

# 선택적으로 성장 시킨 다중 전극판을 갖는 다자유 IPMC 작동기

## MDOF Ionic-Polymer-Metal-Composite Actuators with Selectively Grown Multiple Electrodes

전진한\*·오일권†  
Jeon Jin Han and Oh Il Kwon

**Key Words** : IPMC actuator(이온성 고분자 금속 복합체 작동기), Multiple electrode (다중 전극판), Selective growth (선택적 성장), Electroplating (전기도금).

### ABSTRACT

The ionic polymer-metal composite actuators with selectively grown multiple electrodes were developed to mimic the swimming locomotion of a fish. The developed method is based on combining electroplating with the electroless chemical reduction using the patterned mask. The advantages of this fabrication method are that the initial compositing between the polymer and platinum particles can be assured by the chemical reduction method, and the thickness of each electrode can be controlled easily and rapidly by electroplating. By using the fabricated actuator with a multiple degree of freedom, the oscillatory wave of the flexible membrane actuator was generated and a twisting motion was also realized to verify the possibility of mimicking the fish-like locomotion. The frequency response function was analyzed to investigate the natural frequency and the damping factor by a mechanical shaker and direct electrical excitation through the swept-sine method. Present results show that this novel method can be a promising technique to easily pattern each of multiple electrodes and to implement the biomimetic motion of the polymer actuators with good mechanical bending performance.

## 1. 서론

최근 들어, 인공 근육, 의료 장비, 초소형 로봇, 생체모방학 등에 요구되는 새로운 센서 및 작동기의 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히, 전기장 하에서 형상의 변화가 일어나는 전기활성고분자(Electro-Active Polymer)에 대한 관심이 집중되고 있다. 이 중 IPMC 는 나피온과 같은 이온 교환 고분자 막에 금 또는 백금이 적층된 구조로, 대변형을 하며, 가볍고, 소모 전력이 작으며, 생체적합성이 뛰어나다 [1].

무전해 도금 과정 중, 1 차 도금 과정은 고분자의 두께 방향으로 금속을 적층시키는 과정으로, 고분자-금속 복합층 사이의 접착력을 향상시키고, 작동기의 전기 전도도 및 기계적 성능에 영향을 미치는 중요한 성능 변수이다. 그러나 이 과정은 복잡한 제작 공정으로 인해, 작동기 성능의 재현성 등을 유지하는데 한계를 가지고 있다. Salehpoor 등 [2]이 PVD, 무전해 도금, 전기 도금 등을 언급하였지만 확실한 성능 개선은 보고되지 않았다.

선행 연구를 기반으로 [3, 4, 5], 본 연구에서는 전극판을 전체적으로 무전해 도금을 통해 성장시킨 후, 다중 전극판을 선택적으로 추가 적층시킴으로써, 작동기의 기계적 물성치를 향상 시켰고, 굽힘 및 비틀림과 같은 생체 모방 움직임의 성능을 개선하였다.

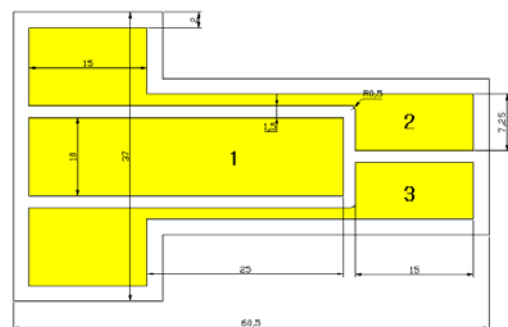
## 2. 다중 전극판 제작

### 2.1 다중 전극판의 개념

생체모방공학 관점에서, 물고기의 움직임은 물속이나 혈관 속과 같은 환경에서 유영해야 되는 마이크로 로봇과 같은 소형 로봇의 구동 방법의 해결책을 제시해 줄 수가 있다. 이 관점에서 볼 때, IPMC 의 젖은(wet) 타입 및 대변형 작동기라는 장점을 적용할 수 있도록, 다중 전극판 개념을 도입하였다.

