

IPMC 구동기의 제작 및 고분자 해석기법에 관한 연구

김세훈*, 조석민**, 이동원**, 박영철***, 강정호#

A study of manufacture of IPMC actuator and the high molecule finite element analysis.

Se-Hun Kim*, Seok-Min Cho**, Dong-Weon Lee***, Young-Chul Park****, Joung-Ho Kang#

ABSTRACT

The laminate IPMC actuator have been developed with a commercial Nafion film and platinum electrodes. Equivalent beam and equivalent bimorph beam models for IPMC(Ionic Polymer-Metal Composite) actuators are described. By using a beam equation with estimated physical properties and actuation displacements of a cantilevered IPMC actuator are estimated. And Finite element analysis(FEA) was done by ANSYS.

Key Words : Ionic polymer-metal composites(IPMC), FEA, ANSYS

1. 서 론

최근 생체 모방형 인공근육을 개발하고 이를 의료적으로 응용하려는 시도들이 활발하게 이루어지고 있다. 현재까지 연구된 생체모방형 구동기 재료로서 가장 전도유망한 것 중 하나는 인가된 전압에 따라 기계적 변형이 발생하는 이온성 고분자 금속 복합체(IPMC, ionic polymer metal composite)이다. IPMC는 EAP(Electro-active polymer)의 한 종류로서 일반적으로 180 μ m 두께의 상용 이온성 고분자 양단에 두께 10~15 μ m의 금속 전극층(백금)이 전해 도금된 형태로 구성되어 있다. 이온성 고분자와 금속 전극판의 샌드위치 구조로 이루어진 IPMC는 인가되는 전압에

따라 동적으로 대변형이 가능하며, 특히 PZT와 같은 다른 재료들에 비해 상대적으로 낮은 전압(1~3V)에서 대변형 뿐만 아니라, 용액중에서도 동작이 가능하다는 강점으로 인해 IPMC 구동기 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다.

하지만 현재까지 개발된 IPMC 기반 구동기의 경우 작은 구동력과 같은 기계적인 부분에서의 제약으로 인해 큰 토크를 요구하는 구동기 응용에는 적용하기가 어렵다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 Multi-wall Carbon nanotube (CNT)와 같은 다양한 전도성 나노 재료들을 IPMC의 주재료가 되는 Nafion™ 용액에 혼합하여 복합체를 제작하고, 기계적 특성 평가 관련 연구가 최근 시작되었다. 하지만 대부분의 연구가 IPMC의 제작법 및 응용에 대해 이루어지고 있을 뿐 해석 기법에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 실제 해석에 고려되어야 할 사항들을 파악하기 위해 이온성 고분자막으로 널리 사용되고 있는 상용 Nafion 필름과 전해 도금법을 이용하여

* 동아대학교 대학원 기계공학과

** 전남대학교 대학원 기계공학과

*** 동아대학교 기계공학과

교신저자 : 동아대학교 기계공학과

E-mail : kangjh@dau.ac.kr

IPMC 구동기를 제작, 구동특성을 확인하였다. 그리고 Nafion 필름 및 백금 등의 물성치와 빔 공식을 이용하여 외팔보 IPMC 구동기의 변위 움직임을 구하였다. 해석은 상용 유한요소해석프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

2. IPMC의 구동원리^[1-6]

그림 1을 통해 알 수 있듯이 IPMC에 전압을 인가하면 전류의 흐름으로 인해 고정된 음이온과 이동성이 있는 counter이온들이 움직임을 시작하게 된다. 이때 counter이온들은 수화된 상태로 음극을 향해 이동하게 되고 이로 인하여 음극 쪽은 물분자의 포화로 인해 팽윤을 일으키고 반대로 양극에서는 수축반응을 일으키게 된다.^[1-4] 이러한 음극과 양극의 부피 차이에 의해 고분자 전해질은 굽힘 운동을 일으키게 된다. 이러한 일련의 반응은 고분자 전해질, counter이온, 고분자전해질에 채워지는 내부의 용매, 전해질 표면에 존재하는 금속 전극의 종류 또는 상태 등 다양한 인자의 영향을 받는다.

