

# 생체모방 물갈퀴형 IPMC 구동기 설계

김선기<sup>†</sup> · 김온아<sup>\*\*</sup> · 이승엽<sup>\*</sup>

## Biomimetic Design of IPMC Actuator having Webfoot Form

Seongi Kim, On-Ah Kim, Seung-Yop Lee

**Key Words :** IPMC(이온성 고분자 금속 복합체), Actuator(구동기), Biomimetics(생체모방공학), Webfoot(물갈퀴)

### Abstract

Ionic polymer metal composite (IPMC), one of Electro- Active Polymer (EAP) actuators, has great attention due to the low-voltage driven, large deformation and its potential for artificial muscles. In this paper, we firstly review fish swimming modes using various propulsion mechanisms. Based on study on the swimming mechanisms, we develop an underwater robot actuator which mimics fanning motion of webfoot form. It consists of four actuators fabricated by using IPMC and PDMS which mimics Bio-inspired motion. Experiments using a prototype show that the webfooted IPMC actuator generates large deformation and propulsion.

### 1. 서론

최근에 연구되고 있는 능동 폴리머를 적용한 구동기는 폴리머의 가볍고 연한 재질특성을 가지고 있다. 따라서 다양한 형태의 구동기 제작이 용이하고 저전압에서 큰 변위를 발생하여 전기 모터 등의 기존의 전통적인 구동기나 압전 구동기에서는 볼 수 없는 많은 장점을 가지고 있다.

대표적인 물질인 IPMC(Ionic polymer metal composite)는 Nafion 고분자 물질에 백금 무전해 도금법으로 제작되었다. 이것은 대변형을 일으키기 용이하며 가볍고, 소모 전력이 적다. 또한 소음이 적고 인간생체에 대한 적합성과 생물체의 움직임 모사 구동설계에 적용이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 이로 인해 의료, 군사 등 다양한 분야에서 학제간의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

자연적으로 수중 동물은 놀라운 추진 능력을 가지고 있다. 예를 들어 다랑어는 높은 속도와 추진 효율을 가지고 있고 장어는 기술적으로 좁은 영역

을 빠른 속도로 통과하는 능력을 가지고 있다. 이러한 놀라운 능력은 자연모방 연구자들에게 큰 관심을 불러일으켜 당면한 많은 추진기의 한계를 극복할 수 있도록 자극될 수 있다.

1994년 MIT에서 8개 링크로 연결된 RoboTuna를 성공적으로 개발한 이후로 많은 공학자들은 생체 공학을 기반으로 하는 수중 추진 장치를 활발히 연구하고 있다. 수중 동물 생체 모방 연구는 수중 동물의 정확한 움직임의 개념적 설계를 기초로 하여 생체 모방 공학적인 구동기를 제작하여 수행한다.

본 논문에서는 그 동안 연구가 많이 이루어지지 않았던 수중 동물의 꼬리 지느러미 부분의 움직임을 모사하기 위해 물갈퀴 모양으로 설계하고 그 구동 성능을 알아 보고자 한다.

### 2. 구동기 제작

#### 2.1 IPMC 구동원리

본 연구에서 제작된 IPMC는 Nafion에 백금을 무전해 도금하여 전극을 제작하였다. IPMC는 내부의 이온들의 이동으로 인하여 구동을 하며 이온들은 이온 수분 클러스터의 한 형태로도 존재한다. 전압을 인가하였을 때 IPMC 내부에 있던 양이온들은 양극에서 음극으로 이동하며 이 때

