Polymer (Korea) Vol. 26, No. 1, pp 105 112 (2002)

전기활성 IPMC(Ion-exchange Polymer Metal Composite) 구동기 제조 및 구동특성 연구

이준호ㆍ이두성ㆍ김홍경ㆍ이영관*ㆍ최혁렬**ㆍ김훈모**ㆍ전재욱***ㆍ탁용석****ㆍ남재도†

성균관대학교 고분자공학과, 기술연구소, *성균관대학교 화학공학과, **성균관대학교 기계공학과,
***성균관대학교 전자공학과, ****인하대학교 화학공학과

(2001년 7월 27일 접수, 2001년 11월 12일 채택)

Preparation and Characterization of Electro-Active IPMC(Ion-exchange Polymer Metal Composite) Actuator

J. H. Lee, D. S. Lee, H. K. Kim, Y. K. Lee*, H. R. Choi,**
H. M. Kim, J. W. Jeon***, Y. S. Tak****, and J. – D. Nam†**

Department of Polymer Sci. and Eng., Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea
Polymer Technology Institute, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea
**Department of Chem. Eng., Sungkyunkwan University, Korea*
***Department of Mech. Eng., Sungkyunkwan University, Korea*
****Department of Elec. and Computer Eng., Sungkyunkwan University , Korea*
*****Department of Chem. Eng., Inhwa University, Inchun, Korea*
†e-mail : jdnam@skku.ac.kr

(Received July 27, 2001; accepted November 12, 2001)

요 약 : 연구는 electro-active polymer(EAP)의 특성을 가지는 ion-exchange polymer metal composite(IPMC)을 이용하여 지능형 대장내시경 개발에 목적을 두고 있다. IPMC는 낮은 구동전압과 빠른 반응속도로 인하여 매우 매력적인 물질이다. 본 연구에서는 IPMC구동기의 전극을 무전의 도금 방법을 이용하여 용액함침-환원방법(impregnation-reduction method)으로 제조하였으며 코팅된 백금전극의 횟수에 따라 변위와 변화를 측정하였다. 구동특성을 알아보기 위하여 길이, 주파수에 대한 변위, 힘을 측정하였으며, 주파수 대역은 저주파 대역과 공명주파수 대역을 사용하는 것이 적합하다는 결론을 얻었다. 또한 다양한 구동적 특성과 수분의 함량에 따른 영향에 대해 고전적 적층 이론(classical laminate theory, CLT)을 이용하여 이방성 IPMC의 응력분포와 수분이동에 따른 모멘트, 변형률, 곡률(cuvature)을 모델링 하였다.

ABSTRACT : The low actuation voltage and quick bending response of IPMC(ion-exchange polymer metal composite) are considered attractive for the construction of various types of actuators. In this study, in order to develop a new type actuators by using the IPMC platinum electrode of IPMC are fabricated by using electroless impregnation-reduction method plating. As the platinum-plating times are increased, IPMC performance was improved in terms of bending displacement and force due to the enhanced surface conductivity. In addition, we investigated the basic actuation characteristics of resonance frequency and actuator length as well as the effect of water uptake and ion mobility. Using the classical laminate theory(CLT), a modeling methodology was developed to predict the deformation, bending moment, and residual stress distribution of anisotropic IPMC thin plates. In this modeling methodology, the internal stress evolved by the unsymmetric distribution of water inside IPMC was quantitatively calculated and subsequently the bending moment and the curvature were estimated for various geometry of IPMC actuator.

Keywords **:** *ion-exchange polymer, metal composite, actuator, sensor, electro-active polymer.*

서 론

최근 전기활성 고분자 (EAP)에 대한 연구가 매우 활발히 되어지고 있는데, 고분자구동기는 기존의 금속 재료인 모터, 형상기억합금 (SMA), 전기활성 세라믹(EAC)에 비해 큰 변형능력, 에너지효율성, 멤스 (micro - electro - mechanical system, MEMS)공정을 통한 기존물질이 갖는 소형화, 가공성의 한계를 극복할 수 있는 매력적인 물질로 생각되고 있다.[1–7] 특히 고유의 성질이 인간의 근육과 비슷한 강인성, 변형 - 힘을 가지고 있어 인체 내 장기에 손상을 최소한으로 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 전기활성 고분자에는 전도성 고분자, 폴리머 겔 (CP), 전기변형 고분자 (EP), 이온교환 고분자 금속 복합재료 (IPMC), 나노튜브 등이 있으며 특히 IPMC는 낮은 구동전압을 요구하며 큰 변형과 빠른 반응조건을 가진 물질로써 액츄에이터, 인공근육, 센서, 연료전지등 다양한 분야에 적용시킬 수 있다고 알려져 있다.[1–8]

