

# 이온성 고분자-금속 복합체의 수중 응용

## A Review : Underwater Applications of Ionic Polymer –Metal Composites

허 석, 김 광 진\*, 제이슨 파켓  
(Seok Heo, Kwang Jin Kim, and Jason W. Paquette)

**Abstract :** Specialized propulsors for naval applications have numerous opportunities in terms of research, design and fabrication of an appropriate propulsor. One of the most important components of any propulsor is the actuator that provides the mode of locomotion. Ionomeric electro-active polymer may offer an attractive solution for locomotion of small propulsors. A common ionomeric electro-active polymer, Ionic Polymer-Metal Composites (IPMCs) give large true bending deformations under low driving voltages, operate in aqueous environments, are capable of transduction and are relatively well understood. IPMC fabrication and operation are presented to further elucidate the use of the material for a propulsor. Various materials, including IPMCs, are investigated and a simplified propulsor model is explored.

**Keywords :** Ionic polymer-metal composites, bending actuator, propulsor, electroactive polymers

### I. 서론

전기활성 고분자(electroactive polymers: EAPs)에 대한 연구가 활발하게 진행되는 이유중에는 큰 전기적 변형 (bending 또는 extensional), 작은 밀도, 제작의 용이성 과 기계적 유용성 등 전통적인 전기활성 재료들의 장점을 제공하기 때문이다.[1] 일반적으로, 전기활성 고분자는 강체이며 취성을 갖는 전기활성 세라믹보다 2~3배나 더 큰 변형을 일으킨다. 전기활성 고분자 재료들은 반응속도가 빠르고, 작은 밀도를 갖으며, 형상기억합금에 비하여 개선된 회복력을 보인다. 또한, 부드러운 움직임과 생체모방 작동기 분야에서 큰 영향력을 보이고 있으며, 수중 운동체에 적용하기 위해 전기활성 고분자를 이용한 생체모방 추진체의 보다 개선된 연구가 진행중이다.

### II. 이온성 고분자-금속 복합체 (IPMCs)

IPMCs(Ionic Polymer Metal Composite)는 이온성 전기활성 고분자(ionomeric EAPs)이며 지난 10년간 정밀한 연구가 진행되었다[5]-[7], [10]-[11], [13], [15]-[17], [25]-[33], [35]-[36], [38]-[42], [61], [63]-[65]. 1993년 Oguro[32]는 처음으로 고분자전해질 막-전극 복합체 (polyelectrolyte membrane-electrode composite)를 발견했다. 이것은 Nafion117(perfluorinated sulfonate membrane: Nafion 117)과 막의 양면에 화학적으로 도금된 백금전극으로 구성되며 수용액속에서 전극에 낮은 전압(~1.5 volt)을 인가하면 빠른 변형과 굽힘을 나타낸다(Shahinpoor 등[62]도 유사한 발견을 함). 그림 1은 외팔보 형상의 IPMC가 AC전압이 인가될 때 양극과 음극으로 움직이는 굽힘이 발생하는 운동을 보여준다.

### 1. IPMC 제작

일반적으로 고분자 형태의 상품으로 제공되는 IPMC의 제조에 관한 기초는 이온교환 막(ion exchange membrane, IEM)으로부터 시작한다. IEM 즉, 양이온들은 투과되지만 음이온들은 투과되지 못하는(양이온 교환재료들의 경우) 플루오르로

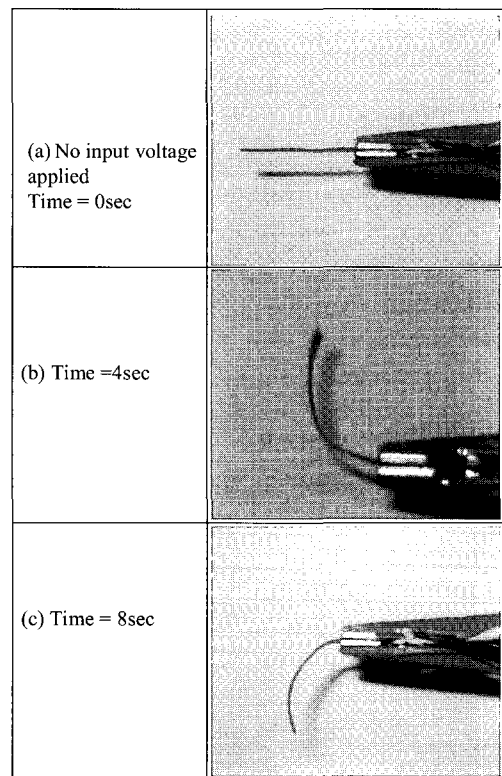


그림 1. 0.25 Hz, 교류 3V 사각파를 인가했을 때 일반적인 IPMC의 운동. (a) 전압 불 인가시 (b) 양극 (c) 음극.

Fig. 1. Typical IPMC placed under an applied AC voltage step function input of 3.0 volts at a frequency of 0.25 Hz. (a) no voltage applied, (b) positive polarity, and (c) negative polarity.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 6. 25., 채택확정 : 2004. 8. 13.

허석, 김광진, 제이슨 파켓 : 네바다 주립대학교 기계공학과

(heoseok@unr.edu/kwangkim@unr.edu/paquette@unr.edu)

※ 본 연구는 U.S. National Science Foundation[Grant IIS-0328274]와 Nevada Space Grant Consortiums/NVEPSCOR에 의하여 연구되었습니다. 본 연구는 IEEE-JOE에 연재 될 예정입니다.

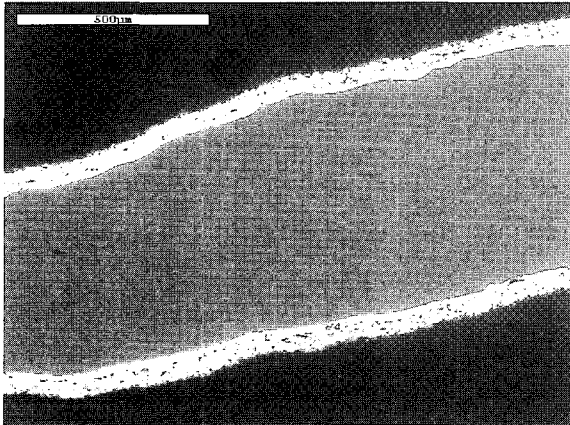


그림 2. IPMC의 단면은 투과성이 확장된 탄소와 밀집된 백금을 갖는 두 전극(윗면과 아랫면)을 보여준다.

Fig. 2. A cross-section of an IPMC showing two electrodes (top and bottom) with porous expanded graphite and dense platinum. This IPMC is manufactured by the solution-casting and further treatment with porous graphite and chemical reduction of platinum as effective compliant electrodes (from Kim and Shahinpoor,[15]).

치환된 이온성 고분자(ionomeric perfluorinated polymer backbone)의 독특한 성질에 의한다. 다른 종류의 막들은 가장 일반적인 미국 Dupont사의 Nafion™ 또는 일본 Asahi사의 Flemion이 있다. Nafion의 경우 양성자(protons), H<sup>+</sup>가 다른 양이온(cation)들과 교환되기 때문에 이것을 이온 교환 막이라 말한다.

만약 H<sup>+</sup> 이온들이 금속이온들과 교환된다면 금속이온들은 적절한 환원제(reducing agents)에 의해 환원되고, 금속이온으로 구성된 효과적인 전극들이 윗면과 아랫면에 적층 구조물을 만들게 된다. 금속성의 두 표면은 높은 전도성을 갖으며 화학공정에 따라 다양한 변화를 줄 수 있다. 그림 2에서와 같이 일반적인 IPMC 단면의 현미경 사진을 보면 고분자 구조가 중심에 있고 바깥으로 금속복합체를 포함한 적층 구조물을 볼 수 있다.