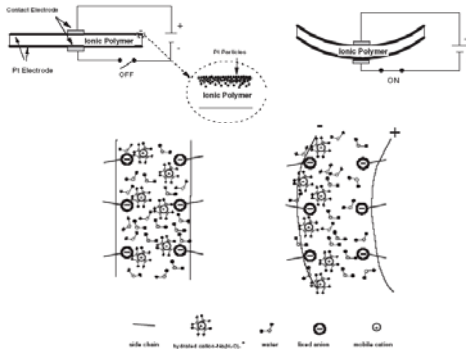


Fig. 1 Bending mechanism of IPMC

3. IPMC 제작 및 성능실험

3.1 IPMC 제작

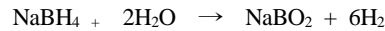
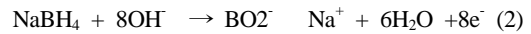
IPMC의 제작을 위하여 Dupont 사의 NafionTM 20wt%를 이용하였다. Nafion의 경우 membrane 형태

와 dispersion형의 두 가지 종류가 판매되고 있다. 초기 연구에서는 IPMC의 제작을 위해 film형태의 Nafion이 사용되었으나 점차 구동력의 한계 등을 극복하기 위해 Nafion dispersion을 이용하는 연구가 진행되고 있다. 상용 Nafion film의 경우 50~180 μ m 범위의 특정 두께를 갖는 반면 casting방법을 사용하였을 경우에는 연구자가 원하는 두께의 Nafion film을 얻을 수 있다.본 연구는 IPMC의 해석 방법에 초점이 맞춰진 관계로 상용 Nafion film을 이용하였으며 일반적인 IPMC의 제작방법으로 알려진 무전해도금법을 이용하여 IPMC를 제작하였다.

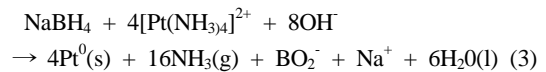
3.2 Nafion 도금 과정^[5-6]

NafionTM의 양단에 전극을 형성하는 방법으로는 무전해도금(electroless plating)이 사용되었다. 본 실험에서 사용한 IPMC 제작을 위한 도금공정은 다음과 같이 두 단계로 나눌 수 있다.

1단계는 깊이 방향으로 분자를 금속화시킨다.



(1)과 (2)로부터



2단계는 표면을 도금을 하고 전극화시킨다.

1차도금은 고분자의 깊이 방향으로의 전극화 과정이며 고분자-금속 복합물 형성에 중요한 과정이라고 할수 있으며 2차도금은 1차도금 후 깊이 방향으로 전극화가 된 고분자의 표면도금을 강화하고 표면 전극화를 가져오기 위해 수행된다. 2차도금의 경우는 특히 표면 저항 감소 및 표면 전극화에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

무전해도금 과정을 자세히 살펴보면

1) 전처리 (surface roughening)

Nafion의 표면을 거칠게 하고 표면에 백금의 흡착

을 용이하게 하는 과정으로

- ① 깊이방향 도금을 위한 처리를 한다.
-3kg/cm² 이상의 압력으로 sand blasting
- ② 2단계(표면전극화)를 위한 처리를 한다.
180mesh 및 1200mesh 의 abrasive paper 또는 emery paper 사용하여 Nafion의 양면을 긁어 표면을 거칠게 한다.
- ③ 기타 잔류물을 제거하기 위하여 초음파 세척을 한다.
- ④ HCl 처리를 한다.
막의 불순물과 이온들을 제거한 후 2N의 HCl에 막을 넣고 약 30분간 끓인 후 D.I water로 rinse를 한다.
- ⑤ 수 처리
남아있는 산 성분을 제거하고 막을 팽창시킨다.
D.I water에서 30분간 가열한다.

2) 이온 흡착(adsorption)

Nafion의 Hydrophilic 영역에 Pt complex를 뿌려 H⁺ 를 [Pt(NH₃)₄]²⁺으로 이온교환시키는 과정으로

- ① 5×6 cm 면적의 Nafion을 180mg Pt/90mol의 [Pt(NH₃)₄]²⁺ 용액에 담근다.
- ② 중화를 위해 5%NH₄OH 용액 1ml 를 가한다.
- ③ 실온에서 10시간 이상(보통 하룻밤) 방치한다.

3) 1차 도금(reduction)

Nafion의 깊이 방향으로 흡착된 백금염을 백금으로 환원시키는 과정

- ① 5wt% NaBH₄ 수용액을 준비한다.
- ② D.I water로 Nafion을 세척한 후 Nafion 면적 1cm² 당 60ml 비율로 준비한 D.I. water에 담근다.
- ③ 30분 간격으로 5% NaBH₄ 수용액 28ml를 7번에 걸쳐 나누어 준다.
- ④ NaBH₄ 40ml를 더 가하고 1.5시간동안 60℃에서 stirring해준다.
- ⑤ Nafion을 물로 rinse 하고 0.1N HCl에 1시간 동안 담궈둔다.

