

캡슐형 내시경 로봇의 IPMC 액추에이터 모델링

오신종* · 김훈모** · 최혁렬*** · 전재욱**** · 남재도*****

Modeling of IPMC Actuator for the Endoscopic Microcapsule

Sin-Jong Oh, Hunmo Kim, Hyoukryeol Choi, Jae Wook Jeon and Jae-Do Nam

Key Words : IPMC, EAP, Endoscopic Microcapsule(캡슐형 내시경), 모델링, 직교성

Abstract

The Ionic Polymer Metal Composite (IPMC) is one of the electroactive polymer (EAP) have potential application as micro actuators. In this study, IPMC is used as actuator to control of the direction for the endoscopic microcapsule. Because it bends in water and wet conditions by applying a low voltage (1~3 V) to its surfaces. The basic characteristics and the static modeling of IPMC are discussed. Also the dynamic modeling is performed using the Lagrange' equation. Computer simulation results show that the performed modeling guarantee similarity of actual system.

1. 서 론

폴리머는 무게의 가벼움, 적은 비용, 연한 재질 등의 특성을 가지고 있어서 기존의 모터, 공압 등을 이용한 액추에이터에서는 볼 수 없는 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 수년 전부터 기능성 고분자 폴리머(electroactive polymer, EAP)의 응용에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이러한 기능성 고분자 폴리머를 이용한 액추에이터의 몇 가지 특징을 살펴보면 첫째로 인체 친화적인 특성을 지니고 있어서 '인공근육', 또는 생물체의 움직임을 모방한 액추에이터(biomimetic actuator) 및 Fig.1 에서 보는 것처럼 현재 개발중인 캡슐형 내시경 로봇과 같이 인체 내부를 이동하는 액추에이터에 사용되어질 수 있다. 둘째, 이러한 EAP 의 또 다른 장점중의 하나로는 현재 많은 분야에서 큰 관심을 갖고 연구되어지고 있는 MEMS 분야에 이용할 수 있다는 점이다. 이는 EAP 물질들이 작은 형태로의 가공이 용이하고 또한 비용면에서도 기존의 MEMS 보다는 훨씬 경

제력을 가지기 때문이다. 이외에도 자체의 연한 성질 때문에 기존 액추에이터에서 사용되기 어려운 유연성을 요구하는 곳에도 사용 가능하다.

일반적으로 EAP 는 그들의 활동 메커니즘(activation mechanism)을 바탕으로 크게 전자적 폴리머(electronic polymer)와 이온적 폴리머(Ionic Polymer) 두 가지 형태로 구분할 수가 있다.

전자적 폴리머의 특징은 높은 구동 전압(> 150 v / μ m)을 요구하나 직류 전압에서 변위를 만들어낼 수 있고 또한 높은 기계적 에너지 밀도를 가지고 있으며 큰 제약조건 없이 공기상에서도 작동이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 로봇응용에 많이 사용되어질 수 있다. 이러한 폴리머에는 일렉트로스트릭티브 폴리머(Electrostrictive Polymer, EP), 정전기형 폴리머(Electrostatic Polymer), 압전형 폴리머(Piezoelectric Polymer) 그리고 강유전형 폴리머(Ferroelectric Polymer) 등이 있다.

또 다른 형태인 이온적 폴리머에는 젤(Gels), IPMC(Ionic Polymer Metal Composite), 전도성 폴리머(Conductive Polymer) 그리고 카본 나노튜브(Carbon nanotube) 등이 있다. 이러한 이온적 폴리머는 1-5 V 의 낮은 구동전압과 큰 변형을 보이는 장점이 있으나 항상 수분 상태를 유지해야 하고(전도성 폴리머 제외) 직류 전압에서는 그 변형을 유지하기가 힘들다. 따라서 본 논문에서 다루게 될 IPMC 는 직류 전압 하에서 액추에이터로 사용되어질 수 있기 위해서는 적절한 제어 알고리즘을

* 성균관대학교 대학원 기계공학부
 ** 성균관대학교 기계공학부
 *** 성균관대학교 기계공학부
 **** 성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터공학부
 ***** 성균관대학교 화학 고분자 및 섬유공학부

개발하여야 한다. 특히 현재 액추에이터로 사용 가능성이 높은 몇몇 기능성 고분자 폴리머들은 대부분 기본적인 실험을 통한 그 특성을 파악하여 몇 가지 기본적인 액추에이터의 응용을 해본 정도이다.⁽⁴⁻⁶⁾ 따라서 IPMC의 제어에 앞서 우선 가장 적합한 동적 모델링을 수행 할 필요성이 있다. 이에 본 논문에서는 IPMC의 기본 특성 실험과 이론을 통한 동적 모델링수행을 하고자 한다.