2. 작동 원리

그림 1과 같은 막 위에 전기장을 걸면 전극의 한 방향으로 빠르게 굽힘운동을 하는 것을 볼 수 있다. 이것은 고분자의 복잡한 구조안에 전반적인 용매(일반적으로 물)의 흐름을 조사하면 알 수 있다(그림 3).

기저 고분자(base polymer)는 ionomer로 특정 전하(specific charge) 이온들이 이동하기 위해 특별히 디자인하고 합성한 것이다. IPMC가 용매(일반적으로 물)에 의해 완전히 젖었을 때, 막 구조물의 조직은 나노크기의 기공/경로 구조를 보인다 [46]-[50], [52]-[55]. 고정된 이온의 그룹들은 클러스터 영역에서 용매(solvent)분자뿐 아니라 모체(matrix)안에 화학적으로 분산된 양이온들과 상호작용하는 고분자 결사슬들의 끝단에 붙게 된다. 전기장이 막을 통과하여 인가될 때, 전극의 한 방향으로 빠른 굽힘 운동이 발생하며 그림 4에서 도식한 대개의 경우에서, 다른 전극방향으로 서서히 이완되는 경향이 일어난다. 일반적으로 이러한 굽힘운동은 전면극(양극의 경우,

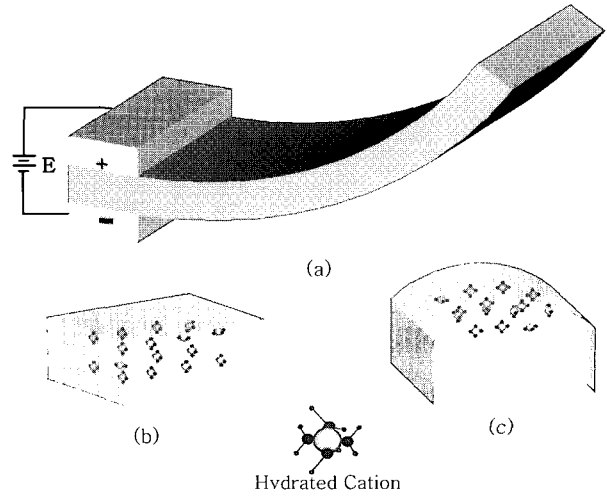


그림 3. (a) 전압 인가시 IPMC의 굽힘 (b) 전압을 인가하지 않았을 때 IPMC 단면 (c) 전압 인가시 IPMC 단면.

Fig. 3. (a) Bending of IPMC with an applied voltage, (b) IPMC section with no applied voltage, and (c) IPMC section with an applied voltage.

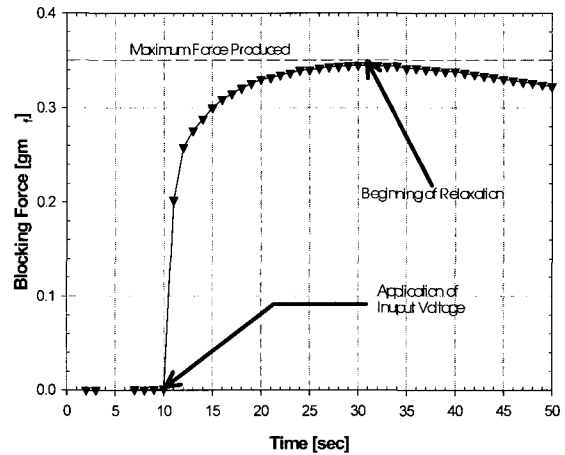


그림 4. 시간이 지남에 따른 인가된 DC전압 하에서 IPMC의 이완현상.

Fig. 4. Relaxation phenomena exhibited by IPMCs under an applied DC voltage for an extended period of time.

양이온 먼)을 향하는 나노경로들을 통하여 클러스터 영역으로부터 수화된 양이온의 이동과 free water에 의해 발생하는 전기적인 삼투압의 결과로 보인다. 입력변화로 발생하는 굽힘응력에 있어서 이 결과는 양 전기장 하에 외팔보 형태의 IPMC의 굽힘운동을 보여주는, 그림 3에 도식한 바와 같이, 전극(양극의 경우, 음극 먼)방향으로 굽힘이 일어나는 것으로 해석된다. DC 전기장의 적용에 관한 이완 거동에 대한 설명은 나중에 한다. 또한, 1.23 V 이상 운용시에 전기분해가 발생한다.

IPMC의 조작과 성능에 영향을 주는 것에는 많은 특성들과 변수들이 있다. 재료는 AC전압을 가하면 재료의 특성을 보여준다.

DC전압을 인가할 때, 초기의 IPMC는 음극면으로 굽힘을 보이거나 시간이 좀 지나면 재료는 양극면으로 이완한다(relaxes). IPMC재료는 작동영역에 한계를 가지고 있다. 이것은 주어진 작동신호에 대한 빠른 응답시간을 요구하는 경우에는 IPMC의 응답이 좋지 않음을 말한다. AC/DC응답과 이완거동(그림 4)은 뒤에 조사할 예정이다. 앞에서 언급한 것처럼, counter ion species, IEM, 온도와 이온 클러스터(ionic clusters) 모두 IPMC의 거동에 영향을 준다. 재료의 중요 특성중의 하나는 수화(hydration)이다. IPMC에 포함된 수화의 정도는 재료의 전반적인 거동과 성능에 중요한 역할을 한다.

IPMC의 거동에 대한 대개의 그럴듯한 이론적인 기술들중 하나인 De Gennes 등[10]의 보고서에서는 전하 이동(막에 전하밀도  $J$ , 를 갖는)대한 선형 불가역 열역학 관계와 용매 이동(흐름,  $Q$  를 갖는)에 대한 이온 겔들(예, IPMC)의 전기기계적인 연결에 대하여 기술한다. 이러한 형태의 시스템에 관한 Onsager 관계식은 다음과 같다.

$$J = \sigma E - L_{1,2} \nabla p \tag{1}$$

$$Q = L_{1,2} E - K \nabla p \tag{2}$$

여기서,  $L_{1,2}$ ,  $\sigma$ ,  $K$  와  $\nabla p$  는 단면계수, 전도율, Darcy Permeability와 압력구배 이다. 단면계수,  $L_{1,2}$  는 coupling coefficient와 관계되며, 단위는  $(m/s)/(V/m)$  로 나타낸다. (1)과 (2)는 전기장, E, 뿐만 아니라 기계적 압력 구배,  $\nabla p$ , 를 연결한다. 이러한 식들은 IPMC의 ‘direct effect’(작동)와 ‘inverse effect’(감지 또는 변환)을 설명하기 위한 것이다. 저자들은 전에 언급한 IPMC의 ‘이완’ 거동을 조정하기 위해 모델을 확장중 이다.

3. 변환 원리

IPMC를 독특하게 만드는 것들 중에는 작동기 성능에 대하여 고유의 변환되는 성질을 갖기 때문이다. 압전재료와 유사

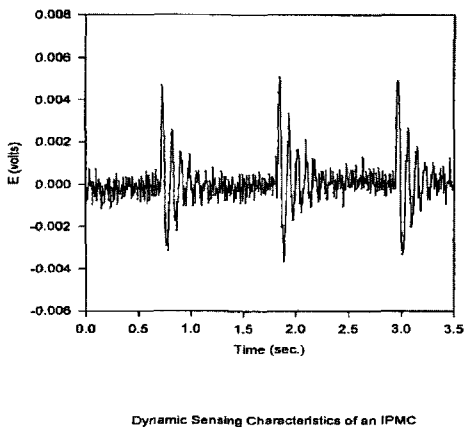


그림 5. IPMC를 감지기로 사용한 경우 응답선도.  
 Fig. 5. IPMC used in sensing mode. Data obtained by applying small bending moment (three times) to IPMC in cantilevered configuration that produced a voltage across the membrane as shown (from Shahinpoor and Kim [39]).