이온은 이온 - 수분 클러스터의 한 형태도 존재하며 전압을 인가하였을 때 양극에서 음극으로 이온들이 움직이게 된다. 일반적으로 고분자 물질은 수분을 함유하면 팽창하는 성질을 가지고 있으므로 이 결과 한쪽 전극이 팽창되고 다른 한쪽 전극은 팽창된 만큼 수축을 하여 체적의 변화로 인하여 구부러지는 운동을 한다.[2,6,7] 일반적으로 구동전압 범위에서 전기분해가 일어나 수분의 감소 현상을 발생하는데 구동변위와 힘을 감소시키는 영향으로 작용을 한다. 따라서 다양한 분야에 응용하기 위해서는 수분의 함량, 수분의 이동현상이 중요한 문제가 되어진다. 그러나 현재까지 구동상태에서 IPMC 내의 수분이동과 분포를 실험적으로 측정 보고된 바 없으며 정량적으로 실험을 한다는 것은 거의 불가능에 가깝다. 그러므로 IPMC 구조의 변형, 운동, 수분이동 영향을 확인하기 위하여 기계학적 모델링을 사용하는 것이 바람직하다고 사료되며 변형과 모멘트는 수분의 양과 수분이동 뿐만 아니라 수화된 IPMC 탄성계수, 수분팽창계수, 백금전극 탄성계수, 복합체의 각층간의 기하학적 배열에도 많은 영향을 미친다.[6,7]

본 연구에서는 이온변화에 따른 변화, 길이, 주파수, 힘에 대한 구동적 특성을 조사하였고 이온교환 고분자 막 내부의 수분이동에 따른 응력분포, 변형, 곡률, 기계적 모멘트를 이미 복합재료분야에서 검증이 된 고전적 적층 이론 (CLT)을 통하여 연구하였다.

이 론

다층 적층판(laminate)은 각층의 연속적 적층과 서로간 층의 이방성 성질에 의해 결정되며 고전적 적층 이론 (CLT)은 복합재료를 구성함에 있어서 다른 탄성율을 가진 재료를 적층 할 때 발생하는 구조적 현상을 해결하기 위한 이론이다. 적층 재료가 힘을 받았을 때 생기는 전체적인 변형과 층에 분포하는 힘에 대한 예측을 가능하게 해주며 얇은 층의 복합구조물을 분석하는데 유용하다. 또한 다양한 열/수분 환경에도 적용될 수 있는데 잔류응력현상과 전체적인 적층판 구조의 결과적 변형을 유도한다. 이 이론은 다음 다섯 가지의 가정으로 시작한다.

Figure 1은 적층된 판의 단면이 변형할 때의 변화를 보여주는 그림으로 u_0, v_0, w_0는 각각 변형시의 x, y, z 방향의 변위를 나타내고 z 방향의 변위는 오로지 x와 y의 함수라고 가정한다. 작은 변위에 있어서 탄성의 전통적인 작은 변위에 관해서 탄성의 관계는 응력 - 변위의 관계로 주어진다.

이차원의 경우 강도 행렬 $[\bar{Q}]$는 네개의 엔지니어링 상수 즉 x - , y - 방향의 인장계수(tensile modulus), 전단계수(shear modulus), 그리고 포아송비에 의해 계산되어진다. 행렬값과 엔지니어링 상수간의 자세한 관계는 참고문헌을 참고하기바라며 적층판이 여러 개의 층으로 구성되어 있을 때 각 층의 응력 - 인장 관계는 다음과 같이 나타낼수 있다.[9–12]

$$\begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ t_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} e_x^0 \\ e_y^0 \\ g_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (1)$$

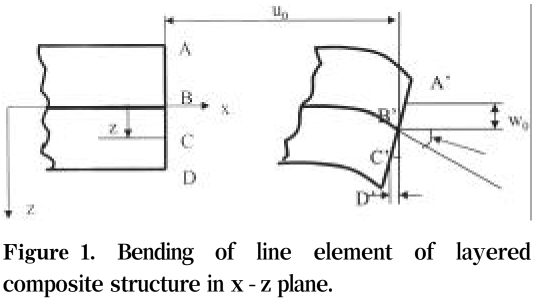

Figure 1. Bending of line element of layered composite structure in x - z plane.

