

패턴된 IPMC 작동기의 진동특성

Vibration Characteristics of Patterned IPMC Actuator

전진한*·오일권†
Jeon Jin Han and Oh Il Kwon

Key Words : IPMC actuators(이온성 고분자 금속 복합체 작동기), Multiple electrode patterning (다중 전극판), FEM(유한요소법).

ABSTRACT

The ionic-polymer-metal-composite actuators have the best merit for bio-mimetic locomotion because of their large bending performance. Especially, they have the advantage for mimicking a fish-like motion because IPMCs are useful to be actuated in water. So we have developed IPMC actuators with multiple electrodes for realization of biomimetic motion. This actuator is fabricated by combining electroless plating and electroplating techniques capable of patterning precisely and controlling a thickness of Pt electrode layer. The FRF analysis was conducted by a mechanical shaker and direct electrical excitation which is based on sweep sine wave function. From this result, the proper young's modulus of Platinum was investigated and applied on expecting the vibration characteristics of patterned IPMC actuator. The calculated maximum displacement of the patterned IPMC was 2.32mm under an applied 4mN/mm. The natural frequency was increased however displacement was decreased in according to increase a thickness of Pt.

1. 서론

최근 들어, 인공근육, 의료 장비, 초소형 로봇, 생체모방학 등에 요구되는 새로운 센서 및 작동기의 연구가 활발히 진행 중에 있다. 대표적으로 전기장 하에서 형상의 변화가 일어나는 전기활성고분자(Electro-Active Polymer)가 광범위하게 연구되어 오고 있다. 이 중 IPMC 는 대변형을 하며, 가볍고, 소모 전력이 작아 소형화에 유리하고, 생체적합성이 뛰어난 재료이다. 작동기는 나피온과 같은 플루오르로 치환된 이온 교환 고분자 막에 금 또는 백금이 화학적으로 적층된 구조를 이루고 있다[1]. 그림 1(a, b)를 살펴보면, 그것은 내부에서 움직이는 양이온(H⁺) 과 결합 구조로 고정된 음이온(술포산기(SO₃⁻))으로 구성되어 있다. 또한, SEM 사진을 보면 전극 층이 표면 전극 층, 고분자-금속 복합 층으로 구성된 복합재료임을 알 수 있다. 그림 2 는 전기장 내에서 IPMC 의 굽힘 원리를 설명하는 개략도로, 충분히 수화된 상태에서 IPMC 양면에 전압을 인가하면, 내부의 양이온과 물 분자가 클러스터 구조를 이루어 음극 쪽으로 이동하게 된다. 이때, 음극은 이온들의 과다분포로 팽창하고 양극은 수축되어 IPMC 는 양극 쪽으로 굽어지게 된다.

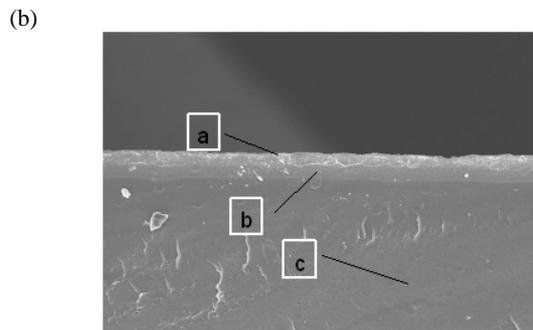
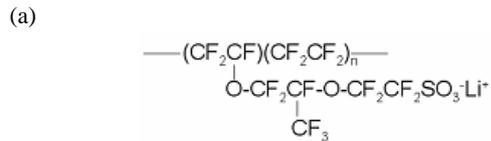


Figure 1. Ion-exchangeable polymer membrane and layer-up of IPMC
 (a) Chemical structure of Nafion, and (b) Cross-sectional view of IPMC.
 (a) : Surface Electrode (b) : Polymer-Metal Composite (c) : Membrane)

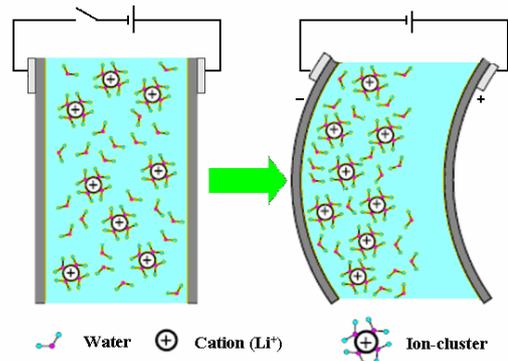


Figure 2. A schematic illustration of an actuation principle.

