혈전용해술을 위한 IPMC 구동특성해석
Analysis of IPMC beam bending behavior for thrombolytic therapy

이정현 [1], *[#]이계한 [1], 오진선 [1], 김문준 [1]
J.H. Lee[1], [#]K. Rhee(khanrhee@mju.ac.kr) [1] , J. S. Oh[1], M. J. Kim[1]
[1] 명지대학교 기계공학과

Key words : IPMC, Thrombolytic therapy, FEM, Concentration boundary layer

1. 서론

유연한 고분자 구동체를 혈전 내부에 삽입하고 진동시킴으로 혈전 내부로 약물 침투를 증가시켜 혈전을 용해하는 새로운 혈전용해술이 제안되었다. 이 방법은 혈관 손상 등의 부작용을 최소화할 수 있고, 약물 주입과 병행 사용할 수 있으며, 혈전용해제의 투여량을 최소화하여 약물에 의한 출혈의 위험성을 감소시키고, 혈전용해 효율을 극대화할 수 있는 새로운 개념의 치료기법이다. 물리적 자극과 혈전용해제 투여를 동시에 사용하여 두 기법의 상승적 효과로 혈전 용해를 획기적으로 가속할 수 있으며, 흡인(suction) 방법과도 동시에 사용이 가능하다. 전기활성 고분자 구동체를 사용한 진동자는 유연하여 혈관에 손상을 주지 않으며, 발생하는 힘과 변위가 음의 상관관계를 가지므로 혈관의 손상을 최소화하고 기구의 신뢰성 및 안전성이 크다. 전기활성 고분자는 전기적 자극을 가하면 고분자 내부의 화학적 반응을 통해 작동력과 변위가 발생하는 특성이 있으므로 생체모사형 작동기 및 마이크로 로봇 등의 개발에 응용되고 있다. 이온성 고분자 금속 복합체(ionic polymer metal composite: IPMC)는 금속 전극에 인가한 전압에 의해 막 내부 이온의 이동에 따른 수축과 팽창이 발생하며 이에 따라 작동력과 변위가 발생한다. IPMC 는 비교적 낮은 전압에서 큰 작동 변위를 발생할 수 있으므로 다양한 분야에 응용이 가능한 소형 경량의 작동기로써 개발되고 있다. [1, 2] 혈전용해에 적합한 구동 특성을 갖는 구동체를 제조하기 위하여, IPMC 진동자의 구동 특성을 예상하여 구동체 제작을 위한 설계 사양을 제공해야 한다. 따라서 본 연구에서는 혈전용해술을 위한 IPMC 진동자의 특성 및 인가전압 특성에 따른 구동 성능을 유한요소법을 이용하여 연구하고자 한다.

2. 실험방법

두께가 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm 인 각각의 IPMC 에 1.0V, 1.5V, 2.0V 전압을 인가하여, 두께에 따른 IPMC 의 변위와 막힘 하중을 측정하였다. 실험 결과 0.2mm 두께의 IPMC 는 다른 두께의 IPMC 에 비해 전압 대비 큰 변형이 발생하며, 2.5V 이상의 전압을 인가하는 경우 전기 분해의 영향으로 인하여 결과값 측정에 어려움이 있으므로 측정값에서 배제 하였다. IPMC 의 변형은 IPMC 가 고정된 위치에서부터 10mm 지점에서, 막힘 하중은 끝 단에서 측정하였다. IPMC 는 전압이 인가되는 경우 큰 굽힘 변형이 나타나게 되므로, 끝단부분의 위치변화로 인하여 측정 점이 변하여 IPMC 의 변위 측정이 어렵게 되므로, 고정 점에서 10mm 떨어진 점의 변형을 측정하게 되었다.

3. 수치해석

IPMC 모델링 시 전기, 화학, 기계적 특성을 고려한 물리화학적 반응의 모델링은 복합적인 이론을 포함 하고 있어 최적화 모델링을 하기 어렵다. [3-6] 본 연구에서는 IPMC 의 모델링 위해 전압과 변위 및 반력 즉, 입력과 출력으로 단순화 시킨 관계만을 고려하여 IPMC 를 해석 모델을 구성하였다. 모델의 유효성을 검증하기 위해 보 형태의 모델을 제작하여 모델에 전압을 인가 하였을 때 힘과 거동의 관계를 측정하였고, 유한요소 해석 결과와 비교하였다.

