

전기 응답성 고분자 물질을 이용한 용수철 실린더형 액추에이터의 특성 분석

A Study on Characterization of Cylinder type Actuator using Dielectric Elastomer

*권지훈¹, 강경수¹, 조경호², 김경수¹, #김수현¹

*J.H.Kwon¹, G. S. Kang¹, K. H. Cho², K.S.Kim¹, #S.H.Kim(soohyun@kaist.ac.kr)¹

¹ 한국과학기술원 기계공학과, ² 국방과학연구소 제4기술연구본부

Key words : Cylinder type, Dielectric Elastomer, Numbers of layers

1. 서론

인공 고무 근육이라고도 불리는 DEA(Dielectric Elastomer Actuator, EAP의 일종)는 이를 포함한 폴리머 액추에이터를 통칭해서 EAP라고도 한다. 이는 기존 회전형 모터에 비해 새로운 디자인 가능성을 제시할 수 있고, 또한 실제 인간근육과 유사한 직선 운동을 하는 장점이 있다.

EAP는 폴리머의 일종으로서 크게 전자식(Electronic) EAP와 이온식(Ionic) EAP로 나눌 수 있다. 이 중에서 전자식 EAP는 고전압(약 1kV 이상)을 이용하는 단점이 있다. 또한 변위 및 출력의 증대를 위하여 구동 전에 팽팽하게 잡아 당김(pre-strain)을 이용하므로 지속적인 성능 유지(repeatability)가 관건이나 이는 두루마리처럼 둘둘 말아 스택형으로 해결 가능하다. 또한 반응시간이 약 0.1초 이하로 빠른 편이다.(1-3)

유전체(dielectric) 엘라스토머(elastomer) 액추에이터, 즉 DEA가 가지는 장점은 아래와 같다.(4)

1. 베어링이나 슬라이딩 부품 없이 높은 변형율을 만들 수 있는 능력
2. 하나의 엘라스토머에 여러 다른 전극을 입혀서 다수의 자유도(D.O.F)를 가지는 장치를 만들 수 있음
3. 폴리머 변형에 대해 한방향 혹은 평면의 양방향으로 모두 움직일 수 있도록 설계 가능
4. 자연 근육과 기계적 성질에 대한 유사성
5. 높은 유연성(compliance)으로 인한 안정성과 튼튼함
6. 액추에이터, 센서로 동시에 쓸 수 있는 능력
7. 2D 제작 기법에 의한 설계용이성과 전기회로에 적용 용이

기본적으로 DEA구조는 가운데 부분인 엘라스토머와 이를 기준으로 바깥쪽 양쪽에 전극층이 존재하여 총 3개의 층이 존재한다. 전극층에 전기장을 가하면 맥스웰 응력(Maxwell Stress)에 의해 엘라스토머를 쥐어짜는 쿨롱 힘(Coulomb charge attraction)이 발생한다. 이는 엘라스토머를 두께방향으로 수축시키고 비압축성 성질에 의해 부피가 일정하므로 두께방향에 수직인 면 방향은 팽창하게 한다.(5) 면 방향 팽창은 한층의 전극에 있는 전하 입자들을 서로 떨어뜨리고, 그 결과 내부 에너지가 작아지게 된다.

2. DEA를 이용한 액추에이터

보통 DEA를 이용해서 만드는 액추에이터는 일종의 두루마리 형태를 가진다. 1자유도 구동의 경우 보통 pre-strain된 아크릴 필름이 압축된 스프링에 말려진 형태로 되어있다. 이는 원주방향과 길이방향의 pre-strain상태를 유지해주면서 길이 방향의 변형을 허용하는 구조이다.(6, 7)

Pei 그룹에서는 실제 길이(엘라스토머와 전극이 접촉하는 길이: active length)가 약 4.5cm 었을 때, 실험결과 최대 15N의 힘 출력, 변위는 최대 12mm로 변형율이 약 26%에 달했다. 이는 충분한 힘과 변위라고 할 수 있으므로 액추에이터로서 충분한 효율을 나타내고 있다.

EAP는 전극에 의한 압착력으로 두께가 줄어들게 되고, 면적방향으로는 늘어나는 성질을 가지는데, 이때 압착력은 맥스웰 응력(Maxwell stress)에 의해 전극사이에 발생하는 쿨롱(Coulomb) 힘에 의해 발생한다.

