

# 대칭구동 원리에 의한 폴리머 액추에이터의 모델링

## Modeling of Antagonistically Driven Polymer Actuator

정민영, 정광목, 구자춘\*, 최혁렬, 남재도, 이영관

(Min Young Jung, Kwang Mok Jung, Ja Choon Koo, Hyoukryeol Choi, Jae Do Nam, and Young Kwan Lee)

**Abstract** : Many different polymeric materials are introduced for the alternative solutions of electro-mechanical actuators. Although light weight and grate flexibility of the material deserves notable attention from enormous publications, few of the publication has discussed feasibility study for actual industrial applications. Most of the previous work demonstrated plain movement of the material without delineating any design concept that guarantees 'controllable action'. The present work introduces a noble design concept that provides controllable action and the concept is verified through a modeling and a simulation of the actuation method.

**Keywords** : electroactive polymer, dielectric elastomer, linear actuator

### I. 서론

널리 사용되고 있는 전자기 변환기(transducer)와 비교하여 폴리머 액추에이터(polymer actuator)는 경량화와 고효율의 이점을 가지고 있으며, 새로운 에너지 변환장치로서 최근 다방면에 적용이 되면서 이에 대한 관심이 날로 증가하고 있는 추세이다. 폴리머릭(polymeric) 에너지변환 재료도 연구대상으로서 관심을 끌고 있지만, 전기활성고분자(electroactive polymer, EAP)는 새롭고 괄목할 만한 액추에이터로서 더욱 많은 발전 잠재성을 가지고 있다[1].

10여 년 전부터 본격적으로 연구가 시작된 EAP를 이용한 액추에이터는 현재 많은 성과를 보이고 있다. 대표적으로 상용화에 근접한 재료로는 이온 교환막을 이용한 IPMC (Ionic Polymer Metal Composite)와 실리콘이나 우레탄 등을 이용한 유전성 엘라스토머(Dielectric Elastomer) 액추에이터를 들 수 있다. 일반적으로 EAP는 이들의 물리적인 액추에이션 원리에 따라서 이온성 폴리머와 비이온성 폴리머의 두 가지 종류로 구분할 수 있는데 이온성 폴리머인 IPMC는 수용액 상태에서만 구동이 가능하여 활용도가 매우 제한적이다. 또한 DC구동이 불가능하여 서보용으로 사용하기가 곤란하며, 기본적으로 굽힘 운동을 하기 때문에 선형 또는 회전 형태의 구동을 이끌어내기가 어렵다. 반면 최근에는 비이온성 폴리머인 dielectric elastomer가 좀더 다양하게 응용될 수 있고 활용 가능성이 높기 때문에 많이 선호하고 있는데 이의 가장 큰 걸림돌은 구동을 위하여 고전압이 필요하다는 것이다. 또한 변위 및 출력 증대를 위하여 선변형(prestrain)을 이용함으로써 액추에이터의 지속적인 성능 유지가 곤란하다는 단점이 있다. 하지만 이러한 기술적인 문

제에도 불구하고 특히 로봇관련 영역에서 폴리머 액추에이터는 인간의 근육과 유사한 메커니즘(mechanism)을 가지고 있기 때문에 다방면에서 이를 응용하기위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 폴리우레탄(polyurethane)과 실리콘(silicon)이 실험적인 차원에서 많이 다루어지고 있다.

Dielectric elastomer의 기본적인 구동은 전압이 양 표면에 인가되었을 때 elastomer가 변형을 하여 팽창 또는 수축하면서 발생하게 된다. 최근에 다양한 폴리머구동에 관한 설계 개념들이 발표되고는 있지만 폴리머의 구동을 파악하고 현상을 관찰하는 것에 영역이 한정되어있고 이것을 제어하는 방법에 관해서는 이에 관한 연구가 미진한 실정이다.

