길이 27㎜를 갖는 스트립 형태를 사용한다. 이러한 부품들을 이용하여 그림 4(b)와 같은 형태로 조립한다. ㄱ자 모양의 구리판 몸체는 수직 부분을 길이 방향으로 반으로 잘라 다리를 벌리듯이 성형한다. 이렇게 제작한 두 개의 구리판 몸체는 각각 IPMC 액추에이터의 양면에 접합된다. 구리판의 다리 부분에는 스트립 형태의 IPMC 액추에이터의 연속적인 진동을 흡수할 충격 흡수대(impact absorber)가 부착된다. 충격 흡수대는 스티로폼과 같이 최대한 경량이며 몸체에 부착되어 IPMC 액추에이터의 진동을 몸체로 전달

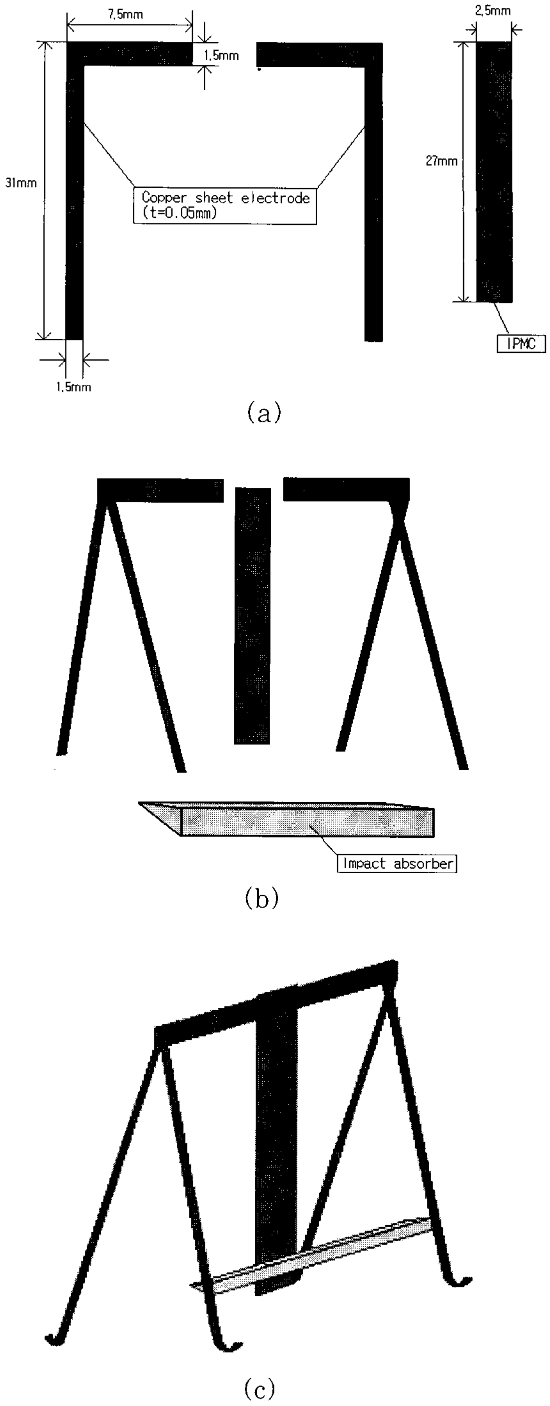


그림 4. 이동형 액추에이터의 구성 : (a) 구성 부품 및 치수, (b) 조립 방법, (c) 조립 후 모습
Fig. 4. Moving mechanism : (a) parts and size, (b) before assemble and (c) after assemble.

할 수 있는 재료를 사용하였다. 그림 4(c)는 조립이 완료된 후의 이동형 액추에이터의 모습이다.

이와 같이 제작한 이동형 액추에이터는 스트립 형태의 IPMC 액추에이터의 진동에 의해 움직이게 된다. IPMC 액추에이터를 동작시키기 위해서는 스트립 형태의 IPMC 양면에 전압을 인가해 주어야 하는데 이것을 전선의 연결 없이 가능하도록 그림 5와 같은 레일 형태의 전극을 설계하였다. 즉 두 개의 구리판 몸체는 각각 IPMC 액추에이터의 양면에 연결되어 있으므로 각각의 몸체가 서로 분리되어 있는 레일 전극 상에 위치하게 되고 이 두 개의 레일 전극에 구동에 필요한 교류 전압을 인가함으로써 액추에이터 몸체에 전선을 연결하는 일없이 이동형 액추에이터의 동작이 가능해진다.