그러므로 적층판의 각 층에 대한 압력의 변화는 모든 적층판에 있어서 응력 - 인장을 계산함으로써 얻어질 수 있으며 적층판에 작용하는 결과적인 힘과 모멘트는 적층판의 층을 통해 이에 상응하는 응력과 모멘트를 적분함으로써 정의될 수 있다.

증가된 행렬의 형태로 다시 쓰면 이차원의 적층판의 구조적 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A & B \\ B & D \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} e^0 \\ k \end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서 $A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} (\overline{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$ $B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2)$

$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n} (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3)$ 이다.

적층판은 온도나 수분의 분포에 변화를 주면 치수의 변화, 잔여분의 응력분포가 생기는데 흡습성이나 열 분포 변화의 결과 흡습성 인장이 자체 내에서 발생하기 때문이다. 흡습성 인장 e^{H} 는 수분팽창 계수 b와 수분 함량에 따라서 단일층 변화의 계수C를 곱한 것과 같다. 흡수성에 의한 인장($e^{H} = b\,C$) 즉 물체가 자유롭게 팽창, 구부러지거나 비틀린다고 할 때 흡습성 인장은 실제적으로 우리들이 측정하는 힘이나 모멘트를 만들어내지는 않게 되지만, 방향성과 다른 물성을 갖는 층이 적층되어 있는 경우 이들은 자유로운 변형을 한다고 할 수 없다. 예를 들어, IPMC에 붙어있는 백금전극은 물을 흡수한다고 해서 그 부피가 변하지는 않는 반면에, 고분자 층은 수분변형이 있으며 동시에 백금 층에 의하여 강력히 억제되어지기 때문이다. 따라서 단일층에서 응력은 자유로운 팽창에 대한 흡수성 인장과 겉에서 관찰된 인장의 차이만큼의 인장, 즉 기계적 인장 e^{M} 에 의해 생성되며 이는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\{e^{M}\} = \{e\} - \{e^{H}\} \tag{3}$$

흡수성에 의한 변형의 경우, 적층판에 작용하는 어떤 외부적 힘, 모멘트는 없으며, 단지 응력은 적층판 내의 수분의 분포에 의해 생성되어진다. 따라서 위의 기계적 인장을 치환하고 결과적인 힘과 인장을 0으로 하면 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} A & B \\ B & D \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} e^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N^{H} \\ M^{H} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$\{N^{T}\} = C \sum_{k=1}^{n} \{\overline{Q}\}_k \{b\}_k \{h_k - h_{k-1}\} \tag{5}$$

$$\{M^{T}\} = \frac{1}{2} C \sum_{k=1}^{n} \{\overline{Q}\}_k \{b\}_k \{h_k^2 - h_{k-1}^2\} \tag{6}$$

$\{N^{H}\}$, $\{M^{H}\}$ 과는 수분의 이동에 의하여 형성되는 힘과 모멘트이며 이들이 결과적으로 적층판 변형을 생성한다.

실 험

재 료. 본 연구에서 사용된 이온교환막은 Nafion 117(Dupont)을 사용하였으며 물리적, 화학적, 전기적 도금방식이 연구가 되어지고 있으나 본 연구는 무전위 도금방법, impregnation - reduction(I - R)method을 사용하였다.[11-14] 표면적을 넓히기 위해 브러쉬로 막의 표면을 처리한 다음 과산화수소(H_2O_2) 10%를 이용하여 불순물을 제거했다. 정제된 막에 남아있는 과산화수소를 증류수로 제거한 후 백금 이온들이 막 내로 충분히 들어갈 수 있도록 tetraamineplatinum(II) chloride monohydrate($Pt(NH_3)_4)Cl_2.H_2O$) 0.1~10 mM 농도 안에 이온교환막을 담근 후 환원제 sodium borohydride($NaBH_4$)를 사용하여 백금을 환원시켰다. 이러한 과정을 1~8회 반복하여 IPMC를 제조하였다.

백금존재여부와 백금전극의 형성분포를 알아보기 위하여 Philips 사의 XL 30 ESEM - FEG(SEM)으로 측정하였고 IPMC내의 수분존재 상태를 알아보기 위하여 TA Instrument사의 시차 주사 열량계인 DSC 2910을 질소 하에서 온도를 –100~280 ℃까지 10 ℃/ min로 사용하였다. 또한 IPMC수분함량에 따라 전류밀도의 차와 현상을 Perkin Elmer사 263A (Potentiostat/ Galvanostat)을 사용하였다.