본 논문에서는, 대칭 구조에 기반을 둔 dielectric elastomer의 수학적 모델을 작성하고 이를 제어할 수 있는 방법을 제시한다. 이것의 컴플라이언스(compliance)와 외력의 변화에 따라 평면적인 양방향으로의 변형을 제어하는데 있어서 주어진 재료의 특성과 기하학적인 구속조건은 충분한 제어가 가능성을 보여주고 있다. 간단한 제어법칙에 의한 많은 다른 종류의 액추에이터의 제어능력은 가장 중요한 설계 요소가 되며 특별히 이를 인간의 근육과 유사한 동작에 적용하기 위해서는 간단한 구조와 제어가 용이해야한다. 여기서 제안된 액추에이터는 위 두 가지 요구조건을 모두 만족하면서 제작하기도 손쉽다.

본 논문에서는 액추에이터의 기본적인 구동원리와 선변형에 의한 대칭구동의 개념을 소개하고 다음으로 수학적인 구성방정식(constitutive equation)을 유도하여 시뮬레이션(simulation)해봄으로써 향후 개발될 액추에이터에 응용될 기본적인 이론을 제시하고자 한다.

### II. 구동 원리

Dielectric elastomer의 물리적인 구동원리는 이미 잘 설명되어있다[2], [3], [4], [5], [6]. 이는 전기역학적인 상호 에너지변환에 의한 두개의 평행한 판형 커패시터(capacitor)에 기본원리를 두고 있으며 기본적인 구동 메커니즘(mechanism)에 관한 개략적인 모양은 그림 1에 나타내었다. 전극(compliant electrode)으로 코팅되어 있는 dielectric elastomer의

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 6. 30., 채택확정 : 2004. 8. 13.

정민영, 정광목, 구자춘, 최혁렬 : 성균관대학교 기계공학부  
(picaskk@skku.edu/jungkmok@me.skku.ac.kr/jckoo@me.skku.ac.kr/hrchoi@me.skku.ac.kr)

남재도, 이영관 : 성균관대학교 응용화학부

(jdnam@skku.edu/sklee@skku.ac.kr)

※ 본 논문은 과학기술부 21세기 프론티어 사업 "인간지능 생활 지원 지능로봇 기술개발 사업단"의 지원으로 이루어졌습니다.

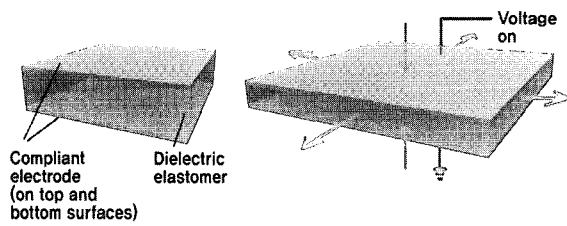


그림 1. 기본 작동 원리.

Fig. 1. Basic operation.

양단에 전압을 가하게 되면 압축이 되면서 평면방향으로 팽창을 하게 된다. 이렇게 재료가 전하의 집적으로 전기적인 에너지가 저장이 되면서 두께가 감소하고 역학적인 탄성에너지가 저장되면서 평면방향으로의 힘이 발생하게 된다. 이렇게 두 가지 에너지 영역(domain)이 커플(couple)되어 elastomer은 동작을 하게 된다. 두께 방향으로의 전압에 의해 생기는 역학적 압력은 다음 식으로 표현이 된다[3].

$$\sigma_e = -\epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 전기장(electrical field) 그리고  $\epsilon_0$ 와  $\epsilon_r$ 은 각각 진공상태에서의 유전율(free space permittivity)과 비유전율(relative permittivity)을 나타낸다.

비록 물리적인 구동은 위에서 설명한 기본 원리에 의해 표현을 할 수 있지만 큰 한계를 가지고 있는데 그것은 변형에 의해 생기는 평면방향의 힘은 매우 적다는 것이다. 가장 큰 이유는 필름자체가 매우 부드럽고 얇기 때문이며 쉽게 좌굴이 되거나 평면방향의 힘에 의해서 좌굴(buckling)이 발생하기도 한다. 또한 이러한 단순움직임을 가지고 실제 액추에이터에 적용하여 제어하기는 어려운 점이 있다.

### II. 대칭구동의 원리와 개념설계

폴리머의 변형에 의해 발생하는 적은 힘과 제어의 관점에서 볼 때 어려운 점이 있는 기본적인 작동원리에서 벗어나 이를 응용한 대칭구동이라는 새로운 액추에이터를 선보이려한다. 이것의 개략적인 모양은 그림 2에 나타내었다.