유한요소해석을 하기 위해 상용코드인 ANSYS (ver. 12)를 이용하였으며, 실험에 사용한 것과 동일한 3 차원 형상을 모델링 하였다. 보 모델은 ANSYS multiphysics 에서 제공하는 coupled-field SOLID5 로 모델링 하였으며[7], 전기-기계-열 상관관계에 의한 정적, 과도 해석을 하였다.[8, 9] 연구에서 사용한 IPMC 모델은 3 층으로 이루어져 있으며, 각각의 경계층은 열 전도계수와 열 팽창계수를 가지고 있다. 위층(Anode)과 아래(Cathode) 경계층은 IPMC 에 구동력을 제공하므로, 두 경계층에서의 이온의 농도의 변화는 급격한 기울기로 변화하게 된다[9]. 경계층 두께는 IPMC 두께 5%로 가정하고, 전기- 기계 연성 계수와 상사성을 갖는 열 팽창계수 α를 파라미터로 사용하였다. 본 연구에서는 모델링을 위하여 IPMC 보의 고정점에서 10mm 떨어진 위치의 변형과 시뮬레이션 결과를 비교하여 열팽창 계수를 결정하였다.

IPMC 의 수학적 모델은 이온 농도의 급격한 기울기 변화가 일어나는 Anode 및 Cathode 경계층과 이온의 농도의 변화가 거의 없는 중간 층으로 총 3 개의 가상 층으로 적층되어 있다고 가정하였다. 물성치는 두께(0.4mm, 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm) 에 따라 105 MPa, 85 MPa, 74 MPa, 66 MPa 를 가지며 푸아송비는 0.4, 밀도는 1000 kg/m^3, 비열은 $0.03J/Kg^0C$ 으로 고정하였다. Anode 및 Cathode 층의 두께는 실험값과 비교하여 시뮬레이션 값이 10% 이하의 오차 값을 가질 때까지 시뮬레이션을 반복하였다.

IPMC 는 주거동이 굽힘으로 나타난다. 유한개의 절점과 절점 사이의 관계를 요소로 표현하는 유한요소해석의 경우, 축을 따라 수평 혹은 수직 방향의 변위는 절점의 변위로 비교적 정확히 알 수 있으나, 굽힘의 경우 절점이 두 축을 따라 동시에 이동하므로 단순히 절점의 특정방향 변위만으로 전체 모델의 한 점에서의 변위를 설명할 수 없다. 즉 IPMC 의 길이방향을 X 방향, 두께방향을 Y 방향으로 모델링 한다면, 실험에서는 변위를 변형 전 고정 점에서 +X 방향 10mm 위치에서 변형 후 고정 점에서 +X 방향 10mm 위치로 측정한다. 고정 점에서 X 방향으로 10mm 에 위치한 절점의 Y 방향 변위는 쉽게 나타나나, 최종 절점의 위치는 고정 점에서 10mm 위치가 아니라, X 방향 변위만큼 이동한 점이 최종위치이다. 따라서 실제 실험결과와 차이를 나타내므로 이 차이를 기하학적으로 삼각함수를 이용하여 보정하였다.

4. 결과

열팽창계수를 결정하기 위하여 실험을 통한 변위, 막힘 하중이 ANSYS 통한 열/구조 연성 해석 값과 비교되었다. 유한요소 해석 결과 두께에 따른 경계층의 증가를 고려하지 않았을 경우 실험값과의 상대 및 절대 오차가 모두 크게 나타났으나, IPMC 두께에 따라 일정한 비율로 경계층을 변화하였을 경우 다양한 IPMC 의 두께에도 오차가 상대적으로 적었다. 이는 경계층 내부의 무 차원 물 분자 농도는 무 차원 두께에 따른 일정한 분포를 갖는 농도 분포에 상사 해를 가짐과 유사한 의미를 지닌다. Table 1 에서 보여지는 것과 같이 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm 의 두께의 IPMC 를 각각 20μm, 30μm, 40μm, 50μm 두께의 Anode / Cathode 층으로 모델링 하면 유한요소해석결과가 실험값과 가장 작은 오차를 보였다. 즉, IPMC 는 전체 두께의 5%에 해당하는 경계층에서 이온이 집중되는 Anode / Cathode 층이 발생하고, IPMC 는 이때의 경계층에 의해서 주 변형이 일어나게 된다.

Table. 1 에서 보여주는 것처럼 실험값과 시뮬레이션 값의 오차가 대부분 10% 이내였다. 하지만 IPMC 의 두께가 커짐에 따라 변위가 줄어들고, 2 볼트 이상의 전압이 인가될 때는 전기 분해가 촉진 되기 때문에, 두께 1.0mm 이상의 IPMC 와 2 볼트 이상의 전압이 인가 될 때는 변위와 반력 모두 오차가 증가하는 결과를 보였다.