4) 2차 도금(Developing)

표면도금 및 표면 전극화를 위한 과정으로 1차 도

금 과정에서 생겨난 고분자 표면의 Pt layer상에 백금 추가

- ① 시편크기가 5×6cm 면적 기준으로 2mg Pt/cm², 1mg Pt/2ml의 백금염 용액을 준비 한다
- ② 준비한 백금염 용액에 5%NaBH₄ 용액 5ml를 가 한다
- ③ 5% NH₂OH-HCl 용액과 20% NH₂NH₂ 용액을 준비한다.
- ④ 1차 도금 과정을 거친 Nafion 을 백금염 용액에 넣는다.
- ⑤ 5% NH₂OH-HCl 용액과 6ml 와 20% NH₂NH₂ 용액 3ml를 매 30분마다 넣어 주는데, 온도를 서서히 올려서 60℃가 되도록 해준다. 이 과정을 4 시간동안 계속한다.
- ⑥ Gray metallic layer 가 생성된다.
- ⑦ NaBH₄ 로 end point를 체크한다.
- ⑧ Nafion을 물로 rinse하고 0.1N의 염산에서 30분 동안 끓여 NH₄⁺ 이온을 제거하고 다시 물로 rinse한다.

5) 이온 교환

composite에 존재하는 H⁺ 이온을 양이온으로 교환시킨다. 도금된 시편을 채취하여 원하는 양이온의 염화염 (chloride salt) 용액 속에 담궈 이온 교환시킨다.

이러한 공정을 거쳐 그림 2와 같은 IPMC를 제작할 수 있었다.

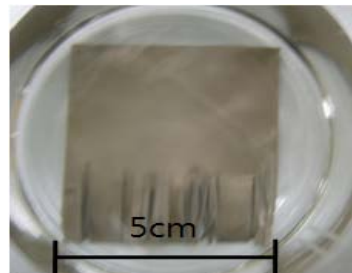


Fig. 2 Image of fabricated IPMC

3.3 IPMC 성능평가

제작된 IPMC의 단면을 절단하여 SEM으로 관찰한

결과 그림 3과 같이 양호한 전극을 갖는 IPMC가 제작되었음을 확인할 수 있었다. 제작된 IPMC는 Nafion film의 두께와 같은 약 $180\mu\text{m}$ 의 두께를 갖고 깊이방향으로 약 $15\sim 20\mu\text{m}$ 정도의 전극이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 제작된 IPMC를 $30\text{mm}\times 5\text{mm}$ 크기로 절단한 다음 그림 4와 같은 방법으로 변위를 측정하였으며 그 결과는 표1에 나타내었다.

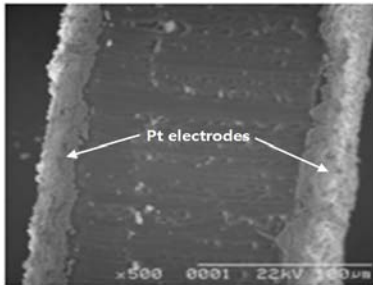


Fig. 3 SEM image of fabricated IPMC

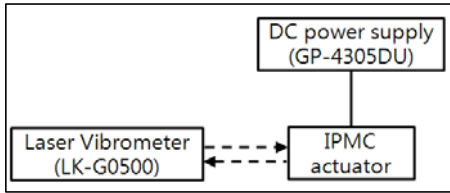


Fig. 4 Displacement experimental system configuration

Table 1 Experimental results (driving voltage versus displacement)

Driving voltage	Displacement(mm)
$0V_{DC}$	± 0.1
$1V_{DC}$	2.7
$2V_{DC}$	8.2
$4V_{DC}$	14.6

실험 결과 전체적으로 양호한 변위를 보였으며 $0V$ 의 경우 전압을 인가하지 않았음에도 불구하고 IPMC 주변 수분의 증발 등으로 인해 미약하게 변위가 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 일정한 크기 이상의 전압을 인가하면 물의 전기분해로 인해 IPMC의 성능 변화가 발생하는 것을 확인하였다.