하게, IPMC는 가해진 전기장 하에서 움직임을 보일 뿐만 아니라 재료에 발생된 굽힘 모멘트로부터 전류를 발생할 수도 있다. 발생된 굽힘 모멘트에 의해, 굽힘 응력은 고분자의 중심에 위치하고, 전위는 각각의 클러스터 안에 있는 음이온들과 양이온들의 유효중량의 이동변위에 의하여 발생한다[10], [28], [29]. IPMC에 대한 변환원리를 보여주는 데이터가 그림 5이다. 이것은 대변위 감지기 또는 감쇠에 관한 응용에 IPMC를 효과적으로 사용할 수 있음을 보여준다[17], [37].

4. 전극 구성

몇가지 화학적인 환원 공정을 통해 멤브레인의 표면에 귀금속을 침착시키는 과정을 이용한다. 귀금속을 사용하는 이유는 IEM(Nafion™)에는 산과 부식환경에서 사용되기 때문이다. 다른 재료들(또는 전도성 매개물)은 팔라듐, 은, 금, 탄소, 흑연(graphite), 그리고 나노튜브들을 포함한 것을 사용한다. 가장 대중적인 방법은 Nafion™ IEM에 화학적으로 백금을 침착하는 것이다[57].

IPMC로 사용하기 위한 IEM, Nafion™ 은 표면을 금속화시킬 수 있다. 멤브레인 표면에 전극을 침착하는 방법에는 몇가지가 있다. 전극은 (a)IEM에 기계적인 압착을 하는 것[40], [56], (b)전기화학적으로 침착하는 것[58], (c)화학적으로 침착하는 방법이 있다.

IEM의 한면과 접하는 용액의 음 금속이온들은 반대면과 접하는 용액들로부터 멤브레인을 통해 확산되며 환원제에 의해 줄어들게 된다. Lui 등[57]은 침투-환원공정의 두 단계를 이용했다. 금속이온들은 고분자의 친수성 영역을 통해 흡수지게 된다.

Lui는 또한 이상적인 전극은 다음의 특징들을 갖는다고 보고를 한 바 있다. (a)좋은 중간미립자는 작은 전기적 저항을 받는다. (b)침전물을 통한 물질전달이 되는 다공성 구조물은 제한 인자가 없다. (c)광범위한 전극-IEM은 전기화학적으로 활성표면적과 접촉한다. (d)금속-필름은 멤브레인 표면에 근접한 얇은 층의 Nafion내부에 넓게 침착한다. Nafion 멤브레인의 평균 두께는 대략 0.20mm이다. Ionomer에 금속 입자의 침착깊이는 일반적으로 10µm 정도이며 두 전극사이에 접촉은 없다.

표면은 일반적으로 거칠게 전 처리를 한다. 이것은 음 금속이온이 멤브레인 표면안에 있는동안 환원제에 반응하여 멤브레인의 밖으로 확산하는 것을 돕는다. 화학공정에 의존하여, 금속은 멤브레인에 1µm에서 20µm 깊이로 침착된다. 전극을 만드는 과정에서 중요한 점은 IPMC의 유효한 용량, 저항, 전류 밀도를 결정하고 재료의 반응거동을 확인하는 것이다. 일반적인 IPMC의 SEM은 그림 6(위)에서처럼 화학적인 침투/환원 과정에 의해 백금화한 것을 보여준다. 화학적인 침투/환원 과정에 의해 표면은 불규칙한 형상을 나타내며, 검은 입자들과 클러스터들은 백금 입자들을 보여준다. 다른 IPMC의 TEM은 그림 6(아래)에서 보여준다. 그림 6에서 처럼, 백금 입자들(검은 클러스터)의 밀도가 명확한 것은 멤브레인 표면에서 보다 크게 성장한 것이다. 이것은 환원제의 영향없이 멤브레인에 깊게 침투하였기 때문이다. 밀도는 분산거리가 커질수록 줄어든다.

IPMC는 또한 전에 포함된 금속 입자층은 물론 표면에 있

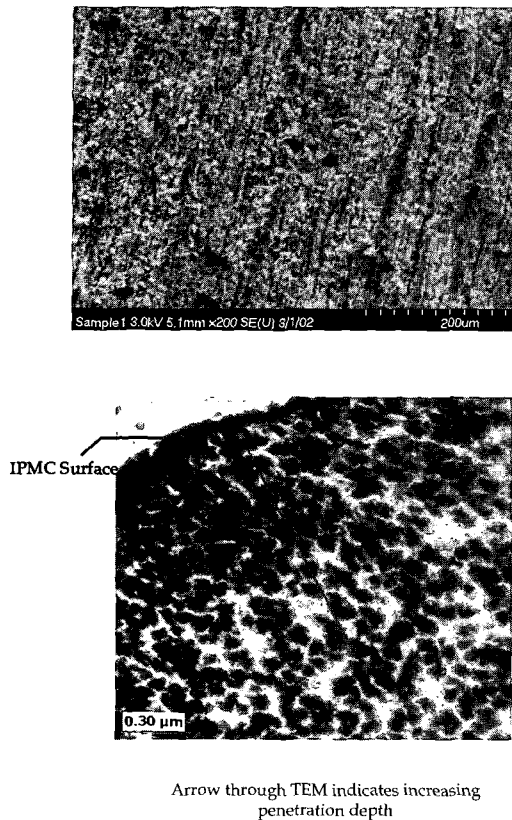


그림 6. 백금입자를 전극으로 갖는 (위)일반 IPMC의 SEM사진(표면); (아래) 일반IPMC의 TEM사진. 위 사진의 왼쪽지역은 IPMC의 표면을 나타낸다(입자 밀도가 크다).

Fig. 6. (top)An SEM micrograph of a typical IPMC (surface); (bottom)A TEM micrograph of typical IPMC that has been electroded with Platinum particles. The top left region of micrograph indicates the surface of the IPMC(particle density is greater)([from Kim and Shahinpoor, 2003 [15]]).

는 금속의 바깥층을 포함하기 위해 금속을 전기도금화 할 수 있다. 이것은 재료의 특성과 응답을 수정하기 위해 사용되는 다른 방법이다. 전반적인 표면의 전도성은 이러한 방법에 의해 향상될 수 있다. 이것의 장점은 전기장이 전극에 위치하는 것이 전반적인 전압양을 약간 줄여서 IPMC의 전체 길이에 도달할 수 있도록 한다. 일반적인 전기도금된 금속들의 표면은 금, 백금, 흑연을 포함한다. 재료를 전기도금한다면 주의해야 한다. 강성이 커져 IPMC의 굽힘성능을 제한하지만 IPMC에 의해 발생하는 blocking force는 증가한다.

