Polymer (Korea) Vol. 26, No. 1, pp 113 120 (2002)

유전성 탄성체를 이용한 전기변형 고분자 구동체의 특성 연구

황성덕 · 이경섭 · 김홍경* · 최혁렬 · 김훈모** · 전재욱*** · 이영관**** · 남재도†**

성균관대학교 고분자공학과, *고분자기술연구소, **성균관대학교 기계공학과,
***성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과, ****성균관대학교 화학공학과

(2001년 7월 27일 접수, 2001년 11월 28일 채택)

A Study of Electrostrictive Polymer(EP) Actuator Using Dielectric Elastomers

Sungdoc Hwang, Kyungsub Lee, Hongkyeong Kim*, Hyoukryeol Choi,**
Hunmo Kim, Jae Wook Jeon***, Young Kwan Lee****, and Jae-Do Nam†**

Department of Polymer Science and Engineering, Sung,
**Polymer Techology Institute,*
*** Department Mechanical Engineering,*
**** School of Electrical and Computer Engineering,*
*****Department Chemical Engineering, Sung Kyun Kwan University,*
300 Chunchun-dong, Jangan-gu, Suwon, Kyunggi-do 440-746, Korea
†e-mail: jdnam@skku.ac.kr

(Received July 27, 2001; accepted November 28, 2001)

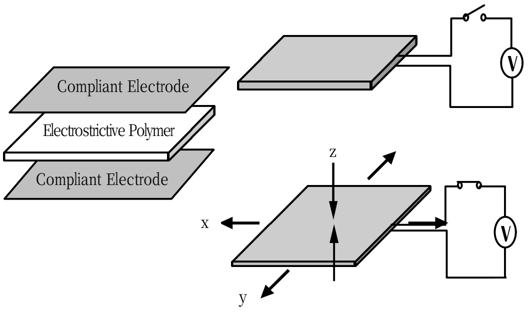
요 약 : 전기변형(electrostriction)이란 물체에 전압을 인가했을 때 맥스웰 응력이 나타나고, 이로 인하여 물체가 변형되는 현상을 말한다. 이러한 성질은 대부분의 유전체에서 나타나는데, 특히 탄성계수가 낮은 엘라스토머에 적용하면 전기에너지가 효율적으로 변환되어 큰 변형과 힘을 발현한다. 이렇게 전기변형을 크게 일으키는 고분자를 전기변형 고분자(electrostrictive polymer, EP)로 분류하며, 이들은 구동체 및 센서, 인공근육, 음향전달 장치 분야로의 활용이 유망한 재료로 예견되고 있다. 본 연구에서는 폴리우레탄과 아크릴 고무 등의 유전성 탄성체(dielectric elastomer)를 이용하여 전극-EP-전극의 적층을 이루는 유니모프 구동체를 제조하여 구동시켰고 주파수를 증가시키면서 작동시킬 때 구동체의 운동범위가 감소하는 현상을 전기적, 기계적으로 해석하고자 유전율과 탄성율을 주파수에 따라 측정하는 한편, 고전적 적층이론을 이용하여 EP의 구동역학을 모델링 하였다. 실험결과, 주파수 증가에 따른 구동체의 운동 변위 감소는 재료의 유전 완화시간과 밀접한 관계를 가졌음을 알 수 있었고, 고전적 적층이론으로 해석한 유니모프 구동체의 운동은 실제 적용한 우레탄 구동체의 운동과 상당히 유사한 거동을 보였다.

ABSTRACT : Electrostriction is the phenomenon that a material is strained due to Maxwell stress developed by the applied voltage. In many electrostrictive materials, especially polymeric elastomers can produce large deformation and force due to their low elastic modulus. In this study, polyurethanes and acrylic rubber with compliant electrodes were used as electrostrictive polymer(EP) actuator. Actuation characteristics of the EP actuators with different physical properties of dynamic modulus and dynamic dielectiric constant were analyzed under AC field. The classical laminate theory was also used to simulate the actuation process in relation to the geometry and the physical properties of the actuators.