<sup>†</sup> 서강대학교 기계공학과

E-mail: ms6939@paran.com

TEL: (02)706-8280 FAX: (02)712-0977

\* 서강대학교 기계공학과

\*\* 서강대학교 기계공학과 대학원

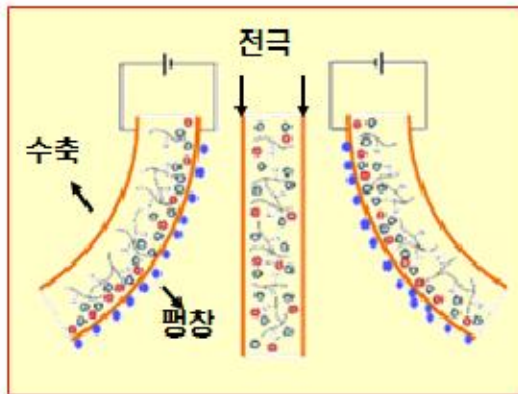


Fig.1 Mechanism of IPMC

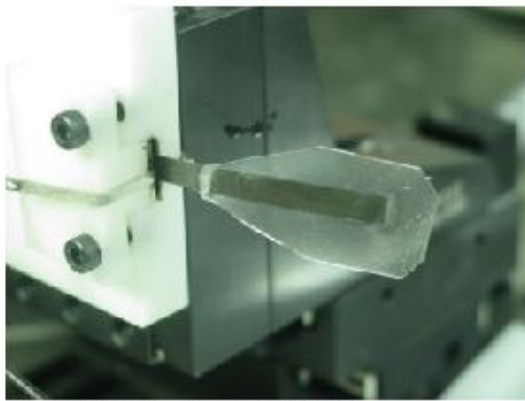


Fig.2 Fabrication of the Webfoot

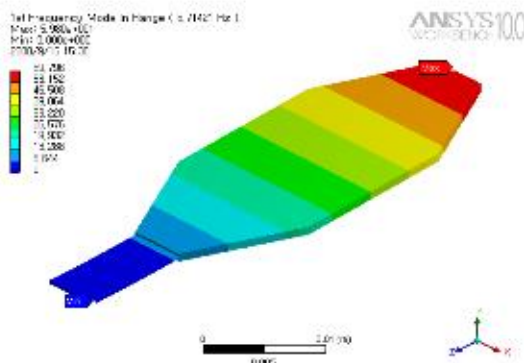


Fig.3 Analysis of the Webfoot 1<sup>st</sup> mode

클러스터를 형성한 수분들도 같이 이동을 하게 된다. 일반적으로 고분자 물질은 수분을 함유하면 팽창하는 성질을 가지고 있다. 이 결과 한 쪽 전극 부분이 팽창된 만큼 수축을 하여 체적의 변화를 일으키고, 이로 인해 구부러지는 운동을 하게 된다. 특히 이 물질은 낮은 대역의 구동전압(<math><3\text{V}</math>)에서 가장 큰 변형을 가지며 빠른 반응 조건의 대역폭을 가지고 있다.

## 2.2 물갈퀴 모양 구동기 제작

IPMC (L45mm,×W 4mm×T0.3mm)를 PDMS 에 접합하여 물갈퀴 모양 구동기를 완성하였다. 제작 시



Fig.4 Amplifier developed by driving IPMC

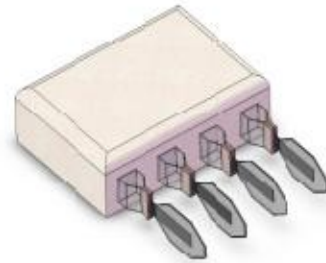


Fig.5 Design of the Webfoot Robot

IPMC 의 양면에 0.1mm 두께로 PDMS 가 고르게 코팅 되도록 제작하여 총 물갈퀴 모양 구동기 두께는 0.5mm 가 되었다.

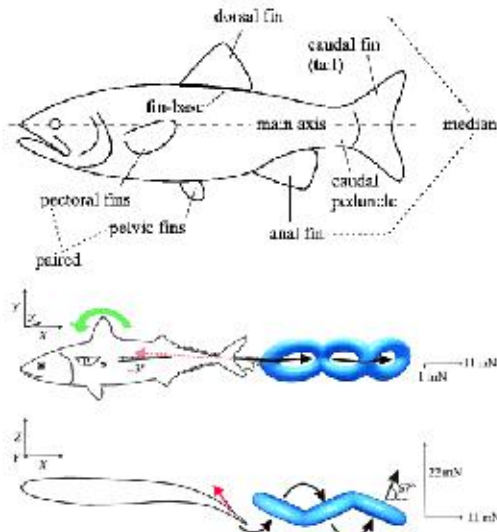
PDMS 는 IPMC 표면에 접합 강도가 뛰어나고 유연성이 우수하여 IPMC 의 움직임을 구속하지 않는다.