5. 전기적 특성

IPMC의 전기적 거동은 수화, IEM, 양이온 종류, 전극 합성, 등을 포함하는 몇 가지 변수들에 크게 의존한다. 즉, 재료의 저항률에 대한 값은 전극을 만드는 과정과 직접적으로 관련된다. 여기서 저항률은 앞에서 언급한것 처럼 고분자재료안에 금속 입자들의 보다 조밀한 분산으로 줄어들 수 있다. 그림 7은 어떻게 표면저항률을 줄이고 침착된 금속 입자들(이 경우 백금)의 침투깊이를 증가시키는지 보여준다. 이것은 침

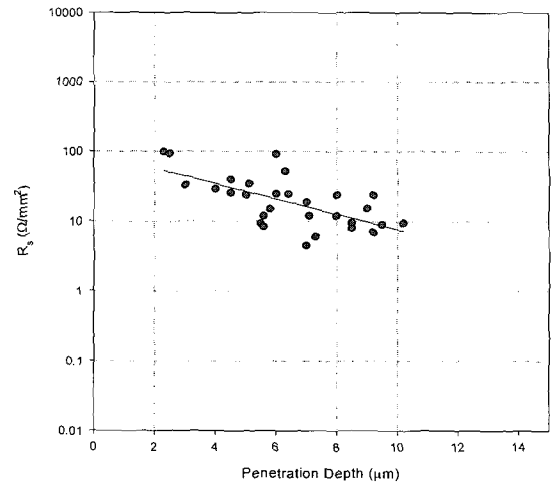


그림 7. 다른 침투 깊이를 갖는 시편의 4점 표면 저항률 계속 선도.

Fig. 7. Four-point probe surface resistivity measurement of samples with various penetration depths (from Kim and Shahinpoor, 2003[15]).

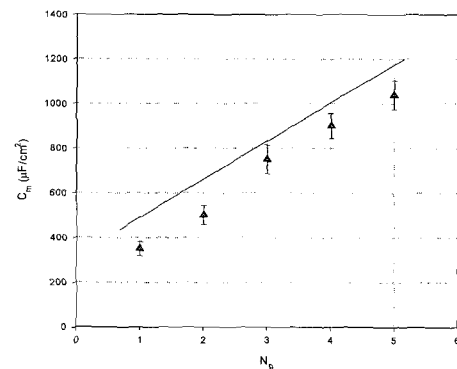


그림 8. 용량 데이터. Np는 금속이온을 함유한 일단의 용액과 조절된 환원 용액안에서의 반복적인 도금 횟수를 말한다. 계측 데이터는 도금 횟수의 증가에 따라 용량의 크기도 증가함을 보여준다. 도금은 5회 이상 수행되었다. 실선은 Onishi등이 보고한 데이터를 나타낸다.

Fig. 8. Capacity data. Np is the number of repetitive plating in a batch solution containing metals ions and conditioned reducing solutions. The data points represent the measured value of capacitance for increasing number of repetitive platings. The plating was performed up to 5 times. The solid line represents the previously published data from Onishi et al., 2000[35].

투깊이가 증가되어 재료의 향상된 전도성을 나타낸다. 그림 8은 도금 횟수와 관련한 용량(capacity) 데이터를 보여준다. 용량은 도금 횟수의 증가에 따라 증가 됨을 알 수 있다. 재료의 거동에 대한 연구와 전기적 응답을 해석하는 방법은 AC또는 DC 전압을 인가하여IPMC를 관찰하는 것이다.

6. 고분자 특성을 맞추기 위한 실험적 접근

기저 고분자의 용량과 저항률 반응은 앞에서 관찰한것 처

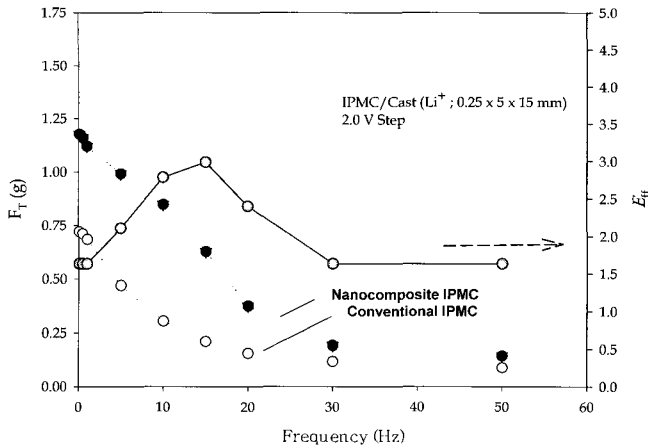


그림 9. 나노복합재 IPMC와 일반적인 IPMC의 blocking force 선도.

Fig. 9. The measured blocking force of a nanocomposite IPMC and a conventional IPMC(from [61]).

럼 발생하는 힘 응답들과 관계된다. 작동을 위한 유발 인자들중 하나는 IPMC의 만족할만한 성능을 얻기 위한 기저 고분자의 최적화에 대한 연구다. 기저 고분자의 특성을 향상시키기 위해 저자들에 의한 실험적인 접근은 새로운 clay-based 나노복합재 기술을 도입하는 것이었다[27], [51], [60].

IPMC의 구동은 새롭게 개발된 나노복합재 기술에 의해 만들어지고, 인가 전압하의 외팔보 구조물에 주파수를 바꾸어 가면서 가진을 하면 IPMC를 지나는 blocking force,  $F_T$ ,를 측정할 수 있다. 그림 9는 일반적인 IPMC와 나노복합재 IPMC (~3% loading)에 대하여 주파수가 0.1-50 Hz사이의 2V사각파를 인가하였을 때의 대표적인 선도를 보여준다.

일반적으로 나노복합재 IPMC의 성능은 일반적인 IPMC보다 힘발생 능력이 훨씬 크다. 나노복합재 IPMC와 일반적인 IPMC의 blocking force와의 관계식은 다음과 같다.

$$E_{ff} = \frac{F_{NC}}{F} \quad (3)$$

여기서,  $F_{NC}$ 와  $F$ 는 나노복합재 IPMC와 전통적인 IPMC의 blocking force를 나타낸다. 나노복합재 IPMC의 성능은 blocking force내에서 100%성장한것 보다 주파수 5-20Hz영역에서 나타나는것이 훨씬 좋다. 이러한 비선형 거동은 고분자 구조 또는 재료의 정전기 현상내에 물의 이동에 기인한다. 이러한 점은 현재 계속 연구중에 있다.

### III. Potential Naval Applications

IPMC의 수중운동체에 대한 응용물 중 하나는 Bandyopadhyay [2]-[4]의 것이 있다. 그들은 수중 추진체에 있어 방사성 소음의 변조에 관하여 IPMC의 사용을 실험한 것이다. 그림 10은 블레이드의 꼬리진동은 흐름을 거스르는 고정 블레이드의 꼬리끝에서 IPMC를 안으로 움직이는 것과 물고기 꼬리 지느러미처럼 움직이는것으로 요구하는 소음 분광을 조절할 수 있음을 보인다.

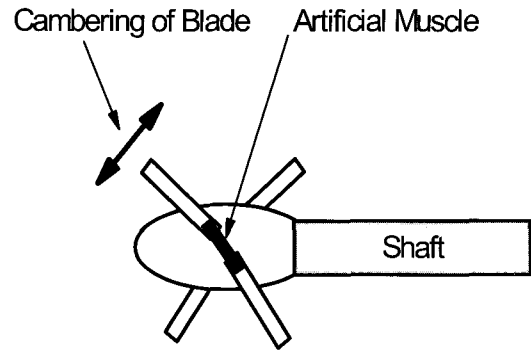


그림 10. 수중 추진체내에 방사성 소음 변조를 위한 도해.

Fig. 10. Illustration of radiative noise alteration in underwater propulsors.

