

실린더형 유전체 엘라스토머 액츄에이터의 변형을 거동에 대한 연구 Research on Strain Behavior of Cylindrical Dielectric Elastomer Actuator

*강경수¹, 임춘택¹, 김경수¹, 권지훈¹, #김수현¹

*G. S. Kang¹, C. T. Rim¹, K. S. Kim¹, J. H. Kwon¹, #S. H. Kim(soohyun@kaist.ac.kr)¹

¹ 한국과학기술원 기계공학과

Key words : Cylindrical DEA, Strain, Numbers of layers

1. 서론

기존의 액츄에이터(Actuator, 구동기)는 전기적 힘을 이용한 모터가 많았고, 부피가 큰 제품의 경우에는 충분한 토크가 전달 가능하였지만 제품들이 상업적, 기술적으로 작은 크기의 모터를 요구하게 되었다. 이에 소형화된 모터의 경우 출력이 낮아 충분한 힘 전달이 어려웠다. 이는 모터의 크기가 작을수록 출력이 모터 구동에 쓰이는 것보다 열로 전환되는 쪽이 많아지기 때문이다. 또한 작은 모터는 어느 정도의 출력을 내기 위해 빠른 구동 속도를 필요로 하고, 이로 인해 출력토크가 낮아지므로 충분한 토크를 내기 위해 기어부 필요로 효율이 떨어지는 단점이 있다.[1] 이와 같은 이유로 제품이 소형화될 수록 움직이는데 필요한 핵심요소인 액츄에이터에 대한 관심이 많아지게 되었다.

이에 대한 대체재로 큰 힘을 내는데 유리한 압전소자(Piezo Actuator), 유연하면서 구동원은 열을 이용하는 SMA(Shape Memory Alloy, 형상기억합금), 또한 미래 인공근육으로 각광받는 EAP(Electrically Activated Polymer)등을 들 수 있다. 압전소자의 대표적 물질인 PZT는 그 유형에 따라 굽힘, 직선운동, 전단운동 등 여러 가지 움직임이 가능하고 큰 힘을 전달 할 수 있으나 다음과 같은 단점도 존재한다. 약 수백 V의 고전압이 필요하고, 빠른 구동속도를 낼 수 있지만 최대 진폭이 자체 길이의 0.1% 정도 되는 등 인공근육의 거동과는 거리가 멀다고 할 수 있다.[2]

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

액츄에이터 재료의 선택시 크기가 작으면서도 고효율을 발생시키는 인공근육과 비교할 필요가 있다. 아래 Table 1과 같이 인공근육으로도 불리는 유전체(Dielectric) 액츄에이터는 같은 조건에 대해 인공근육보다 속도나 에너지밀도 면에서 우위를 보인다.[3] 이와 같은 성능때문에 이를 이용한 액츄에이터 개발이 현재 활발히 진행되고 있다. 참고로, 여기서 아크릴 EAP와 실리콘 EAP는 모두 전자식 EAP에 해당된다.

Table 1 Actuator comparison by various factors

	최대 변형율 (%)	최대 응력 (MPa)	최대 효율 (%)	상대 속도
인공 근육	>40	0.35	>35	중간
PZT	0.2	110	>90	빠름
SMA (TiNi)	>5	>200	<10	느림
아크릴 EAP	215	7.2	60~80	중간
실리콘 EAP	63	3.0	90	빠름

2. DEA 특징

유전식 엘라스토머 액츄에이터를 줄여서 DEA 액츄에이터라고 한다. DEA 액츄에이터를 해석할 때에는 이상적으로 전극에 저항이 존재하지 않는다고 보고, 폴리머(즉, 엘라스토머)부분에 무한대의 저항이 있다고 본다.

유전체 EAP의 경우에는 구동시 고전압(보통 수 kV)이 필요하고, 변위와 출력을 크게 하기 위해 pre-strain 조건 사용으로 지속성이 문제가 된다. 이는 현재 프레임 이용, 스택형 또는 원기둥형 모양 제조등으로 해결하고 있다. [4, 5]

DEA는 전기-기계 커플링 성능이 좋고, 고전압 사용으로 비교적 빠른 주파수 응답(mSec 단위)을 보인다. 그리고 직류 구동시 변형율이 변하지 않고 유지되고 이온식 액츄에이터에 비해 큰 힘이 나온다.