발생하는 응력은 아래 식 1과 같이 전기장의 제곱에 비례하고,

또한 진공 유전 상수(vacuum permittivity: ϵ_0)와 엘라스토머의 유전율(dielectric constant: ϵ_r)에 비례한다.

$$p_{eq} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U^2}{z^2} \quad (\text{식 1})$$

먼저 선형 탄성영역에서 변형율을 계산하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 엘라스토머는 선형 탄성영역에서 작동
2. 온도에 의해 발생하는 변형율은 작으며 무시
3. 프레임 구축에 의해 x방향 변형율은 없다
4. 바깥방향 응력을 양(+)으로 봄

작용-반작용에 의해 전극에 발생하는 힘은 같고, 응력을 생각하면 실제 전극에 의해 움직이는 엘라스토머의 면적과 전극층의 면적이 같다고 볼 수 있으므로 전극층에 발생하는 z방향 응력은 다음 식2와 같다

$$\sigma_{z2} = \sigma_{z1} = -\epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{d}\right)^2 \quad (\text{식 2})$$

또한 엘라스토머와 전극의 뾰와송비는 인장실험으로부터 간단히 다음과 같이 측정할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x, \quad \epsilon_y = \frac{\nu}{E} \sigma_x \quad \therefore \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\nu \quad (\text{식 3})$$

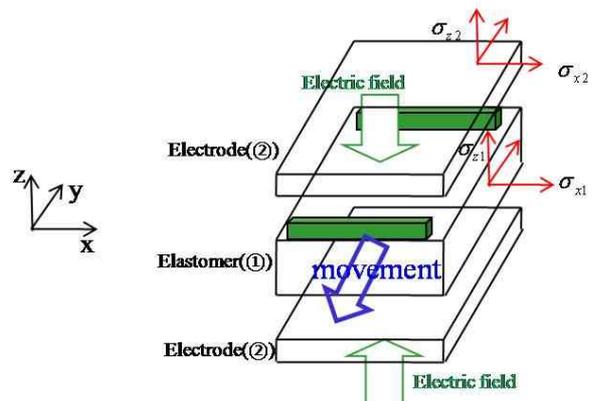


Figure 1. Flat EAP actuator model

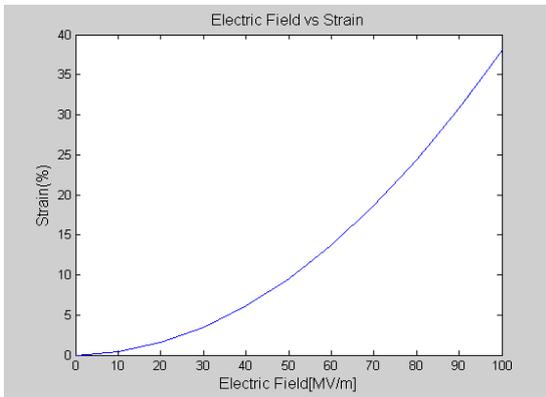


Figure 2. Electric field vs Strain in linear elastic region

y방향 변형율은 다음과 같다.

$$\epsilon_{y1} = -\frac{v_1}{E_1} \times (1+v_1) \sigma_{z1} = -\frac{v_1(1+v_1)}{E_1} \times -\epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{d}\right)^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r v_1 (1+v_1)}{E_1} \left(\frac{V}{d}\right)^2 \quad (\text{식 4})$$

$$\epsilon_{y2} = -\frac{v_2}{E_2} \times (1+v_2) \sigma_{z2} = -\frac{v_2(1+v_2)}{E_2} \times -\epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{d}\right)^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r v_2 (1+v_2)}{E_2} \left(\frac{V}{d}\right)^2 \quad (\text{식 5})$$

이때 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} [F/m]$ 이고, ϵ_r 는 엘라스토머와 고무와 유사한 성질을 지니므로 7이라 하고, v_1 역시 고무의 테이터를 이용해서 0.5라 하고, E_1 은 다른 논문의 결과를 이용해서 1.22Mpa로 하였다.(8) 그러면 Figure 2와 같은 전기장과 변형률 관계 그래프를 그릴 수 있다.

3. 스프링을 이용한 원기동형 DEA 액추에이터

평면 직사각형 EAP는 스스로 설 수 없다는 단점이 있다. 그리고 제작 결과 엘라스토머의 탄성력으로 인해 구조가 휘어지는 문제점이 발생하였다.