액추에이터는 dielectric elastomer로 만들어진 두 개의 얇은 필름으로 구성되어있으며 각각의 필름은 사각형 틀(frame)에 한쪽 끝이 고정되어 있다. 사각형틀은 필름을 고정시키는 역할을 할 뿐만 아니라 필름에 전극을 입히고 전압을 인가하였을 때 그라운드(ground) 역할도 같이 하게 된다. 중간에 폴리머 블록(polymer block)을 두어 각각의 필름을 블록에 결합시키게 되면 전압을 인가하지 않는 한 중간 지점에서 평형을 유지하게 되는데 이때 각각의 필름은 초기 위치에서 중간지점까지의 선변형을 가지고 있게 된다. 평형을 유지하고 있는 상태에서 어느 한쪽에만 전압을 가하거나 또는 동시에 가하게되면 전압차가 발생하여 평형이 깨지게 되면 폴리머 블록은 평면상에서 1자유도 운동을 하게 된다. 조금 더 자세한 구동 메커니즘은 그림 3에 나타내었다. 전극 A와 C 또는 B와 C에 전압을 인가하게 되면 dielectric 필름은 평면상에서 팽창하게 되고 블록은 좌우로 움직여 새로

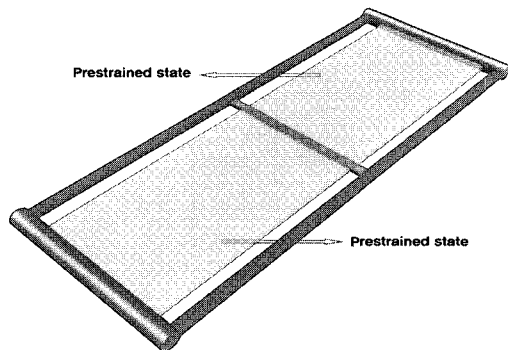
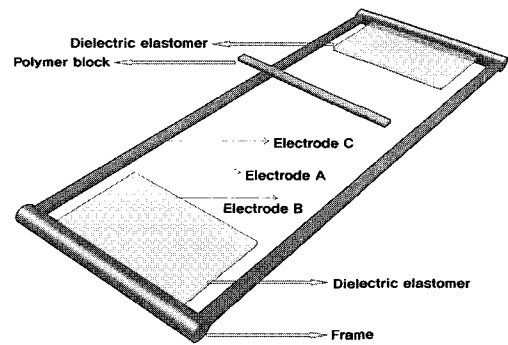


그림 2. 대칭구동 개념의 액추에이터 개략도.

Fig. 2. Schematic view of proposed actuator.

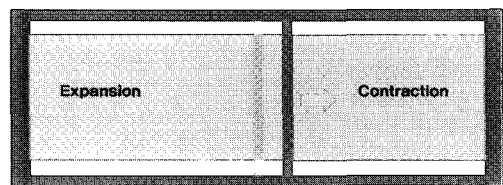
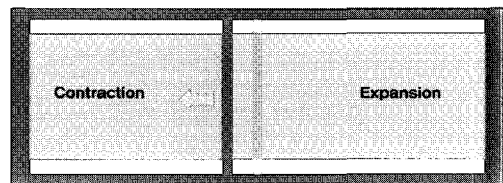


그림 3. 액추에이터의 기본 구동.

Fig. 3. Principle actuation mode.

운 힘의 평형 점에서 멈추게 된다. 이렇게 두 개의 필름이 블록에 의해 서로 구속이 되어 있기 때문에 제안된 액추에이터의 구동은 단지 필름의 강성(stiffness)을 전압에 의해 제어함으로써 얻어질 수 있게 된다. 물론 필름에 전압을 제거하게 되면 바로 초기의 정적평형 상태로 돌아가게 되고 다시 전압을 가하게 되면 구동을 하게 됨으로써 서로 간에 밀고 당기는 식의 대칭적인 구동을 하게 된다.