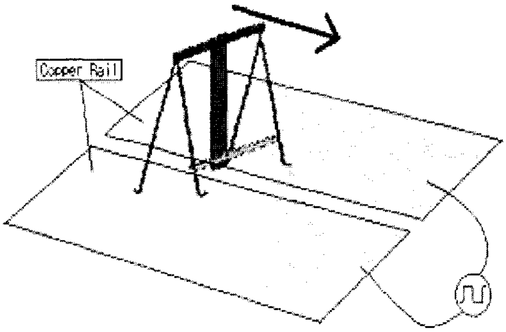
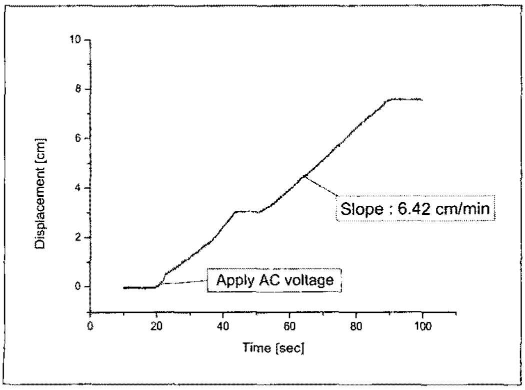
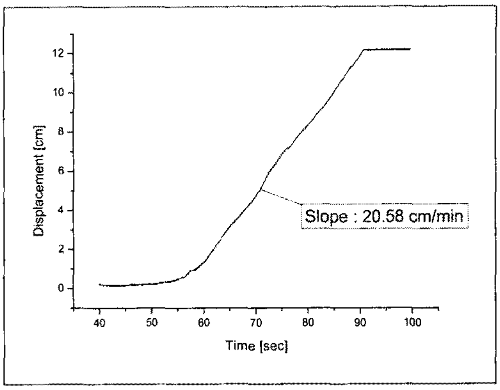


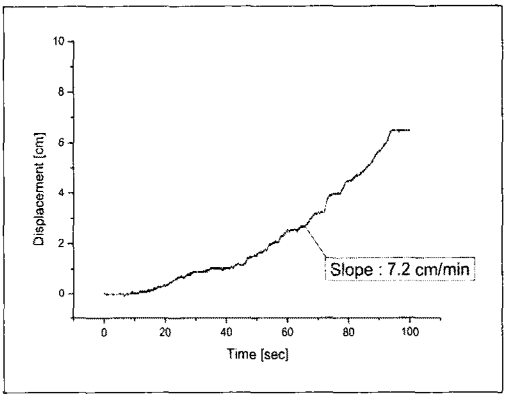
그림 5. 이동형 액추에이터의 전원 공급 방법
Fig. 5. Power supplying method to the moving mechanism.



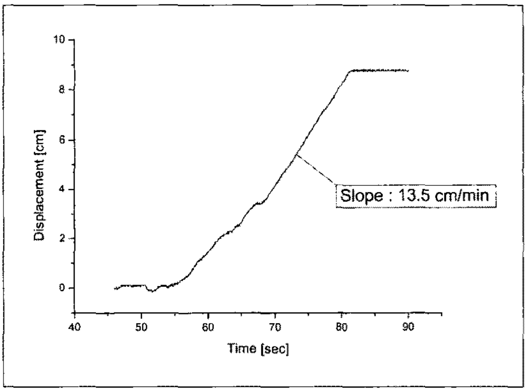
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 이동형 액추에이터의 이동거리 측정 결과 : (a) 8V, 15Hz, (b) 8V, 20Hz, (c) 7V, 10Hz, (d) 7V, 15Hz.
Fig. 6. *Measured moving displacement of the moving mechanism* : (a) 8V, 15Hz, (b) 8V, 20Hz, (c) 7V, 10Hz and (d) 7V, 15Hz.

