

## 論文

## IPMC 작동기의 기계적 물성에 관한 연구

김홍일\*, 김대관\*, 한재흥\*\*

## A Study on Mechanical Properties of IPMC actuators

Hong Il Kim\*, Dae Kwan Kim\*, Jae-Hung Han\*\*

## ABSTRACT

The Ionic Polymer Metal Composite (IPMC), an electro-active polymer, has many advantages including bending actuation, low weight, low power consumption, and flexibility. These advantages coincide with the requirements of a bio-related application. Thus, IPMC is promising materials for bio-mimetic actuator and sensor applications. Before applying IPMC to actual application, basic mechanical properties of IPMC should be studied in order to utilize IPMC for practical uses. Therefore, IPMCs are fabricated to investigate the mechanical characteristics. Nafion is used as a base ionic polymer. Nafion samples cast with various thicknesses are used to test the thickness effects of IPMC. Subsequently, IPMC is fabricated using the chemical reduction method. The deformation, blocking force and frequency response of the IPMC actuator are important properties. In this present study, the performances of the IPMC actuators, including the deformation, blocking force and natural frequency, are then obtained according to only the input voltage and IPMC dimensions. Finally, the empirical performance model and the equivalent stiffness model of the IPMC actuator are established using experiments results.

## 초 록

본 연구에서는 IPMC의 기본적인 기계적 특성을 알아보았다. 기전폴리머의 한 종류인 IPMC는 굽힘형 작동, 가벼움, 저전력 소모, 유연성 등의 많은 장점을 가진 재료이다. 따라서 IPMC는 생체모방형 작동기와 센서로서 많은 가능성을 가지고 있다. 이런 가능성을 바탕으로 IPMC를 실제로 응용하기 위하여 IPMC의 변형, 구동력, 주파수 응답 등 기본적인 기계적 특성을 연구하였다. 우선 이온교환폴리머의 한 종류인 네피온 용액을 사용하여 여러 가지 두께의 네피온 막을 만들고, 무전해 도금을 통해 IPMC를 제작하였다. 이렇게 제작된 IPMC의 규격, 인가 전압에 따른 변형, 구동력, 주파수 응답 특성에 관한 실험을 수행하고, 실험 결과를 통해 IPMC 성능의 실험식과 등가 강성 모델을 수립하였다.

**Key Words** : 기전폴리머(Electro-active Polymer), IPMC(Ionic Polymer Metal Composite), 네피온(Nafion), 변형(Deformation), 구동력(Blocking Force), 주파수 응답(Frequency Response)

## 1. 서 론

EAP (Electric Active Polymer)의 한 종류인 IPMC (Ionic Polymer Metal Composite)는 작동변위가 매우 크며, 가볍고, 소

모 전력이 작아 소형화에 유리하며, 특히 물에 대한 친화력이 좋아 생체 적합성이 뛰어난 재료이다. 따라서 IPMC를 생체 모방형 작동기로 사용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. IPMC는 이온교환폴리머 (Ionomer)의 양 표면에 전극이 결합된

\* 한국과학기술원 기계항공시스템학부 항공우주공학전공 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계항공시스템학부 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:jaehunghan@kaist.ac.kr)

형태를 갖는 복합재료이다[1]. 그리고 IPMC는 젖은 상태에서 전기적 자극을 받아서 작동을 하기 때문에 기계적, 전기적, 화학적 성질이 결합된 상당히 복잡한 작동 특성을 가진 재료이다 [2]. 현재 IPMC의 기계적, 전기적, 화학적 특성과 IPMC 모델링에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. IPMC의 작동은 미시적 관점으로 수화된 양이온의 이동 현상으로 모델링 하고 있다 [3]. 한편 IPMC를 실제 작동기로 적용하기 위해 변위나 구동력 등에 관한 실험을 수행하여 실험식을 구하고, 실험 결과를 이용하여 등가 강성을 구하고, FEM 모델을 수립하기도 한다 [4]. 이런 연구 결과를 바탕으로 IPMC를 이용한 플래핑 날개를 제작하거나, 소형 펌프를 구현하기도 하였다[5,6].

본 연구에서는 캐스팅 방법을 통해 제작된 네피온을 이용하여 다양한 규격을 가지는 IPMC를 제작하고, 성능 실험을 수행하여 구동력과 1차 고유 진동수에 대한 실험식을 수립하였다. 또한 IPMC의 등가 강성을 예측하고 구조적 특성을 고찰하였다.