### 2.2 다중 전극판의 디자인

IPMC 의 전극 표면에 패터닝을 하여 다자유 움직임을 구현될 수 있도록, Fig. 1 과 같이 작동기를 디자인 하였다. 패턴은 좌측의 구동 전압 인가부와 우측의 구동부로 나누어 진다. 특히, 구동부는 진동형 및 비틀림 움직임을 고려하여, 3 개의 독립적인 세부 패치로 구성하였다.



294 Fig. 1 A pattern design of multiple electrodes of IPMC actuator

† 책임저자 : 전남대학교 기계시스템공학부 조교수  
E-mail : ikoh@chonnam.ac.kr  
Tel : (062) 530-1685, Fax : (062) 530-1689  
\* 정희원, 전남대학교 기계공학과 대학원

### 2.3 선택적 성장 기법

우선, 무전해 도금 과정을 통해, 이온성 고분자와 금속 전극층 사이의 복합체 층을 형성하였다. 다음 공정으로, Table 1에 언급된 전기 도금 조건 하에서, Fig. 1과 같이 패터닝 된 시편의 패치 1을 선택적으로 추가 적층하였다.

**Table 1** Operating conditions of electroplating

Electroplating Operating Conditions	
Plating bath	2.5% Hexachloroplatinic acid plating solution [H <sub>2</sub> PtCl <sub>6</sub> , 20g/L]
Temperature, °C	30
Agitation	Mechanical stirring system
General current density range	0.1 ~ 1 A/dm <sup>2</sup> [6]
Anode electrode	Titanium expanded mesh plate coated by Platinum
Proper current density	0.58A/dm <sup>2</sup> [4]

Fig. 2는 선택적 성장이 끝난 시편을 보여준다. 패치 1에만 전류를 인가하여, 전기도금을 수행하였다. 2번 패치의 경우는 전기도금이 되지 않고, 무전해 도금만 되어 있는 상태로, 약 203~208 μm의 두께를 유지하였다. 또한, 3번 패치의 경우는 절연 라인이 완벽하지 못하여, 얇게 도금이 되었지만, 두께의 변화는 크게 없었다. 반면, 1번 패치는, 부분적으로 약 239~241 μm까지 전극층이 성장하였다.



**Fig. 2** IPMC with selectively grown multiple electrodes

### 3. IPMC의 주파수 응답 실험

고유 진동수는 IPMC와 같은 굽힘 작동기의 기계적 특성을 잘 표현할 수 있다. 따라서 본 절에서는 가진기(shaker)를 통한 기계적 가진과 작동기를 소인 정현파 신호로 직접 전기적으로 가진시켜서, 주파수 응답 함수를 구하였다.

### 3.1 실험 방법 및 조건

기본적으로, 수화된 IPMC 작동기의 변위는 마른 상태보다 훨씬 크다. 따라서, IPMC의 수화된 정도는 작동기의 굽힘 성능에 중요한 역할을 한다. 주파수 응답 실험도 다음과 같이 두 가지 조건하에서 수행하였다.

마른 조건은 시편을 50%의 상대습도 및 23°C의 온도 조건하의 항온 항습조에 1시간 동안 보관한 것을 기준으로 하였다. 반면, 수화된 조건은 시편을 만나질 이상 동안 증류수에 담가둔 것을 기준으로 하였다. 이러한 조건하에서, 무전해 도금만 된 시편과 전기 도금한 시편의 공진주파수 및 감쇠 계수를 찾아 보았다.