Keywords : *electrostrictive polymer, dielectric elastomer, unimorph actuator, dielectric constant, classical laminate theory.*

서 론

일반적으로 전기모터나 솔레노이드와 같은 전기 구동체 기술은 상당히 다양한 응용분야를 가지지만 이들의 기술은 몇 가지 경우에 적용하기 어려운 한계를 가진다. 특히, 마이크로 스케일의 기계장치를 구성하는데 있어서 상당한 제약을 가지며 장치의 구조를 통합하여 단일화된 스마트 구조를 가지게 하는데도 어려움이 따른다.[1] 생체와 유사한 모습의 로봇이나 메카니즘을 구현하는데 있어서 근래의 연구는 그 어느 때 보다도 활발하고 이들을 무선 조정장치나 무인 로봇 등으로 구성하여 인간이 직접 작업하기 곤란한 분야에 사용하려는 시도는 계속되고 있다. 특히, 마이크로 로봇과 같은 소형 시스템에서 작동 효율을 높이려는 시도로 인하여 전기활성 고분자(electroactive polymer; EAP)는 상당한 관심을 모으고 있다.[2-5] 일반적으로 고분자는 경량이고, 가공이 쉬워 다양한 모양으로의 제조가 용이하고, 저렴한 비용이기 때문에 구동체의 재료로서는 매우 매력적이다. 더구나 다양한 화학적 수단을 사용하여 원하는 대로 물성을 수정할 수 있는 장점도 있다.[6] 구동체로 사용될 수 있는 전기활성 고분자의 종류는 다양하다. 전기변형 고분자를[7,8] 비롯하여 압전성 고분자,[9] 형상기억 고분자,[10] 전도성 고분자 등이[11,12] 있고 이들은 서로 다른 장단점을 가지고 있다.[13] 예를 들면, 압전성 고분자는 변형이 작고, 형상기억 고분자는 응답속도가 느리다. 전기변형 고분자 또한 구동전압이 높다는 결점을 가지고 있지만, 큰 변위와 힘을 얻을 수 있고, 에너지 효율이 높다는 장점과 더불어, 위에서 언급한 보편적인 고분자가 가지는 장점들을 가지고 있으므로 소형 시스템의 구동체로 활용하려는 움직임이 활발하다.



(a) (b)

Figure 1. Principle of electrostrictive actuator. (a) structure of electrostrictive actuator and (b)operation of electrostrictive actuator.

이미 알려진 바와 같이 전압을 인가하였을 때 전기변형 고분자는 맥스웰 응력에 의해 구동된다. Figure 1과 같이 유전성 탄성체의 양쪽 표면에 유순한 전극을 도포하여 전압을 인가하면 z 방향으로 인력이 작용하여 유전성 탄성체를 압박하고, 이에 탄성체는 x-y 방향으로 팽창한다.[4,14-16] 이 때 양쪽 전극의 강성을 다르게 하면 구동체는 상대적으로 약한 강성을 가지는 쪽으로 휘게 되고 이러한 원리로 유니모프 형태의 구동체를 제조할 수 있다.[17,18] EP는 이러한 유니모프 형태 이외에도 매우 다양한 형태로 구동체를 구성할 수 있으며 구동체의 디자인에 따라서 구동 능력의 최적화를 가져올 수 있다. 유니모프 형태는 가장 단순한 형태의 구동체로서, 재료의 물성을 측정하고 모델링 하는데 이상적이라 볼 수 있다.

본 논문에서는 유전성 탄성체를 이용하여 간단한 유니모프 형태의 구동체를 제조하였고 구동시 주파수에 따른 영향을 살펴보았다. 그리고 전압 인가에 따라 발생하는 힘과 변형을 고전적 적층 이론(classical laminate theory)을 이용하여 모델링 하였다.

이론적 배경

고전적 적층이론은 복합재료를 구성함에 있어서 서로 다른 탄성율을 가진 재료를 적층할 때 발생하는 구조적 현상을 해결하기 위한 이론이다. 이 이론은 적층 재료가 힘을 받았을 때 생기는 전체적인 변형과 층에 분포하는 힘에 대한 예측을 가능하게 해준다.[19-22]

이 이론은 다음의 다섯가지 가정으로부터 출발한다. (1)층을 이루는 판의 두께는 너비에 비해 매우 얇다. (2)모든 변형은 적층판의 두께방향 변형에 비해 작아야 한다. (3)적층 내부의 변형은 두께에 선형적이다. (4)변형-변위와 응력-변형의 관계는 선형이다. (5)가로축 법선방향의 변형은 판 내부 변형과 비교할 때 무시할 만하다.

