

IPM 작동기의 열등가 모델링

Thermal equivalent modeling of an IPM actuator

박흥석¹, *이계한², 이장열³, 조재영³

H. S. Park¹, *K. Rhee(khanrhee@mju.ac.kr)², J. Y. Lee³, J. Y. Jho³

¹ 한국과학기술연구원 의과학연구소, ²명지대학교 기계공학과, ³서울대학교 화학생물공학부

Key words : IPMC, actuator, FEM, thermal equivalent model

1. 서론

전기활성 고분자는 전기적 자극을 가하면 고분자 내부의 화학적 반응을 통해 작동력과 변위가 발생하는 특성이 있으므로 생체모사형 작동기 및 마이크로 로봇 등의 개발에 응용되고 있다[1,2]. Nafion, Flemion, Aciplex 등의 이온성 고분자 막에 백금 등의 전도성 금속을 plating한 이온고분자 금속 복합체(Ionic Polymer Metal Composite, IPMC)는 금속 전극에 인가한 전압에 의해 막 내부의 이온의 이동에 따른 수축과 팽창이 발생하며 이에 따라 작동력과 변위가 발생한다. IPMC는 비교적 낮은 전압에서 큰 작동 변위를 발생시킬 수 있으므로 다양한 분야에 응용이 가능한 소형 경량의 작동기로서 개발되고 있으며, 성능의 향상을 위하여 미세 구조의 최적화 및 제작 방법의 개선에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다[3,4,5].

IPMC의 전기-화학-기계적 특성에 관한 다양한 이론 및 실험적 연구가 수행되고 있으며, IPMC 작동기의 모델링은 IPMC의 개발 및 성능 예측에 중요하다. Nemat-Nasser는 IPMC에서 발생하는 다양한 물리화학적 변화를 마이크로역학을 기반으로 비교적 상세하게 물리적으로 모델링하였다[6,7]. 이 방법은 물리화학적 이론의 제시가 명확하나, 방법이 복잡하고 물리화학적 모델링에 요구되는 다양한 물리량, 파라미터, 경계조건의 결정이 어려우므로, 단순한 일차원 모델에 제한적으로 응용이 가능하다. Toi 등은 인가전압에 의한 이온의 분포를 모델링하여 이에 따른 아이젠 응력 및 변위의 발생을 두 쌍의 전극을 갖는 보 모델에서 유한요소법을 이용하여 계산하였다[8]. 이 방법은 고분자 내부에서 발생하는 다양한 전기-화학-기계적 반응 중 전기화학적 반응의 모델링에 초점을 두고 연구를 수행하였다.

IPMC 작동기 내부의 복잡한 물리화학적 반응의 정확한 모델링이 어렵고 많은 가정 및 모델 파라미터의 결정이 요구되므로, 작동기의 내부의 복잡한 현상을 고려하지 않고 블랙박스화 하여, 작동기에 가해진 전압과 발생변위의 관계만을 고려하여 모델링하는 방법이 제시되었다[9,10]. 이 방법은 실험을 통하여 전압과 변위의 관계를 구하고, 이를 이용하여 특정 형상이나 경계조건을 만족하는 작동기에 응용하는 방법이다. 이 모델링 방법은 이온의 이동 및 응력 발생의 물리적 현상을 모델링하지 않고, 주어진 입력(전압) 및 출력(변위)의 관계만을 모델링하므로, 모델링의 물리적 근거의 제시가 부족하나, 유사한 형상 및 경계조건의 모델에 대하여 다양한 전압 및 변위의 관계를 비교적 용이하고 정확하게 예측할 수 있다.

