

# 2007年度 春季學術發表大會 論文集

日時：2007年 4月 28日(土)

場所：연세대학교 제2공학관

主 催：社團法人 韓國複合材料學會

後 援：韓國科學技術團體總聯合會

韓國學術振興財團

延世大學校 BK21나노/마이크로

응용 기계기술 인력양성 사업단



제 4 발표장		
09:00~10:40 복합재료 물성 평가 I (Composites Properties Evaluation I)		좌장: 이정주
09:00 ~09:20	섬유/입자 혼합 보강 금속복합재료의 건식 마모 거동 장준호*(POSTECH), 송정일(창원대), 한경섭(POSTECH) .....	185
09:20 ~09:40	IPMC 작동기의 기계적 물성에 관한 연구 김홍일*, 김대관, 한재홍(KAIST).....	189
09:40 ~10:00	자동차 유압브레이크용 고무호스의 내구시험 및 미세손상 발생 곽승범*, 최낙상(한양대), 임영한(화승 R&A) .....	194
10:00 ~10:20	팽창흑연/판상흑연 혼합 보강 전도성 고분자 복합재료의 전기적 기계적 특성평가 오경석*, 허성일, 윤진철(POSTECH), 송정일(창원대), 한경섭(POSTECH) .....	198
10:20 ~10:40	수분 흡수에 의한 흑연 보강 고분자 복합재료의 손상 거동 연구 윤진철*, 허성일, 오경석(POSTECH), 송정일(창원대), 한경섭(POSTECH) .....	202
10:40 ~11:00	Coffee Break	
11:00~11:40 특별강연 11:40~12:00 개 회 식		좌장: 홍순형 좌장: 박종만
13:20~15:00 복합재료 물성 평가 II (Composites Properties Evaluation II)		좌장: 김 철
13:20 ~13:40	포움-복합재료 샌드위치 구조의 주름각 변화가 압축 특성에 미치는 영향 호윤기*, 장승환(중앙대).....	206
13:40 ~14:00	금속 연속섬유 강화 Zr 계 비정질 금속복합재료의 미세조직 및 기계적 성질 이상복* (KIMM), 이규홍(POSTECH), 이상관(KIMM), 이성학(POSTECH) .....	210
14:00 ~14:20	Carbon/PPS 복합재의 Z 축 보강에 의한 기계적 특성 및 충격 특성 유연호*, 민경식, 변준형, 이진우(KIMM) .....	214
14:20 ~14:40	원형단면 콘크리트 충전 FRP 합성 압축재의 개발 주형중*, 남정훈(홍익대), 이 완(SK 건설), 윤순중(홍익대).....	218
14:40 ~15:00	겹침이음된 종방향 철근을 갖는 FRP 로 보강된 교각의 휨거동 이의중*, 곽재훈, 박주경(홍익대), 신광열(경림건설), 윤순중(홍익대).....	222
16:30~18:00 간담회 및 논문상 시상		



## IPMC 작동기의 기계적 물성에 관한 연구

김홍일\* · 김대관\* · 한재흥\*\*

## A Study on Mechanical Properties of IPMC actuators

Hong Il Kim, Dae Kwan Kim and Jae-Hung Han

**Key Words:** Nafion, IPMC, ionic polymer metal composite, deformation, blocking force, frequency response

## 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. Due to the fact that the performance of IPMC can vary with its thickness, rather than a commercial Nafion membrane, 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.

## Nomenclature

$F$ : 구동력	$w$ : 폭	$I$ : 관성모멘트
$f_1$ : 1차 고유진동수	$t$ : 두께	$\rho$ : 밀도
$E_{eq}$ : 등가 강성	$L$ : 길이	$A$ : 면적

## 1. 서론

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

\* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 항공우주공학과 부교수



FEM 모델을 수립하기도 한다 [4]. 이런 연구 결과를 바탕으로 IPMC 를 이용한 플래핑 날개를 제작하거나, 소형 펌프를 구현하기도 하였다 [5,6].