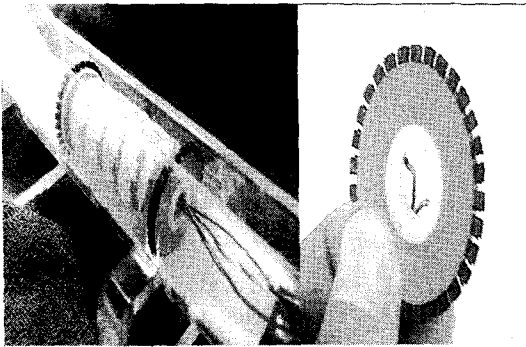
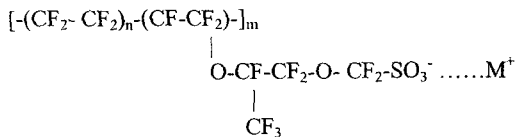


Fig. 1 Endoscopic capsule on developing using IPMC actuator

2. IPMC의 일반적 특성

2.1 동작원리

일반적인 IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)는 Nafion®, Flemion®과 같은 퍼플로리네이트(Perfluorinated)된 이온 교환 고분자 막에 금, 또는 백금 금속을 화학적으로 코팅한 형태를 이루고 있다. IPMC의 전형적인 화학구조는



와 같이 이루어져 있다. 여기에서 양이온 M⁺는 카운터 이온이라고 불리는 데 이는 H⁺, Li⁺, Na⁺ 등의 다른 양이온으로 바꿀 수가 있다.⁽⁷⁾

스트립 타입의 IPMC의 전체적인 외형을 살펴 보면 Nafion 양 표면에 백금 코팅이 되어있어서 끝단에 전극을 설치하여 전압을 가해주면 굽힘 운동을 하는 것을 알 수가 있다. 이러한 운동의 원인은 Nafion에 전압을 가해줄 때 SO₃⁻ 분자그룹들은 고정되어지고 양이온, 즉 카운터 이온인 M⁺만 떨어져 나와 양극쪽으로 이동을 하게 된다. 이

때 물분자도 양이온을 따라서 양극쪽으로 이동을 하게 된다. 이때 양극쪽으로 물분자와 양이온이 몰려서 IPMC가 팽창하면서 휘는 것을 관찰할 수 있다. 만약 반대 전압이 가해지면 다시 양이온과 물분자가 반대쪽으로 이동하여 기존의 휘었던 부분이 이번에는 수축을 하여서 반대로 휘는 것을 볼 수 있다 (Fig.2 참조). 이때 인가 전압을 달리하면 그 변형 정도의 차이를 얻을 수 있다. 따라서 IPMC는 이러한 변형을 이용하여 액추에이터 구동체로서 사용되어질 수 있다.⁽⁸⁾

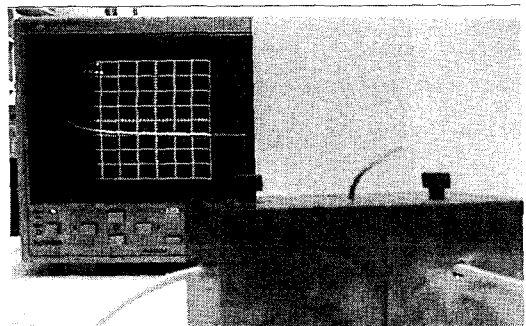


Fig. 2 The bending motion experiment of IPMC

2.2 기본특성

IPMC는 다음과 같은 특성을 가지고 있다.⁽⁹⁾

- 구동 전압이 1~3 volt 정도로 다른 기능성 고분자 폴리머보다 낮다.
- 100Hz 이상의 주파수 입력에도 반응을 할 정도로 응답속도가 빠르다.
- 탄성계수가 약 2.2×10^8 Pa 정도로 꽤 유연한 물질이다.
- 1mm 이하로도 가공이 가능하다. 따라서 소형 액추에이터 개발에도 사용이 가능하다.
- 106 정도의 반복굽힘에도 견딜 정도로 내구성이 좋다.
- 굽힘에 의해서 발생하는 힘은 매우 작다. (크기가 5mm×20mm×0.2mm인 외팔보 형태의 액추에이터 끝단에서 발생하는 힘은 약 0.8gf 정도임)
- 이것은 물 속 또는 젖은 상태에서 원활한 작동을 할 수 있다.

