생체적합형 고분자를 이용한 박막형 이동기의 제작 및 특성평가

정영대† · 정해도*

Fabrication and Performance Evaluation of Diaphragm-type Actuators using Biocompatible polymer

Young Dae Jung and Hae Do Jeong

Key Words : Electro-active Polymer(전기구동형 고분자), Biocompatible(생체적합형), Segmented Poly-urethane(세그먼트화 폴리우레탄), Dielectric Constant(유전율)

Abstract

Electro-active polymer (EAP), one of the smart materials, is a new alternative offering ultra-precise movements and bio-compatibility. We present the results of the design, fabrication, and performance evaluation of a fabricated diaphragm-type polymer actuator using segmented polyurethane(SPU). This paper illustrates the relationship between the elastic modulus and maximum deflection as a key property of the Maxwell stress effect and also presents the relationship between the dielectric constant and maximum deflection as a key property of the electrostriction effect, especially in polymer actuators using SPU. A diaphragm-type actuator was used to induce an equation of the vertically distributed load by using a fully clamped circular plate as the boundary condition. To verify the equation, the results were compared to the data measured from load cell. In the near future, a low-cost check valves and bio-robot can be applied by its actuators.

1. 서 론

현재 화학공업과 고분자기술의 발달로 인해 세라믹이나 금속 등의 재료의 경량화, 저비용, 성형성 등으로 인해 점차 고분자로 대체될 것으로 예상된다. 이러한 과정에는 물론 단점으로 여겨지는 열이나 독성물질의 함유등이 있음에도 불구하고 위의 장점으로 인해 앞으로 많은 재료적인 발전 및 응용분야 또한 다양해 질것으로 예상된다.

이 중에서도 전기구동형 고분자(electro-active polymer, 이하 EAP)는 이온전도에 의한 산화환원(redox)반응에 의해 변형이 발생되는 이온교환형(ionic)메커니즘, 유전체 내의 전계의 공급에 의한 전기왜곡 현상(electro-strictive effect)과 정전기적 인력에 의한 맥스웰 효과(Maxwell effect)가 재료내부에서 발생되어 전극간에 인장 혹은 압축응력이 발생되는 변형을 가지는 유전체(dielectric) 메커니즘으로 분류될 수 있는데[1], 몇 가지의 경우를 제외하면 이온교환의 경우 대기 중에서 그 상태를 유지하거나 동작의 유도가 어려워 상용제품으로의 적용은 어렵다고 할 수 있다[2].

최근의 유전체 EAP를 이용한 고분자 액츄에이터의 연구를 두 가지로 분류하면, 폴리우레탄 혹은 실리콘(silicone) 등과 같은 탄성체류[3,4] 및 이에 액정성을 부여한 네마틱 고무(nematic rubbers)와 같은 soft 액츄에이터와 Nafion^{TM}(by Dupont)과 같은 불화화합물을 사용하고 두 백금전극을 통해 ~1V정도의 전압만으로도 쉽게 변형이 일어나는 semi-soft 액츄에이터로 구분할 수 있다[5].

본 논문에서는 세그먼트화 폴리우레탄

† 회원, 부산대학교 기계공학연구정보센터
E-mail : ydjung@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-1384 FAX : (051)516-2029
* 부산대학교 기계공학부

(Segmented Polyurethane, 이하 SPU)을 사용하여 제작한 원판형 액츄에이터를 고체역학적인 경계조건을 이용하여 해석하였다. 또한 SPU 의 경도와 강도에 영향을 미치는 화학조성비의 변화가 액츄에이터의 전계 유도변위에 정적 혹은 동적으로 어떠한 영향을 미치는지에 대한 영향을 분석하고자 한다.

2. EAP 액츄에이터

2.1 전기왜곡성 고분자

전기왜곡성 혹은 전왜성(electro-striction)이란 전계하에 변형이 발생되는 현상을 말하며, 이를 역압전성(depiezo)이라고도 한다. 이러한 전왜성 물질은 압전성 물질과 달리 변형을 가할 때 발생되는 기전력이 매우 약하여 센서로는 사용되지 않으며 액츄에이터로만 사용되고 있다[6,7].

Fig 1 과 같이 전극간 정전기적 인력(hydrostatic force)에 의해 두께방향인 전극간에는 압축응력이 발생되어 수축이 발생되게 되는 반면, 길이방향으로는 인장응력에 의해 늘어나게 된다.