Figure 2는 적층된 판의 단면이 변형할 때의 변화를 보여주는 그림으로, u_0, v_0, w_0는 각각 변형시의 x, y, z 방향의 변위를 나타내고 z 방향의 변위는 오로지 x와

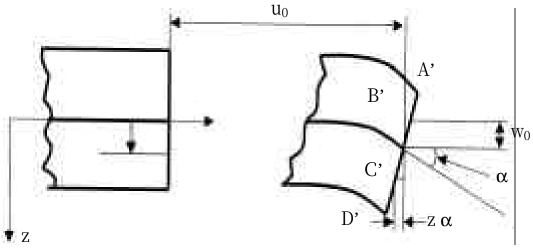


Figure 2. Bending of line element of layered composite structure in x - y plane.

y의 함수라고 가정한다. 작은 변위에서는 다음과 같은 변형 - 변위 관계를 가진다.

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = e_x^0 + zk_x \tag{1}$$

$$e_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = e_y^0 + zk_y \tag{2}$$

$$g_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = g_{xy}^0 + zk_{xy} \tag{3}$$

여기서, e 는 인장변형, g 는 전단변형, e^0 와 g^0 는 각각 판 중심의 인장변형과 전단변형, 그리고 k 는 곡률이다. 이들을 행렬로 표현하면,

$$\{e_x, e_y, g_{xy}\} = \{e_x^0, e_y^0, g_{yx}^0\} + z\{k_x, k_y, k_{xy}\} \tag{4}$$

이고, 판 중심의 변형과 곡률을 다음과 같이 정의한다.

$$\{e_x^0, e_y^0, g_{yx}^0\} = \left\{\frac{\partial u_0}{\partial x}, \frac{\partial v_0}{\partial y}, \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}\right\} \tag{5}$$

$$\{k_x, k_y, k_{xy}\} = -\left\{\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}, 2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}\right\} \tag{6}$$

이차원에서 평판의 응력을 고려하면 응력 - 변형 관계는 임의의 축에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ t_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ g_{xy} \end{Bmatrix} \tag{7}$$

여기서, s 와 t는 각각 인장응력과 전단응력이다. $\left[\overline{Q}\right]$ 는 x와 y 방향의 인장계수와 전단계수, 그리고 포아송비의 네가지 상수로부터 계산된다. 식(6)과 식(7)에서

$$\begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ t_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{Bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{Bmatrix}_k \begin{Bmatrix} e_x^0 \\ e_y^0 \\ g_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z\begin{Bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{Bmatrix}_k \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}_k \tag{8}$$

의 관계가 성립하고 두께방향의 적층을 모두 고려한 법선방향의 힘과 모멘트는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \left[\sum_{k=1}^{n} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz\right] \begin{Bmatrix} e_x^0 \\ e_y^0 \\ g_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \left[\sum_{k=1}^{n} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z\,dz\right] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \left[\sum_{k=1}^{n} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z\,dz\right] \begin{Bmatrix} e_x^0 \\ e_y^0 \\ g_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \left[\sum_{k=1}^{n} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2\,dz\right] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \tag{10}$$

이를 다시 표현하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N \\ \hdashline M \end{Bmatrix} = \left\{\begin{array}{c:c} A & B \\ \hdashline B & D \end{array}\right\} \begin{Bmatrix} e^0 \\ \hdashline k \end{Bmatrix} \tag{11}$$

여기서 A, B, D는 각 각, $A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} \left(\overline{Q}_{ij}\right)_k \left(h_k - h_{k-1}\right)$ $B_{ij} = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n} \left(\overline{Q}_{ij}\right)_k \left(h_k^2 - h_{k-1}^2\right)$, $D_{ij} = \frac{1}{3}\sum_{k=1}^{n} \left(\overline{Q}_{ij}\right)_k \left(h_k^3 - h_{k-1}^3\right)$ 이고, h 는 적층의 중심에서 각 층까지의 거리이다.