3. 모델링

3.1 기본실험

우선 IPMC를 Fig.3처럼 단순 지지된 외팔보(cantilever)로 가정을 한다.

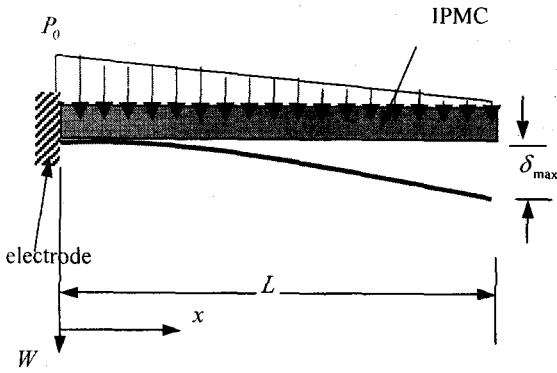


Fig. 3 Simplified model of IPMC as applying an input voltage

즉, 전압이 인가되었을 때 IPMC가 굽어지는 모습을 외부에서 힘 $P(x)$ 가 작용을 한 것처럼 가정을 하였다. 이때 힘의 분포가 전극쪽에서 멀어질수록 작아지는 것은 IPMC의 표면 저항에 의해서 전극에서 멀어질수록 전압의 분포가 작아지기 때문이다. 전압과 변위를 관계를 알기 위해 실험을 수행하였다. 실험을 위한 장치는 Fig.4와 Fig.5에서 보여주고 있다.

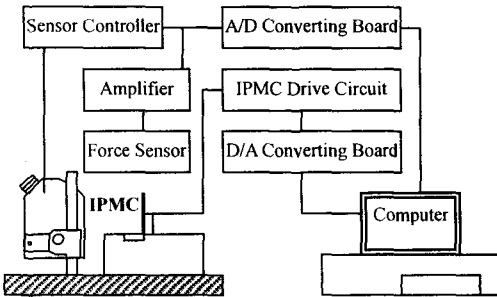


Fig. 4 Experimental setup

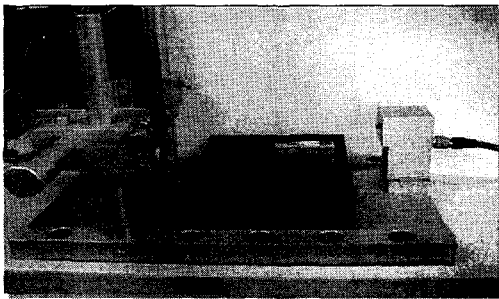


Fig. 5 The measurement device set for displacement and force of IPMC

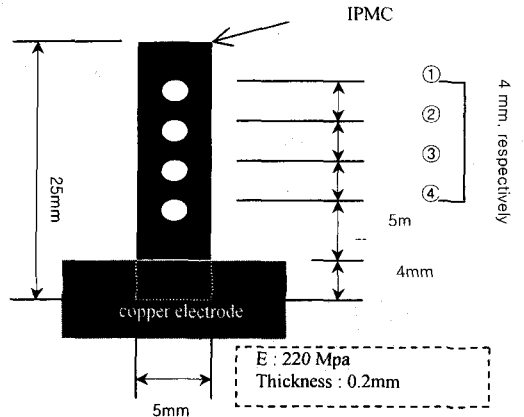


Fig. 6 IPMC (5 mm x 24 mm x 0.2 mm) between copper electrodes for experiment

Fig.6은 백금으로 2회 코팅한 IPMC 시편에 일정한 간격으로 점을 표시하고 구리 전극사이에 끼운 후 레이저 변위 센서를 이용하여 전압을 가하였을 때 각 지점의 변위값을 측정하였다.