기초 실험에 사용된 실험장치는 변위측정을 위한 레이져 변위기(LK - 081), Force센서(GSO - 30), 그리고 아날로그 신호 처리를 위한 12 bit A/D 컨버터, 인가하는 전압을 조절하기 위한 12 bit D/A 컨버터로 구성되었다. 드라이브서킷은 D/A 컨버터의 전류를 증폭

하기에 충분한 전원을 공급하도록 하였으며 모든 데이터와 조절은 퍼스널 컴퓨터에서 처리하였다.

결과 및 고찰

Figure 2는 제조된 IPMC의 전극과 전극의 분포도를 SEM와 EDS로 관찰한 것이다. 백금층이 양쪽면으로 형성되어있는 것이 보이며 EDS로 백금의 분포를 확인하였다. 백금전극의 분포는 양쪽에서 막 안으로 갈수록 점차적으로 줄어드는데 물리적인 방법인 프레스나, 스퍼터링 등을 사용하여 백금 층을 형성하는 것보다 화학적 환원반응으로 형성된 백금 전극 층이 막 안에서도 형성이 되어 이온과 수분의 이동을 좀더 촉진시키는 역할을 한다고 사료되어진다. (a)는 백금코팅을 한번 했을 경우이며 이때 전극의 두께는 대략적으로 7 μm의 전극층을 형성하였고 (b)는 4번코팅 했을 경우 14 μm 전극층을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 EDS에서 측정된 백금의 농도분포에서는 SEM에서 관찰된 두께보다 더 안으로 깊이 전극이 형성되어 있다는 것을 알 수 있다. 이는 전극의 환원과정에서 고분자의 내부에 농도구배를 가지고 백금이 석출된다는 것을 확인할 수 있었으며, 백금이 고분자의 자유부피공간 또는 분자 사슬에 형성될 것이라는 것을 추론할 수 있다.

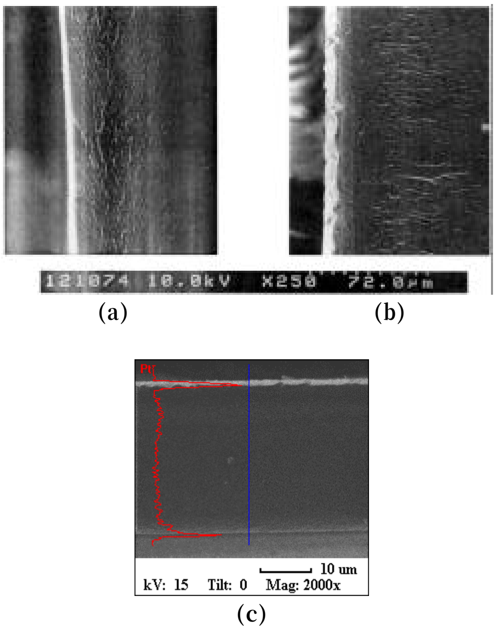

Figure 2. SEM and EDS micrographs of IPMC actuator.

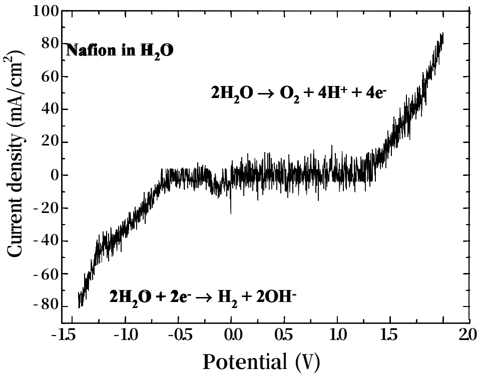

Figure 3. LSV of Pt/Nafion actuator in water exhibiting electrolysis of water.

Figure 3은 물속에서 IPMC를 구동시켰을 때의 LSV를 보여주고 있다. 실제로 구동을 시키는 범위내의 전기전위가 –0.3 V 이하에서 1.3 V보다 큰 전압일 경우 수분의 전기분해가 일어나는 것을 볼 수 있으며 IPMC의 구동전압을 조절을 전기분해로 인하여 IPMC 내의 수분의 변화량에 따라 다양한 현상을 초래할 수 있다. 전기분해에 의한 수분의 분해현상은 구동주파수가 큰 경우 수분의 분해량이 감소하여 안정제의 첨가를 통하여 최소화시키는 것이 가능하다. 공명주파수는 IPMC 구동기의 기계적 특성과 두께 그리고 이온의 이동능력에 따라 결정된다. 수분이 감소함에 따라 이러한 기계적, 전기화학적 특성에 의하여 공명주파수가 변화하며, 이는 IPMC 구동기의 구동능력 및 특성을 결정하는 것이다.