## 2. IPMC의 작동 원리 및 제작

### 2.1 IPMC의 작동 원리

IPMC는 내부에서 이온과 물이 자유롭게 움직일 수 있는 네피온(Nafion)등의 이온교환폴리머와 표면전극 층으로 이뤄진 재료이다. 따라서 IPMC 내부에 존재하는 수화된 양이온은 이온교환폴리머 내부에서 자유롭게 움직일 수 있으며, IPMC의 표면전극 층에 전압을 가하면 내부에 전기장이 발생하고, 이 전기장에 의해서 수화된 양이온이 움직이게 된다. 이러한 양이온의 이동에 의해 IPMC 내부에 밀도 변화가 생기게 되고, 이것을 상쇄하기 위해 IPMC의 음극 쪽이 팽창하게 된다. 결과적으로 IPMC는 양극 쪽으로 휘는 굽힘 변형을 하게 된다. 이 굽힘 변형을 이용하여 IPMC를 작동기로 사용하게 되며, 이때 굽힘의 크기, 형상, 구동력, 주파수 응답이 작동기로서 중요한 성능이다. IPMC의 작동 원리를 Fig. 1에 나타내었다.

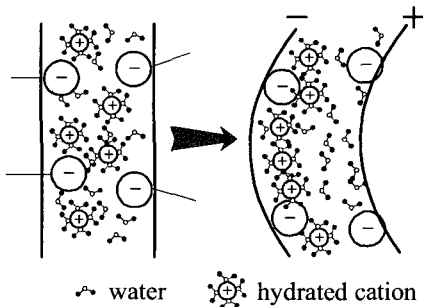


Fig. 1 IPMC의 작동 원리.

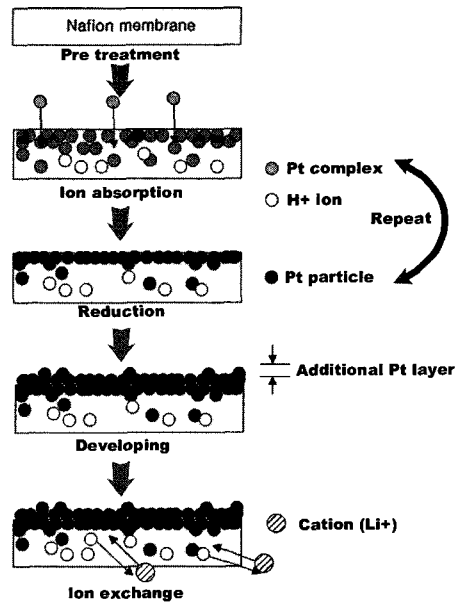


Fig. 2 IPMC 제작 과정(무전해 도금).

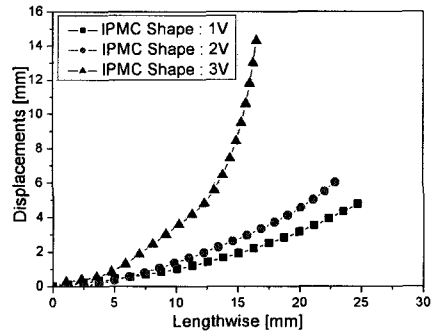


Fig. 3 IPMC 변형 형상.

### 2.2 IPMC 제작

본 연구에서는 캐스팅 방법으로 다양한 두께를 가지는 네피온을 제작하였다. 그리고 Fig. 2에 설명된 무전해 도금 방법을 이용하여 백금을 전극으로 가지는 IPMC를 제작하였다. 이렇게 제작한 IPMC 시편은 각각 변위, 구동력, 주파수 응답 등의 실험에 사용되었다.

## 3. IPMC 성능 실험

IPMC와 같은 굽힘형 작동기의 중요한 성능요소로 변형, 구동력, 그리고 주파수 응답을 들 수 있다. 따라서 본 절에서

는 이들 성능요소에 대하여 IPMC의 성능과 관련된 변수인 IPMC 시편의 규격, 인가 전압 등을 변화 시켜가면서 실험을 수행하였다.