이를 액츄에이터로 이용하기 위해 먼저 한쪽 끝을 고정하여 강도와 경도가 높은 절연재료를 한 층으로 만들고 그 위에 EAP 를 적층시켜 만든 bimorph-type 으로 만들면 구동자체를 외팔보(cantilever)의 끝 단의 처짐거동으로 해석할 수 있다. 반면에 원판의 가장자리를 완전 고정(clamping)하여 원형판의 중앙부분에 처짐을 발생하는 형태인 unimorph-type 으로 제작이 가능하게 되면, 변형자체를 중앙의 최대처짐으로 간주하여 해석할 수 있다.

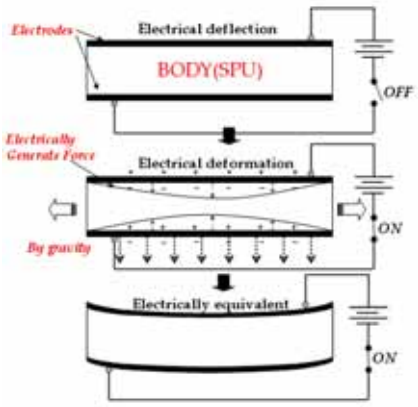

Fig. 1 Operation of diaphragm-type actuator

2.2 원판형 액츄에이터의 역학적 모델링

본 연구에서 수행하였던 고분자 액츄에이터는 비교적 경도가 낮기 때문에, 박막으로 제작될 경우 외부의 하중에 의해 형태를 제대로 유지하기가 힘들다는 단점이 있었다. 이 때문에 원판형의 박막으로 제작되는데, 원둘레에서 고정되며 중심에서 최대처짐을 보이도록 제작하였다.

이의 해석을 위해 원형판(circular plate)에 주어지는 전계유도응력을 분포하중으로 간주하여 처짐과 전계유도응력과의 관계를 도출하여 처짐거동에 영향을 미치는 인자를 분석하고자 한다[8].

Fig 2 와 같은 두께가 h이고 가장자리에서 완전구속된 원판에 수직분포하중인 전계유도응력 이 발생한다고 가정할 때, 원판 중앙에 최대처짐을 보인다고 볼 수 있으며 경계조건 식 (2)를 통해 유도가 가능하다. 이 처짐과 유도된 응력과의 관계는 선행연구에 의해 다음과 같이 유도될 수 있다[9,10].

$$w_0(r) = \frac{q_0 a^4}{64D}\left(1-\frac{r^2}{a^2}\right)^2 \tag{1}$$

$$w_0 = 0 \quad and \quad \frac{dw_0}{dr} = 0 \quad at \quad r = a \tag{2}$$

$$q_0 = \frac{Eh^3}{0.202a^4} w_{\max}, Q_0 = \frac{4\pi Eh^4}{0.202} w_{\max} \tag{3}$$

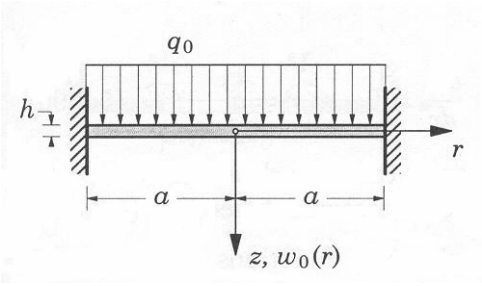

Fig. 2 Analysis of a fully-clamped circular plate

2.3 원판형 액츄에이터의 전기화학적 특성

절연체를 전기장위에 놓았을 때 표면에 전하(electric charge)가 유기되는 현상이 있는데, 이러한 절연체를 유전체라 하고, 전극과 인접한 표면에 전하를 띠게 된다. 이 현상을 생성하는 메커니즘은, 자성체의 자기화와 마찬가지로 전기장의 작용에 의해서 무극성분자에서는 분자 내의 양 · 음의 전하가 어긋나고, 극성분자에서는 쌍극자 모멘트(dipole moment)의 방향이 가지런해져서 물질이 전체적으로 전기 쌍극자 모멘트를 가지게 되고, 이것이 콘덴서(condenser)의 극판에서 전하의 작용을 얼마간 상쇄하기 때문이라는 것이 밝혀졌다.

이러한 절연체를 극판 사이에 넣었을 경우와 진공일 때의 유전율(dielectric constant of vacuum)의 비

를 유전율(dielectric constant, permittivity)이라고 하는데, 정전용량(capacitance)의 측정에 의해 변환이 가능하다. 일반적인 고체나 액체의 유전율은 2~10 정도이나 로셀염이나 티탄산바륨($BaTiO_3$)과 같은 압전 물질은 수백에서 수천의 유전율을 가진다.

액츄에이터로 사용된 일반적인 SPU의 경우, 압전재료로는 유전율이 다소 작은 10~5000 정도의 영역을 가지며, soft segment인 polyol의 종류에 따라 유전율은 변하게 된다[11].