† 전남대학교 기계시스템공학부 조교수
 E-mail : ikoh@chonnam.ac.kr
 Tel : (062) 530-1685, Fax : (062) 530-1689

* 전남대학교 기계공학과 대학원

3. IPMC 주파수 응답 실험

현재 IPMC 는 기계, 전기, 화학적 특성과 모델링에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. Nemat-Nasser 는 IPMC 의 구동 특성과 미소 역학을 바탕으로 수학적 모델링 수행하였다[2]. Lee 는 작동기의 변위와 구동력 등의 실험값으로 등가 강성을 구하고, FEM 모델을 수립하였고[3], Kim 은 구동력과 고유 진동수에 대한 실험식을 바탕으로 등가 강성을 예측하고 구조적 특성을 고찰하였다[4].

본 연구에서는 IPMC 작동기를 다중전극판 기법으로 새롭게 패터닝 및 생체모방 움직임 구현에 앞서, FEM 해석 기법을 통하여 좀 더 쉽고 직관적으로 패터닝 디자인 및 작동기의 진동 특성을 살펴보았다.

2. IPMC 의 다중 전극판 패터닝

2.1 다중 전극판의 개념

생체 모방 공학은 자연계에서 영감을 얻어 이를 기존의 공학 체계에 접목시켜 기존의 공학적인 문제점들에 대해 새롭게 접근하는 흥미로운 연구 분야이다. 이런 관점에서 생체모방공학은 물고기의 움직임은 물속이나 혈관 속과 같은 환경에서 유영해야 되는 마이크로 로봇과 같은 소형 로봇의 구동 방법의 해결책을 제시해 줄 수가 있다. 대부분의 물고기는 꼬리지느러미를 이용하여 자신의 몸을 굽히고 비틀어서 추진력을 얻는다. 이런 물고기의 움직임은 전진과 관련된 파동형 신호와 회전과 관련된 진동형 신호로 이루어진다[5]. 이 점에 있어서, IPMC 구동기는 인공 물고기 로봇의 지느러미를 제어하는 용도로 사용 될 수 있다.

2.2 다중 전극판의 디자인

전극 표면의 패터닝을 통해 다자유를 갖는 구동을 구현할 수 있도록, 그림 3 과 같이 디자인 하였다. 패턴은 구동 전압 인가부와 구동부로 나누어 진다. 특히, 구동부는 비틀림, 파동, 진동형 모션을 고려하여, 3 개의 독립적인 세부 패턴으로 디자인하였다.

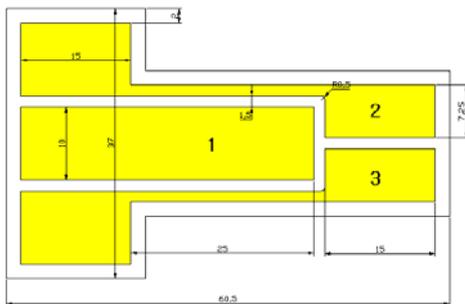


Figure 3. An improved pattern design of multiple electrodes of IPMC actuator.

고유 진동수는 IPMC 와 같은 굽힘 작동기의 기계적 특성을 잘 표현할 수 있다. 따라서 본 절에서는 소인 정현파 (sweep sine wave)를 이용하여 기계적 가진기와 전기 가진 신호로 IPMC 를 직접 작동시켜, 주파수 응답 결과를 구하였다. 그리고, 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC Patran/ Nastran[6]을 이용하여, 고유 진동수의 해석값과 실험값을 비교하고 IPMC 의 백금층의 등가 물성치를 구했다.