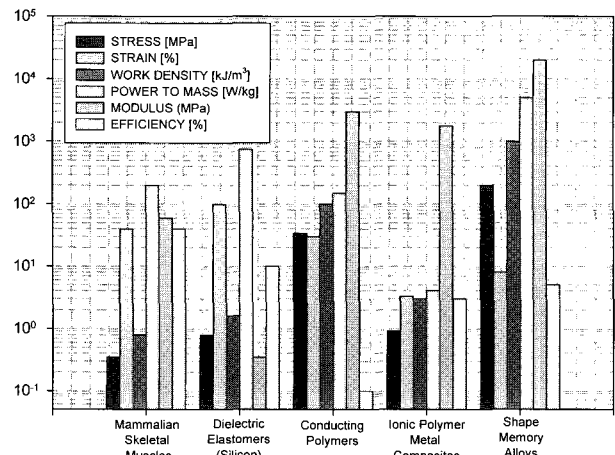


그림 11. Biomimetic추진체 응용에 관한 여러 종류의 작동기 재료에 대한 물성치. 선도는 최대 값을 보여주며 작동기 설계에 꼭 필요한 것은 아니다.

Fig. 11. Properties for various actuator materials with potential for biomimetic propulsor applications [18, 23, 24, 28, 43]. Values shown are maximum values, not necessarily used when designing actuators.

Mojarrad [26]에 의해 수행된 다른 예는 IPMC를 물같은 매개물에 배나 물고기처럼 움직이는 로봇 구조물에 관한 추진체와 같이 사용한 것이다.

이부분의 흥미있는것은 전기활성 고분자 또는 다른 작동기 재료를 수중 추진체로서 적당한 추진과 기동성이 가능하도록 제작하였다는 점이다. 매우 다양한 EAP 재료 [8], [9], [12], [14], [20]-[22], [44], [45]들이 현재 유전성 탄성체(dielectric elastomers), 강유전성 고분자(relaxor ferroelectric polymers), 액정 탄성체(liquid crystal elastomers), 전도성 고분자(conducting polymers), 탄소 나노튜브(carbon nanotubes), 이온성 고분자-금속 복합체(IPMCs), 형상 기억 합금(shape memory alloys) 등을 포함하는 biomimetics 분야에서 응용하기 위해 연구되고 있다. 그림 11은 추진체로서 중요인자에 관한 몇가지 작동기의 물성치를 나타낸다[23].

추진체의 기본형태에 관한 조건은 carangiform(전갱이과 물고기)수영 형태(꼬리 또는 꼬리 지느러미 진동 형상)이며 몇 가지 중요 물성을 포함해야 한다. 표 1은 작동기재료의 선택에 있어 이러한 중요 물성치에 관하여 보여주고 있다.

유전성 탄성체는 고전압에서 작동되기때문에 물로부터 큰 전기 방전을 방해하기위한 장치가 필요하다. 전도성 고분자는 캡슐화하는 문제가 있고 추진체로서 선형적인 운동에 한계가 있으며[23]-[24] 두층 또는 세층의 구조 또는 기계적인 보조기구를 포함하여 사용해야 한다. 형상 기억 합금은 작동기 성능은 매우 훌륭하지만 전도성 고분자와 같이 선형 운동에 있어서 기계적인 수정 또는 효과적인 작동을 위해 두층 또는 세층의 구조물이 필요하다. IPMC는 순수 굽힘을 한다. 이러한 성질은 다른 매력적인 성질들, 물 환경에서 작동되는것, 작은 구동 전압과 변환 용량에 있어 IPMC가 추진체로서 적당한 선택임을 보여준다.

Rosen [59]은 carangiform 물고기 추진의 기구학적인 설명을 제안하였다. 그의 이론적인 식들은 최근 Mojarad [26]에 의해 실험적으로 증명되어졌다. Rosen은 anguilliform(eel-like)수영 방식이 진동 또는 파동에 있어 대부분 물고기 몸체에 관련이 있다고 설명했다. Mojarad에 의하면 스스로 앞으로 나아가기 위해 물고기 앞부분에서 만들어지는 물의 흐름을 효과적으로 이용하여 몸의 저항을 이기고 물고기의 뒷 부분을 사용한 추진이 이루어진다고 한다. 이것은 Rosen의 'Vortex Peg Hypothesis'를 말한다. 이것은 물고기가 가속이 없는 수영을 할 때는 뒤로 향하는 물의 흐름을 포함하지 않고 움직이지만 가속시에는 그 흐름을 이용하는것을 말한다. anguilliform운동의 간단한 모델은 수정된 carangiform 운동을 혼합하여 정리한 것이다.

다음의 식들과 이론은 Rosen에 의해 개발된 것이다(1959) [59]. Vortex의 질량  $m$ 은,

$$m = \frac{Lbwh}{g} \tag{4}$$

여기서,  $L, b, w, h, g$  는 길이, 물고기 꼬리의 폭, 질량 밀도, 두께와 중력상수 이며 그림 12에서 보인다.

각각의 vortex arm의 길이  $l$  은 꼬리로 치는 폭,  $a$  에 비례하는 것으로 가정하면,

표 1. 추진체로 사용하기에 가능한 몇몇 재료들의 특성.  
Table 1. Properties of interest for propulsor application for several potential materials.

	Response Time	Aqueous Operation	Operating Voltage	ETC
Shape Memory Alloys	Medium	Yes	1-4 V	Effective in linear actuation
IPMCs	Medium (up to 100Hz)	Yes	1-7 V	Intrinsic bending, Excellent electrode
Conducting Polymers	Medium (relatively slow)	Yes	1-10 V	Linear actuation / bending
Dielectric Elastomers	Fast	No	1000 V	Linear actuation / bending

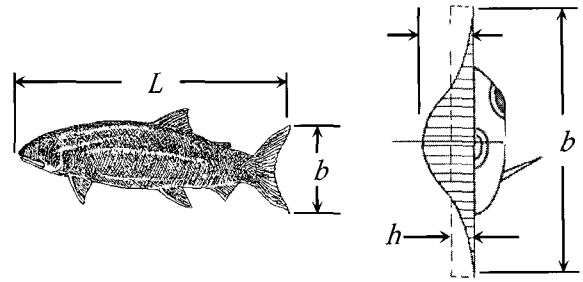


그림 12. Carangiform 운동에 기초한 추진체 설계를 위한 다양한 변수들의 도해.  
Fig. 12. Illustration of various parameters for propulsor design based upon fish carangiform motion [59].

$$m = \frac{abwh}{g} \tag{5}$$

이고, 꼬리로 치는 주파수  $f$ , 한번 치는데 두번의 vortices,에서 발생하는vortices의 수는  $2f$  가 되고, 파동 주기당 발생하는 vortices의 전체 질량은 (단위는 kg/s),

$$M = \frac{2fabhw}{g} \tag{6}$$

이다. 전체 물고기 속도,  $V_0$  는 앞으로 향하는 물고기 속도,  $V$ , 앞으로 향할 때 발생하는 물에 의한 저항의 절대 속도,  $v$ , 물고기에 의해 방출되는 물의 상대속도,  $u$ ,에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$V_0 = u - (V - v) = V(k + c - 1) \tag{7}$$

여기서,  $u = kV$  와  $v = cV$  이며,  $k$ 와  $c$ 는 형상에 따른 상수이며, 전체 힘은 다음과 같다.

$$F = MV_0 = \frac{2fabhwv(k + c - 1)}{g} \tag{8}$$

운동방향의 반대라 가정할 때 저항력은  $D = C_d wV^2 A / 2g$  으로 주어지고, 여기서  $C_d$  는 젖은 표면적  $A$  에 기초한 저항 상수이다. 저항이 추진과 같이 설정되면 물고기가 앞으로 향하는 최종속도는 다음과 같다.

$$V = \frac{4bh(k + c - 1)fa}{C_d A} \tag{9}$$

(9)에서, 앞으로 나아가는 물고기의 속도는 꼬리로치는 주파수의 발생과 파동의 크기에 비례하고 후에 물고기의 형상과 유체의 특성들에 의존한다.