실 험

유니모프 구동체 제조. 실험에 사용된 전기변형 고분자로는 Table 1과 같은 유전성 엘라스토머가 사용되었다. 전극에는 두 가지 형태의 것이 사용되었는데 하나는 분말 형태의 은이 분산되어 있는 전도성 그리스 (CW7100, Chemtronics Co.)이고, 다른 하나는 우레탄 (PT6100s, Deerfield Co.)에 카본블랙 (Shawinigan

Table 1. Features of the Elastomers Used in This Study

elastomer	maker	resin type
VHB4905	3 M Co.	acrylic rubber
PT6100s	Deerfield Co.	ether type urethane
A1028	Nanopol Co.	ester type urethane

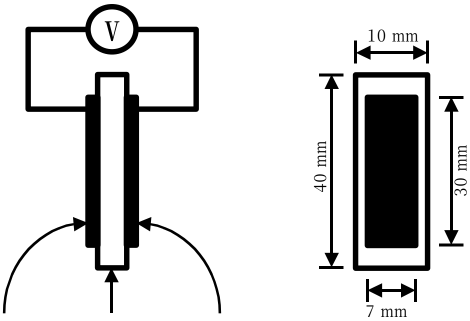


Figure 3. Schematics of simple unimorph type actuator.

acetylene black, Chebron Co.)을 분산시켜 성형한 전도성 우레탄 필름이다. 실험에는 20 wt%의 카본블랙 함량을 사용하여 유니모프 형태의 구동체에 전극으로 접합하였다. 접합 방법은 전도성 그리스의 경우, 스탠실 인쇄기법을 이용하여 유전성 탄성체의 표면에 일정한 두께로 도포하였고 우레탄 전극의 경우는 130 ℃에서 가압하여 전도성 우레탄 필름과 전기변형 고분자를 접합하였다 (Figure 3).

구동 실험. 구동체의 구동 실험은 교류 전압을 인가한 실험과 직류 전압을 인가한 실험의 두가지 형태로 시행하였다. 첫번째 구동실험은 VHB 4905, PT 6100s, A1028 등의 전기변형 고분자의 양쪽 표면에 각각 전도성 그리스와 전도성 우레탄 필름을 접합한 유니모프 형태의 구동체를 제조하여 0.1~10 Hz의 교류 주파수를 주어 구동시켰다. 이 실험은 주파수와 구동체의 운동에 관한 상관관계를 얻기 위한 것으로 최대 전압은 VHB 4905의 경우 10 kV, 나머지 두개는 4 kV를 인가하였다. 두번째 구동실험은 구동체의 변위와 전압의 관계를 알아보기 위하여 직류 전압을 인가한 것으로, 양쪽에 다른 두께(40 μm, 25 μm)의 전도성 우레탄 필름을 전극으로 사용하고 PT 6100s를 구동본체로 사용한 유니모프 형태의 구동체에 1 kV에서 5 kV의 전압을 인가하였을 때 나타내는 변위를 관찰하였다. 이 때 사용한 고전압 발생장치는 DC-DC 컨버터 (Picochip series VV, Pico electronics Inc.)였고 on-off 제어를 사용하여 사각파를 발생시켰다.

유전율과 탄성율. 구동체를 이루는 유전성 고무의 유전율과 탄성율을 측정하여 구동 특성에 관한 기본 자료를 얻었다. 유전율 측정기 (DEA 2970, TA Instruments Co.)와 동역학 열분석기 (DMTA Mark III, Rheometrics Co.)를 이용하여 각각 0.1~100 kHz의 사인파 형태의 주파수로 측정하였고 온도범위는 30~50 ℃였다. 그리고 영률을 측정하기 위하여 만능시험기(4400 R, Instron Co.)를 이용하였으며 이 측정에는 ASTM D 882를 따랐다.