### III. 구성방정식 모델링

이미 기본적인 구동원리에서 밝힌 바와 같이 elastomer은 마치 두개의 판형 커패시터와 유사한 물리적인 특성을 가지면서 구동을 하게 된다[7]. 이것은 두개의 전기와 기계의 서

로 다른 에너지 영역(domain)에서 elastomer가 변형을 하면서 상호 에너지변환을 하게 되므로 주어진 모델은 서로 다른 에너지 영역을 퍼텐셜에너지(potential energy) 형태로 저장하게 된다. 전형적인 커패시턴스의 구성방정식은 다음과 같이 표현된다[8].

$$q = \Phi_c(e) \tag{2}$$

여기서  $q$ 와  $e$ 는 각각 전하와 전압을 나타낸다. 선형적인 커패시터에서의 구성관계는 (2)로부터 다음과 같이 대치된다.

$$q = C e \tag{3}$$

여기서  $C$ 는 커패시턴스를 나타내며 커패시터에 저장된 에너지  $E$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$E = \int P dt = \int e i dt = \int \frac{q}{C} dq = \frac{q^2}{2C} \tag{4}$$

여기서  $P$ 는 파워(power)를 나타내며  $C$ 는 dielectric elastomer의 커패시턴스로서 다음과 같이 주어진다.

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d} \tag{5}$$

여기서 앞서 말했듯이  $\epsilon_o$ 와  $\epsilon_r$ 는 각각 진공상태에서의 유전율(free space permittivity)과 비유전율(relative permittivity)을 나타내며  $A$ 는 필름의 유효면적,  $d$ 는 전극사이의 간격을 의미한다. 일반적인 elastomer의 경우 변형이 발생하여도 체적의 변화가 없는 완전한 탄성체로 가정을 하면 푸아송 비(Poisson's ratio)  $\nu$ 는 0.5의 값을 가지게 된다[5]. 이러한 가정은 다음과 같은 식을 만족한다.

$$A_x \cdot l_x = A_y \cdot l_y = A_z \cdot t = v_o \tag{6}$$

여기서  $v_o$ 는 elastomer의 초기 부피(volume)를 나타내고  $l_x, l_y, t$ 는 각각 부피의 너비(width), 폭(depth), 높이(height/thickness)를 나타낸다.  $A_x, A_y, A_z$ 는 각각에 대응하는 단면적을 나타낸다. 따라서 elastomer에 저장된 에너지는

$$E = \frac{q^2 t^2}{2\epsilon_o \epsilon_r v_o} = E(q, t) \tag{7}$$

가 된다. elastomer의 부피가 변화하지 않으므로  $v_o$ 는 상수이다.

$$\frac{\partial E}{\partial q} = \frac{qt^2}{\epsilon_o \epsilon_r v_o} \tag{8}$$

는 입력전압  $V$ 가 되고 마찬가지로 두께  $t$ 를 따라서 그 방향으로 나타나는 힘  $F_t$ 는

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{q^2 t}{\epsilon_o \epsilon_r v_o} \tag{9}$$

이다. 이렇게 elastomer에 저장된 에너지와 일반화된 힘을 유도하였고 에너지가 보존된다면 반드시 맥스웰의 상호관계

(Maxwell's reciprocity relations)를 만족해야한다[8], [9]. 그 관계는

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial E}{\partial q} \right) = \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = \frac{2qt}{\epsilon_o \epsilon_r v_o} \tag{10}$$

이 된다. 따라서 (8), (9)는 구성방정식으로서 유효한 식이 되며 다시 정리하면 다음과 같다.

$$V = \frac{t^2}{\epsilon_o \epsilon_r v_o} q \tag{11}$$

$$F_t = \frac{q^2}{\epsilon_o \epsilon_r v_o} t \tag{12}$$

여기서  $V$ 는 양 전극의 전위차,  $F_t$ 는 두께방향(수직방향)으로의 힘이 된다.