추진체 모델의 지정된 변수들과 Rosen의 개발된 식들을 적용하여 다른 종류의 작동기들을 실험하고 발생하는 추진

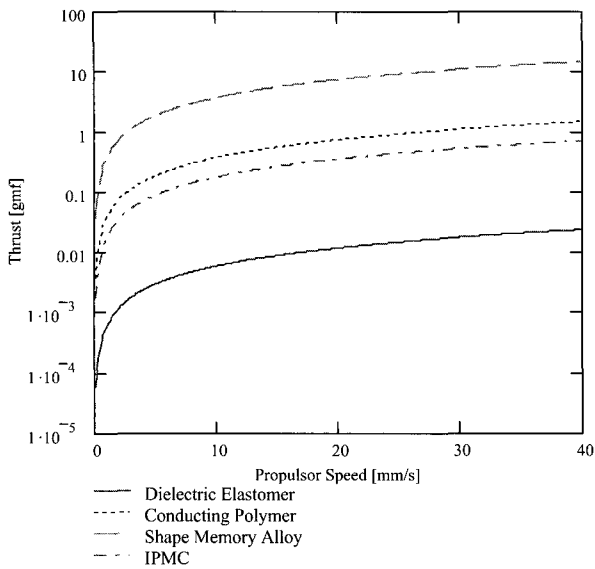


그림 13. 추진체 운동에 대한 작동기 재료들의 비교 선도.  
Fig. 13. Comparative plot of varying actuator materials used for propulsor locomotion.

력은 특별한 추진체 형상에 대해 사용된다. 그림 13은 미리 결정된 형상에 대하여 여러 종류의 작동기로 발생된 추진력 결과를 보여준다. 입력 변수들 중의 몇가지는 가정되었는데,  $l = 80\text{mm}$ ,  $h = 20\text{mm}$ ,  $b = 20\text{mm}$  와 작동 주파수는 2.0Hz 이다. 앞으로 향하는 물고기 속도에 대한 모델의 입력 값은 이 해석으로 가정되었고 모든 작동기에 대한 합당한 값들이 설정되었으며, 각 작동기는 20 mm/s의 속도를 얻을 수 있었다. 작동력의 값은 그림 11에서 주어진 작동 밀도(work density)의 지정된 값으로 결정된다. 그림 13은 오직 작동기 재료가 갖는 물성치만 다른, 같은 추진체에 대한 결과를 보여준다. Rosen의 모델은 매우 작게 변하는 속도 같은 작은 규모에 대해서는 입증되지 않았다.

그림 13을 설명하면, 모든 추진체가 추진에 필요한 힘을 만드는 성질이 다르다는 것을 보이고 있다. 형상기억합금(SMA)에 대한 최대 힘의 크기는 초기 작동 위상에 대한 것이 수축 위상은 관계가 없다. 형상기억합금의 유리한 결과는 꼬리로 치는 주파수를 2 Hz로 가정한 것이다. 일반적으로 형상기억합금과 유전성 탄성체는 필요한 굽힘 운동을 만들기 위해 다른 기계적인 부분과 함께 구성되어야 한다. 그렇지만, 전도성 고분자는 가정된 2Hz 보다 작은 영역에서도 좋은 결과를 보였지만 보호를 위한 막의 사용이 불편하다.

수정된 carangiform 운동에 기초한 최적화된 추진체를 만들기 위해 해야 할 일은 연구 중이다. 추진체는 추진 형태에 있어 힘을 만드는 것에 관하여 이론과 실험적으로 해석되어야 한다.

추진체로서 IPMC의 능력을 검증하기 위해, 추력을계측하기 위한 실험장치를 그림 14와 같이 구성하였다. 10g 로드 셀(Transducer Techniques)은 추진체의 힘을 계측하며 데이터 획득 시스템(NI)을 통하여 추진체의 시간에 대한 힘을 얻었다. 추진체는 물이 담긴 비이커속에 수직으로 로드 셀과 연결되

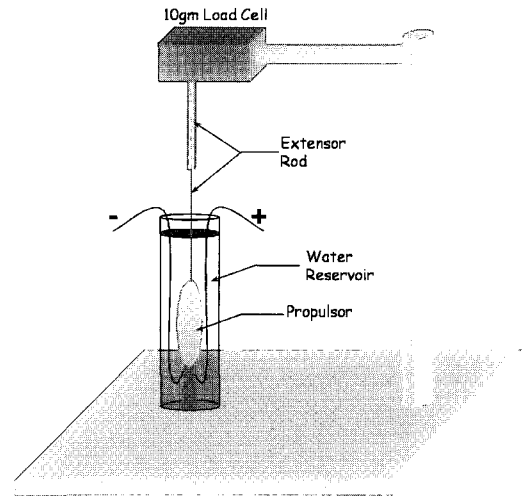


그림 14. IPMC 추진체의 추력을 계측하기 위한 실험장치 구성도.  
Fig. 14. Schematic of experimental apparatus used to measure thrust of IPMC propulsor.

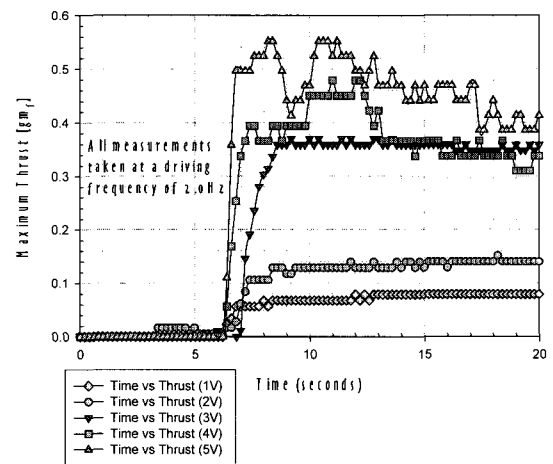


그림 15. IPMC추진체의 추력 데이터는 2.0Hz의 사각파를 다양한 입력전압을 가하며 얻은것이다.  
Fig. 15. Thrust data obtained for IPMC propulsor subjected to a square waveform at a frequency of 2.0Hz and various input voltages.

었으며, 추진체의 무게에 의한 중력의 영향을 제거하기 위한 작업을 하였다. 그림 15는 2.0Hz의 사각파를 인가 전압을 달리하며 입력하였을 때 얻은 추진체의 추력 데이터를 보여준다. 주파수를 0.1 ~2.0Hz 까지 변화시켜가며 최대 추력치를 찾아보았으나 입력주파수에 의한 영향을 크게 다루기에는 적절치 않지만, 다양한 입력 전압에 의한 응답을 얻을 수 있었다. 여기서 흥미로운 점은 3~5V의 전압인가 시 나타나는 추력 거동인데 매우 불규칙하고 값들과 유사성을 보인다. 이러한 것은 1.22V이상의 전압에서 물의 전기분해에 의한 가스의 방출에 의한 것으로 보인다. 이러한 거동의 다른 그럴듯한 이유로는 추진체의 움직임으로 인해 발생하는 vortices로 인한 복잡한 유체역학과 관련되어 보인다. 증명을 위한 실험

적인 연구가 진행 중이다.

#### IV. 요약

IPMC는 변환뿐 아니라 작동 능력을 갖는 유일한 전기활성 고분자이다. 재료는 낮은 구동 전압에서 작동되고, 유연한 작동기이며, 물과 친하여 추진체 작동기로서 이상적인 조건을 갖고 있다. 몇가지 논쟁거리는 추진체 디자인과 이론적인 모델링뿐 아니라 실험에도 있다. 앞으로의 계획은 강력한 수중 추진체로 IPMC의 구현에 관해 지속적인 연구를 할 것이다.