Figure 4는 수분의 존재상태를 조사하기 위하여 DSC 측정을 N_2 분위기하에서 10 ℃/min 속도로 –100~280 ℃까지 올려 측정하였다. 녹는점 0.8 ℃, 8 ℃부근에서 별개의 다른 값을 가지는 두개의 피크가 관찰되며 자유수분(free - water)과 묶인수분(bound — water)과 관계가 있는 것으로 보인다. 자유수분은 고분자 자유부피 사이에 들어있는 수분을 말하며 묶인수분들은 고분자 사슬과 수소결합, 이온과 수분의 결합으로 클러스터를 형성하며 고분자 사슬의 이동성에 중요한 요소로 작용한다. 이 결과 IPMC 내의 수분존재 상태는 자유수분, 묶인수분으로 존재하며 IPMC 구동역

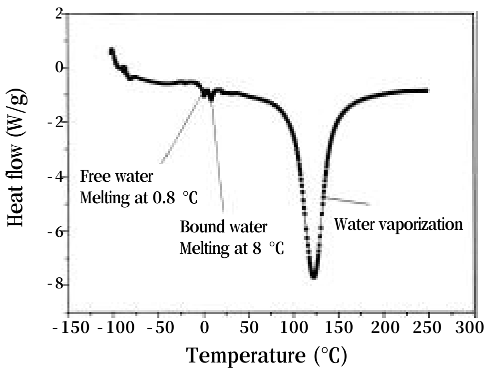

Figure 4. DSC thermogram of IPMC showing two melting peaks each representing free and bound water.

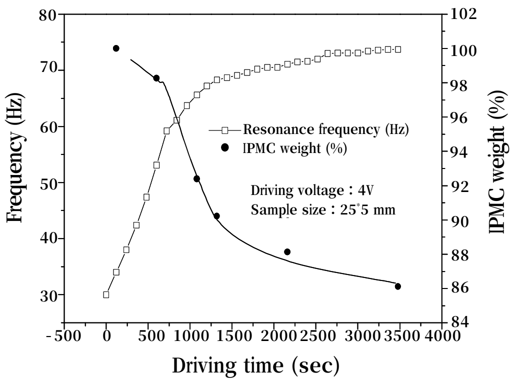

Figure 5. Resonance frequency of IPMC actuator during continuous driving.

할에 각각 다른 성질을 부여한다고 사료되어진다.

위에서 언급했듯이 IPMC 내의 수분의 변화량에 따라 다양한 성질을 나타나며 이러한 현상들 중 하나인 주파수에 영향을 미치는 결과가 Figure 5이다. 수분이 포함된 양에 따라 공명주파수도 거의 대칭적으로 변화를 하며 처음 30 Hz에서 공명주파수가 형성되나 점차적으로 공명주파수 대역이 올라 나중에는 75 Hz까지 증가한다. 동시에 Nafion 내부의 이온이 수분을 포함하고 이동할 수 있는 양이 정해져 있으며 그 이상의 수분이 IPMC내 존재할 때 클러스터를 형성하지 못한 물 분자는 이온-수분 클러스터의 움직임에 저항으로써 작용한다. 이러한 다양한 인자에 의하여 결정된 결과가 Figure 5에서 보여지고 있으며 이는 IPMC 구동기의 설계에 반영되어야 할 것이다.

IPMC를 구동하기 위해 전압을 인가하였을 때 일반적으로 백금전극의 표면저항으로 인해 IPMC 전체면에 동일한 전압이 가해지지 않으며 이러한 결과 완벽한 구의 형태로써 구부러지는 운동을 하지 않는다. Figure 6은 표면 전도성을 향상시켰을 때와 일반적인 IPMC를 구동시켰을 때 차이를 보여주고 있다. 전도성 그리스를 표면에 도포한 경우 IPMC의 구부러지는 운동은 완벽한 구의 형태로 나타내어지며 변위가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. IPMC를 구동기 재료로써 적용시킬 경우 표면 전도성을 증가시킴으로써 제어측면에서 상당한 장점을 가질 수 있다고 판단된다. 그러나 단순히 백금전극을 두껍게 생성하여 표면 전도성을 증가시키는 것은 백금전극 자체의 강성으로 인하여 모멘트와 변