기본적으로 DEA 구조를 보면 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.[6] 면 방향 팽창은 한층의 전극에 있는 전하 입자들을 서로 떨어뜨리고, 그 결과 내부 에너지가 작아지게 된다.

3. 실린더형 DEA 시뮬레이션

실린더형을 포함한 일반 DEA에서 발생하는 응력은 전기장의 제공에 비례하고, 또한 진공 유전 상수(vacuum permittivity: ϵ_0)와 엘라스토머의 유전율(dielectric constant: ϵ_r)에 비례한다.

$$P_{eq} = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{d}\right)^2 \quad (1)$$

변형율을 계산하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.(Fig. 1)

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

또한 본 연구에서 실린더형(스프링형) DEA는 반지름이 두께에 비해 매우 크므로 원기둥형 좌표계를 직교좌표계로 생각할 수 있다

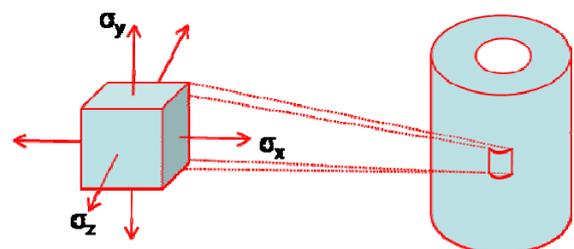


Fig. 1 Modeled as a rectangular coordinates ($\because r \gg 10t$)

변형율관계를 찾기 위해 실린더형 DEA 에 대해 스프링과 엘라스토머(3M 회사의 VHB #4910)의 스프링 상수를 계산하였다. 2 층의 유효한 엘라스토머층(전극사이에 있는 엘라스토머층)이 스프링에 감싸 있는 상태에서 스프링의 직경은 5.8 mm, 전극이 엘라스토머를 감싸는 길이인 유효 길이는 35 mm, VHB 의 두께는 0.1 mm의 조건을 가졌다. 전극/엘라스토머층에서 엘라스토머층이 면적의 절반을 차지하고, 전극층이 스프링 상수에 미치는 영향은 무시하다고 가정하였다. 이를 바탕으로 계산한 결과는 다음과 같다.

$$k_{elas} = \frac{EA}{l} \Big|_{elastomer} = 0.33[N/mm] = 330[N/mm] \quad (2)$$

$$k_{spring} = \frac{Gd^4}{8D^3N_a} = 0.09[N/mm] = 90[N/m] \quad (3)$$

$$\therefore k_{eq} = k_{elas} + k_{spring} = 420[N/m] \quad (4)$$

로드셀을 이용하여 실험적으로 측정된 결과, 스프링의 스프링 상수는 80[N/m], 실린더형 DEA 의 전체 스프링 상수는 350[N/m]로, 계산값과 다소 오차는 존재하였다.

위와 같이 얻어진 스프링상수를 바탕으로, 변형율에 관한 관계식을 구하였다. 엘라스토머의 스프링 상수는 엘라스토머 층 수와 전기적 힘에 의해 커질 수 있다. 이는 아래와 같은 관계식으로 쓸 수 있고, 변형율은 층수가 어느 정도 커지면 포화가 된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\Delta x}{l} \\ &= \frac{0.5}{1-0.5} \times 8.85 \times 10^{-12} \times 7 \times \left(\frac{V}{0.1}\right)^2 \times 2\pi \times 3.4 \times 0.1 \times n \\ &= \frac{0.035 \times (n \times 160 + 90)}{0.035 \times (n \times 160 + 90)} \\ &= \frac{cV^2n}{an+b} \quad \text{꼴} \end{aligned} \quad (5)$$