4. 고분자의 해석 기법^[6~7]

IPMC를 설계 및 제작하거나 기계적 성능을 해석 및 예측하기 위해서는 우선 기계 역학적 해석 방법이 검토되어야 한다. 본 논문에서는 고분자의 기계적 특성을 평가하기 위한 그 해석 기법을 검토하고 제시하고 있으며, 기계적 성능을 개선하기 위한 방법 중의 하나로써 일반적인 보의 해석기법을 검토하여, 본 실험에서 적용 가능한 방법을 제시하고자 한다.

4.1 IPMC의 하중 변위 관계 측정^[7]

본 연구의 등가 모델들의 등가 하중 및 등가 전기 기계적 물리량들은 그림 6와 같은 방법으로 측정되며 이것은 제작한 actuator를 검토하는데에 사용된다.^[7] 그림 5은 좌측 단이 외팔보 조건으로 고정되고 우측 단은 하중측정기(force transducer)와 접촉하고 있는 IPMC를 나타낸다. (a)에 나타난 바와 같이 인가 전압을 가하면 끝단의 변위(s)가 0인 경우에 대해서 작동기 끝단에서의 작동력이 계측되며, 이 하중은 반발력 혹은 막힘 하중에 해당한다. 하중 측정기의 위치를 IPMC 끝단에서 y방향으로 이동시키면서 하중을 측정하면 (b)에서와 같이 특정 작동변위에서의 IPMC 끝단의 작동력을 계측할 수 있다. 반복적으로 하중을 측정하면 작동력이 0으로 계측되는 지점이 최대변위 발생지점이다.

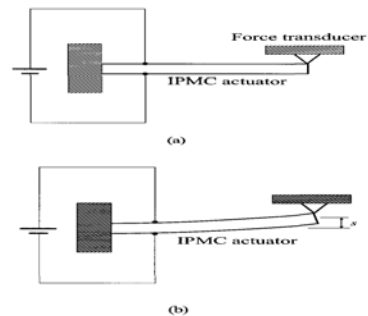


Fig. 5 Test for the free-displacement relationship.

5.2 등가 보 모델^[7]

IPMC 작동기를 일정한 분포하중을 받는 외팔보로 가정할 수 있다. 보 이론으로부터 외팔보의 오른쪽

끝단에 작용하는 반발력은 다음 (4)식을 이용해 계산된다.[3]

$$R_B = \frac{3pL}{8EI} \quad (4)$$

여기서 p 는 분포하중, L 은 보의 길이, E 는 보의 영계수(Young's modulus), I 는 보의 단면 이차 관성모멘트(second moment of inertia)이다. IPMC의 굽힘강성 EI 를 안다면 (5)로부터 등가 분포하중 p 를 결정할 수 있다.

$$p = \frac{8EIR_B}{3L} \quad (5)$$

(5)식에서 이차 관성모멘트 I 는 작동기의 단면형상으로 결정되고, 등가 영계수는 다음의 혼합법칙으로 근사한다.

$$E = E_{PT}V_{PT} + E_{Poly}V_{Poly} \quad (6)$$

여기서 E_{PT} 는 백금전극의 영계수이고, E_{Poly} 는 멤브레인의 영계수이다. V_{PT} , V_{Poly} 는 각각 백금과 멤브레인의 부피비이다. 등가 분포하중을 이용하여 IPMC 작동기의 최대 끝단 변위를 계산하고, 이를 실험값과 비교할 수 있다. 최대 끝단 변위는 다음과 같은 분포하중을 받는 외팔보의 끝단 변위 계산식을 이용해 구할 수 있다.[3]

$$y_{max} = \frac{pL^4}{8EI} \quad (7)$$

5.3 등가 바이모프 보 모델^[7]

등가 바이모프 보 모델에서는 IPMC를 두께가 같은 가상의 두 층으로 구분하고, 인가전압을 가하면 굽힘 거동이 일어난다고 가정한다. IPMC의 인가전압과 끝단 변위(s)와의 관계는 (8)로 표현된다.^[4]

$$s = \frac{3d_{31}VL^2}{2H^2} \quad (8)$$

여기서 d_{31} (m/V)은 전기-기계 연성계수이고 V 는 인가전압이다. d_{31} (m/V)은 다시 (9)과 같이 표현된다.