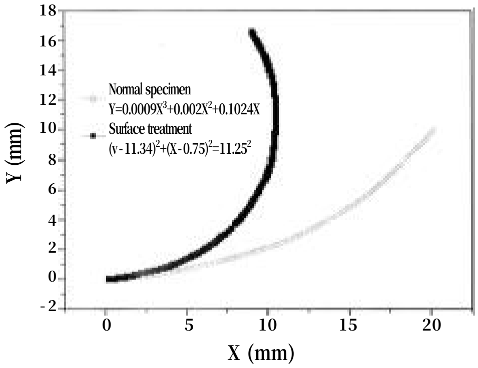

Figure 6. IPMC bending shape comparing electrode treatment.

위의 값의 감소를 초래한다. 본 연구에서는 9차이상을 하였을 경우 표면 전도성보다 강성의 영향을 더 받는 것을 알 수 있었다.

Figure 7은 일반적인 IPMC 코팅회수에 따른 곡률을 측정한 결과이다. 1차에서 5차까지 순차적으로 코팅의 회수를 증가시켰을 때 변위의 차이는 크게 나타나지만 6차이상부터 곡률의 큰 변화를 나타내지 않았다. 이러한 결과는 위에서 언급한 바와 같이 표면 전도성이 증가함에 IPMC에 비교적 동등한 전압을 줄 수 있어 이온-수분 클러스터들의 움직임이 활발할 수 있으나 IPMC 강성으로 인하여 큰 변화를 얻을 수 없었으며 모델값 Figiure 10과 비교하여 곡률 값은 비교적 정확하게 묘사되었다.

모델링 적용. 이온교환막의 인장계수는 고분자의 수

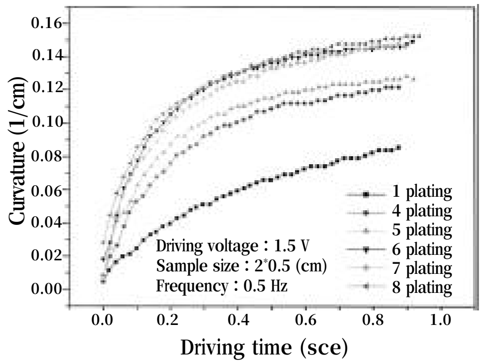

Figure 7. Dynamic curvature charge of IPMC as a function of platinum plating times.

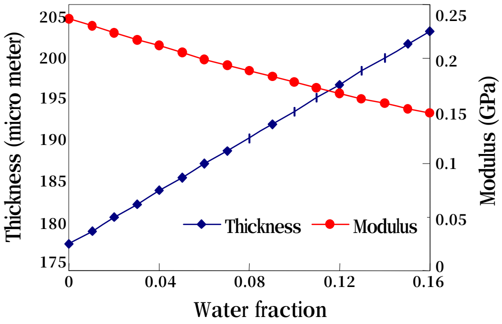

Figure 8. Estimated modulus and thickness change of Nafion 117 as a function of water content calculated by model equation in text.

분함량과 이온종류, 클러스터의 직경의 변화에 영향을 받으며 제안된 식은 다음과 같다.[17]

$$E/E_0 = \exp\left[-\acute{a}\left(c + \frac{1200 - M_{eq}}{20}\right)\right] \quad (7)$$

여기서 E_0=0.275 GPa, a=0.0294, c는 건조된 Nafion 고분자 100 g당 수분의 함유량(g), M_{eq}는 Nafion의 당량 분자량(equivalent molecular weight)이다. 포아송비의 상수는 0.487로 하였다.[16] 수분 팽창계수 b는 Nafion117의 최대수분 흡수량과 각층의 팽창에 의해 계산되며 이는 다양한 실험 상황과 연구자에 따라 달라진다. 본 연구에서 Nafion 117의 두께는 수분 흡수량이 16%일 때 178에서 202 ㎛ 까지 변화하며[19] 식 (7)을 이용하여 각각의 탄성계수와 두께를 이용하여 수분 비에 따른 변화를 Figure 8로 나타내었다.