## 2.3 물갈퀴 구동기의 1 차 모드 해석

Ansys Workbench 해석 프로그램을 이용하여 IPMC 와 PDMS 를 결합한 물갈퀴 구동기의 1 차 모드 주파수를 Fig.3 에서 5.71Hz 로 추정하였다

## 2.4 구동을 위한 Amplifier 제작

IPMC 와 PDMS 로 이루어진 물갈퀴 모양 구동기는 구동하기 위해 3V 의 전압이 필요하다. 하지만, 전압이 3V 이상이 되면 IPMC 표면에서 물의 전기 분해가 발생하여 불필요한 전류를 발생시키고, 이것은 표면의 백금 도금 층을 파괴한다. 따라서 IPMC 는 표면의 전기저항 용량성의 문제 때문에 저주파수 영역에서 저전류(수백 mA)가 흐르도록 설계되어야 한다. 이러한 변수를 고려하여



**Fig.6** Body and fin shape of typical fish (Upward), thrust generation by fanning motion (Downward)

Fig.4 와 같이 3V 에서 150mA 를 인가하는 선형 증폭기를 OP-amp 로 구성하여 제작하였다.

### 2.5 물갈퀴 모양을 이용한 구동기 장치 제작

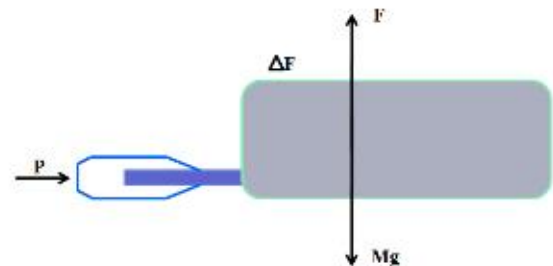
본체는 Fig.8 과 같이 스티로폼으로 제작하였고 물갈퀴 구동기에 전압을 인가할 때 IPMC 양면 전체에 고르게 전압이 공급되어야 하기 때문에 플라스틱 집게에 구리 금속을 균일하게 입혀 전극을 완성하였다. 전선을 포함한 전체 무게는 20g 이다.

## 3. 구동기 원리

### 3.1 수중 동물의 추진 운동

생체공학 이론에 따르면 대부분 수중동물은 몸체의 뒷부분 꼬리 지느러미를 강력하게 좌우로 흔드는 운동을 한다. 마치 부채로 바람을 일으키는 것과 같은 원리로 물을 뒤로 보내는 기능을 수행하여 추진력을 발생시킨다. 대표적인 예로, 물고기는 앞과 뒤가 뾰족한 방추형(fusiform)이며, 단면은 달걀형(Oval form)으로 전체적인 외형은 유선형이다. 물고기의 헤엄치는 능력은 유연한 몸체의 파동운동(Undulation)과 꼬리지느러미의 움직임으로부터 발생한다.

Fig.5 는 물고기의 몸체 형상과 꼬리 지느러미의 구동 원리를 보여준다. 꼬리지느러미(caudal fin)는 물고기의 추진력 대부분을 발생시키는 중요한 역할을 한다. 그 원리와 개념을 이해하고 꼬리부분의 파동 운동을 생체 공학적으로 모방하였다.



**Fig.7** Floating Mechanism of The webfoot device

### 3.2 물갈퀴형 구동기 원리

물갈퀴형 IPMC 구동 장치는 IPMC 에 PDMS 를 코팅하여 제작된 구동기는 본체가 스티로폼으로 구성된 것에 부착 한 형태이다. IPMC 자체는 0.3Hz 이하의 구동 주파수에서 IPMC 표면의 물 분자가 전기 분해 되어서 IPMC 표면에 작은 수포를 발생시킨다. 체적의 변화에 따라 물갈퀴 로봇의 부력도 변화한다. 물갈퀴 구동장치의 부력 원리는 Fig.7 과 식(1)과 같다.

$$P = -\frac{1}{2}C_d\rho A|V_k|V_k \quad (1)$$

$C_d$ 는 물 표면에서 물갈퀴 구동 장치의 면적(A)의 항력 계수,  $V_k$ 는 물갈퀴 구동 장치의 속도,  $\rho$ 는 물의 밀도이다. 물갈퀴 로봇의 부력은 (2)식과 같다.