본 연구에서 사용된 3 가지의 각기 다른 soft segment 인 polyol 로는 PTMG(BASF Co. Ltd, Mw=2000), PNAD(Union Chem, Co. Ltd, Mw=2000)와 PDMS(Shinetch Chemical. Mw=2000)를 사용하였고, hard segment 인 isocyanate 로는 MDI(BASF Co. Ltd)를 사용하여 SPU 를 합성하였다.

사용된 polyol 을 극성순으로 보면, PNAD 가 PTMG 보다 크다. 이는 고분자의 정전용량은 분자의 극성에 의한 재배열로 전하가 저장되기 때문에 극성이 높을수록 일반적으로 유전율이 높다.

유전율을 구하기 위해 식(4)를 이용하는 데, 여기서 d 는 두께(thickness)이고, A 는 면적(sectional area), ε_o 는 진공 유전율이며, $8.854\times10^{-12}F/m$ 의 값을 가진다.

$$\varepsilon_r = \frac{C_p d}{A\varepsilon_o} \tag{4}$$

일반적으로 전왜 혹은 압전 액츄에이터와 같은 전기구동형 액츄에이터의 경우, 표면에 전하가 많이 유도될수록, 즉 유전율이 높을수록 전왜 혹은 압전 현상이 증가된다. 세라믹 컨덴서(ceramic condenser)의 경우, 정전용량을 증가시키기 위해서는 절연성은 높지 않으나 식 (4)와 같이 유전체를 극히 얇게 하여 적층(lamination)시키는 방법을 주로 이용하게 된다.

3. 실험 및 결과

3.1 액츄에이터의 제작공정

먼저 body의 제작은 각각의 polyol을 이용하여 isocyanate와 합성한 SPU resin을 몰드 내에서 건조시키는 solution casting 법을 이용하였다. 이때 사용된 몰드는 극성인 SPU와의 탈형(decoupling)을 위하여 비극성인 TEFLON^{TM}을 이용하였다.

본 연구이전에는 Circuitworks^{TM}사의 도전성 실버그리스(silver grease)를 전극으로 사용하였으나, 본 실험에서는 고분자 전극으로, body와의 접합성을 고려하여 제조된 저점도의 수분산 SPU resin에 전도성 입자인 카본 블랙(carbon black)을 분산시켜 레진형 전극을 제작한 후 이를 스핀코터를 이용하여 body의 양면에 박막 코팅하여 80℃에서 10 분 동안 건조로에서 경화시켰다.

본 논문에서는 이전의 연구를 통해 개발된 30 ㎛ 의 두께와 평균 300Ω/sq의 표면저항을 가지는 고분자 전극을 이용하여 액츄에이터를 제작하였다[12].

3.2 탄성계수와 유전율의 측정

식(3)에서 살펴본 바와 같이 액츄에이터의 구동력은 두께 h 와 탄성계수가 중요한 변수가 됨을 알 수 있는데, 기존의 SPU 의 기계적인 물성을 좌우하는 인자로 본 논문에서는 hard segment 를 구성하고 있는 isocyanate 의 조성비(content)를 사용하였다. 본 논문에서는 이를 hard content 라고 정의하였다.

먼저 hard content 가 탄성계수 E 에 미치는 영향을 보기 위해, UTM 을 사용하여 변형률(strain)에 따른 인장강도(tensile stress)를 측정하였다. 본 연구에서는 100% 변형 이내에서의 응력-변형률 선도를 도시하였는데, 통상적으로 100% 변형 시의 강도를 상대적인 경도로 사용하고 이를 100% modulus 라 한다. 이는 굽힘을 이용한 액츄에이터의 경우 안정성과 제어의 용이성 때문이다.

Fig 3 은 hard content 의 증가에 따라 기울기에 해당하는 modulus 값이 증가하는 것을 보여주고 있으며, Fig 4 는 hard content 에 따른 최대변위가 급격히 감소하고 있음을 보여준다.

hard content 가 유전율에 미치는 영향을 보기 위해 Impedance Analyzer HP4192A 를 사용하여 전기용량(capacitance, C_p)을 측정하였으며, 식 (4)에 의해 유전율로 변환하여 Fig. 5 에 나타내었다.