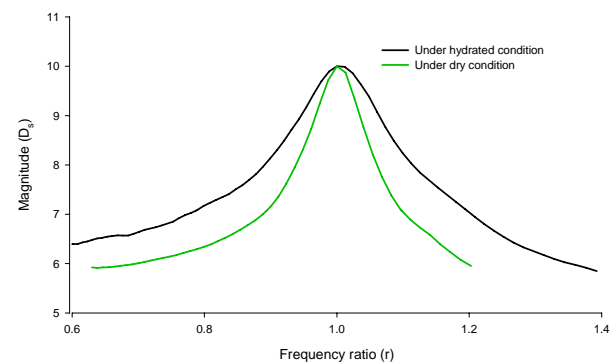
### 3.2 모달 물성치

감쇠계수는 Half-power 방법[7]에 의해 구해졌다. 그 과정은 식 1과 같이 간단하며,

$$\zeta = \frac{r_2 - r_1}{2}, \zeta \ll 1 \quad (1)$$

여기서,  $\zeta$ 는 감쇠계수를,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 공진 주파수 대비 주파수 비를 의미한다. 공진 주파수 전, 후에서 공진 응답 크기의  $\sqrt{2}/2$  배가 되는 점을 half-power 점이라고 하고, 이때,  $r_1$ 과  $r_2$ 를 이용하여 감쇠계수를 구할 수 있다.

Fig. 3은 1번 패치에 전기도금을 한 후, 마른 및 수화된 상태에서 주파수 응답 함수를 구한 것이다. 각각의 공진 주파수는 Table 2에 언급된 것과 같이 각각, 27.09, 11.16 Hz가 측정되었다. 또한, 감쇠 계수는 그림을 살펴보면, 마른 상태에서 주파수 비의 크기가 줄어들음을 알 수 있다. 즉, 수화된 상태에서 마른 상태로 변하게 되면, 작동기의 공진 주파수가 증가하고, 감쇠 계수는 줄어들어서, 재료의 기계적 강성이 증가함을 알 수 있다.

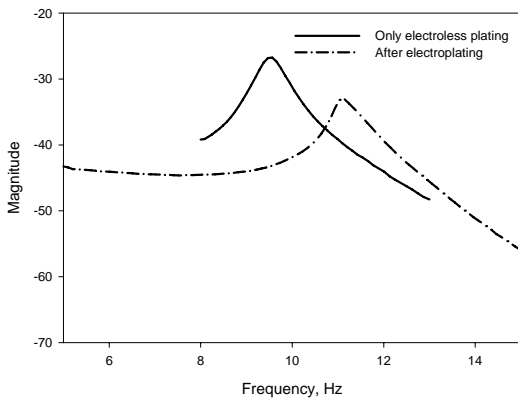


**Fig. 3** Half-power points curves by the Half-power method

Table 2 에서 수화된 상태에서 기계적 가진을 한 결과를 살펴보면, 전기도금을 통하여 백금 층이 증가하였고, 이로 인해, 공진 주파수가 증가하고, 감쇠 계수는 줄어들을 알 수 있다. Fig. 4 는 수화된 상태에서 기계적 가진에 의해 구해진, 도금 전과 후 패턴된 작동기의 주파수 응답 함수이다.

**Table 2** Natural frequency and damping factor for the patterned IPMC

Condition		Only electroless plating (Thickness of the patch 1: 203~208 $\mu\text{m}$ )		After electroplating (Thickness of the patch 1 Max. 239~241 $\mu\text{m}$ partially plated)	
		Natural frequency (Hz)	Damping factor	Natural frequency (Hz)	Damping factor
Electrical excitation	Hydrated	9.60	0.4074	10.76	-
	Dry	21.44	0.0857	27.09	-
Shaker excitation	Hydrated	9.13	0.1456	11.16	0.1103