비록 양단의 전위차에 의해 변형이 생기고  $F_t$ 가 발생되지만 이는 제안된 액추에이터에서 필요로 하는 평면방향으로의 힘과 변위가 아니기 때문에 이를 다시 평면방향으로의 힘과 변위로 나타내 주어야한다. 앞서 설명했듯이 dielectric elastomer이 변형이 되어도 부피의 변화가 없는 완전한 탄성체라 가정하면 푸아송 비(Poisson's ratio)  $\nu$ 는 0.5의 값을 가지게 되고 elastomer가 변형에 대한 일반성을 유지한다면 푸아송 비의 정의에 의해 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_t = -\nu \epsilon_x \tag{13}$$

여기서  $\epsilon_t$ 와  $\epsilon_x$ 는 각각  $t$ 방향과  $x$ 방향으로의 변형률을 나타낸다.  $\epsilon_t = \Delta t/t$  이고  $\epsilon_x = \Delta l_x/l_x$ 이므로 양변에 시간에 관한 미분을 하여

$$\dot{t} = -\nu \frac{t}{l_x} \dot{l}_x \tag{14}$$

의 관계를 얻을 수 있다.  $\dot{t}$ 과  $\dot{l}_x$ 은 파워를 구성하는 요소로서 각각  $F_t$ 와  $F_x$ 와 관계되어 에너지의 소모 없이 파워를 전달하게 된다. (14)를 다시 쓰면

$$\dot{t} = \eta \dot{l}_x \tag{15}$$

이 되고 무차원 계수  $\eta$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\eta = -\nu \sqrt{\frac{t^3}{v_o}} \tag{16}$$

(14)보다는 (15)를 사용하여 표현하는 것이 단지 하나의 상태변수를 포함하기 때문에 식을 명확하고 간결하게 표현할 수 있다.

#### IV. 액추에이터 시스템과 상태방정식

##### 1. 상태방정식의 유도

이제까지 elastomer의 구성관계를 유도하였고 이번 단원에서는 액추에이터 시스템(actuator system)의 모델을 생성하고 상태방정식을 유도하여 시뮬레이션을 해보고자한다. 그

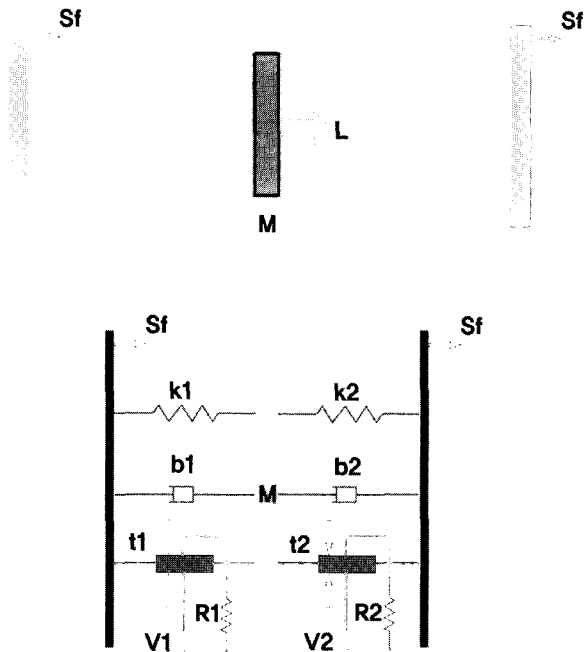


그림 4. 액추에이터 모델.  
Fig 4. Lumped model of proposed actuator.

러나 제안된 액추에이터는 실제로 유한한 변형율과, 점탄성(viscoelasticity) 그리고 변형 후 완전 회복되지 않고 어느 정도의 소성변형을 포함하기 때문에 시뮬레이션 상에 어느 정도의 한계는 있을 수 있지만 액추에이터의 일반적인 거동을 알아보기 위한 목적으로써 유용성은 있다고 판단이 된다. 제안된 액추에이터 시스템을 간략한 방법으로 모델을 하였으며 그림 4와 같다.

모델에서  $k_1$  과  $k_2$  는 elastomer의 선변형을 설명하기 위한 강성을 나타내며  $b_1$  과  $b_2$  는 에너지 소산요소가 된다. 초기에 블록은 정적평형상태에 있으며 질량은  $M$  으로 표현된다. 질량  $M$  과 이의 변형속도로 표시되는 운동량(momentum)의 시간에 대한 미분 값은 액추에이터의 출력 힘 이 된다.