그 결과로써 Fig.7은 전압을 증가시키면서 각 지점에서의 변위값을 측정된 것과 각 지점에서의 전압 증가에 따른 변위값을 보여주고 있다. (여기서는 2V, 1.5Hz의 전압 인가)

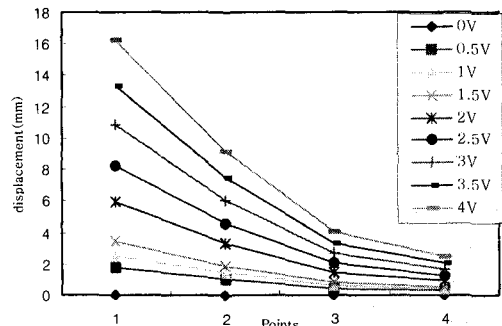
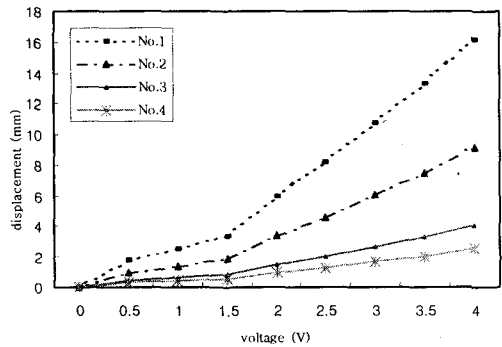


Fig. 7 Displacement of each point of IPMC with respect to input voltage

이렇게 인가 전압을 바꾸면서 각 지점에서의 변위값을 여러 번의 실험을 통해서 측정한 후에 수치 해석적으로 전압과 변위의 관계식을 유도해 낼 수 있고, 여기서는 IPMC 끝단의 변위, 즉 최대 변위값을 알기 위한 관계식을 다음과 같이 나타내었다.

$$\delta_{\max} = \frac{9.4}{125} \times L \times (-0.0016V(t)^5 + 0.691V(t)^3 + 0.611V(t)) \quad (1)$$

3.2 동적 모델링

Fig.3 에서 외팔보로 가정한 IPMC 의 힘과 변형량과의 관계식을 식(2)와 같이 유도해 낼 수 있다.

$$EI \cdot W(x) = \frac{P_0}{120L} (L-x)^5 - \frac{P_0}{24} L^3 (L-x) + \frac{P_0}{30} L^4 \quad (2)$$

식(1)에서 구한 δ_{\max} 값을 식(2)의 값에 대입하면 식(3)의 P_0 라는 값을 얻을 수가 있다.

$$P_0 = \frac{30EI}{L^4} \cdot \delta_{\max} \quad (3)$$

이 값을 이용하면 다음과 같이 IPMC 에 가해졌다고 가정한 힘 $P(x)$ 를 구할 수가 있다.

$$P(x) = -\frac{P_0}{L} (x-L) = -\frac{30EI}{L^5} \cdot \delta_{\max} (x-L) \quad (4)$$

3.2.1 운동 방정식

이제 IPMC 를 액추에이터로서 사용하기 위한 제어기 설계를 하기에 앞서 이것의 동적 모델링을 수행하고자 한다. Fig.3 으로부터 라그랑지안 방정식(Lagrange's equation)을 이용하여 운동방정식을 유도해보자.⁽¹⁰⁾

위치에너지(Potential energy) V 는

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L EI (W'')^2 dx \quad (5)$$

여기서 E : 탄성계수, I : 면적 2 차 모멘트

운동에너지(Kinetic energy) T 는

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \dot{W}^2 dx \quad (6)$$

여기서 ρ : 밀도, A : 단면적

외팔보로 가정한 IPMC 의 경계조건은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} W(0,t) &= 0, & W'(0,t) &= 0, \\ W''(L,t) &= 0, & W'''(L,t) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

부분 적분을 사용하여 식(5)를 전개하면

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \int_0^L EI \left[\frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \right]^2 dx \\ &= \left[\left| \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \right|_0^L - \left| W(x,t) \cdot \frac{\partial^3 W(x,t)}{\partial x^3} \right|_0^L \right. \\ &\quad \left. + \int_0^L W(x,t) \cdot \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} dx \right] \cdot \frac{1}{2} EI \quad (8) \end{aligned}$$

여기서 식(7)의 경계조건을 대입하면 위식은 다음과 같이 정리된다.

$$V = \int_0^L W(x,t) \cdot \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} dx \quad (9)$$

식(6)과(9)로부터

$$\begin{aligned} L &= T - V \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \dot{W}^2 dx - \frac{1}{2} EI \int_0^L W(x,t) \cdot \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} dx \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 L 은 라그랑지안 함수(Lagrangian function)이다. 위식으로부터 운동방정식을 유도하기 위해서 식(11)의 라그랑지안 방정식을 이용한다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{W}} \right) - \frac{\partial L}{\partial W} = P(x) \quad (11)$$

식(10)을 식(11)에 대입하면 외팔보로 가정한 IPMC 의 운동방정식은

$$\rho A \ddot{W} + EI \cdot \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} = P(x) \quad (12)$$

으로 표현할 수 있다.