5. 결론

IPMC 의 유한요소 해석 시 기존의 bimorph 보는 이온이 집중되는 층을 배제 하였기 때문에 오차가 크므로, 다양한 두께의 형태를 가진 IPMC 에 적용하기 어려웠다. 따라서 IPMC 의 거동을 최적으로 해석하기 위하여 온도-전압-이온 집중 분포의 관계인 열 상사성을 사용하여 이온이 집중되는 가상 층을 모델링 하였다.

다양한 두께를 가진 IPMC 를 Anode, Cathode 층과 중간층을 가진 3 층으로 모델링 하여 인가 전압을 1, 1.5, 2 볼트로 달리하면서 ANSYS 를 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 실험값과 비교/분석 하였다. 2 볼트 이하의 전압에서 IPMC 샘플의 변형 및 반력의 유한요소 해석 결과 샘플 두께에 따른 경계층 두께의 비가 일정할 경우 해석 결과는 대체적으로 실험 결과와 잘 일치 하였다.

IPMC 는 2 볼트 이하의 입력 전압에 대해서는 비교적 선형적 적인 변형과 힘을 보이지만, 2.5 볼트의 전압이 인가되면 변형이 갑자기 증가하거나 감소하는 현상을 보인다. 3 볼트의 전압에 대해서 변형이 측정되지 않거나 갑자기 변형이 증가하는 현상을 보인다. 이는 3 볼트 이상의 전압에서 IPMC 의 반복적 작동의 신뢰성 감소, 전기분해, 큰 변형에 따른 전압과 변형 관계의 비선형화 등에 기인하리라 예상되며, 이를 반영한 해석모델의 개선이 필요하리라 예상된다.

후기

본 연구는 보건의료연구개발사업 (A090406)의 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. Lim, S. M., Lee, S., Yoon, K. J. and Goo, N. S., "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. Jager, E. W. H., Inganas, O. and Lundstrom, I., "Microrobots for Micrometer-size objects in aqueous media; Potential tools for single-cell manipulation," Science, Vol. 288, pp. 2335-2338, 2000.
3. Kanno, R., Kurata, A., Hattori, M., Tadokoro, S., Takamori, T. and Oguro, K., "Characteristics and modeling of ICPF actuators," Proc. Japan-USA Symp. on Flex Automation, Vol.2, pp.691-8, 1994
4. Xiao, Y. and Bhattacharya, K., "Modeling electromechanical properties of ionic polymers," Proc. SPIE, Vol. 4329, pp.292-300, 2001.
5. DeGennes, P., Okumura, K., Shahinpoor, M. and Kim, K., “Mechanoelectric effects in ionic gels,” Europhys. Lett. Vol. 40, pp. 513-8, 2000.
6. Wang, Q., Xu, B., “Nonlinear piezoelectric behavior of ceramic bending mode actuator under strong electric fields,” J. Appl. Phys., Vol. 86, pp. 3352-3360.
7. Lughmani, W. A., Jho, J. Y., Lee, J. Y., and Rhee, K. H., "Modeling of Bending Behavior of IPMC Beams using Concentrated Ion Boundary Layer,"
8. Park, H. S., Lee, J. Y., Jho, J. Y., Rhee, K. H., "Analysis of an Active Catheter Using Thermal Equivalent Modeling of IPMC," Journal of the Korean Society for Precision Vol. 24, No. 12, pp.38, 2007.
9. Tadokoro, S., Takamori, T. and Oguro, K. “An actuator model of ICPF (Ionic Conducting Polymer Film) for robotic applications on the basis of physicochemical hypotheses,” Proceedings of 2000 IEEE international conference of robotics and automation, pp. 1340-6, 2000.

Table. 1 Comparison of measured roughness data (width : 5mm , length :30mm , expansion coefficient: 0.12)

Sample Thickness (mm)	Boundary layer thickness(μm)	Young's Modulus (MPa)	Voltage (V)	10mm Displacement Experiment(mm)	10mm Displacement Simulation(mm)	Tip Blocked force Experiment(gf)	10mm Blocked force Simulation(gf)
0.4	20	105	1	2.51	2.96	0.34	0.39
			1.5	3.72	4.51	0.45	0.58
			2	6.33	6.17	0.66	0.77
0.6	30	85	1	1.82	1.95	0.75	0.70
			1.5	2.81	2.97	0.89	1.04
			2	4.16	4.02	1.09	1.39
0.8	40	74	1	1.14	1.46	1.16	1.07
			1.5	2.14	2.21	1.52	1.60
			2	3.41	2.98	1.81	2.14
1.0	50	66	1	0.81	1.16	1.74	1.48
			1.5	1.71	1.76	2.15	2.22
			2	2.72	2.37	2.55	2.96