구동체의 움직임은 전기장, 수분을 당기는 힘, 막의 팽창과 수축, 정전기적 힘 등의 변화에 의해 이온의 움직임의 결합된 형태로써 결정되어지는 것으로 사료되어진다.[1,12,20] 그 결과 IPMC의 구동은 고분자 내부의 수분이 비대칭적으로 분포함으로써 생성되며 이는 팽창된 고분자의 다양한 탄성계수 값의 결과를 얻게 된다. 고분자에 있어서 기계적인 변형과 힘뿐만 아니라 이온의 집중화와 수분의 분포를 예견하기 위해 다양한 모델들이 시도된 바 있으며 많은 연구들이 제각기 다른 계산, 수분과 이온의 집중분포에 대한 제시를 하였다.[21-26] 그러나 이온 클러스터 유동성의 관점에서 모델 제시를 입증할 만한 실험결과가 없다. 따라서 우리는 수분 집중분포가 고분자의 음극과 양극 사이에 선형적으로 존재한다고 가정하였고, 변형, 힘 잔여응력분포에 대한 수분함량의 효과를 추측하였다. 본 연구에서는 Nafion 117이 똑 같은 두께를 가진 20개의 층으로 이루어져 있으며 음극에서의 C_{max}와 양극에서 C_{min}으로부터 각각 다른 수분함유를 포함한다고 가정하였다. 층의 개수가 20개를 넘는 경우 별로 차이를 보이지 않았다. 수분 이동의 양은 전기량에 의해 평형 상태에서 전극쪽으로 이동하는 수분의 양으로 정의하였고, 이것을 가정한 대로 수분 집중의 단선적 분포는 단순하게 0.5 C_{max}로 계산될 수 있었다. 구동체에 있어서 수분의 전체적인 양에 따라 구동체의 전체적인 두께는 b= 0.8425 C를 사용하였다.

Figure 9에서는 모델을 이용하여 계산된 IPMC 내부의 응력 분포를 보여주고 있다. IPMC 적층판 끝부분의 응력은 백금전극에 있어서 응력을 보여준다. 백금전극에서 큰 응력이 나타나는 것은 백금의 탄성계수가 이온교환막보다 크며 따라서 대부분의 응력이 수분 이동에 의해 백금 전극에서 발달하기 때문이라고 사료된다. 기호는 압축과 인장의 방향을 나타내주며 백금전극 바로 붙어있는 고분자막의 층은 수분에 의한 변형을 하려하지만 백금전극으로 인하여 제한을 받아 자유로운 상태로의 변형을 할 수 없게 되므로 백금전극과 부호가 반대로 나타나게 되는 것이다.

Figure 10에서 휘어지는 운동 즉 곡률은 이동한 수분의 양에 의해 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다. 모델에 따르면 수분이동이 약 3.5%인 경우에 약

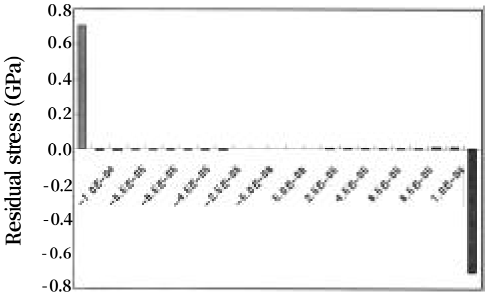

Figure 9. Calculated residual stress in IPMC layers created by water migration. Two residual stresses at the ends represent platinum electrodes.

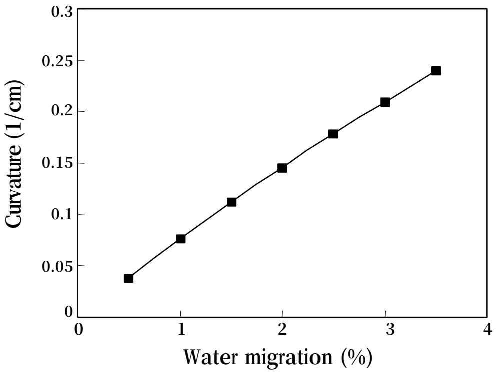

Figure 10. Calculated curvature of IPMC strip plotted as a function of water migration.

0.25 cm의 곡률을 만들어낸다는 것을 알 수 있는데 이정도의 곡률범위에서 실제 IPMC가 작동하므로 약 3 - 4%의 수분의 이동이 IPMC의 구동기에서 발생한다는 것을 유추할 수 있었다. 본 연구에서 제한하는 모델은 이방성(anisotropy)을 갖는 소재에 확장적용할 수 있는 것으로써, 앞으로 IPMC 구동기의 응용에 사용될 이방성구동체의 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 또한 백금전극의 두께, Nafion의 두께 및 양이온의 종류 및 수분이동능력 등의 설계 및 해석에 이용되어 구동기의 최적화 및 전기화학적 모델링에 접목될 수 있으리라 사료된다.