본 연구에서는 보 형상의 IPMC 작동기의 정적 구동 특성을 예측하기 위하여 열 등가 모델을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 전도성 고분자에 전압을 인가하면 이온의 이동이 발생하며, 이에 따른 팽창 및 수축에 의해 변형이 발생하며 이는 온도의 변화에 의한 열팽창 및 수축과 유사성을 갖는다. 열 등가 모델에서는 인가 전압과 온도, 전압에 의한 변형의 발생과 열팽창에 의한 변형의 발생의 유사성을 이용하여 모델링을 수행한다. 이 방법은 다양한 전기활성 고분자 보의 굽힘각, 모멘트 및 변형의 해석에 응용되고 있다 [11,12]. 본 연구에서는 열등가 보 모델링 파라미터를 실험적 결과를 이용하여 결정하고, 이를 이용한 유한 요소 해석을 통하여 제시한 모델의 유효성을 검증하고자한다. 또한 보 모델의 표면 전극 패턴에 따른 보 형상의 변화를 예측하여 IPMC를 이용한 다양한 구동 발생의 가능성을 고찰하고자 한다.

Model type	#1		#2
Applied voltage	3V	4V	6V
Elastic modulus (MPa)	241	421	122
Thermal expansion	1.25e-3	1.69e-3	3.73e-3

Table 1 Calculated material properties for different applied voltages of model type #1 and type #2.

2. 방법

본 연구의 IPMC 동작기는 가상의 두 층으로 이루어진 등가 바이모프 보 모델로 간략화 하였으며 크기는 같고 부호가 반대인 열팽창 계수를 가지는 윗 층과 아랫 층이 서로 다른 부피 변형을 일으킴에 따라 동작기의 휨 변형이 발생한다고 가정하였다. 상요 유한요소 코드인 ANSYS(ver 10.0)를 이용하여 실험에 사용된 것과 동일한 3차원 형상 모델을 생성하고 (Fig. 1) 실험을 통해 측정한 하중-변위 관계 실험값을 이론식에 적용하여 보의 거동을 예측하는데 필요한 전기, 기계적 물리량들을 결정하였다 (Table 1). 등가 바이모프 보 모델의 인가전압과 끝단 변위(s) 관계를 이용하여 IPMC의 전기-기계 연성계수(electro-mechanical coupling coefficient, d_{31})를 계산하고, 이는 다시 열 등가 기법(thermal analogy)을 이용하여 등가의 열팽창 계수(α_1)로 치환하였다. 또한 IPMC의 등가 영계수는 바이모프 보의 막힘 하중(blocking force, F_{bl}) 계산식에 실험을 통해 측정한 보의 막힘하중과 보 모델의 형상을 적용하여 IPMC의 실제 굽힘강성에 따른 영계수를 계산하였다. 구현된 3차원 보 모델은 ANSYS multiphysics에서 제공하는 coupled-field SOLID5 타입의 6면체 요소망으로 유한요소 모델링하였으며 이를 통해 전기, 기계, 열 간 상관관계에 의한 정적 비선형 해석의 수행이 가능하다. IPMC의 거동 구현에 필요한 물성 조건은 IPMC의 형상과 인가전압에 종속적이므로 실험과 해석은 서로 다른 형상으로 제작된 두 가지 타입의 작동기 모델을 이용하여 수행되었다. 실험을 통해 측정된 최대 막힘하중과 끝단 변위 값은 해석 모델의 물성 조건 결정에 변수로 작용하는 동시에 동작기의 거동을 대표하는 수치적 지표가 되므로 이들의 실험값과 해석 결과를 서로 비교함으로써 모델링된 등가 바이모프 보 모델을 검증하였다.