결과 및 고찰

전극. 유니모프 구동체를 구성하는 요소는 전극과 전기변형 고분자 필름이다. 전극은 전기변형 고분자에서 나타나는 전기변형 효과에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 변형에 순응하는(compliant) 재료를 사용해야 한다. 실험에 사용한 전극 중, 우레탄 전극은 카본블랙의 함량에 따라 전극이 가지는 저항과 강성이 변화한다. 카본블랙의 함량이 많아지면 전기전도성은 좋아지지만, 강성이 현저히 증가한다. 전기변형 고분자에 접합되는 전극은 반드시 유연하면서도 전기 전도성이 좋아야 하므로 이들의 타협은 반드시 필요하다. 우레탄 전극은 카본블랙의 함량에 따라서 Figure 4와 같은 전기 저항의 변화를 보였고, 카본블랙의 첨가에 의

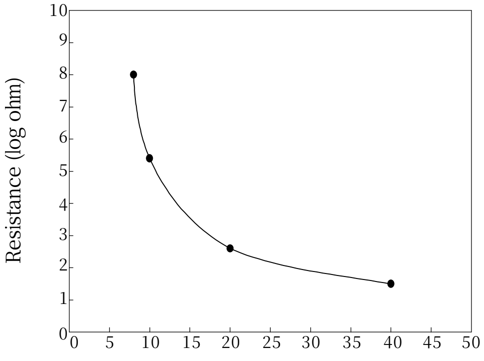


Figure 4. Surface resistance of conductive urethane electrode as a function of carbon black content.

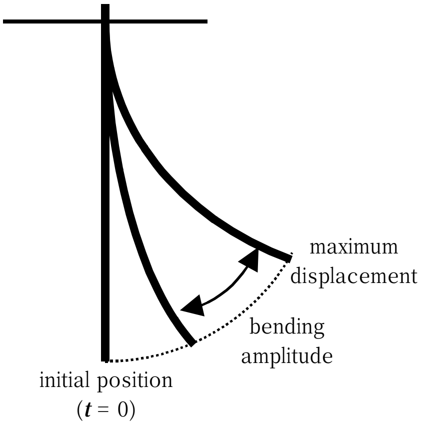


Figure 5. Actuation of the simple unimorph type actuator.

해 저항이 크게 줄어드는 20 wt%의 함량을 가지는 우레탄 전극을 사용하였다.

주파수에 따른 구동 현상. 전류를 인가하면 유니모프 형태의 EP 구동체는 전극의 강성이 약한 쪽으로 휘어진다. 이러한 운동을 교류 전압을 인가한 상태에서 살펴보면 Figure 5와 같이 운동을 하는데 특정 주파수 이상에서는 구동 시작 초기의 위치로 돌아오지 않고 진폭도 줄어든다. 이러한 현상을 관찰하여 도시한 것이 Figure 6이다. 이 그림에서 우리는 아크릴 러버(VHB 4905)와 우레탄(PT6100s와 A1028)의 구동 형태에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 아크릴 고무는 약 1 Hz까지 진폭의 변화를 보이지 않고 안정한 운동을 하고 있는 반면, 2종의 우레탄은 구동 초기부터 진폭이 줄어든다.

정전기력(electrostrictive force)은 외부에서 가한 전기장과 물질의 유전상수에 의하여 다음과 같은 식으로 표현된다.[2,6]

$$P = e_0 e_r E^2 \tag{12}$$

여기서 P는 전기변형 효과에 의한 법선방향의 압력, e_0와 e_r는 각각 엘라스토머의 진공 유전율과 상대 유전율, E는 전기장의 세기이다. 변형-응력 관계를 여기에 대입하여 정리하면 다음과 같이 기계적 변형율을 계산할 수 있다.

$$e^E = \frac{P}{Y} = e_0 e_r E^2 / Y \tag{13}$$

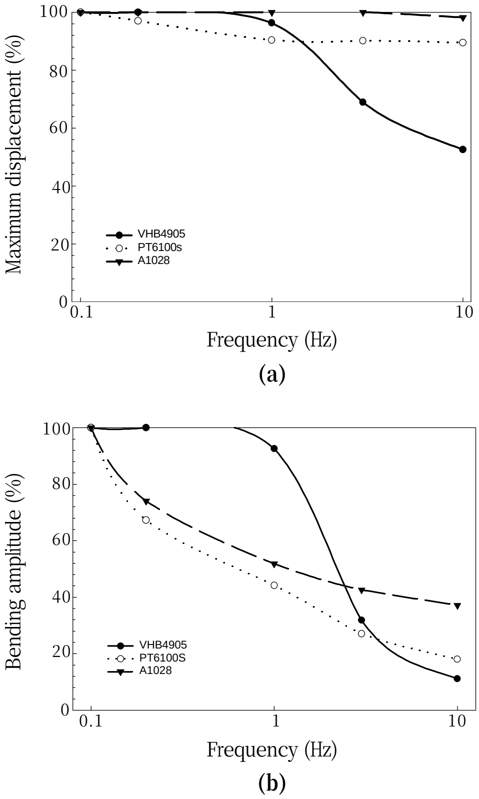


Figure 6. The performance of the simple unimorph type actuator as a function of the frequency of applied on-off controlled DC electric field.