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

## 2. IPMC 의 작동 원리 및 제작

### 2.1 IPMC 의 작동 원리

IPMC 는 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, IPMC 의 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 IPMC 의 음극 쪽이 팽창하게 된다. 결과적으로 IPMC 는 양극 쪽으로 휘는 굽힘 변형을 하게 된다. 이 굽힘 변형을 이용하여 IPMC 를 작동기로 사용하게 되며, 이때 굽힘의 크기, 형상, 구동력, 주파수 응답이 작동기로서 중요한 성능이다. IPMC 의 작동 원리를 Fig. 1 에 나타내었다.

### 2.2 IPMC 제작

IPMC 의 제작은 화학적 산화-환원 반응을 기초로 수행되었다. 본 연구에서는 캐스팅 방법으로 다양한 두께를 가지는 네피온을 제작하여, IPMC 를 제작하였다. IPMC 시편은 각각 변위, 구동력, 주파수 응답 등의 실험에 사용되었다. 제작과정은 Fig. 2 에 간략히 설명되었다.

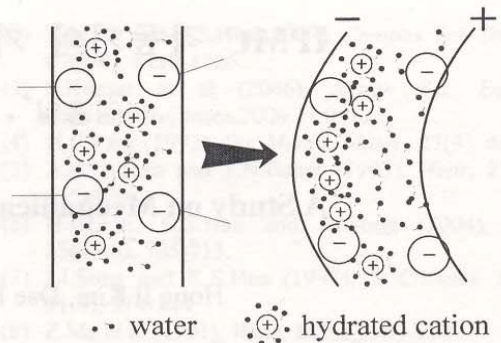


Fig. 1 IPMC 의 작동 원리

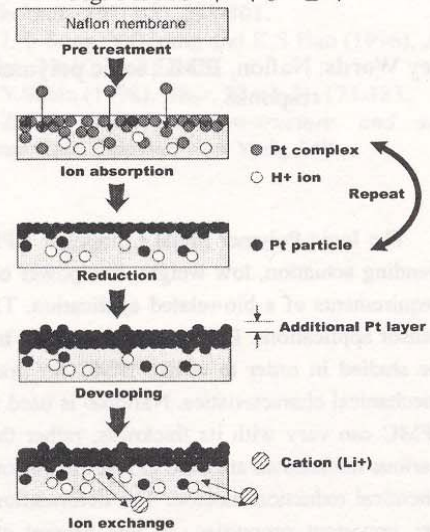


Fig. 2 IPMC 제작 과정

## 3. IPMC 성능 실험

IPMC 와 같은 굽힘형 작동기의 중요한 성능요소로 변형, 구동력, 그리고 주파수 응답을 들 수 있다. 따라서 본 절에서는 이들 성능요소에 대하여 IPMC 의 성능과 관련된 변수인 IPMC 시편의 규격, 치환된 양이온의 종류, 인가 전압 등을 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

### 3.1 변형 실험

변형 실험을 통해 인가 전압에 따른 IPMC 의 변형 형상을 디지털 카메라를 이용하여 측정하고, 그 변형 형상을 데이터화 하였다.  $Li^+$  이온으로 치환된 IPMC 를 각각 1V, 2V, 3V 로 인가할 때의 변형 형상을 Fig. 3 에 나타내었다. 결과를 통해서 IPMC 의 변형이 인가 전압이 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 IPMC 의 변형은 인가 전압에 비선형적인 것을 확인할 수 있었다.

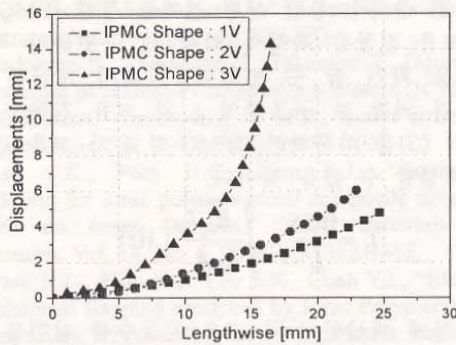


Fig. 3 IPMC 변형 형상

### 3.2 구동력 실험

시편 한쪽 끝을 고정시킨 후, 로드셀을 이용하여 인가 전압, IPMC 구극에 따른 저지력을 측정하였다. IPMC의 구동력 실험은 변형 실험과 마찬가지로  $\text{Li}^+$ 이온으로 치환된 IPMC를 이용하여 수행되었다. Fig. 4 (a), (b), (c)의 실선은 각각 두께, 폭, 길이에 따른 IPMC의 구동력을 측정한 결과이다. 실험 결과를 통해 구동력은 IPMC 두께의 제곱, 폭에 비례하고, 길이에 반비례하는 것을 알 수 있었다. 그리고 실험 결과를 정리하여 IPMC의 구동력과 구극에 관한 실험식 (1)을 구하였다.