$$F = \rho \times V_a \quad (2)$$

$V_a$ 는 물갈퀴 구동 장치의 총 부피이다. 무게(Mg)가 부력(F)보다 작으면 물갈퀴 구동 장치는 물 위로 뜰 것이다. IPMC 표면의 물이 전기분해 되어 발생하는 수포는 IPMC 양면에서 흡수되기 때문에 총 부피는  $\Delta v$  만큼 증가하여 부력도 이에 상응하여 증가한다.

$$\Delta F = \rho \times \Delta v \quad (3)$$

$$F = Mg - F \quad (4)$$

(4) 식은 가라 앉지 않고 물 위에 유지 됨을 나타낸다.

$$\Delta F > Mg - F \quad (5)$$

(5)식은 부력이 무게보다 높기 때문에 물 위에 떠 있을 조건이 된다.

#### 4. 구동 실험

##### 4.1 실험장치와 입력 전압과 전류

본 실험은 LC-2400A 의 비접촉식 레이저 측정기로 변위를 측정하였고 힘은 강성이 1gforce/mm 의 stainless steel bar 에 물갈퀴 모양 구동기를 구동하여 변위를 측정 계산하였다. 3V 전압을 사각파형 1Hz 부터 8Hz 까지 1Hz 간격으로 입력하였다. 특히, 1 차 공진 모드점 5.71Hz 주파수 근처 값 입력하여 물갈퀴 모양 구동기의 변위와 힘을 측정 계산하였다.

입력된 신호에 따라 작동하는 물갈퀴형 IPMC 구동기의 변위는 센서의 측정 범위의 한계로 인하여 가로 22 mm 인 지점에서 측정 하였다. Fig.9 과 Fig.10 은 물갈퀴 구동기 한 개의 시편당 입력전압과 전류파형을 나타낸다.

##### 4.2 실험 결과

주파수와 변위 및 힘 그래프 Fig.11, Fig.12 에서 나타나듯이 변위는 1 차 공진 모드점과 낮은 주파수 영역에서 크게 나타나고 힘은 주파수가 낮을수록 크게 계산되었다.

Ansys Workbench 해석을 통해 1 차 공진 모드점은 5.71 Hz 에서 발생하는 것으로 예측 되었으나 측정 실험 결과 0.54Hz 높은 6.25Hz 에서 변위 1.3mm, 힘 0.001 mgforce 으로 각각 측정되었다. 반면에 1Hz 에서 변위는 0.4mm, 힘은 0.035mgforce 로 측정되었다. 그 실험 결과 값은 Fig. 13, Fig.14 에 나타나있다. 주파수의 영향에 따른 물갈퀴 구동 범위는 1 Hz 영역에서 구동하는 것이 바람직함을 예측 할 수 있다. 또한, 물갈퀴 구동기와 비교하여 IPMC 만을 측정할 때보다 주파수와 변위가 변화된다. 이것은 PDMS 의 무게 때문에 IPMC 만의 변위와 힘 보다 작게 발생하였다. 하지만 폴리에틸렌 필름으로 제작된 물갈퀴 구동장치의 변위와 힘은 거의 발생하지 않았다. 이유는 IPMC 를 구동하는데 폴리에틸렌 필름이 큰 저항으로 작용하였기 때문이다. PDMS 는 Nafion 의 밀도와 유사하고 강성은 더 유연하여 IPMC 로 구동하는 물갈퀴 모양을 제작하는데 적합하였다. 20g 무게를 가진 물갈퀴 구동장치는 힘이 가장 크게 나타난 사각파형 1 Hz 주파수 3V 전압을 각각 4 개의 물갈퀴 모양 구동기에 인가하고 10 회 측정하여 평균

$2 \times 10^{-3}m/s$ 로 측정되었다.