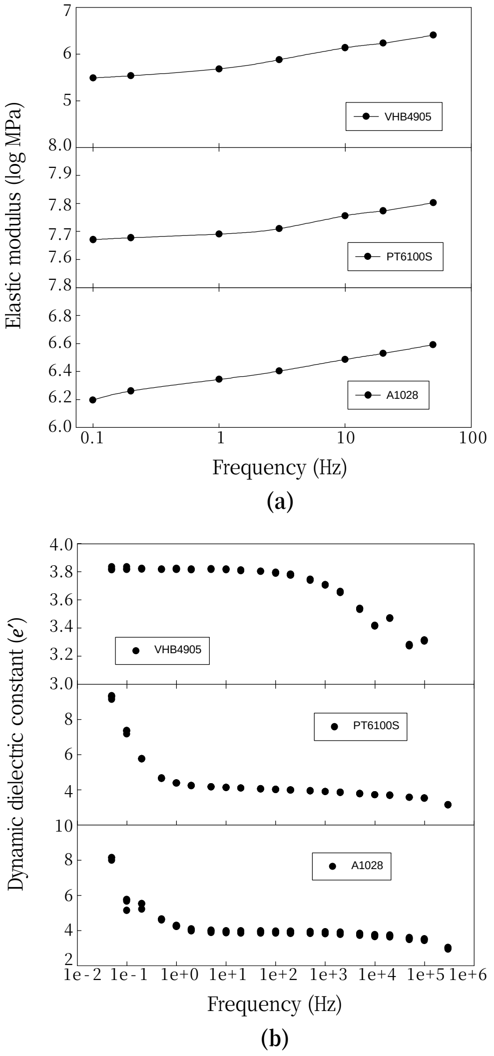
여기서 e^E 는 전기변형 효과에 의한 법선방향의 변형이고, Y는 엘라스토머의 탄성율이다. 따라서 변형율은 전기변형 고분자의 변형이 사용된 소재의 유전율과 탄성율에 의해 결정되어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 유전율과 탄성율은 주파수의 영향을 받기 때문에 Figure 6에서와 같은 현상을 일으켰음을 유추할 수 있다.

주파수에 따른 동적 유전율은 일반적으로 Havriliak-Negami 모델에 의하여 다음과 같이 표현된다.[23]

$$\frac{e^* - e_u}{e_r - e_u} = \frac{1}{1 + (iwt)^b} \tag{14}$$

$$e^*(w) = e'(w) - e''(w) \tag{15}$$

여기서 e^*는 복합 유전율, e¢ 는 비교 유전율, e^2 는 유전 손실, e_r는 완전히 완화되었을 때(주파수=0)의 유



(a)

(b)

Figure 7. Frequency effect of (a) dynamic elastic modulus measured by using DMTA and (b) dynamic dielectric constant measeured by using DEA.

전율, e_u는 완화되지 않았을 때(주파수=∞)의 유전율, *b*는 고분자의 비대칭 요소, *t* 는 유전 완화 시간(고분자가 배향되거나 완화되는 시간)이다.