주어진 시스템 모델에서 상태변수를 정리하면  $P$  는 블록의 운동량,  $l_1$  과  $l_2$  는 elastomer의 변위(displacement),  $q_1$  과  $q_2$  는 각각의 elastomer에 축적된 전하량,  $t_1$  과  $t_2$  는 각각 elastomer의 두께를 나타낸다. 상태방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{P} = k_1 l_1 + k_2 l_2 + \eta_1 \frac{q_1^2}{\epsilon_0 \epsilon_r V_1} t_1 - \eta_2 \frac{q_2^2}{\epsilon_0 \epsilon_r V_2} t_2 \quad (17)$$

$$+ S_f (b_1 + b_2) - \frac{P}{M} (b_1 + b_2)$$

$$\dot{l}_1 = S_f - \frac{P}{M} \quad (18)$$

$$\dot{l}_2 = S_f + \frac{P}{M} \quad (19)$$

표 1. 시스템 상수.

Table 1. System constants.

M (kg)	k (N/m)	b (Ns/m)	R ( $\Omega$ )	Sf (m/s)
0.02	10	0.5	1000	0

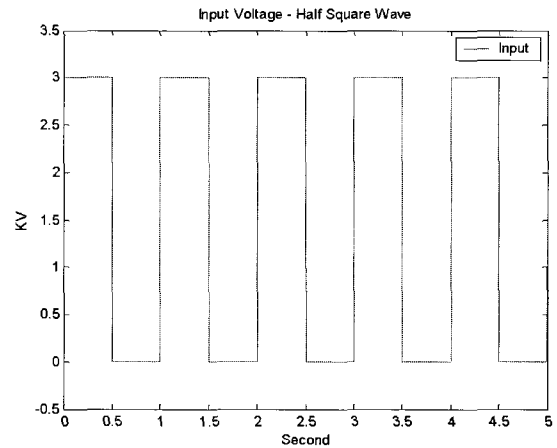


그림 5. 구형파 입력전압.  
Fig 5. Input voltage - half square wave.

$$\dot{q}_1 = \frac{1}{R_1} [V_1(t) - \frac{t_1^2}{\epsilon_0 \epsilon_r V_1} q_1] \quad (20)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{R_2} [V_2(t) - \frac{t_2^2}{\epsilon_0 \epsilon_r V_2} q_2] \quad (21)$$

$$\dot{t}_1 = \eta_1 (S_f - \frac{P}{M}) \quad (22)$$

$$\dot{t}_2 = \eta_2 (S_f + \frac{P}{M}) \quad (23)$$

여기서  $V_1(t)$  과  $V_2(t)$  는 각각의 elastomer에 인가되는 입력전압을,  $S_f$  는 시스템경계(system boundary)의 속도를 나타낸다.  $\eta_1$  과  $\eta_2$  는 (16)에서 주어졌듯이 무차원계수를 나타내고 상태변수의 함수로 주어지게 된다.  $R_1$  과  $R_2$  는 elastomer의 전기적인 저항(resistance)을 나타내며 유도된 상태방정식으로부터 질량  $M$  의 운동량은 입력전압  $V_1(t)$  과  $V_2(t)$  에 의해 제어가 된다.

2. 시뮬레이션(Simulation)

유도된 상태방정식으로부터 시뮬레이션을 수행하여 주어진 모델의 적합성을 파악하고 이를 다른 형태의 액추에이터에 적용가능 여부를 알아보려고 한다. 시뮬레이션에 사용된 elastomer는 3M VHB4905으로써 두께  $500\mu m$ , 부피  $150 mm^3$ 의 물성(property)을 적용하였다. 주어진 모델의 시스템 상수들은 표 1에 나타내었다. VHB4905에는 각각 1Hz 입력전압으로 3KV를 인가하였다. VHB4905는 약간 두껍고 댄핑(damping)에 있어서 에너지 소산을 많이 함으로써 좀더 많은 피텐셜에너지가 구동하기 위해 필요하다. VHB4905는 선변형을 200%까지 주었다.