IPMC는 복잡한 제조과정과 많은 변수들을 포함하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 제조 공정이 재료의 특성에 개선된 재료의 성질들을 나타내기 위해 다른 처리 공정뿐 아니라 많은 변수들, 이온 교환막, 양이온 종류, 수화, 전극제조 공정과 같은, 에 의존하여 재료의 성능을 나타낸다. 이 재료들의 전기적 특성들은 이미 이야기한바 있다.

#### 참고문헌

- [1] Y. Bar-Cohen, *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles – Reality, Potential and Challenges*, SPIE Press, March 2001, pp. 1-671.
- [2] P. R. Bandyopadhyay, “Maneuvering hydrodynamics of fish and small underwater vehicles,” *Integrative and Comparative Biology*, vol. 42, no. 1, 2002, pp. 102-117.
- [3] P. R. Bandyopadhyay, W. P. Krol, D. P. Thivierge, W. H. Nedderman, M. Mojarad, “A biomimetic propulsor for active noise control: experiments,” *NUWC-NPT Technical Report 11,351*, 2002.
- [4] W. P. Krol, A. Annaswamy, P. R. Bandyopadhyay, “A biomimetic propulsor for active control: theory,” *NUWC-NPT Technical Report 11, 350*, 2002.
- [5] Y. Abe, A. Mochizuki, T. Kawashima, S. Yamashita, “Effect on bending behaviour of counter cation species in perfluorinated sulfonate membrane-platinum composite”, *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 9, 1998, pp. 520-526.
- [6] K. Asaka, K. Oguro, Y. Nishimura, M. Mizuhata, H. Takenaka, “Bending of polyelectrolyte membrane-platinum composites by electric stimuli I. response characteristics to various waveforms”, *Polymer Journal*, vol. 27, no. 4, 1995, pp. 436-440.
- [7] K. Asaka, K. Oguro, “Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli part II. response kinetics”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 480, 2000, pp. 186-198.
- [8] R. H. Baughman, “Conducting polymer artificial muscles”, *Synthetic Metals*, vol. 78, 1996, pp. 339-353.
- [9] K. Bhattacharya, J. Li, Y. Xiao, “Electromechanical models for optimal design and effective behavior of electroactive polymers,” in *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles* (ed. Y. Bar-Cohen), SPIE, 2001, Bellingham, Washington.
- [10] P. G. De Gennes, K. Okumura, M. Shahinpoor, K. J. Kim, “Mechanoelectric effects in ionic gels,” *Europhysics Letters*, vol. 50, no. 4, 2000, pp. 513-518.
- [11] E. T. Enikov, B. J. Nelson, “Electrotransport and deformation model of ion exchange membrane based actuators”, *SPIE Proc.*, 2000, pp. 129-139.
- [12] R. P. Hamlen, C. E. Kent, S. N. Shafer, “Electrolytically activated contranctile polymer”, *Nature*, vol. 206, 1965, pp. 1149-1150.
- [13] J. Jung, Y. Tak, B. Kim, J.-O. Park, S. Lee, and J. Pak, “Tadpole robot (TadRob) using ionic polymer metal composite (IPMC)”, *Proceedings of SPIE*, vol. 5051, 2003, pp. 272-280.
- [14] A. Katchalsky, “Rapid swelling and deswelling of reversible gels of polymeric acids by ionization”, *Experientia*, vol. V, 1949, pp. 319-320.
- [15] K. J. Kim, and M. Shahinpoor, “Ionic polymer-metal composites - II. manufacturing techniques,” *Smart Materials and Structures*, vol. 12, no. 1, 2003, pp. 65-79.
- [16] K. J. Kim, and M. Shahinpoor, “Development of three dimensional ionic polymer-metal composites as artificial muscles,” *Polymer*, vol. 43, no. 3, 2002, pp. 797-802.
- [17] K. J. Kim, and M. Shahinpoor, “Applications of polyelectrolytes in ionic polymeric sensors, actuators, and artificial muscles,” Review Chapter in *Handbook of Polyelectrolytes*, edited by S. Tripathy, J. Kumar, and H. S. Nalwa, American Scientific Press (ASP), vol. 3, Chapt. 1, 2002, pp. 1-22.
- [18] G., Kofold, *Dielectric Elastomer Actuator*, Ph.D. Thesis, The Technical University of Denmark, September 2001.
- [19] W. Kuhn, O. Kunzle, A. Katchalsky, “Verhalten polyvalenter fadenmolekelionen in losung”, *Halvetica Chemica Acta*, vol. 31, 1948, pp. 1994-2037.
- [20] W. Kuhn, “Reversible dehnung und kontraktion bei andernung der ionisation eines netzwerks polyvalenter fadenmolekulionen”, *Experientia*, vol. V, 1949, pp. 113-125.
- [21] W. Kuhn, B. Hargitay, A. Katchalsky, H. Eisenberg, “Reversible dilation and contraction by changing the stat of ionization of high-polymer acid networks”, *Nature*, vol. 165, 1950, pp 514-516.
- [22] W. Kuhn, B. Hargitay, “Muskelahnliche kontraktion und dehnung von netzwerken polyvalenter fadenmolekulionen”, *Experientia*, vol. VII, 1951, pp. 1-11.
- [23] J. D. Madden, N. Vandesteeg, P. G. Madden, A. Takshi, R. Zimet, P. A. Anquetil, S. R. Lafontaine, P. A. Wierenga, I. W. Hunter, “Artificial muscle technology: physical principles and naval prospects”, *Proceedings of UUST03*, 2003.
- [24] J. D. W. Madden, P. G. A. Madden, I. W. Hunter, “Conducting polymer actuators as engineering materials”, *SPIE Proc.*, 2002, pp. 176-190.
- [25] K. Mallavarapu, K. Newbury, D. Leo, “Feedback control of the bending response of Ionic polymer-metal composite actuators”, *SPIE Proc.*, 2001, pp. 301-310.
- [26] M. Mojarad, *Characterization and Modeling of Ionic Polymeric Smart Materials as Artificial Muscles and Robotic Swimming Structures*, University of New Mexico, PhD Dissertation, 2001.
- [27] J.-D. Nam, J. H. Lee, H. R. Choi, H. M. Kim, J. W. Jeon, J. Paquette, K. J. Kim, Y. S. Tak, and H. Xu, “Development of electroactive silicate nanocomposites prepared for use as ionic polymer-metal composites (IPMC’s) artificial muscles and sensors”, *Proceedings of SPIE- Smart Structures and Materials*, March 2002, paper #4965-42.
- [28] S. Nemat-Nasser, C. W. Thomas, “Ionomeric polymer-metal composites”, in *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as*