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

식 (1)를 이용하여 계산한 결과는 Fig. 4에 점선으로 표시되었다. 그리고 실험 결과인 실선과 식 (1)를 통해 구해진 점선의 비교를 통해 식 (1)이 IPMC의 구동력을 비교적 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

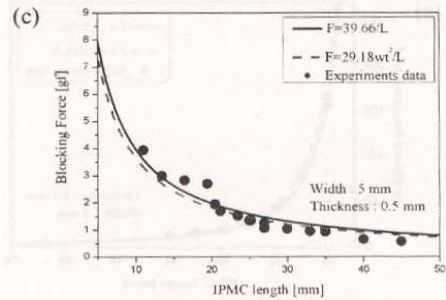
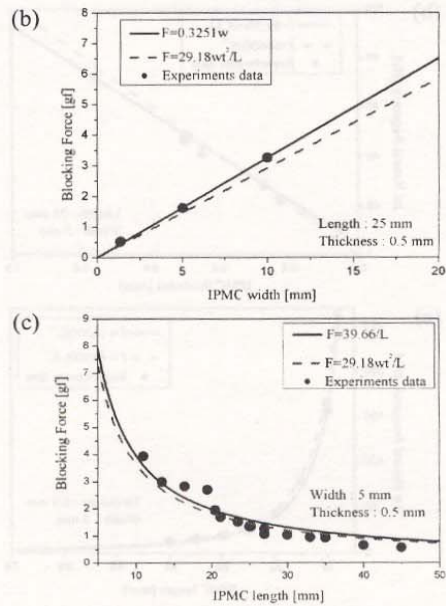
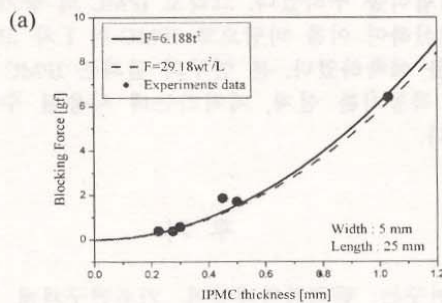


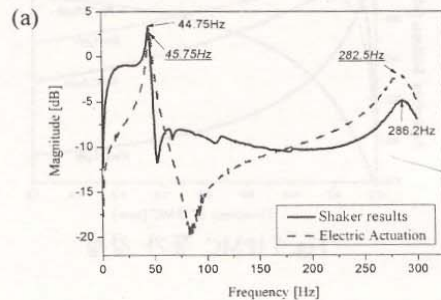
Fig. 4 IPMC 구동력 특성

### 3.3 주파수 응답 실험

IPMC는 전기적 자극에 의해서 작동되는 시스템이기 때문에, 고유의 전기적 특성에 의해서 고유 진동수가 변하는지 확인할 필요가 있다. 따라서 구조 가진과 전기 작동 각각의 주파수 응답 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 5 (a)와 같이 고유 진동수는 거의 변화가 없는 것을 확인하였다. 또한 구동력 실험과 같이 시편의 두께, 길이에 따른 주파수 응답 실험을 수행하여 시편의 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.

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

구동력 실험과 마찬가지로 Fig. 5(b), (c)의 실험 결과와 계산 결과 비교를 통해 식 (2) 또한 시편의 1차 고유 진동수를 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.