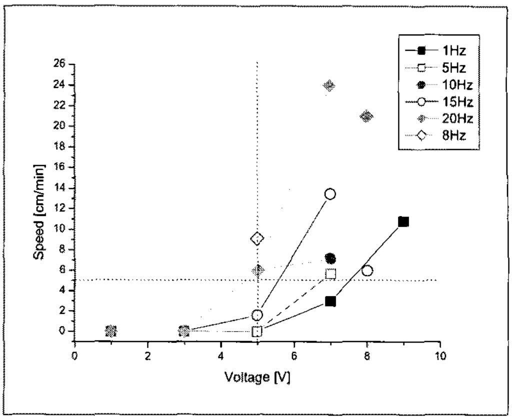
이동형 액추에이터의 구동을 위해서 인가한 전압은 1-9V의 크기를 가지며 주파수는 1-20Hz의 범위를 갖는다. 이동형 액추에이터의 속도는 전압의 크기와 주파수의 변화에 따라 달라지며 몇 가지 경우의 이동형 액추에이터의 이동거리를 시간에 따라 표시한 결과가 그림 6에 나타나 있다.

그림 6(a)는 8V의 전압 크기와 15Hz의 주파수를 갖는 경우이다. 교류전압을 인가한 직후부터 이동형 액추에이터가 움직이기 시작하며 대체적인 속도는 6.42㎝/min인 것으로 측정되었다.

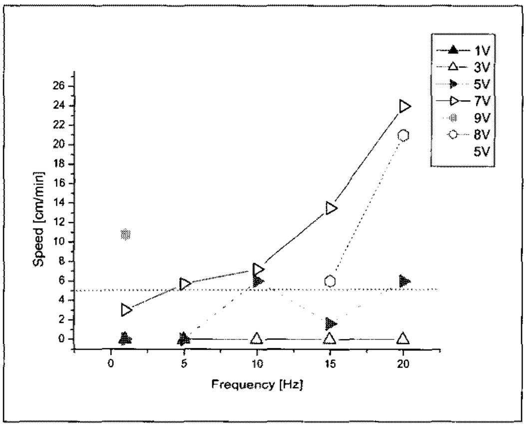
그림 6(b)는 전압의 크기는 동일하게 8V로 유지하며 주파수를 20Hz로 증가시킨 경우로서 속도가 20.58㎝/min까지 증가되었다. 그림 6(c)와 (d)는 7V의 전압을 인가하고 주파수를 각각 10Hz와 15Hz로 조절한 경우로서 7.2㎝/min 및 13.5㎝/min의 속도를 보이고 있다. 주파수 증강 따라 속도가 증가하는 것은 동일한 경향이나 8V 인가의 경우에 비해 상당히 속도가 낮아져 있음을 알 수 있다. 인가하는 전압의 크기와 주파수의 변화가 이동형 액추에이터의 속도에 미치는 영향을 좀 더 체계적으로 분석하기 위하여 전압의 크기 변화 및 주파수의 변화에 따른 속도를 측정하였다.

그림 7(a)는 인가 전압의 크기 변화에 따른 이동형 액추에이터 속도의 측정 결과이다. 대체적으로 전압이 커지면 속도도 증가하는 것으로 볼 수 있으나 이는 4-5V 이상의 전압에서 명확히 보인다. 4V보다 작은 전압 조건에서는 대체로 분명한 움직임이 관찰되지 않는다. 이는 이동형 액추에이터가 움직이기 위한 문턱(threshold) 전압 조건에 해당하는 것이라고 볼 수 있으며 몸체가 바닥 레일 전극과 갖는 정지 마찰력의 크기에 해당하는 전압 조건이라고 해석할 수 있다.

그림 7(b)는 주파수 변화에 따른 이동형 액추에이터의 속도 측정 결과로서 전압 변화의 경우와는 달리 문턱 주파수 조건은 보이지 않고 대체로 주파수 증가에 따라 속도가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 전압의 크기 변화가 속도의 단순 증가로 나타난 결과와는 달리 주파수 변화의 경우에는 주파수가 증가해도 오히려 속도가 감소하는 경우가 발생하고 있다. 이는 IPMC 액추에이터 자체의 수분 흡수 상태가 변화하면 주파수 변화에 따른 액추에이터로서의 진동 특성이 균일하지 않기 때문인 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 7. 이동형 액추에이터의 속도 측정 결과 : (a) 전압 크기의 변화, (b) 주파수의 변화

Fig. 7. Measured velocity of the moving mechanism varying (a) magnitude of voltage and (b) frequencies of applying voltage.