3.2.2 방정식 해석 (Modal analysis)

일반해(Homogeneous solution)를 구하기 위해서

식(12)의 $P(x)$ 는 0으로 놓고 정리하면

$$c^2 \cdot \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

$$\text{여기서, } c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

식(13)의 편미분방정식을 풀기 위해서 변수분리법(separation of variables)을 이용한다. 즉, 변위 $W(x,t)$ 는 x 만의 함수와 t 만의 함수의 곱으로 표현될 수 있다고 가정하면

$$W(x,t) = X(x) \cdot T(t) \quad (14)$$

식(14)를 식(13)에 넣고 정리하면,

$$\frac{c^2}{X(x)} \cdot \frac{d^4 X(x)}{dx^4} = -\frac{1}{T(t)} \cdot \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = \omega^2 \quad (15)$$

식(15)는 다음의 두 항으로 분리할 수가 있다.

$$\frac{d^4 X(x)}{dx^4} - \beta^4 X(x) = 0 \quad , \beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (16)$$

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 \cdot T(t) = 0 \quad (17)$$

여기서 식(16)은 모드모양(mode shape)을 결정해주고 식(17)은 모달폭(modal amplitude)을 결정해 준다.

식(4.11)을 풀면

$$X_n(x) = [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)] \quad (18)$$

$$\text{여기서, } \sigma_n = \frac{\sinh \beta L - \sin \beta L}{\cosh \beta L + \cos \beta L}$$

모달 방정식(17)에 모달 감쇠식 $2\xi\omega \cdot \dot{T}(t)$ 를 추가시키면

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + 2\xi\omega \cdot \frac{dT(t)}{dt} + \omega^2 \cdot T(t) = 0 \quad (19)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 식(19)를 풀면,

$$T_n(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left\{ c_0 \cos(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) + c_1 \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) \right\} \quad (20)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

식(18)와 식(20)을 식(14)에 넣고 정리하면 일반해 $W_h(x,t)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_h(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \cdot T_n(t) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)] \\ &\quad \times e^{-\xi\omega_n t} \left\{ c_0 \cos(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) + c_1 \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

식(12)에서 $P(x)$ 항이 들어간 식은 변수분리법으로 풀수가 없다. 따라서 여기서는 변위 $W(x,t)$ 를 아래와 같이 가정한다.

$$W(x,t) = M(x,t) + \phi(x) \quad (22)$$

식(22)를 식(12)에 대입하여 정리하면

$$\rho A \ddot{M} + EI \cdot \frac{\partial^4 M(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 \phi(x)}{\partial x^4} = P(x) \quad (23)$$

$$\frac{\partial^4 \phi(x)}{\partial x^4} - P(x) = 0 \quad (24)$$

식(24)를 만족하도록 $\phi(x)$ 를 선택하면, 경계 조건 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W(0,t) &= M(0,t) + \phi(0) = 0 \\ W'(0,t) &= M'(0,t) + \phi'(0) = 0 \\ W''(L,t) &= M''(L,t) + \phi''(L) = 0 \\ W'''(L,t) &= M'''(L,t) + \phi'''(L) = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 $\phi(0) = \phi'(0) = \phi''(L) = \phi'''(L) = 0$ 가 되는 $\phi(x)$ 를 선택했다고 가정하면 식(25)는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} W(0,t) &= M(0,t) = 0 & W'(0,t) &= M'(0,t) = 0 \\ W''(L,t) &= M''(L,t) = 0 & W'''(L,t) &= M'''(L,t) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

식(4)를 식(24)에 대입하면,

$$\frac{\partial^4 \phi(x)}{\partial x^4} = -\frac{30EI}{L^5} \cdot \delta_{\max}(x-L) \quad (27)$$

이 미분방정식을 풀면,

$$\phi(x) = EI \cdot \delta_{\max} \left(-\frac{x^5}{4L^5} + \frac{5x^4}{4L^4} - \frac{5x^3}{2L^3} + \frac{5x^2}{2L^2} \right) \quad (28)$$