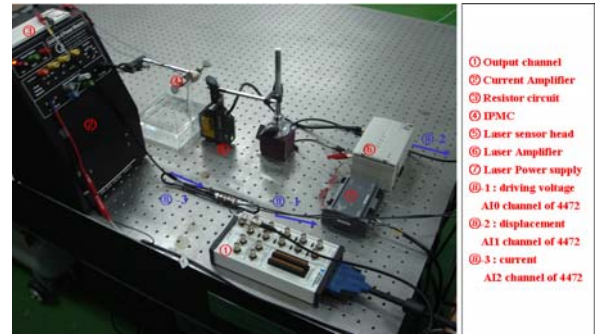


**Fig. 4** Frequency response curves under hydrated condition

## 4. 성능 실험

### 4.1 실험 장비 설치

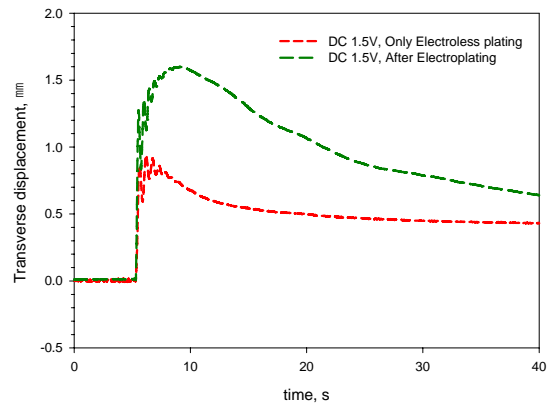
횡방향 끝 단 변위 측정과 전체 움직임의 형태를 살피기 위한 비전 센싱(vision sensing) 시스템이 통합된 실험 장비를 꾸렸다. 전체 측정 시스템은 Fig. 5 과 같다. 입력 신호는 BNC-2210 터미널에 연결된 NI-PXI 6733 보드에 의해 생성되고, 전류 앰프(UPM 1503)를 거쳐 다자유 IPMC 구동기에 전달된다. 그리고, PXI-4472 와 CCD 레이저 변위 센서(LK 301)가 끝 단 변위 측정에 사용되고, PXI 1409 이미지 획득 보드와 CCD 카메라(XC-HR 50)를 비전 센싱(vision sensing)에 사용하였다.



**Fig. 5** The integrated experimental setup for measurement of transverse displacement and total movement shape of patterned IPMC

### 4.2 DC 가진 하에서 성능 비교

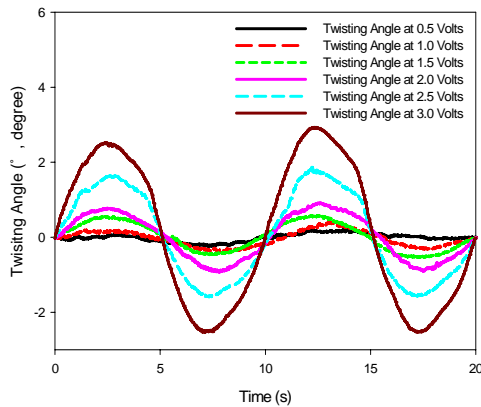
Fig. 6 은 1.5V 의 직류 전압에 대한 작동기의 끝 단 변위의 변화를 보여준다. 패치 1 즉, 시편의 루트(root) 부분이 도금 됨으로써 성능이 1.5 배 증가하였다.



**Fig. 6** Tip displacement of the patterned IPMC under constant step excitation 1.5V

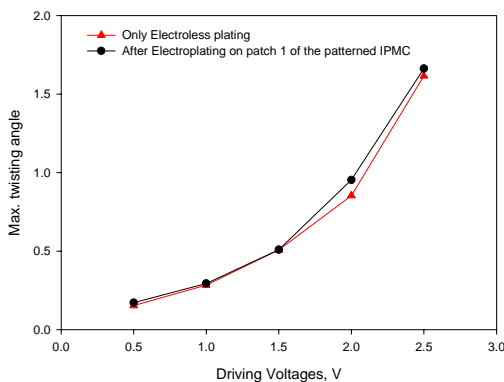
### 4.3 비틀림과 굽힘 실험 결과

비틀림 움직임을 구현하기 위하여, 패치 2, 3 에 반대 위상의 신호를 인가하였다. 레이저 변위계를 두 개 사용하여[5], 시간에 따른 비틀림 각의 변화를 Fig. 7 과 같이 표현하였다. 같은 주파수에서 인가 전압이 커짐에 따라, 비틀림 각도 커짐을 확인하였다. 또한, 3 볼트에서의 비틀림 각은 1 볼트의 비틀림 각보다 약 5 배 정도 컸다.