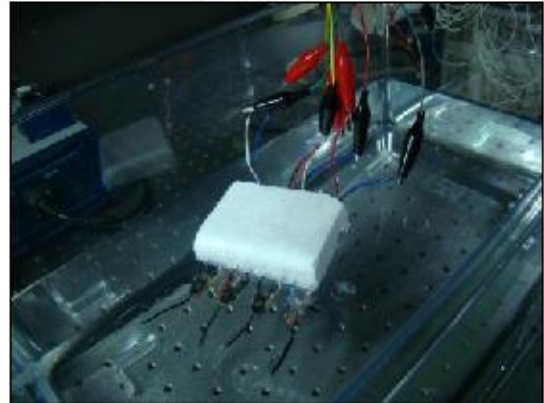


Fig. 8 Experimental Setup of Webfoot Actuator

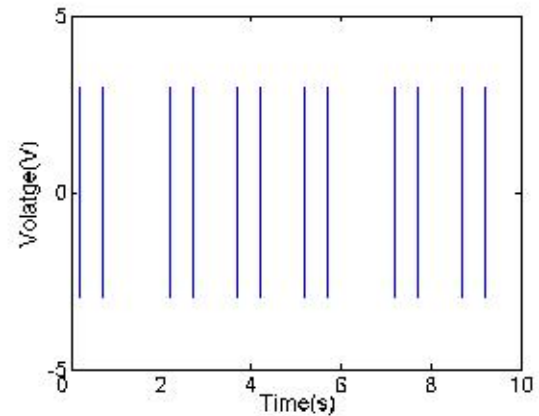


Fig. 9 Square Input Voltage (1Hz, 3V)

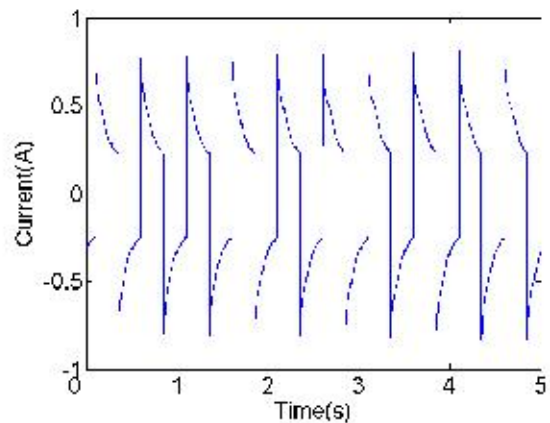


Fig. 10 Input Current of the Webfoot Actuator  
전선의 장력으로 인하여 구동 범위는 0.01m 로 한정되었다.

#### 5. 결론

본 논문은 생체 모방 공학을 이용하여 IPMC 에 PDMS 가 코팅된 물갈퀴 형태의 구동기를 제안하였다. 수중 동물의 추진 원리에 따른 구동기 성능의 우수성을 알아보았다. 더 많은 연구를 통하여 향후 군사나 의료목적의 장치 개발로 기대할 수

있을 것이다. IPMC 로 구성된 물갈퀴를 제작하여 각각 변위와 힘, 그리고 구동기 4 개를 적용하여 구동 장치의 속도를 측정하였다. 향후 물갈퀴형 구동 장치를 무선으로 구연하여 전선의 장력에 영향을 받지 않고 구동 방향을 제어하는 연구 및 실험을 수행할 예정이다. 이를 통해 좀더 정밀한 실험결과를 기대할 수 있을 것이다.

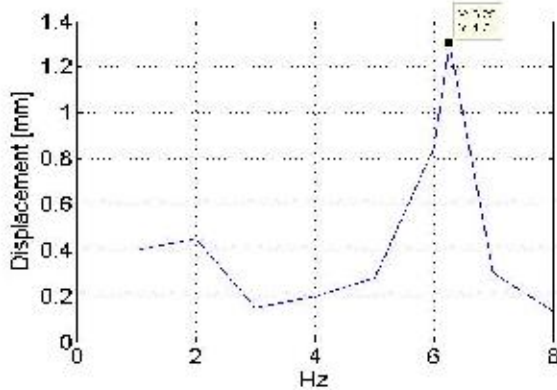


Fig.11 Displacement vs. exciting frequency.