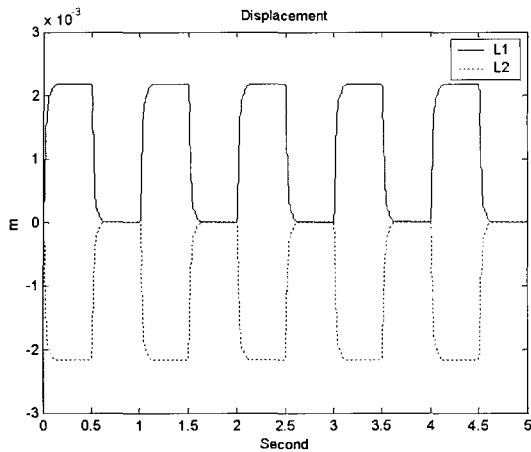


그림 6. 변위 - 구형파 입력.  
Fig 6. Displacement - half square wave.

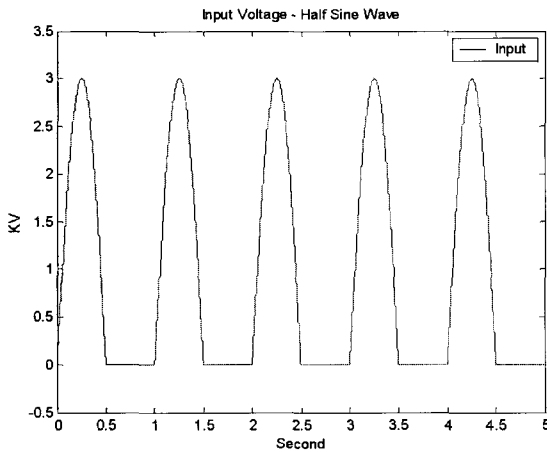


그림 7. 정현파 입력전압.  
Fig 7. Input voltage - half sine wave.

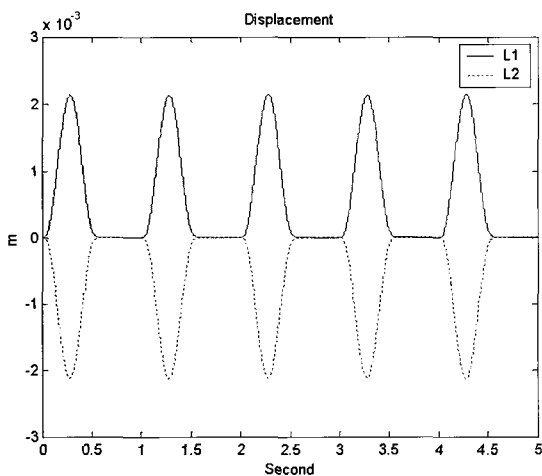


그림 8. 변위 - 정현파 입력.  
Fig 8. Displacement - half sine wave.

그래프를 보면 입력전압의 형태에 따라서 액추에이터변위도 그와 유사한 양상을 보이는 것을 볼 수가 있으며 이를 통해 입력전압의 크기 및 구동주파수를 대칭구동으로 운동이 나타나기 때문에 한쪽 elastomer의 변위가 증가 또는 감소하게 되면 반대편의 elastomer의 변위는 그와 부호만 다르고 동일한 양의 변위가 발생함을 알 수가 있다. 이를 통하여 주어진 액추에이터는 단순히 전압의 크기 및 형태를 제어함으로써 원하는 출력결과를 얻을 수가 있음을 알 수가 있다.

V. 결론

지금 까지 본 논문에서는 새로운 액추에이터로 많은 관심과 연구대상인 dielectric elastomer의 기본적인 원리와 개념을 알아보았고 이를 응용한 대칭구동형 액추에이터의 개념설계를 해보았다. dielectric elastomer의 동적특성상 변위 및 출력의 증대를 위하여 선변형(prestrain)이 주어져야 한다. 이를 위하여 사각형태의 틀(frame)을 이용하여 elastomer에 선변형을 주고 전압을 인가하여 변위를 발생시키는 구조의 액추에이터를 제안하였다. 또한 소성변형이 발생하지 않은 완전탄성체로 가정하여 이를 바탕으로 수학적 모델링을 해보았다. 시뮬레이션 결과를 보면 액추에이터의 변위는 입력 전압의 형태에 따라 유사한 양상을 보이고 있음을 알 수가 있다. 따라서 제안된 액추에이터는 전압의 크기와 형태를 변화시킴으로써 원하는 출력결과를 얻을 수가 있었다.