- Artificial Muscles, Reality, Potential, and Challenges*, ed. Bar-Cohen, Y., SPIE Press, Washington, U.S.A., 2001.
- [29] S. Nemat-Nasser, "Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites", *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 5, September 2002.
- [30] K. Newbury, D. J. Leo, O. Parrot, "Mechanical work and electromechanical coupling in ionic polymer bender actuators", Proc. ASME 2001. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2001, Paper number AD-23705.
- [31] K. Newbury, *Characterization, Modeling, and Control of Ionic Polymer Transducers*, PhD Dissertation, Virginia Polytechnical Institute and State University, September 2002.
- [32] K. Oguro, K. Asaka, H. Takenaka, "Actuator element", *U.S. Patent #5,268,082*, 1993.
- [33] K. Oguro, N. Fujiwara, K. Asaka, K. Onishi, S. Sewa, "Polymer electrolyte actuator with gold electrodes", *SPIE Proc.*, 1999, pp. 64-71.
- [34] Y. Osada, H. Okuzaki, H. Hori, "A polymer gel with electrically driven motility", *Letters to Nature*, vol. 355, 1992, pp. 242-244.
- [35] J. W. Paquette, K. J. Kim, J.-D. Nam, Nam, Y. S. Tak, "An equivalent circuit model for ionic polymer-metal composites and their performance improvement by a clay-based polymer nanocomposite technique", *Proceedings of ASME IMECE'02*, 2002, Paper # ASMS40.
- [36] K. Sadeghipour, R. Salomon, S. Neogi, "Development of a novel electrochemically active membrane and smart material based vibration sensor/damper", *Smart Materials and Structures*, vol. 1, no. 2, 1992, pp. 172-179.
- [37] M. Shahinpoor, "Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using ionic polymeric gel muscles", *Smart Structures and Materials*, vol. 1, 1992, pp. 91-94.
- [38] M. Shahinpoor, M. Mojjarrad, "Soft actuators and artificial muscles", *U.S. Patent #6,109,852*, 2000.
- [39] M. Shahinpoor, K. J. Kim, "Ionic polymer-metal composites: I. fundamentals", *Smart Materials and Structures*, vol. 10, 2001, pp 1-15.
- [40] M. Shahinpoor, and K. J. Kim, "A novel physically-loaded and interlocked electrode developed for ionic polymer-metal composites (IPMCs)", *Actuator and Sensors-A. Physical*, vol. 96, 2002, pp. 125-132.
- [41] S. adokoro, S. Fuji, T. Takamori, K. Oguro, "Distributed actuation devices using soft gel actuators", *Distributed Manipulators*, Kluwer Academic Press, 2000, pp. 217-235.
- [42] S. Tadokoro, T. Takamori, K. Oguro, "Modeling IPMC for design of actuation mechanisms", in *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles, Reality, Potential, and Challenges*, ed. Bar-Cohen, Y., SPIE Press, Washington, U.S.A., 2001.
- [43] S. G. Wax, R. R. Sands, "Electroactive polymer actuators and devices", *SPIE Proc.* 1999, pp. 2-9.
- [44] Xiao, Yu, K. Bhattacharya, "Modeling electromechanical properties of ionic polymers", *SPIE Proc.*, 2001, pp. 292-300.
- [45] Q. M. Zhang, V. Bharti, Z. Y. Cheng, T. B. Xu, S. Wang, Ramotowski, T. S., Tito, F., Ting, R., "Electromechanical behavior of electroactive P(VDF-TrFE) copolymers", *SPIE Proc.*, 1999, pp. 134-139.
- [46] A. Eisenberg, H. L. Yeager, *Perfluorinated Ionomer Membranes*, ACS Symposium Series 180, ACS, Washington DC, 1982.
- [47] A. Eisenberg, *Ions in Polymers*, Advances in Chemistry Series, American Chemical Society, Washington D.C., 1980.
- [48] M. Escoubes, and M. Pineri, in *Perfluorinated Ionomer Membranes* (ed. A. Eisenberg and H. L. Yeager), ACS Symposium Series, 180, Chapt. 2, 1982.
- [49] T. D. Gierke, G. E. Munn, and F. C. Wilson, "Morphology of perfluorosulfonated membrane products (Wide-Angle and Small-Angle X-Ray Studies)", in *Perfluorinated Ionomer Membranes*, ACS Series 180, ACS, Washington D.C., 1982.
- [50] P. J. James, J. A. Elliott, T. J. McMaster, J. M. Newton, A. M. S. Elliott, S. Hanna, M. J. Miles, "Hydration of nafion studied by AFM and X-ray scattering", *Journal of Materials Science*, vol. 35, 2000, pp. 5111-5119.
- [51] M. Alexandre, P. Dubois, "Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties, and uses of a new class of materials," *Materials Science and Engineering*, vol. 28, 2002, pp. 1-63.
- [52] A. Eisenberg, and F. E. Bailey, *Coulombic Interactions in Macromolecular Systems*, ACS Symposium Series, 302, American Chemical Society, Washington D.C., 1986.
- [53] R. J. Full, K. Meijer, "Artificial buscles versus natural actuators from frogs to flies", *SPIE Proc.*, 2000, pp. 2-9.
- [54] G. Gebel, P. Aldebert, M. Pineri, "Structure and related properties of solution-cast perfluorosulfonate ionomer films," *Macromolecules*, vol. 20, 1987, pp. 1425-1428.
- [55] T. Hashimoto, M. Fujimura, H. Kawai, "Structure of sulfonated and caboxylated perfluorinated ionomer membrane," in *Perfluorinated Ionomer Membranes* (A. Eisenberg and H. Yeager [46]), ACS Symposium Series 180, 1982.
- [56] R. J. Lawrence, L. D. Wood, *U.S. Pat.*, 4,272,353, 1981.
- [57] Liu, Raymond, Her, Wei-Hwa, Fedkiw, S. Peter, "In situ electrode formation on a nafion membrane by chemical platinization," *Journal of Electrochemical Society*, vol. 139, no. 1, 1992, pp. 15-23.
- [58] P. Millet, M. Pineri, R. Durand, "New solid polymer electrolyte composites for water electrolysis", *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 19, 1989, pp. 162-166.
- [59] M. W. Rosen, *Water Flow About a Swimming Fish*, US Naval Ordinance Test Station, Master Thesis, 1959.
- [60] B. K. G. Theng, *The Chemistry of Clay-Organic Reactions*, Wiley, New York, 1974.
- [61] J. Paquette, K. J. Kim, J.-D. Nam, Y. S. Tak, "An equivalent circuit model for ionic polymer-metal composites and their performance improvement by a clay-based polymer nanocomposite technique," *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, vol. 14, pp. 633-6424, 2003.
- [62] M. Shahinpoor, D. Adolf, D. W. Segalman, Witkowski, "Electrically controlled polymeric gel actuators," *US Patent 5,250,167*, 2003.
- [63] M. Shahinpoor, K. J. Kim, "Experimental study of ionic polymer-metal composites in various cation forms: actuation behavior," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 10, no. 6, pp. 423-436, 2002.
- [64] M. Shahinpoor, K. J. Kim, D. Leo, "Ionic polymer-metal

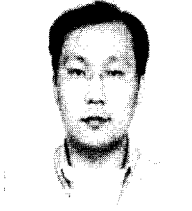
composites as multifunctional materials," *Polymer Composites*, vol. 24, no. 1, pp. 24-33, 2003.

[65] M. Shahinpoor, K. J. Kim, "Mass transfer induced hydraulic

actuation in ionic polymer-metal composites," *Journal of Intelligent Materials Systems and Structure*, vol. 13, no. 6, pp. 369-376, 2002.

**허 석**

동국대학교 기계공학과에서 학사, 석사, 박사 학위. 현재 네바다 주립대학교 기계공학과에서 박사후 과정에 있음. 심 분야는 능동 진동 제어, 메카트로닉스 등.



**김 광 진**

1992년 애리조나 주립대학교에서 박사 학위. 1995년 메릴랜드 대학교 환경 에너지 공학 센터에서 박사후 과정 마침. 현재 네바다 주립대학교 기계공학과 부 교수로서 120편의 논문과 2개의 미국 특허, 다수의 논문상 수상. 관심분야는 인



공근육/능동재료, 열공학/에너지 시스템, 나노 기술임.

**제이슨 파켓**

뉴멕시코 대학교 기계공학과 학사 학위, 네바다 주립대학교 기계공학과 석사학위. 현재 네바다 주립대학교 기계공학과 박사학위 재학중. 심 분야는 이온성 고분자 금속 복합체의 응용.