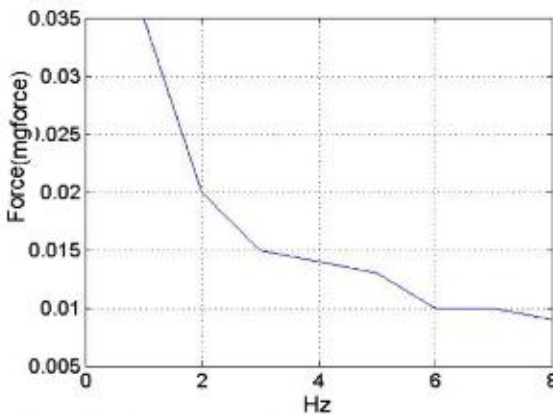


Fig.12 Force vs. exciting frequency.

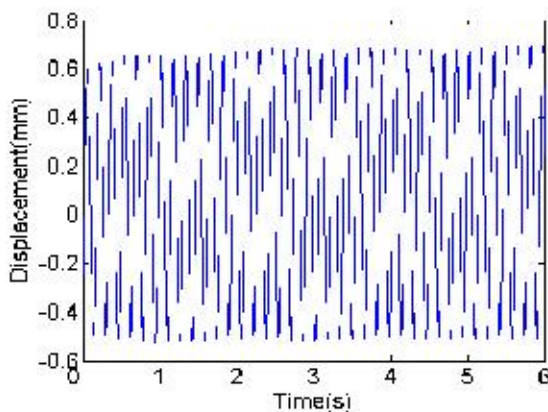


Fig. 13 Displacement of the Webfoot Actuator at 6.25Hz

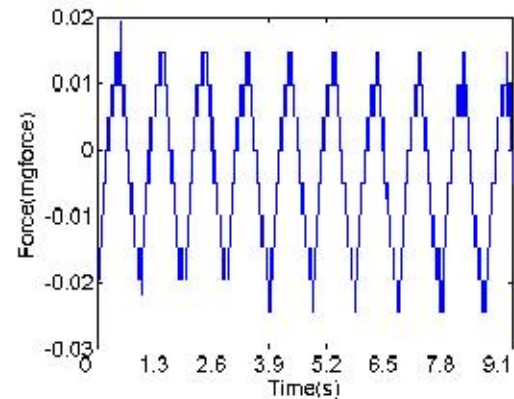


Fig. 14 Force of the Webfoot Actuator at 1Hz

## 후 기

본 연구는 서울시산학연클러스터사업(10816)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1)Guo, s.,Toshio, F., Kinji, A., 2003,"A New type ofFish-like Underwater Microrobot," *IEEE/ASME TRANSACTIONMECHAITRONICS*, Vol8,No.1,
- (2) Lee, S.j, et al, 2006"A new fabrication method for IPMC actuators and application to artificial fingers," *SMART MATRAIAL AND STRUCTURES*,Vol.15,1217-1224
- (3)Mohsen Shahinpoor and Kwang J Kim,2005,"Ionic polymer-metal composites:IV. Industrial and medical applications," *Smart Mater. Struct.*,Vol. 14,p.197--214
- (4)Fish, fE.and Lauder, G. V., 2006,"Passive and Active low Control by Swimming Fishs and Mammals," *Annual Review of Fluids Mechnics*,Vol.38,pp.193-224.
- (5)M.H.Sohn,2008"Swimming Mode and Characteristics of Aquatic-Animals," *대한기계학회, 바이오공학부문*,pp.25-28.
- (6)Michael Sfakiotakis,David M. Lane, and J.Brusce C. Davies, APRIL 1999" Review of Fish Swimming modes for Aquatic Locomotion," *IEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, VOL. 24,NO. 2,237-252
- Davies, APRIL 1999" Review of Fish Swimming modes for Aquatic Locomotion," *IEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, VOL. 24,NO. 2,237-252
- (7)soon-Gie Lee,Hoon-Cheol Park,Surya D. Pandita, And Youngtai Yoo,2006,"Performance Improvement of IPMC for a Flapping Actuator," *Intemational Journal od Control,Automation, and Systems*,Vol6,No. 6,pp.748-755.
- (8)Paolo Arena,Claudia Bonomo,Luigi Fortuna,MAttia Frasca,Salvatore Graziani,2006,"Design and Control of an IPMC Worklike Robot," *IEEE TRANSACTION ON SYSTEMS<MAN<AND CYBERNETICS-PART B: CYBERNETICS*,Vol. 36,NO. 5,pp.1044-1052.