3.1 실험 방법 및 조건

IPMC 는 고분자, 고분자-금속 복합층, 표면 금속 전극층으로 이루어진 복합재료이다. 그 물성치들은 표 1 과 같이 알려져 있다[7, 8]. 그 물성치들 중 특히, 백금의 영 계수 값은 해석 시 적용하기에 오차가 크다. 그림 4 에서, 일반적인 IPMC 의 표면과 단면을 살펴보면, 표면(a)에선 많은 크랙이 존재함을 볼 수 있고, 단면(b)에선 표면 상태와 두께가 고르지 않음을 볼 수 있다. 그러므로, 일반적인 백금의 영계수(146.8GPa)를 해석에 적용하는 데는 무리가 있다. 그래서, 그림 4 (b) SEM 사진을 통해 실제 적층된 백금 두께를 찾고(3 μm), 백금의 영계수를 바꿔 감에 따라 dry 및 hydrated 조건에서의 실험 고유진동수에 최대한도 충족하는 해석 고유진동수를 찾았다.

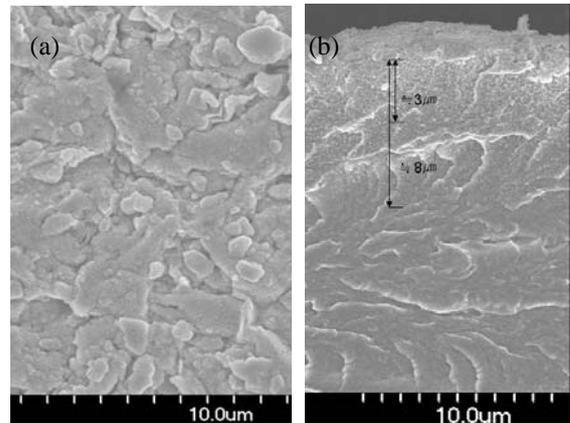


Figure 4. Microstructure of surface electrode layer (a) Top-view of IPMC, and (b) Cross-sectional view of IPMC.

Table 1. Basic properties of IPMC.

Material	Young's modulus (Gpa)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)	Thickness (μm)
Nafion (hydrated /dry)	0.05 /0.254	0.487	2078 /1980	203 /183
Platinum	146.8	0.38	21450	3

IPMC 의 작동원리에서 보았듯이 작동기는 충분히

수화된 상태에서 대변형을 한다. 그러므로 수화된 상태 또한 중요한 성능 변수 있다. 그래서, dry 조건과 hydrated 조건으로 나누어 실험과 해석을 진행하였다. Dry 조건은 50%, 23°C의 항온 항습조를 이용하여, 시편을 1 시간 동안 그 안에 두어 충분히 dry 상태가 되도록 하여 실험을 수행하였다. 한편, hydrated 조건은 시편을 하룻밤 동안 증류수에 충분히 담가 두어 수화시킨 후, 실험을 진행하였다.

3.2 FEM 해석

Dry 상태에서 hydrated 상태가 되면 부피 팽창에 의한 치수의 변화가 생긴다. 조건이 바뀌에 따른 신장률은 각 축 방향으로 약 0.1428 이였고, 이를 적용하여 각 상태에 해당하는 패턴 된 모델을 완성하였다. 단일 시편(4*25mm)의 경우, 모델링에 사용된 요소는 그림 5 와 같이 4 절점 쉘요소를 사용하였으며, 해석에 사용한 총 노드 수는 459 개였다. 또한 패턴된 시편의 경우(16*41.5mm)는 총 348 개의 노드로 해석하였다.

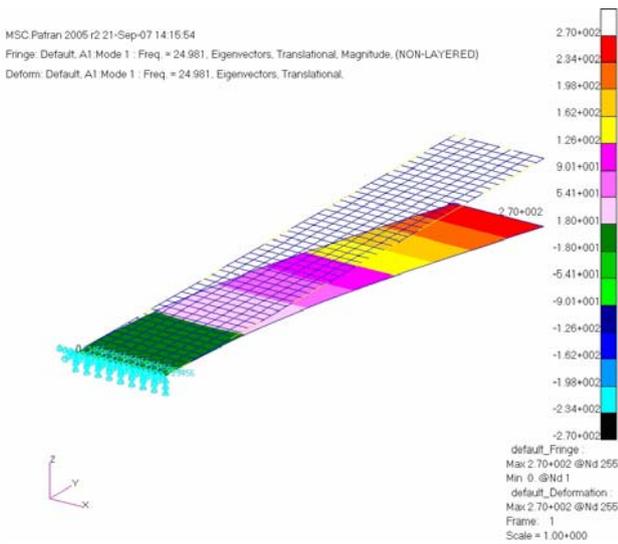


Figure 5. 1st natural frequency of IPMC actuator.