이다. IPMC의 초기속도와 초기변위가 0이라고 놓으면 $W(x,0) = \dot{W}(x,0) = 0$ 이고 이식을 식(22)에 넣으면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} M(x,0) &= W(x,0) - \phi(x) = -\phi(x) \\ \dot{M}(x,0) &= \dot{W}(x,0) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

식(21)에서 $W(x,t)$ 를 $M(x,t)$ 로 바꾸어서 쓰면,

$$\begin{aligned} M(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)] \\ &\times e^{-\xi \omega_n t} \left\{ c_0 \cos(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) + c_1 \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

위 식(30)에 $t=0$ 을 대입하면,

$$\begin{aligned} M(x,0) &= \sum_{n=1}^{\infty} [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)] \times c_0 \\ &= -EI \cdot \delta_{\max} \left(-\frac{x^5}{4L^5} + \frac{5x^4}{4L^4} - \frac{5x^3}{2L^3} + \frac{5x^2}{2L^2} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

식(31)를 풀기 위해 직교성(orthogonality)을 이용하면,

$$\begin{aligned} \int_0^L [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)] \\ \cdot M(x,0) \cdot dx &= c_0 \times \\ \int_0^L [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)]^2 dx \end{aligned} \quad (32)$$

같은 방법으로 $\dot{M}(x,0)$ 를 구하면,

$$c_0 = \frac{1}{Q_n(x)} \int_0^L X_n(x) \cdot M(x,0) \cdot dx \quad (33)$$

$$c_1 = \frac{1}{Q_n(x)} \int_0^L X_n(x) \cdot \dot{M}(x,0) \cdot dx \quad (34)$$

여기서,

$$Q(x) = \int_0^L [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)]^2 dx \quad (35)$$

식(29)로부터 $c_1 = 0$ 이고 c_0 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{1}{Q_n(x)} \\ &\times \int_0^L -EI \cdot \delta_{\max} \left(-\frac{x^5}{4L^5} + \frac{5x^4}{4L^4} - \frac{5x^3}{2L^3} + \frac{5x^2}{2L^2} \right) X_n(x) \cdot dx \\ &= \frac{S_n(x)}{Q_n(x)} \end{aligned} \quad (36)$$

여기서,

$$S_n(x) = \int_0^L -EI \cdot \delta_{\max} \left(-\frac{x^5}{4L^5} + \frac{5x^4}{4L^4} - \frac{5x^3}{2L^3} + \frac{5x^2}{2L^2} \right) X_n(x) \cdot dx \quad (37)$$

식(30)과(36)에서 $M(x,t)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} M(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)] \\ &\times \left[c_0 \cdot e^{-\xi \omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) \right] \end{aligned} \quad (38)$$

최종적으로 변위 $W(x,t)$ 는 식(22),(28),(38)로부터 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} W(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} [(\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x) - \sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)] \\ &\times \left[c_0 \cdot e^{-\xi \omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) \right] \\ &+ EI \cdot \delta_{\max} \left(-\frac{x^5}{4L^5} + \frac{5x^4}{4L^4} - \frac{5x^3}{2L^3} + \frac{5x^2}{2L^2} \right) \end{aligned} \quad (39)$$

4. 시뮬레이션

3장에서 수행하였던 동적 모델링을 검증해보기 위해서 컴퓨터 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig.8에서는 크기가 20 mm×5 mm×0.2 mm인 IPMC 시편에 전압(2V)를 인가했을 때 시간에 따른 끝단에서의 변위를 나타내었다. 여기서 ‘*’로 표현된

그래프는 전압이 인가되지 않았을 경우 즉 단순한 충격 힘을 주었을 경우에 IPMC의 끝단의 변위 현상을 보여주는 것이다.

Fig.9는 전압(2V)을 인가하였을 때 시간(0.5초, 1초, 2초, 3초)변화에 따른 IPMC 전길이에 대한 변위값을 나타낸 것이다. 이 그래프에서 보게되면 초반(0.5초)에 변위가 커지다가 몇 번의 진동을 거쳐 일정 변위에 도달하는 것을 볼 수가 있다.