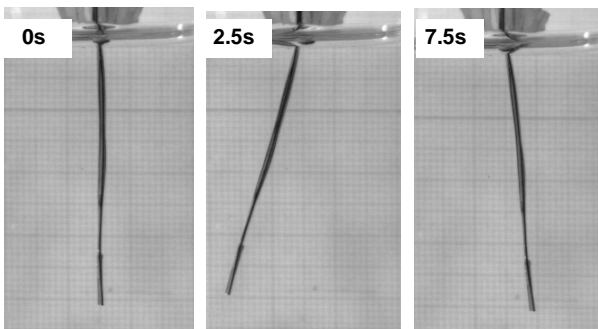
**Fig. 7** Twisting angles history according to different maximum voltages with harmonic excitation,  $A \cdot \sin(2\pi \cdot 0.1 \cdot t)$

전기도금을 한 경우는, 패터닝 구동기의 패치 1 만 도금을 하였기 때문에, 패치 2, 3 만 구동하는 비틀림 모션은 전기 도금 전후로 움직임의 큰 차이를 보이지 않을 것으로 예측 되었고, 실험 결과 Fig. 8 와 같이 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

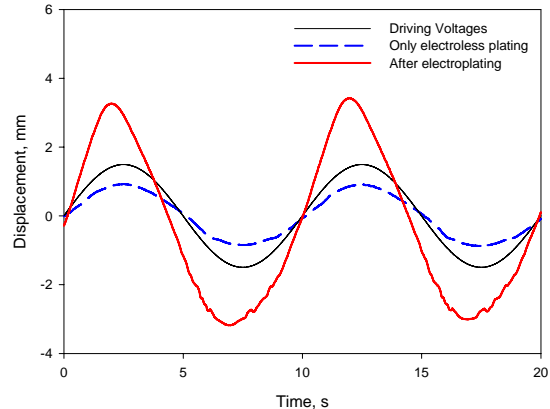


**Fig. 8** Maximum twisting angles under harmonic excitation

Fig. 9 은 순수 굽힘 실험의 결과로, 1, 2, 3 패치에 동일 위상을 인가하여 실험을 수행하였다. Fig. 10 에서, 도금 전과 후 굽힘 움직임의 변위 크기를 비교해 보았고, 그 결과 도금된 경우에서 좀 더 좋은 굽힘 성능을 보였다.



**Fig. 9** Pure bending motion generation using patterned IPMC actuator under harmonic excitation of  $3 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.1 \cdot t)$



**Fig. 10** Comparison of tip transverse displacement under driving voltage of  $1.5 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.1 \cdot t)$

## 5. 결 론

본 연구를 통해서 선택적으로 성장 시킨 다중 전극관을 갖는 다자유도 IPMC 작동기를 제작하고 성능을 평가하였다. 생체 모방 움직임이 가능한 작동기로써의 성능 평가를 위하여 주파수 응답 실험, 직류전압 및 비틀림, 굽힘 실험을 수행하였다. 패터닝 작동기에 도금을 통해, 공진주파수가 증가하였고, 이는 작동기의 작동 주파수 밴드의 증가를 의미하며, 비틀림 및 굽힘 성능도 향상되었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (1) Oguro, K., Asaka, K. and Takenaka, H., 1993, "Actuator Element", US Patent Specification 5,268,082.
- (2) Salehpoor, K., Shahinpoor, M. and Razani, A., 1998, "Role of Ion Transport in Actuation of IPMC Artificial Muscles", SPIE Smart Structures and Materials, Vol. 3330, pp. 50-58.
- (3) Oh, I. K., Jeon, J. H. and Lee, Y. G., 2006, "Multiple electrode patterning of ionic polymer metal composite actuators", SPIE Smart Structures and Materials, Vol. 6168, pp. 286-293.
- (4) Jeon, J. H. and Oh, I. K., 2006, "Fabrication of MDOF IPMC Actuators to Generate Undulatory Motion", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp.119-123.
- (5) Jeon, J. H., Yeom, S. W. and Oh, I. K., 2007, "Fabrication and actuation of ionic polymer metal

composites patterned by combining electroplating with electroless plating”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, In Press, Corrected Proof, Available online 8 August 2007.

(6) Morrissey, R. J., 2001, “ Platinum plating” , *Metal Finishing*, Vol. 99, Supplement 1, pp. 291.

(7) Craig, R. R., 1981, *STRUCTURAL DYNAMICS An Introduction to Computer Methods*, John Wiley & Sons, Inc, New York.