### 3.1 변형 실험

변형 실험을 통해 인가 전압에 따른 IPMC의 변형 형상을 디지털 카메라를 이용하여 측정하고, 그 변형 형상을 데이터화 하였다. Li<sup>+</sup> 이온으로 치환된 IPMC를 각각 1V, 2V, 3V로 인가할 때의 변형 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 결과를 통해서 IPMC의 변형이 인가 전압이 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 IPMC의 변형은 인가 전압에 비선형적인 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 구동력 실험

시편 한쪽 끝을 고정시킨 후, 로드셀을 이용하여 인가 전압, IPMC 규격에 따른 구동력을 측정하였다. IPMC의 구동력 실험은 변형 실험과 마찬가지로 Li<sup>+</sup>이온으로 치환된 IPMC를 이용하여 수행되었다. Fig. 4 (a), (b), (c)의 실선은 각각 두께, 폭, 길이에 따른 IPMC의 구동력을 측정된 결과이다. 실험 결과를 통해 구동력은 IPMC두께의 제곱, 폭에 비례하고, 길이에 반비례하는 것을 알 수 있었다. 그리고 실험 결과를 정리하여 IPMC의 구동력과 규격에 관한 실험식 (1)을 구하였다.

$$F = C_1 \times \frac{wt^2}{L} [\text{gf}], C_1 : 29.18 [\text{gf}/\text{mm}^2] \quad (1)$$

여기에서  $F$ 는 구동력이고,  $w$ ,  $t$ ,  $L$ 은 각각 IPMC의 폭, 두께, 길이이다. 식 (1)을 이용하여 계산한 결과는 Fig. 4에 점선으로 표시되었다. 그리고 실선으로 표현된 실험 결과와 식 (1)을 통해 구해진 점선의 비교를 통해 식 (1)을 이용해서 IPMC의 구동력을 비교적 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 3.3 주파수 응답 실험

IPMC는 전기적 자극에 의해서 작동되는 시스템이기 때문에, 고유의 전기적 특성에 의해서 고유 진동수가 변하는지 확인할 필요가 있다. 따라서 가진기를 이용하여 측정한 IPMC 구조의 주파수 응답과 IPMC를 랜덤신호로 직접 작동시켜서 구한 주파수 응답 결과를 비교하였다(Fig. 5(a)). 그 결과 1차, 2차 고유 진동수는 거의 같은 것을 확인하였다. 따라서 IPMC의 전기적 특성은 IPMC의 1차, 2차 고유 진동수에 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한 구동력 실험과 같이 시편의 두께, 길이에 따른 주파수 응답 실험을 수행하여 시편

의 1차 고유 진동수는 두께에 비례하고, 길이 제곱에 반비례하는 것을 확인하였고, 이 결과는 외팔 보의 고유 진동수의 특성과 같은 것임을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 통해 실험식 (2)를 구하였다.

$$f = C_2 \times \frac{t}{L^2} [\text{Hz}], C_2 : 6.360 \times 10^4 [\text{Hz} \cdot \text{mm}] \quad (2)$$

여기에서  $f$ 는 1차 고유진동수이다. 구동력 실험과 마찬가지로 Fig. 5(b), (c)의 실험 결과와 계산 결과 비교를 통해 식 (2)를 이용하면, 시편의 1차 고유 진동수를 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 3.4 등가 강성을 이용한 고유 진동수 예측

복합재료의 일종인 IPMC는 Fig. 6(c)와 같이 등가 강성( $E_{eq}$ )을 가진 재료로 모사할 수 있다. 등가 강성은 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_{eq} = E_n \times \frac{I_B \times A_A}{I_A \times A_B} \quad (3)$$

여기에서  $E_n$ 은 네피온의 강성,  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $A_A$ ,  $A_B$ 는 각각 Fig. 6 (a), (b) 단면의 관성모멘트와 면적이다. 계산에 사용된 네피온의 강성은 114MPa, 백금 층의 강성은 156GPa이다. Fig. 7은 백금 층의 두께와 IPMC의 두께에 따른 IPMC의 등가 강성을 예측한 것이다. Fig. 7을 통해 두께가 0.2mm, 백금 층 두께가 10nm 내외인 일반적인 IPMC의 강성이 300MPa내외인 것을 알 수 있었다. 한편 주파수 응답 실험 결과를 통해 IPMC의 1차 고유 진동수 특성이 외팔 보 구조물의 특성과 같음을 확인할 수 있었다. 따라서 계산된 등가 강성과 외팔 보 구조물의 1차 고유 진동수 관계인 식 (4)을 이용하면, IPMC의 1차 고유 진동수를 예상할 수 있을 것이다.