3.3 IPMC 주파수 응답 실험 결과

각 조건 및 소인 정현파 가진 형태에 따라, 시편 당 5 회에 걸쳐 주파수 응답 실험을 수행하였다. 그 결과 dry 조건에서는 거의 일정한 고유 진동수를 보였지만, hydrated 조건에서는 실험 중 대기 중에 시편이 노출됨에 따라, 시편의 상태가 dry 됨으로써 dry 상태보다 큰 오차를 보였다. 또한, 가진기에 물리는 시편의 미세한 길이 변화 등도 오차의 원인이었다. 그 값들을 표 2 로 정리해보면, 기계 가진기와 전기 가진에 의한 실험 고유 주파수에 약간의 차이를 보였지만, 큰 차이는 아니었다. 매 실험에서 그 주파수 근방에서 1 차 공진이 발생함을 실험적으로 확인 할 수 있었다.

앞 절에서 찾은 IPMC 의 물성치를 이용하여, 백금의 영계수를 바꿔가면서, 실험값과 유사한 해석 고유진동수를 찾아보았다. 그 결과 백금의 영계수가 약 6GPa 에서 그 상대 오차를 15% 내외로 최소가 됨을 찾을 수 있었다. 이 물성치를 적용하여 다자유 움직임이 가능한 패턴된 IPMC 의 진동 특성을 분석해보았다.

Table 2. Experimental and simulated natural frequency.

Condition	Thickness (μm)		Natural Frequency (Hz)		Relative Error (%)
	IPMC	Nafion	FEM	shaker/ Electrical excitation	
Dry	187	181	27.07	30.45 /31.4	-12.4 /-15.9
Hydrated	208	202	24.9	19.26 /21.2	22.6 /14.8

4. 패턴된 IPMC 의 진동 특성

다자유 움직임이 가능하도록, 2.2 절에서 제시한 대로 IPMC 작동기를 패터닝 할 수 있다. 이 절에서는 구체적인 실제 제작에 앞서, 시뮬레이션을 통해 작동기의 진동 특성을 예측해보고자 한다. MSC PATRAN 을 이용하여 패턴된 IPMC 를 모델링하고, MSC NASTRAN 이용하여 고유진동수를 찾는 normal mode 해석(그림 6)과 하중에 따른 변형량을 찾는 linear analysis 를 수행하였다. Linear analysis 시에는 4mN/mm 의 분포하중 및 분포 모멘트를 패치 전면에 적용하였다. 또한, 패턴된 작동기 구동부의 세 패치에 쌓이는 백금의 양을 3 μm 로 동일하게 한 것과, 각 패치를 전기도금 방법 [9]을 통해 선택 성장시키는 방법으로 두께를 달리하여 고유진동수와 변형량을 비교해 보았다. 2, 3 번 패치의 백금층 두께가 증가함에 따라, 고유 진동수는 커졌고, 반면 끝단의 변형량은 감소하였다.

Table 3. Normal mode and Linear Analysis of patterned IPMC actuator.