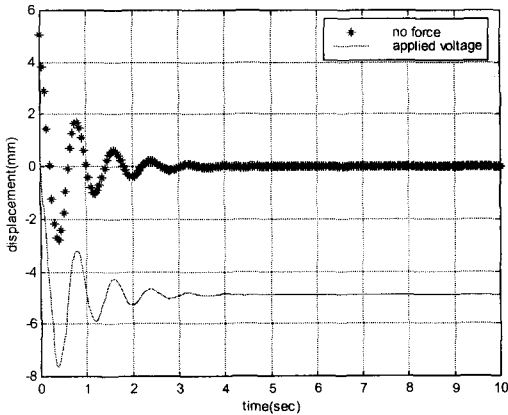


Fig. 8 Displacements of IPMC(end point) as supplying a voltage and no voltage

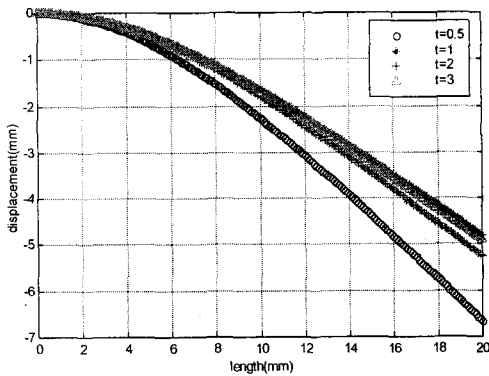


Fig. 9 Displacement of IPMC with respect to time

5. 결론

본 연구에서는 캡슐형 내시경 로봇의 방향전환 액추에이터로 사용되는 IPMC의 힘(인가전압)과 변위와의 관계식을 실험을 통해서 유도하였으며 이를 바탕으로 라그랑지안 방정식을 이용하여 수학적 모델링을 수행하였다. 여기서 수행된 결과는 차후에 액추에이터 제어를 위해서 필요하다.

모델링 결과는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 실제 움직임과의 차이를 확인하여 보았다.

후기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어개발사업 중 “지능형마이크로시스템 개발사업단”의 연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Kornbluh, R., Ronald Pelrine, Qibing Pei, Seajin Oh, and Jose Joseph, 2000, “Ultrahigh strain response of field-actuated elastomeric polymers,” In: *Smart Structures and Materials* (Bar-Cohen, Y., Ed.), Proc. SPIE Vol.3987, pp. 51-64, Newport Beach, USA.
- (2) Zhenyl, M, J.I. Scheinbeim, J.W. Lee, and B.A.Newman, 1994, “High Field Electrostrictive Response of Polymers,” *Journal of Polymer Sciences, Part B-Polymer Physics*, Vol. 32, pp.2721-2731.
- (3) Heydt, R., R. Kornbluh, R. Pelrine, and V. Mason, 1998, “Design and Performance of an Electrostrictive-Polymer-Film Acoustic Actuator,” *J.Sound and vibration*, Vol.215, No.2, pp.297-311.
- (4) R. Kanno et al., “Linear approximate dynamic model of an ICPF (ionic conducting polymer gel film) actuator,” *Proc. IEEE ICRA*, pp.219-225, 1996.
- (5) Tadokoro, S., Shinji Yamagami, Toshi Takamori and Keisuke Oguro., 2000a, “Modeling of Nafion-Pt composite actuators (ICPF) by ionic motion,” In: *Smart Structures and Materials* (Y. Bar-Cohen, Ed.), Proc. SPIE Vol.3987, pp. 92-109, Newport Beach, USA.
- (6) Tadokoro, S., Masahiko Fukuhara, Y. Bar-Cohen, Keisuke Oguro, Toshi Takamori, 2000b, “A CAE Approach in Application of Nafion-Pt Composite (ICPF) Actuators - Analysis for Surface Wipers of NASA MUSES-CN Nanorovers,” In: *Smart Structures and Materials* (Y. Bar-Cohen, Ed.), Proc. SPIE Vol. 3987, pp. 262-272, Newport Beach, USA.
- (7) Yoshiko, A., A. Mochizuki, T. Kawashima, S. Tamashita, K. Asaka and K. Oguro, 1998, “Effect on Bending Behavior of Counter Cation Species in Perfluorinated Sulfonate Membrane-Platinum Composite,” *Polymer for Advanced Technologies*, Vol. 9, pp.520-526.
- (8) Okade T., G. Xie, O. Gorseth et al., 1998, “Ion and Water Transport Characteristics of Nafion Membranes as Electrolytes,” *Electrochem. Acta*, vol.43, no. 24, pp.3741-3747.
- (9) R. Kanno et al., “Characteristics and modeling of ICPF actuator,” *Proc. JUSFA*, pp.692-698, 1994.
- (10) Robert E. Skelton, 1998, “Dynamic systems control: Linear systems analysis and synthesis” John Wiley & Sons, Inc, New York.