$$d_{31} = \frac{2sH^2}{3VL^2} \quad (9)$$

IPMC의 하중-변위 측정에서 측정된 최대작동변위를 (6)에 대입하면 등가 전기-기계 연성계수 d_{31} 을 구하게 된다. 등가 바이모프 보 모델에서는 다음의 바이모프 보 막힘하중 계산식인 (10)로부터 IPMC의 등가 영계수를 계산한다.

$$F_{bl} = \frac{3WH^2E}{8L}d_{31}E_3 \quad (10)$$

F_{bl} 은 끝단의 막힘하중, E_3 는 인가 전기장이다. (11)식을 변형하면 등가 영계수식을 얻는다.

$$E = \frac{8LF_{bl}}{3WH^2d_{31}E_3} \quad (11)$$

본 논문에는 등가 보 모델과 등가 바이모프 보를 검토한 결과 IPMC와 M-CNT를 적층하여 제작한 시편이므로 등가 바이모프 보가 그 적응력이 클 것으로 판단을 하여 등가 바이모프 보 모델을 사용하여 유한요소해석을 하였다.

5.4 등가 바이모프 보 모델의 검증

등가 바이모프 보 모델의 검증을 위해 IPMC의 하중-변위 관계를 수치적으로 모사하였다. 검증을 위해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 10.0의 Piezoelectric Analyses 방법을 이용하였다. 유한요소 해석의 물성값은 (6)을 이용하여 구하였으며 2.5V 인가전압에 대해 등가 전기-기계 연성계수는 2.56×10^{-9} m/V 이고 영계수는 0.275 GPa, 푸아송비는 0.487이다. 시편크기는 10mm × 100mm × 0.2mm [$W \times L \times T$]을 이용하였다. ANSYS에서 Piezoelectric model은 해석을 위해서 piezoelectric matrix [e]와 elastic coefficient matrix [c]를 요구한다. 이 두 가지 행렬의 성분은 프로그램 내에서 전기-기계 연성계수와 영계수등 물성치의 관계를 이용해서 입력된다.

등가 바이모프 보 모델을 이용한 수치해석 결과를 그림 8에 나타내었다. 시편의 길이가 길어지면 그림 7에 나타나는 것 같이 변위가 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 8, 그림 9에 나타낸 것과 같이 IPMC는 구동

전압을 증가시킬수록 그 변위 및 힘이 증가하게 된다. 그러나 실제 시험편에서는 전압을 2V 이상으로 높게 사용하면 물의 전기분해가 촉진되어 다량의 기포가 발생하고, 이는 IPMC 표면의 백금 전극을 손상시키며 내구성을 저하시킨다. 따라서 낮은 전압 하에서의 변위와 힘의 개선이 필요하다.