Condition	Thickness of Pt at patch 2,3 (μm)	Normal mode Analysis		Linear Analysis
		1 st Freq.	2 nd Freq.	Displacement (mm)
Hydrated	3	6.429	32.398	2.32
	6	8.072	40.396	1.22
	9	9.106	45.173	0.816
Dry	3	9.510	47.61	1.20
	6	11.075	55.574	0.71
	9	12.104	60.734	0.50

참고문헌

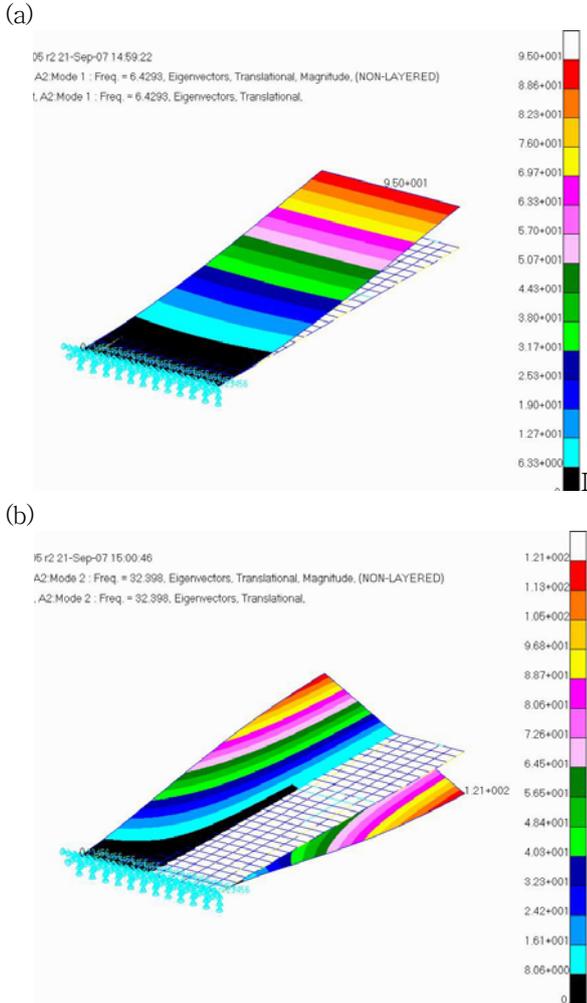


Figure 6. Mode shape of Patterned IPMC Actuator
(a) 1st mode shape, 2nd mode shape.

5. 결론

본 연구를 통해서 간단하고 직관적인 방법으로 IPMC 작동기를 모델링하여 FEM 해석을 수행하였다. 작동기에 적층된 백금의 적절한 물성치를 찾기 위해, 단순 시편의 주파수 응답을 실험값과 해석값을 비교하여 찾았다. 그 결과를 이용하여 다자유 움직임이 가능한 패턴된 IPMC 작동기의 mode shape를 살펴보고, 구동부의 전면에 분포 하중 및 분포 모멘트를 적용하여 변형량 해석을 수행하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구(R01-2005-000-10848-0(2005))의 연구비 지원에 의한 연구 결과입니다.

- (1) Oguro, K., Asaka, K. and Takenaka, H., 1993, "Actuator Element", US Patent Specification 5,268,082.
- (2) Nemat-Nasser, S., 2002, "Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites", Journal of Applied Physics, Vol. 92, no. 5, pp. 2899-2915.
- (3) Lee, S.K., Park, H.C. and Kim, K.J., 2005, "Equivalent modeling for ionic polymer-metal composite actuators based on beam theories", Smart materials and structures, Vol. 14, no. 6, pp. 1363-1368.
- (4) Kim, H.I., Kim, D.K., Han, J.H., 2007, "A study on mechanical properties of IPMC actuators", Journal of the Korean society for composite materials, Vol.20, no.3, pp. 44-48.
- (5) Sfakiotakis, M., Lane, D.M. and Davies, J.B.C., 1997, "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24, Issue 2, pp.237-252.
- (6) MSC, MSC/NASTRAN User's Guide, 2001.
- (7) Siripong, M., Fredholm, S., Nguyen, Q., Shih, B., Itescu, J. and Stolk, J., 2006, "A cost-effective fabrication method for ionic polymer-metal composites", Electroresponsive Polymers and Their Applications (MRS Symp. Proc. vol 889), pp. 0889-W04-03.
- (8) Kim, K.J., Shaninpoor, M., 2003, "Ionic polymer-metal composites: II. Manufacturing techniques", Smart materials and structures, Vol. 12, pp. 65-79.
- (9) Jeon, J.H., Oh, I.K., 2006, "과동형 움직임이 가능한 다자유 IPMC 구동기 제작", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.119-123.