실제로 동일한 액추에이터라 할지라도 수분 흡수 상태에 따라 공기 중에서의 공진 주파수가 달라지는 현상을 실험적으로 관찰할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 IPMC 액추에이터를 이온성 고분자의 표면에 백금을 무전해 도금하는 방식에 의해 제작하였다. 이는 이온성 고분자와 금속간에 복합물을 형성하고 내부 이온의 이동에 의한

부피 변화에 의해 액추에이터로 이용할 수 있다. 제작한 IPMC 액추에이터를 이용하여 공기 중에서 동작하는 이동형 액추에이터를 설계하고 제작하였다. 제작한 이동형 액추에이터는 전원 공급용 전선을 연결하지 않고 바닥의 전극 레일을 이용하는 형태이며 스트립 형태의 IPMC 액추에이터의 진동을 흡수하며 이동하는 방식을 취하고 있다. 최대 속도는 약 24㎝/min인 것으로 측정되었으며 인가하는 전압의 크기 및 주파수를 변화시키며 속도를 측정하고 액추에이터의 특성을 분석하였다. 제작한 이동형 액추에이터는 전선이 연결되지 않고 바닥의 전극을 이용하는 형태이므로 관내 검사용 주행 액추에이터 등으로의 응용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Y. Bar-Cohen, T. Xue, M.Shainpoor, J. Simpson and J. Smith,"Flexible, low-mass robotic arm actuated by electroactive polymers and operated equivalently to human arm and hand," *Robotics 98: The 3rd Conference and Exposition/Demonstration on Robotics for Challenging Environments Sponsored by American Society of Civil Engineers*, April 26-30, 1998 Albuquerque, New Mexico.

[2] E. T. Enikov and B. J. Nelson, "Electrotransport and deformation model of ion exchange membrane based actuators," *Proceedings of SPIE*, vol. 3987, pp. 129-139, 2000.

[3] W. J. Li, M. Y. F. Kwok, J. S. J. Qin and Y. Xu, "Micro Nafion actuators for cellular motion control and underwater manipulation," *Proceeding of International Symposium on Experimental Robotics*, 2000.

[4] K. Onishi, S. Sewa, K. Asaka, N. Fujiwara and K. Oguro, "Bending response of polymer electrolyte actuator," *Proceedings of SPIE*, vol. 3987, pp. 121-128, 2000.

[5] M. Shahinpoor, "Ion-exchange polymer-metal composites as biomime tic sensors and actuators," *Polymer Sensors and Actuators*, Chap. 12, pp. 325-356, 1999.

[6] S. Nemat-Nasser and J. Y. Li,"Electromechanical response of ionic polymer-metal composites," *Journal of Applied Physics*, vol. 87, pp. 3321-3331, 2000.

[7] Y. Bar-Cohen, "Electroactive polymers as artificial muscles - capabilities, potentials and challenges," *Handbook on Biomimetics*, Section 11, in Chap. 8, pp. 1-13, 2000.

[8] R. Kanno, S. Tadokoro, T.Takamori and K. Oguro, "3-Dimensional dynamic model of ionic conducting polymer gel film(ICPF) actuator," *Proceedings of IEEE International Conference on systems, Man and Cybernetics*, pp. 2179-2184, 1996.

[9] H. Takenaka, E. Torikai and N. Wakabayashi, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 7, 397, 1982.

[10] K. Oguro, "Ion-exchange polymer metal composites(IPMC) membranes," Preparation Procedure, *http://ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/IPMC_.htm*.

著 者 紹 介

이 승 기 (李 承 起)
1963년 5월 15일 생
1986년 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
1988년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)
1992-1993년 일본 동북(東北)대학교 기계전자공학과 특별연구원 (JSPS fellow)
1994-1996년 단국대학교 전기공학과 전임강사
1996-2000 단국대학교 전기공학과 조교수
2000-현재 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 부교수

이 상 조 (李 尙 祚)
1977년 9월 22일 생
2000년 단국대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
현재 단국대학교 전기공학과 석사과정