$$d_{31} = \frac{2sH^2}{3VL^2} \tag{Eq. (1)}$$

$$\alpha_1 = \frac{d_{31}}{t} \quad (t = \frac{H}{2}) \tag{Eq. (2)}$$

$$E = \frac{8LF_{bl}}{3WH^2d_{31}E_3} \tag{Eq. (3)}$$

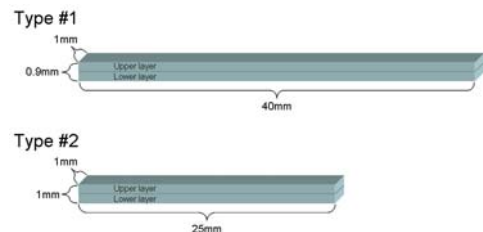


Fig. 1 The 3D bimorph beam model with different geometries

3. 결과

형상이 다른 두 가지 타입의 IPMC 작동기에 대하여 인가전압에 따른 변위와 힘을 실험적으로 측정된 결과를 본 연구에서 제시한 모델을 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과와 비교하였다. 길이가 40 mm인 type #1 model의 경우 인가전압에 따른 하중-변위 관계는 유한 요소 해석 값과 실험적 측정값이 잘 일치하였다. Type #1 model의 시뮬레이션 결과는 3V 인가 시 최대 막힘 하중과 끝단 변위가 각각 0.35gf, 5.00mm로 실험상의 계측 결과인 0.36gf, 4.90mm와 거의 일치하는 결과를 보였다. 또한 4V 인가 경우 역시 시뮬레이션 결과는 각각 1.10gf, 9.02mm로 실험 계측 결과인 1.11gf, 9.10mm와 유사한 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2는 막힘 하중 변화에 따른 변위를 나타낸 관계그래프이다. 길이가 25mm인 type #2 model에 6V 전압을 인가하여 시뮬레이션을 수행하였으며 해석 결과 최대 막힘 하중과 끝단 변위는 2.08gf, 10.50mm로 실험 계측 결과인 2.10gf, 10.50mm와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

작동기의 다양한 변형을 유도하기 위하여 작동기의 길이 방향으로 윗면과 아랫면에 각각 두개의 전극을 입히고, 각 상하 전극에 반대 극성의 전압을 인가하였다. 유한 요소 해석 결과 작동기는 S 형상의 변위를 발생함을 확인하였다(Fig. 3). 따라서 작동기 표면에 다양한 전극 패턴을 입히고, 각 전극에 적절한 전압을 인가함으로써 작동기의 다양하고 복잡한 변형을 유도할 수 있음을 알 수 있었다.

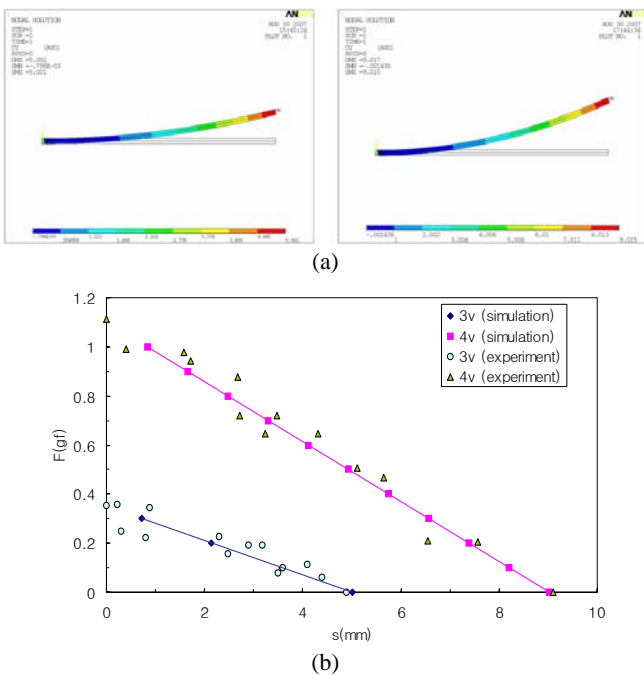


Fig. 2 (a) Simulated displacements using finite element analysis model for applied voltage of 3V and 4V (b) Force-displacement relationships for an IPMC actuator

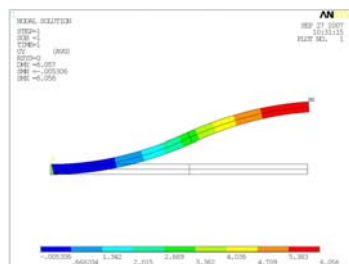


Fig. 3 Simulated displacement of a beam actuator with patterned surface electrodes