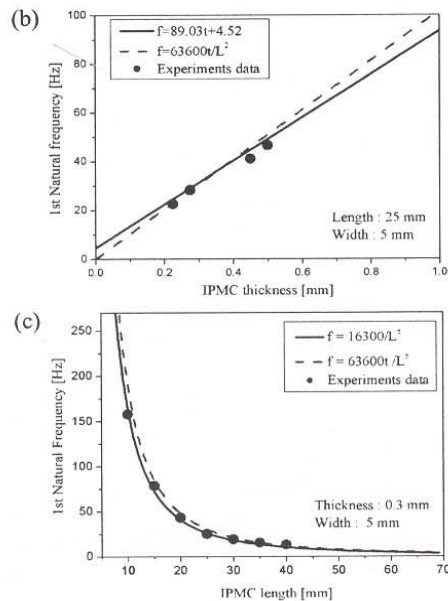


Fig. 5 IPMC 주파수 응답 실험 결과

### 3.4 등가 강성을 이용한 고유 진동수 예측

IPMC는 2개의 백금 층과 폴리머 층으로 이뤄진 복합재료이기 때문에, Fig. 6과 같이 단순화하여 등가 강성을 구할 수 있다. 이 때 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 10  $\mu$ m내외인 일반적인 IPMC의 강성이 300MPa 내외인 것을 알 수 있었다.

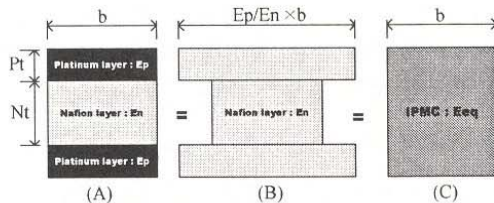


Fig. 6 IPMC 단면 단순화

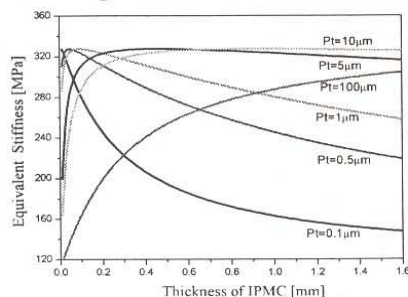


Fig. 7 IPMC 등가 강성

한편 주파수 응답 실험 결과를 통해 IPMC의 1차 고유 진동수 특성이 외팔 보 구조물의 특성과 같음을 확인 할 수 있었다. 따라서 계산된 등가 강성과 외팔 보 구조물의 1차 고유 진동수 관계인 식 (3)을 이용하면, IPMC의 1차 고유 진동수를 예상할 수 있을 것이다.

$$f_1 = \frac{0.56}{L^2} \times \sqrt{\frac{E_{eq} I}{\rho A}} \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

이렇게 계산한 1차 고유 진동수를 실험을 통해 얻은 1차 고유 진동수와 비교하였다. 계산에 사용된 재료의 강성은 앞에서 사용된 것과 동일하고, 백금 층의 두께는 1  $\mu$ m, IPMC의 규격은 실험에 사용된 규격을 이용하였다. IPMC의 등가 강성을 이용하여 1차 고유 진동수를 예측한 결과는 실험 결과와 평균 2% 정도의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 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.

## 4. 결 론

본 연구를 통해서 캐스팅 네피온을 이용한 IPMC의 제작 및 실험을 수행하였다. IPMC의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 IPMC의 규격과 양이온의 종류, 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) Oguro K., Asaka K., Takenaka, H., "Actuator element," US Patent specification 5,268,082, 1993.
- (2) Shahinpoor M., Kim K.J., "Ionic polymer-metal

- composites: I .Fundamentals,” Smart materials and structures, Vol. 10, 2001, pp. 819-833.
- (3) Tadokoro S., Yamagami S., Takamori T., Oguro K., “Modeling of Nafion-Pt composite actuators (ICPF) by ionic motion,” Proceeding of SPIE, Smart structures and materials, Vol. 3987, 2000, pp. 92-102.
- (4) Lee S.K., Park H.C., Kim K.J., “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) Park H.C., Kim K.J., Lee S.K., Chah Y.J., “Electro-mechanical flapping produced by Ionic Polymer-Metal Composites,” Proceeding of SPIE, Smart structures and materials, Vol. 5385, 2004, pp.242-248.
- (6) Lee S.K., Kim K.J., Park, H.C., “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>