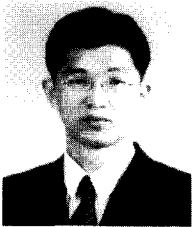
여기서는 실제 모형을 제작하여 보고 실험을 해보진 않았으나 elastomer의 구동원리를 파악하고 개념설계를 통하여 시뮬레이션을 해봄으로써 향후 elastomer가 응용될 새로운 액추에이터의 제어 가능성 여부를 확인할 수 있었다는 데에서 만족할 만한 결과를 얻었다.

참고문헌

- [1] Y. Bar-Cohen, "Electroactive polymer(EAP) actuators as artificial muscles," *SPIE press*, 2001.
- [2] Y. Osada, and D. DeRossi, "Polymer sensors and actuators," *Springer*, 2000.
- [3] R. Perline, R. Kornbluh, and J. Joseph, "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation.," *Sensors and Actuators*, vol. 64, pp. 77-85, 1998.
- [4] T. Hirai, H. Nemoto, M. Hirai, and S. Hayashi, "Electrostriction of highly swollen polymer gel : possible application for gel actuators" *J. of Applied Polymer Science*, vol. 53, pp. 79-84, 1994.
- [5] R. KornBluh, R. Perline, et al., "Electrostrictive polymer artificial actuators" *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2147-2154, 1998.
- [6] R. KornBluh, R. Perline, et al., "High-speed electrically actuated elastomer with Strain greater than 100%" *Science*, vol. 287, pp. 836-839, 2000.
- [7] I. Busch-Vishniac, "Eletromechanical sensors and actuators" *Springer*, 1998.

[8] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, R. C. Rosenberg, "System dynamics" *Wiley-interscience*, USA, 2000.

[9] H. Woodson, and J. Melcher, "Eletromechanical dynamics" *John Wile*, 1968.



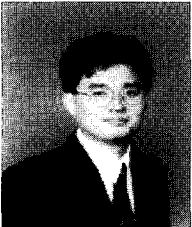
**정민영**

1977년 12월 11일생. 2004년 성균관대학교 기계공학부 졸업(공학학사). 2004년~현재 동대학원 석사과정. 관심분야는 동적시스템 모델링 및 해석, 시뮬레이션.



**정광목**

1969년 2월 4일생. 성균관대학교 기계설계학과(공학학사). 2002년 성균관대학교 대학원 기계설계학과(공학석사). 2002년~현재 성균관대학교 대학원 기계설계학과 박사과정 재학. 관심분야는 인공근육 액추에이터, 마이크로 로봇제어.



**구자춘**

1989년 한양대학교 기계공학과(공학학사). 1992년 University of Texas at Austin(공학석사). 1997년 동대학원(공학박사), 2001년~현재 성균관대학교 기계공학부 조교수. System Dynami.



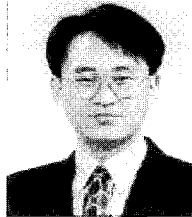
**최혁렬**

1984년 서울대학교 기계공학과(공학학사). 1986년 한국과학기술연구원 기계공학과(공학석사). 1994년 포항공과대학교(공학박사). 1995년~현재 성균관대학교 기계공학부 교수. Artificial muscles ctuator/field-rescue robotics/dextrous mechanism/milli/micro robot.



**남재도**

1984년 서울대학교 화학공학과(공학학사). 1986년 동대학원(공학석사). 1991년 University of Washington (공학박사). 1994년~현재 성균관대학교 응용화학부 고분자시스템공학전공 교수. MLCC(Multi-layer ceramic capacitor), 전기방사 나노 복합소재, 고분자를 이용한 PTC.



**이영관**

1982년 성균관대학교 화학공학과(공학학사). 1988년 University of Southern Mississippi(공학석사). 1991년 동대학원(공학박사). 1997년~현재 성균관대학교 응용화학부 화학공학전공 교수. 이온 함유, 전도성고분자의 합성 및 응용. 나노 복합제로.

전기방사 나노 복합소재, 고분자를 이용한 PTC.

합성 및 응용. 나노 복합제로.