$$f_1 = \frac{0.56}{L^2} \times \sqrt{\frac{E_{eq} I}{\rho A}} [\text{Hz}] \quad (4)$$

여기에서  $\rho$ 는 밀도,  $A$ 는 단면적이다. 계산에 사용된 재료의 강성은 앞에서 사용된 것과 동일하게 백금 층의 두께는 1 $\mu$ m, IPMC의 규격은 실험에 사용된 규격을 이용하였다. 이렇게 구한 1차 고유 진동수를 실험을 통해 얻은 1차 고유 진동수와 비교하였다(Fig. 8). Fig. 8의 결과를 통해 확인할 수 있듯이 등가 강성을 이용한 1차 고유 진동수 예측이 실험결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

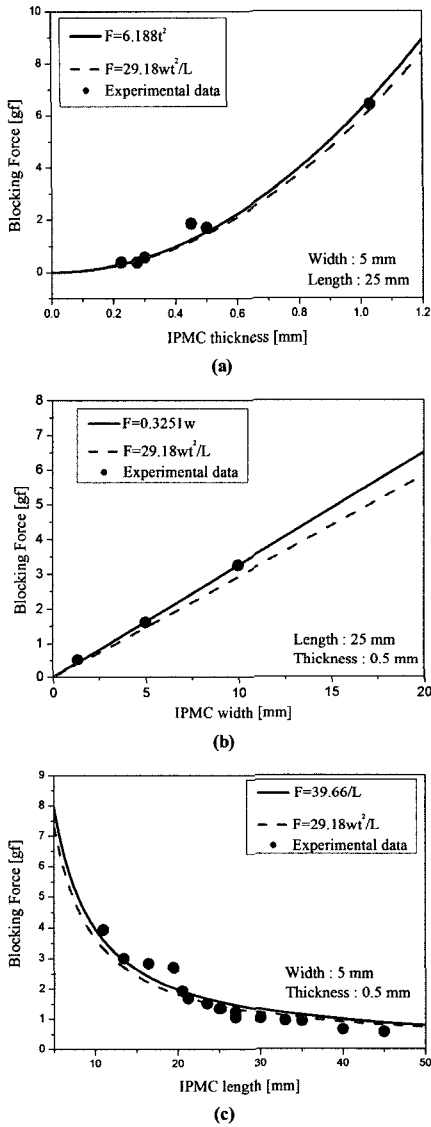


Fig. 4 IPMC 구동력 특성.

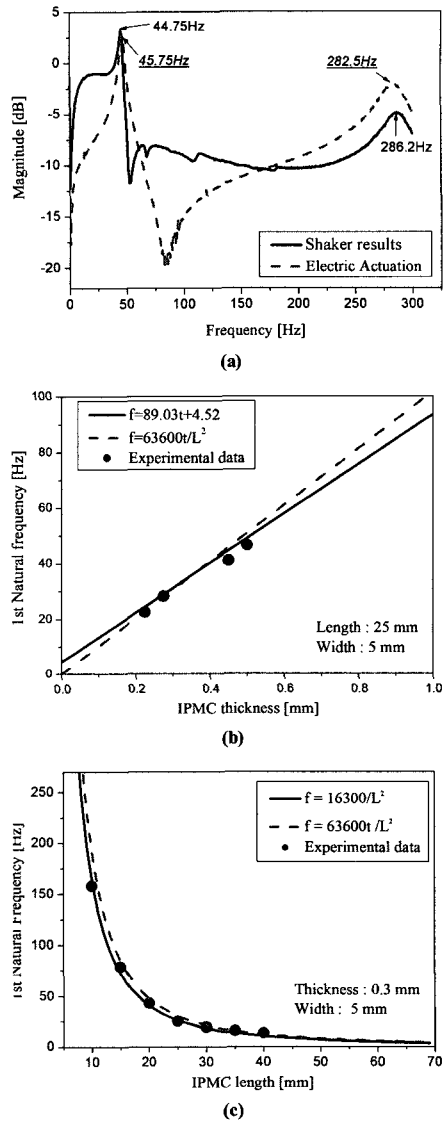


Fig. 5 IPMC 주파수 응답 실험 결과.