4. 결론

본 논문에서는 IPMC 작동기의 거동을 모사할 수 있는 블랙박스 모델로 열등가 보 모델을 제시하였다. 모델링의 중요 파라미터인 전기-기계 연성계수 및 복합체의 영계수는 보에 인가한 전압에 따른 변형과 힘을 실험적으로 측정된 결과를 이용하여 계산하였다. 제시된 보 모델은 전기-기계-열 상관관계를 이용한 정적 비선형 유한요소해석을 수행하였으며 그 결과를 실험의 계측결과와 비교함으로써 모델의 유효성을 검증하였다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 열등가 보 모델의 해석 파라미터 및 경계 조건의 유효성을 증명하였으며, 다양한 표면 전극 패턴 및 경계 조건을 갖는 가상의 작동기 모델에 대하여 시뮬레이션을 수행함으로써 그 거동을 효과적으로 예측할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 IPMC 작동기 모델은 복잡한 형상 및 전극 패턴에 따른 작동기의 거동을 효과적으로 예측할 수 있는 방법으로 사용될 수 있으므로 인공근육 및 생체모방형 작동기의 다양한 응용 분야에 IPMC 작동기의 거동이나 특성을 예측하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(Seoul R&BD Program)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. S. M. Lim, S. Lee, K. J. Yoon and N. S. Goo, "Design and demonstration of a mimimetic wing section using a light weight piezo-composite actuator (LIPCA)," Smart Mater. Struct. vol. 14, pp. 496-503, 2005.
2. E.W.H. Jager, O. Inganas, and I. Lundstrom, "Microrobots for micrometer-size objects in aqueous media; Potential tools for single-cell manipulation," Science, vol. 288, pp. 2335-2338, 2000.
3. M. Shahinpoor and K.J. Kim, "Ionic polymer-metal composite: I. Fundamentals," Smart Mater. Struct. vol. 10, pp. 819-833, 2001.
4. K. J. Kim and M Shahinpoor, "Ionic polymer-metal composite: II. Manufacturing techniques," Smart Mater. Struct. vol. 12, pp. 65-69, 2003.
5. M. Shahinpoor and K. J. Kim, "Ionic polymer-metal composite: III. Modeling and simulation as biomimetic sensors, actuators, transducers and artificial muscles," Smart Mater. Struct. vol. 13, pp. 1362-1388, 2004.
6. S. Nemat-Nasser and L.J. Li, "Electromechanical response of ionic polymer metal composites," J. Appl. Phys. vol. 87, pp. 3321-3331, 2000.
7. S. Nemat-Nasser, "Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites," J. Appl. Phys. vol.92, pp. 2899-2915, 2002.
8. Y. Toi and S. S. Kang, "Finite element analysis of two-dimensional electrochemical-mechanical response of ionic conducting polymer-metal composite beams," Computers and Structures, vol. 83, pp. 2573-2585, 2005.
9. R. Kanno, A. Kurata, M. Hattori, S. Tadokoro, T. Takamori and K. Oguro, "Characteristics and modeling of ICPF actuators," Proc. Japan-USA Symp. on Flexible Automation, vol.2, pp. 691-8, 1994.
10. Y. Xiao and K. Bhattacharya, "Modeling electromechanical properties of ionic polymers," Proc. SPIE 4329, pp.292-300, 2001.
11. S. Lee, H. C. Park and K. J. Kim, "Equivalent modeling for ionic-metal composite actuators based on beam theories," Smart Mater. Struct., vol. 14, pp. 1363-1368, 2005.
12. P. Metz, G. Alici and G. M. Spinks, "A finite element model for bending behavior of conducting polymer electromechanical actuators," Sensors and Actuators A. vol 130-131, pp.1-11, 2006.