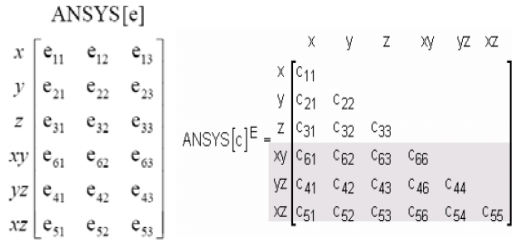


Fig. 6 Elastic coefficient matrix of ANSYS

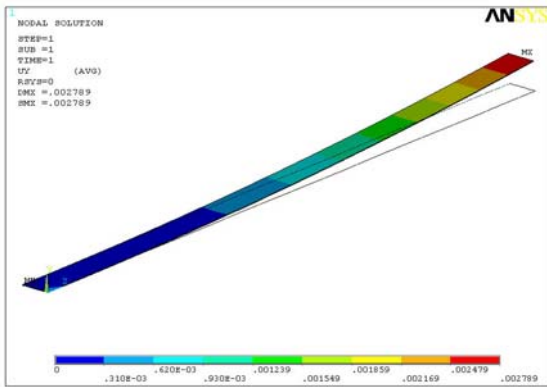


Fig. 7 Elastic coefficient matrix of ANSYS

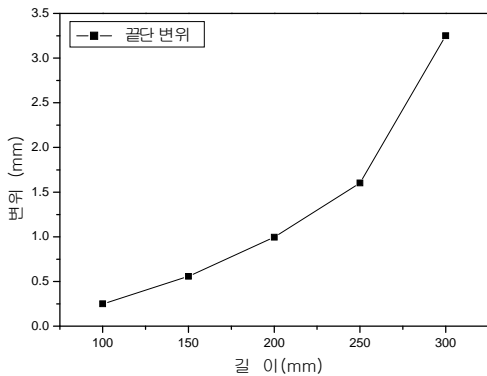


Fig. 8 Elastic coefficient matrix of ANSYS

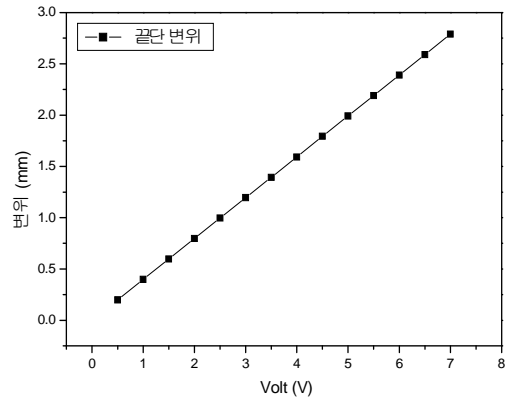


Fig. 9 Elastic coefficient matrix of ANSYS

4. 결 론

앞서 언급한 바와 같이 IPMC는 최근 많은 관심을 받고 있는 재료로 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 이러한 연구는 대부분 IPMC의 제작 방법 및 IPMC를 이용한 구동기(actuator)의 응용에 관한 것으로 실제 IPMC의 해석에 관해서는 다른 분야에 비해 연구가 미비한 실정하기에 본 연구에서는 등가모델 및 등가 바이모프 모델을 이용하여 IPMC를 해석하는 방법을 제안하였고 나아가 IPMC의 해석을 위해 실제로 고려되어야 할 사항들에 대한 확인을 위해 직접 IPMC를 제작하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. IPMC를 수립된 공정에 따라 제작하더라도 온도나 시편의 양과 같은 가시적인 요소 외에 제작자의 노하우등 객관적 고려가 어려운 요소들이 많아 IPMC의 물성치를 정량적으로 설정하는 것이 어렵다.
2. IPMC의 해석과 설계를 위해 등가 바이모프 보 모델의 적용성을 검토하였고, 이를 위해서 제작된 이온성 고분자 복합체의 각각의 물성치를 개별적으로 구할 필요가 있다.
3. 실제 제작된 IPMC의 경우 일정 전압 이상에서 물의 전기분해가 발생하여 성능에 영향을 미치므로 해석 시 이를 고려하는 해석기법을 확립할 필요가 있다.

물의 전기분해가 발생하지 않는 1.2V이하의 전압에서 구동하는 IPMC의 경우 IPMC를 구성하고 있는 고분자 물질 및 전극으로 쓰인 금속의 물성치를 적용하여 등가 바이모프 보 모델로 해석이 가능하였으며 이런 저전압(1.2V이하) 조건의 경우 등가 바이모프 보 모델을 이용해 현재 활발하게 연구되고 있는 IPMC 복합체의 해석도 가능할 것으로 예상된다.

Air Flow Control of MAV's Wing"

7. Sang-Ki Lee, Hoon-C P, Kwang-j k "Equivalent Beam and Equivalent Bimorph Beam Models for Ionic Polymer-Metal Composite Actuator" 제어·자동차·시스템공학 논문지 제 10권, 제11호 2004.

후 기

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음.(KRF-2006-311-DOO323)

참고문헌

1. Jin, Y. J. and Lee, K. O., "Improvements of Mechanical and Electrical Performances of IPMC Actuators Using Carbon Nanotubes," 한국소음진동 공학회, pp. 1-7, 2006.
2. Cho, S. Hand Lee, S.K, "A study on the Fabrication of a Membrane Type Micro-Actuator Using IPMC(Ionic Polymer-Metal Composites) for Micro-Pump application," Trans,KIEE.Vol52c.No7, , pp. 1-2, 2003.
3. Lee, D. y, Park I, S., "Ionic polymer-metal composite bending actuator loaded with multi-walled carbon nanotybes," Science Direct, pp. 117-124, 2007.
4. Vinh K. N, "A novel design and fabrication of mulilayered ionic polymer-metal composite actuators based on Nafion/layered silicate and Nafion/silica nanocomposites", Science Direct pp. 183-188, 2007.
5. Seung-K L, "Fabrication of Ionic Polymer-Metal Composite Actuator and Application to Moving Mechanism", 센서 학회지 2003년 5월
6. Sang-Ki Lee, Kwang, J. K, Hoon C. P, "Design and Analysis of IPMC Actuator-driven Znmf Pump for