전압 10kV 를 가할 때를 보면, 3~5 층으로도 충분히 포화 변형율 상태에 가까워짐을 알 수 있다. (Fig. 2)

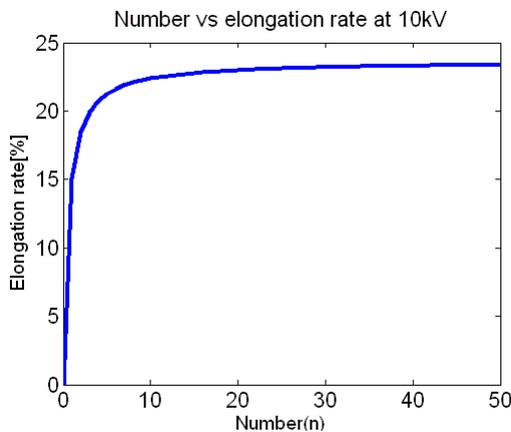


Fig. 2 Relation between numbers of layers and elongation rate at 10kV

또한 층수와 전압에 의한 변형율을 도시화하였다. 이

그래프에서도 변형율은 층수가 어느정도 커지면 포화상태에 접어들고, 전압의 제곱에 비례하여 변형율이 커짐을 알 수 있다. (Fig. 3)

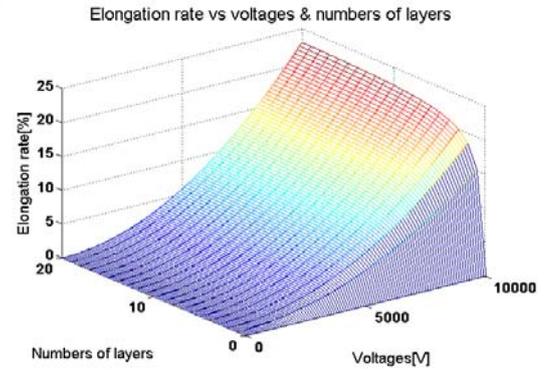


Fig. 3 Relation between numbers of layers & voltages vs elongation rate

4. 결론

본 연구에서는 액추에이터 성능을 비교하기 위해 변형율, 응력, 스피드, 효율 등을 기준으로 분류를 하였다. 이에 대한 분석 결과 폴리머중 특히 DEA(Dielectric Elastomer Actuator)의 경우가 비교적 성능이 고르면서도 좋음(변형율: 20~380%, 출력응력: 수 MPa, 구동 주파수: 수십 Hz, 효율: 25~30%, 일 밀도: 10kJ~수 MJ/m3)을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 원기둥 형태의 DEA 액추에이터를 제안하였는데, 이는 가운데 심을 둘러싼 스프링을 놓고, 바깥쪽에 전극층이 감긴 엘라스토머를 두루마리처럼 감은 형태를 지니고 있다. 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.

여기서 얻은 스프링 상수를 바탕으로 엘라스토머 층수와, 가해준 전압에 대한 원기둥형 DEA 의 변형율을 계산하였다.

참고문헌

1. Dan Viggiano, L.S., *Piezoelectric motors save power and downsize electronic access control*, in *Industrial Embedded Systems*, 2008.
2. Bar-Cohen, *Electroactive Polymer(EAP) Actuators as Artificial Muscles*, second ed, SPIE Press, 2004
3. Madden, J.D.W., et al., *Artificial muscle technology: Physical principles and naval prospects*. Ieee Journal of Oceanic Engineering, **29**(3), p. 706-728, 2004.
4. Pelrine, R.E., R.D. Kornbluh, and J.P. Joseph, *Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation*. Sensors and Actuators a-Physical, **64**(1), p. 77-85, 1998.
5. Carpi, F. and D. De Rossi, *Dielectric elastomer cylindrical actuators: electromechanical modeling and experimental evaluation*. Materials Science & Engineering C-Biomimetic and Supramolecular Systems, **24**(4), p. 555-562, 2004.
6. Duncheon, C., *Robots will be of service with muscles, not motors*. Industrial Robot-an International Journal, **32**(6), p. 452-455, 2005.