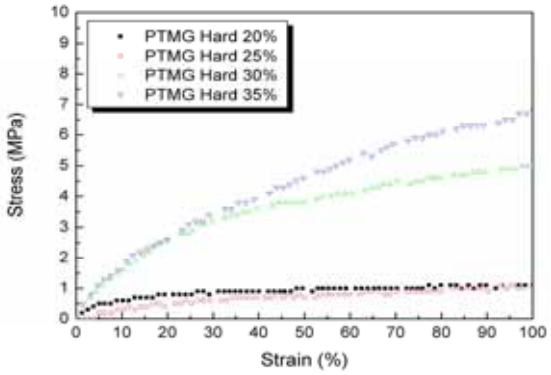

Fig. 3 Stress-strain curve within 100% strain according to hard content

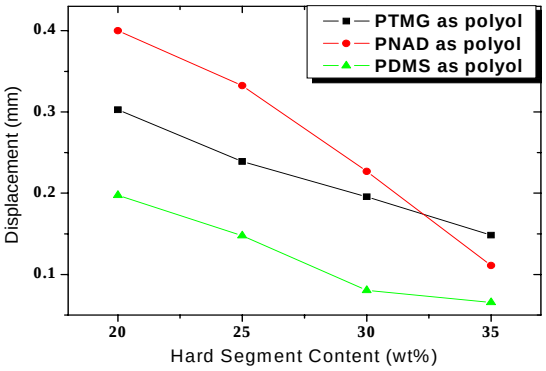

Fig. 4 Maximum displacement according to the types of polyols and hard content

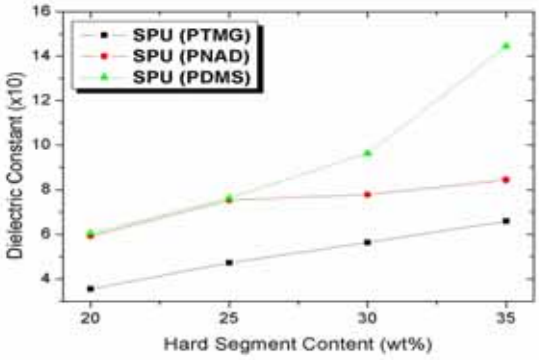

Fig. 5 Dielectric constant of the SPUs using various polyols according to hard content

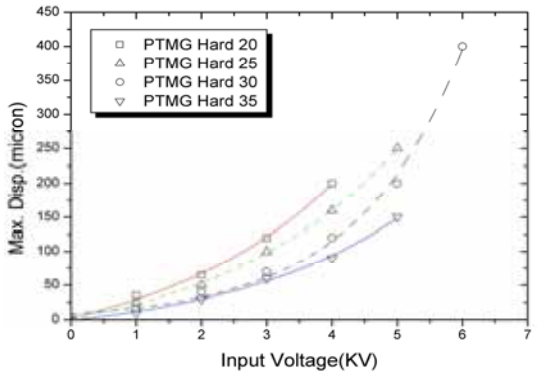

Fig. 6 Maximum displacement per unit electric charge according to hard content

Fig 5 와 같이 SPU 의 hard 와 soft segment 의 성분이 같은 경우, hard content 에 따라 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 SPU 의 전체변형 중 전왜현상에 연관해서 설명할 수 있는데, 결론적으로는 전왜현상에 의한 변형은 hard content 에 비례한다는 것을 알 수 있다.

하지만 PDMS 와 같은 경질의 탄성체의 경우는 전왜효과가 증가하였음에도 최대변형의 증가로 이어지지 않고 있다. 이는 전왜효과의 증가가 재료의 기계적 물성을 극복하지 못하는 데 기인하고 있으며, 결과적으로는 전기구동형 고분자의 구동은 Maxwell 효과에 의해 지배된다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 PDMS 는 제작의 용이하지 않고 액츄에이터 재료로서는 적합하지 않다고 판단하였으며, 반응성이 좋고 비교적 연질인 PTMG 를 사용한 SPU 를 합성하도록 하였다.

Fig 6 에서는 PTMG 를 polyol 로 사용한 액츄에이터의 최대변위를 나타내고 있는데, 이 modulus 값이 증가함에 따라 최대변위가 감소함을 보여주고 있다. 이는 식(3)의 결과와 일치하고 있다.

이를 이용하여 micro-fluidics 의 체크밸브(check valve)와 같은 미세한 구동력을 전달하는 데 필요한 sub-pascal 레벨의 하중을 가하는데 적절한 방법임을 알 수 있으며, 화학적인 구성비를 조절함에 따라 이 하중을 조절할 수 있게 된다.

3.3 최대변형에서의 구동력 환산 및 실측값 비교

2.2 절에 언급된 바와 같이, 수학적 모델링에 의해 유도된 식을 이용하여 간접적으로 구동력을 측정하였다. Fig 7 은 식 (3)에 의해 계산된 값과 실제 로드셀에 의해 측정된 값과 비교한 그래프이다.