결 론

본 연구에서는 IPMC를 이용한 새로운 형태의 구동물질을 성공적으로 제조하였고 그에 따른 다양한 구동특성을 연구하였으며 고전적 적층 이론을 이용하여 IPMC의 모멘트, 수분과 곡률의 관계를 해석하였다. 이로부터 실험적으로 관찰되는 IPMC의 구동현상을 수분의 이동에 의한 모델로서 묘사하였다. 이모델을 이용하면 다양한 구동체를 제작하기에 필요한 특성들을 예측할 수 있다고 사료되어진다.

감사의 글 : 본 연구는 21 C 프론티어 사업인 지능형 마이크로 시스템 과정연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Shahinpoor, *Systems and Control, World Scientific*, p. 31 (1998).
2. Y. Bar - Cohen, S. Leary, M. Shahinpoor, J. O. Harrison, and J. Smith, *Proc. of SPIE,* 3669, 57 (2000).
3. Furukawa and J. X. Wen, *Japanese J. of Appl. Physics*, 23, 677 (1984).
4. I. W. Hunter and S. Lafontaine, *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, p. 165 (1992).
5. R. Pelrine, R. Kornbluh, J. Joseph "Artificial muscle actuator", *Proc. of the Frist Int. Micromachine Symp.*, p. 143, Nov. 1 - 2 (1995).
6. J. - H. Lee, J. - D. Nam, H. R. Choi, H. M. Kim, J. W. Jeon, H. K. Kim, and Y. - S. Tak. *1st Int. Microsystem Symp.*, p. 183, Seoul (2001).
7. J. - H. Lee, J. - D. Lee, H. - R. Choi, H. M. Kim, J. W. Jeon, H. K. Kim, and Y. - S. Tak, *Proc. of SIPE*, 4329, 63 (2001).
8. K. J. Kim, M. Shainpoor, and A. Razami, *Proc. of SPIE*, 3987, 315 (2000).
9. K. S. Pister and S. B. Dong, *J. Eng. Mech. Division, ASCE*, 1 (1959).
10. E. Ressner and Y. Stavsky, *J. Appl. Mech.*, 402 (1961).
11. R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", Hemisphere Pub. Co., New York, 1975.
12. I. M. Daniel and O. Ishai, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, New York, 1994.
13. P. Millet, M. Pineri, and R. Durand, *J. Appl. Electrochem.*, 19, 162 (1989).
14. P. Millet, R. Durand, E. Dartyge, G. Tourillon, and A. Fontaine, *J. Electrochem. Soc.*, 140, 1373 (1993).

15. H. Takenaka, E. Torikai, Y. Kawami, and N. Wakabayashi, *Int. J. Hydrogen Energy*, 7, 397 (1982).
16. R. Liu, W. - H. Her, and P. S. Fedkiw, *J. Electrochem. Sco*., 139 (1), 15 (1992).
17. W. G. F. Grot, C.E. Munn, and P. N. Walmsly, *J. Electrochem. Sco*., 119, 108C, (1972).
18. J.Y. Li and S. Nermat - Nasser, *Proc. of SPIE*, 3987, 103 (2000).
19. Y. Bar - Cohen, S. Leary, A. Yavrouian, K. Oguro, S. Tadokoro, J. Harrison, J. Smith, and J. Su, *Proc. of SPIE*, 3987, 140 (2000).
20. S. Tadokoro, S. Yamagami, T. Takamori, and K. Oguro, *Proc. of SPIE*, 3987, 92 (2000).
21. S. Tadokora, J. Y. Li, and S. Nemat - Nasser, *Proc. of SPIE*, 3987, 103 (2000).
22. S. Nemat - Nasser and J. Y. Li, *Proc. of SPIE*, 3987, 82 (2000).
23. E. T. Enikov and B. J. Nelson, *Proc. of SPIE*, 3987, 129 (2000).
24. J. Y. Li and S. Nemat - Nasser, *Proc. of SPIE*, 3987, 103 (2000).
25. M. Benslimane, P. Gravesen, K. West, S. Skaarup, and P. Sommer - Larsen, *Proc. of SPIE*, 3669, 87 (1999).
26. S. Nemat - Nasser and J. Y. Li, *J. Appl. Phys*., 87 (7), 3321(2000).