즉 IPMC의 규격과 백금 층의 두께를 이용하여 IPMC의 1차 고유 진동수를 충분히 정확히 예측할 수 있었다. 좀 더 정확한 백금 층의 두께를 알 수 있다면 훨씬 더 정확한 1차 고유 진동수를 예측할 수 있을 것이다. 그리고 이렇게 IPMC의 규격과 백금 층의 두께를 이용하여 구한 등가 강성은 IPMC의 1차 고유 진동수 예측 결과를 통해 충분히 타당함을 입증하였다. 따라서 IPMC 등가 강성은 1차 고유 진동수의 예측뿐만 아니라 수치 해석 모델에 사용되어, 변형, 구동력 계산에 적용될 수 있다.

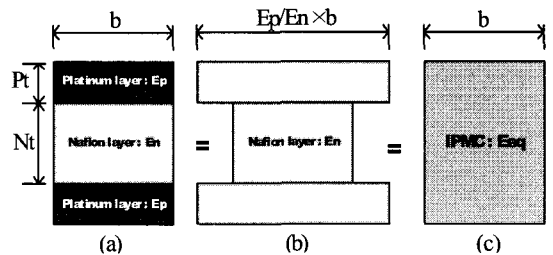


Fig. 6 IPMC 단면 단순화.

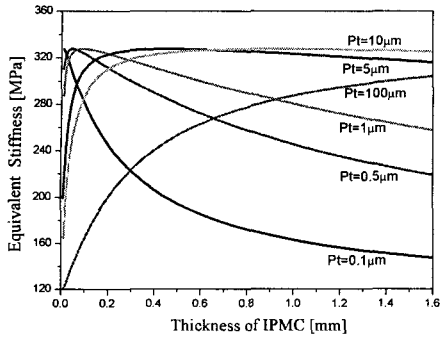


Fig. 7 IPMC 등가 강성.

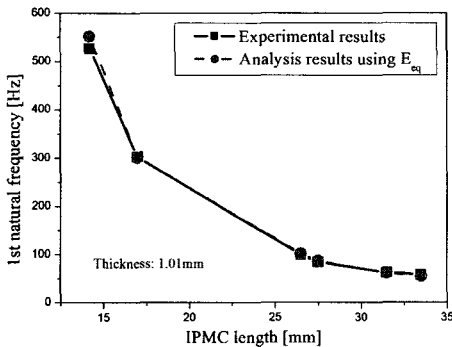


Fig. 8 등가 강성을 이용한 1차 고유 진동수 예측.

#### 4. 결론

본 연구를 통해서 캐스팅 니퍼온을 이용한 IPMC의 제작 및 실험을 수행하였다. IPMC의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 IPMC의 규격과 인가전압 등을 변화시켜가면서 변형, 구동력, 주파수 응답 실험을 수행하였다. 그 결과를 이용하여 구동력과 1차 고유 진동수에 대한 실험식을 구하였다. 그리고 IPMC의 등가 강성을 계산하여 이를 바탕으로 IPMC의 1차 고유 진동수를 예측하였다. 본 연구의 결과는 IPMC를 이용한 작동기를 설계, 제작하는데 사용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- 1) K. Oguro, K. Asaka and H. Takenaka, "Actuator Element," *US Patent specification 5,268,082*, 1993.
- 2) M. Shahinpoor and K.J. Kim, "Ionic Polymer-metal Composites: I .Fundamentals," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, 2001, pp. 819-833.
- 3) S. Tadokoro, S. Yamagami, T. Takamori and K. Oguro, "Modeling of Nafion-Pt Composite Actuators (ICPF) by Ionic Motion," *Proceeding of SPIE, Smart Structures and Materials*, Vol. 3987, 2000, pp. 92-102.
- 4) S.K. Lee, H.C. Park and K.J. Kim, "Equivalent Modeling for Ionic Polymer-metal Composite Actuators Based on Beam Theories," *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No. 6, 2005, pp. 1363-1368.
- 5) H.C. Park, K.J. Kim, S.K. Lee and Y.J. Chah, "Electro-mechanical Flapping Produced by Ionic Polymer-Metal Composites," *Proceeding of SPIE, Smart Structures and Materials*, Vol. 5385, 2004, pp. 242-248.
- 6) S.K. Lee, K.J. Kim and H.C. Park, "Design and Performance Analysis of a Novel IPMC-driven micropump," *Proceeding of SPIE, Smart Structures and Materials*, Vol. 5759, 2005, pp. 439-446.
- 7) Technical Information, "Dupont fuel cells, Safe Handling and Use of Perfluorosulfonic Acid Polymer," <http://www.dupont.com/fuelcells/pdf/dfc301.pdf>.