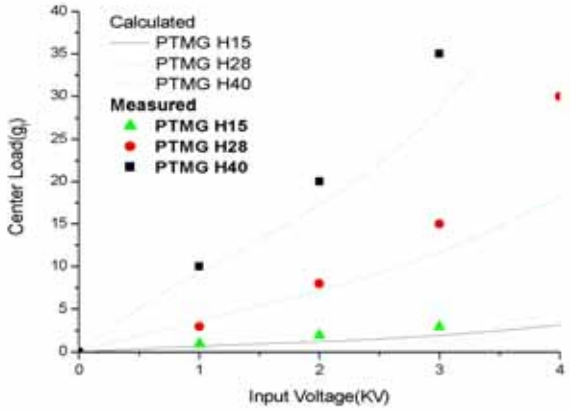

Fig. 7 Force calculated by equation and measured by load cell according to hard content

결과적으로 계산된 수치와 측정된 수치가 잘 매치된다는 것을 알 수 있었으며, 이 두 수치의 차이가 입력전압에 따라 2 차수로 증가하는 전왜효과로 간주될 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 고변형을 수반하는 고분자 액츄에이터의 제작을 위해 성능발현에 지대한 영향을 미치는 SPU body 의 modulus 와 유전율이 변위와

전계응력에 관한 영향을 분석하고, 중앙에서 최대 처짐을 갖는 원판형 액츄에이터의 구동력을 측정하기 위해 고체역학적인 분포하중으로 간주하여 식을 유도하고 구동력을 환산하였다.

유도된 식과 실제 측정치와의 비교를 통해 식의 유도가 적절하였음을 알 수 있었으며, Maxwell 효과에 의한 구동이 핵심임을 증명하였다. 또한 전왜효과는 실제측정치와 유도된 식과의 차이의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있으며, 이를 Fig. 7 에서 제시하였다.

먼저 액츄에이터 body 의 경우 hard content 가 증가할수록 modulus, 유전율이 증가하였다. 달리 말하면 hard content 를 높이게 되면 구동력이 증가한다는 것을 의미한다. 하지만 hard content 가 높으면 최대 변형이 줄어들게 되므로 두 가지 관계를 서로 만족하는 적절한 화학조성비를 결정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 제외되었지만, 반복적으로 처짐과 회복이 일어나지 않은 상황인 정적인 상태만을 고려하였으나, 향후에는 이러한 주파수가 고려되는 동적인 움직임에 대한 고려도 수행되어야 한다고 보여진다. SPU 의 동적인 특성을 DMA(Dynamic Mechanical Analysis)와 같이 반복적인 구동을 통한 점탄성의 해석과 히스테리시스 현상에 대한 좀 더 많은 현상적인 고찰이 필요하다고 여겨진다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제인 (R01-2003-000-11612-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다

참고문헌

(1) Yoseph B Cohen, 2000, “Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscle,” SPIE Press.

(2) 안호정, 이승기, 박정호, 1998, “공기중에서 동작하는 전도성 고분자 액츄에이터용 고체전해질의 특성분석 및 실험적 검증,” 전기학회논문집, Vol. 47, No 10.

(3) P. Gennes, 2002, “Some Remarks on Polymer Actuators,” Polymers for Advanced Technologies, Vol. 13, pp 681-682.

(4) Roy Kornbluh, Ron Pelrine, Joseph Eckerle, Jose Joseph, 1998, “Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators,” Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation.

(5) Yoseph B Cohen, "http://ndeaa.jpl.nasa.gov/," Jet Propulsion Lab, NASA

(6) Kim, J., et al, 2000, "Electroactive papers: its possibility as actuators," SPIE's 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, 3987.

(7) Wang, H. et al, 1998, "The Origins of Electromechanical Response in Polyurethane Elastomer," Proceeding of 9th IEEE Symposium on Applications of Ferroelectrics, pp 182-185.

(8) Lamba, N. et al, 1998, "Polyurethanes in Biomedical Applications," CRC Press.

(9) Reddy, J., 1999, "Theory and analysis of elastic plates," Taylor & Francis, pp 194-215.

(10) Y.-d. Jung et al., 2007, “Fabrication and performance evaluation of diaphragm-type polymer actuators using segmented polyurethane according to chemical-hard-segment content,” Sens. Actuators A: Phys.

(11) Hepburn, C., 1982, "Polyurethane elastomers," 2nd Ed, Applied Science Publishers, pp 51-106.

(12) Y.-d Jung et al, 2003, "Development of Polymer Micro Actuators using Conductive Polymer and Its Application," Polytronics, pp 199-204.