이에 보완하여 부하 능력을 키울 수 있는 원기동형 EAP를 생각할 수 있다.(9, 10) 이는 보다 수월하게 액추에이터와 센서로 동시에 사용할 수 있으며 로봇 등에 응용시 무게를 줄일 수 있고, 구조를 간단하게 하는 장점이 있다.

본 연구에서도 압축 헬리컬 스프링 주위에 엘라스토머와 전극으로 이루어진 평면형 액추에이터를 두루마리처럼 감아 제작하였다.

압축 헬리컬 스프링의 경우 스프링의 길이를 줄여서 전극이 입혀진 엘라스토머를 감싼 다음 길이 방향 힘을 이겨내야, 스프링을 늘어나게 하면서 액추에이터 길이방향 변형이 가능하다.

인장 스프링을 사용하면 좋은 장점은 압축스프링에 비해 좌굴에 대해 더 안전하다는 장점이 있다. 이에 반해 압축스프링을 쓰면 좋은 장점은 식 6처럼 인장스프링에서는 처음 변위를 내기 위해 임계하중 F_i 를 이겨내야 하지만, 압축스프링은 압축상태로 액추에이터를 만들기 때문에 하중을 가하면 바로 늘어날 수 있다는 점이다.

$$k = \frac{F - F_i}{y} = \frac{Gd^4}{8D^3N_a} \quad (\text{식 6})$$

4. 결론

실제 제작 결과 엘라스토머(3M VHB) 자체의 탄성복원 때문에 모양이 변하는 문제점이 발생하였다. 그래서 이에 대한 보상으로 원기동 형태의 DEA 액추에이터를 제안하였다. 이는 가운데 심을 둘러싼 스프링을 놓고, 바깥쪽에 전극층이 감긴 엘라스토머를 두루마리처럼 감은 형태를 지니고 있다. 원기동형은 평면 타입 액추에이터 제작 과정과 비슷하나 pre-strained 엘라스토머를 스프링에 감싸는 작업을 해야 하는 면에서 더 섬세한 기술을 요한다. 이에 대해 기존과 다른 제작 방법을 제시하였다.

액추에이터의 변위를 알기 위해 전체 스프링 상수를 알아야 하는데, 스프링과 전극이 발려진 엘라스토머가 병렬로 연결된 구조이므로 전체 스프링상수는 이 두 스프링상수의 합이라고 할 수 있다. 현재 제작을 통해 충분한 변형율이 나오는지 성능 분석 중이다.

후기

이 연구는 ADD의 국제공동연구 프로젝트의 도움을 받아 진행된 것으로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Bar-Cohen. Electroactive Polymer(EAP) Actuators as Artificial Muscles. second ed: SPIE Press; 2004.
2. Carpi DR, Kornbluh, Pelrine, Sommer-Larsen. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers. first ed: Elsevier; 2008.
3. Madden JDW, Vandesteeg NA, Anquetil PA, Madden PGA, Takshi A, Pytel RZ, et al. Artificial muscle technology: Physical principles and naval prospects. Ieee Journal of Oceanic Engineering. 2004 Jul;29(3):706-28.
4. Dan Viggiano LS. Piezoelectric motors save power and downsize electronic access control. Industrial Embedded Systems. 2008.
5. Zhang XQ, Lowe C, Wissler M, Jahne B, Kovacs G. Dielectric elastomers in actuator technology. Advanced Engineering Materials. 2005 May;7(5):361-7.
6. Qibing Pei RP, Scott Stanford, Roy Kornbluh, Marcus Rosenthal, Kenneth Meijer, Robert Full. Multifunctional Electroelastomer Rolls. Materials Research Society; 2002; 2002. p. EE4.8.1-EE4.8.6.
7. Pei QR, M. Stanford, S. Prahlad, H. Pelrine, R. Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators. Smart Materials & Structures. 2004 Oct;13(5):N86-N92.
8. Kofod G. Dielectric Elastomer Actuators: The Technical University of Denmark; 2001.
9. Carpi F, Chiarelli P, Mazzoldi A, De Rossi D. Electromechanical characterization of dielectric elastomer planar actuators: comparative evaluation of different electrode materials and different counterloads. Sensors and Actuators a-Physical. 2003 Oct 1;107(1):85-95.
10. Ren KL, Liu S, Lin MR, Wang Y, Zhang QM. A compact electroactive polymer actuator suitable for refreshable Braille display. Sensors and Actuators a-Physical. 2008 May 16;143(2):335-42.