주파수에 따른 구동 진폭의 감소 현상을 밝히기 위하여 탄성율과 유전율을 측정한 결과는 Figure 7과 같다. 여기서, 탄성율의 변화는 시료에 따른 경향이 눈에 띄지 않는 반면, 유전율의 변화에서는 유전완화 시간이 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 느린 유전완화 시간은 고분자에 전기장을 걸어 주었을 때 고분자의 분절이 분극되어 배열하는 시간과 전기장을 제거하였을 때 배열하였던 분절이 원래의 불규칙한 상태로 돌아오는 시간 역시 길다는 것을 의미한다. Figure 6의 결과에서 보듯이 VHB 4905는 0.18×10^{-3}초의 유전완화 시간을 보이고, 다른 두 우레탄(PT 6100s, A1028)의 경우는 각각 7초와 5초의 유전 완화시간을 보인다. 이것과 구동 실험에서 보인 진폭의 감소현상을 연관시켜보면 Figure 3에서 진폭이 일정한 영역을 가지는 VHB 4905는 약 1 Hz까지 유전완화가 빠르게 이루어져서 초기의 시작점에서부터 반복적으로 구동이 이루어진다. 그러나 그 이후에는 거동은 점차 시작점에서 멀어지게 되고 그에 따라서 구동하는 진폭이 줄어든다. 동적 유전율 측정에서 보이는 유전완화 시간과 실제 구동 실험의 완화시간이 차이를 보이는데 이것은 구동체에 쓰인 전극의 영향으로 사료된다.

고전적 적층 이론에 의거한 모델링. 복합재료 분야에서 고전적 적층 이론을 통하여 얻고자 하는 것은 각각 다른 물성을 가지는 판들의 적층이 복합재료 전체에 어떠한 영향을 주는가를 예측하는 것이다. 여기서 적층물 중앙의 모멘트와 법선방향의 힘으로부터 곡률과, 변형을 얻는다. 마찬가지로, 전기변형 효과로부터 발생되는 힘이 유니모프 형태의 구동체에 어떠한 모멘트와 힘을 발생시키는가를 고전적 적층이론으로부터 얻어내고 이것으로부터 곡률과 변형을 예측할 수 있다.

유니모프 구동체에 가해지는 전기장에 의하여 변형력이 변화하는 전기변형효과를 고전적 적층 이론으로 설명하기 위해서는 전기장의 변화 DE에 의해 발생하는 변형인 e^E를 고려하여야 한다. 식 (13)으로부터 변형이 자유로운 상태에서 정전기력에 의하여 변형되는 변형율은 $e^E=dDE^2$으로 나타낼 수 있는데, 여기서 d는 전기장에 의한 부피변화 계수가 된다($d=e_0e_r/Y$). 전기변형 현상에 의한 판의 변형은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} e_x^E \\ e_y^E \\ g_{xy}^E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_x\Delta E^2 \\ d_y\Delta E^2 \\ d_{xy}\Delta E^2 \end{Bmatrix} \tag{16}$$

전기변형 효과의 결과적인 힘과 모멘트는 몸체가 완전히 팽창이나 굽힘, 비틀림에 대해서 자유로울 때 발생되는 것이 아니다. 각각 적층을 이루는 판은 서로 다

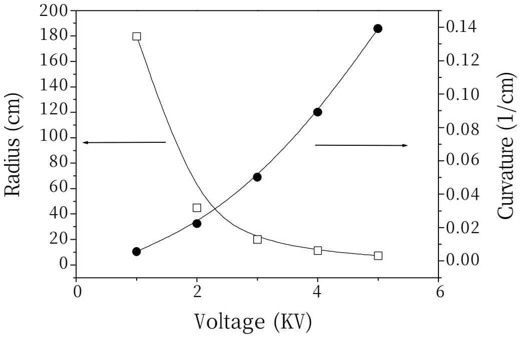


Figure 8. Effective radius and curvature calculated by classical laminate theory for PT6100s and urethane electrodes.

른 전기적/물리적 특성과 방향성을 가지므로 변형으로부터 자유롭지 못하다. 즉 변형은 다른 적층들에 의해 영향을 받으므로 적층의 변형은 식 (4)로부터 층 중심의 변형과 곡률에 의해서 얻어진다. 이를 고려할 때, 변형은 기계적 변형$\{e^M\}$을 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{e^M\}=\{e\}-\{e^E\} \tag{17}$$

이 때, $\{e\}$는 식(4)에 의한 적층 전체의 응력이고, 식 (4)와 식 (11)을 식 (17)에 대입하여 다음과 같은 전기변형 효과에 의한 상태방정식을 유도할 수 있다.

$$\left\{\begin{array}{c:c} A & B \\ \hdashline B & D \end{array}\right\}\left\{\begin{array}{c} e^0 \\ \hdashline k \end{array}\right\}=\left\{\begin{array}{c} N^E \\ \hdashline M^E \end{array}\right\} \tag{18}$$

여기서 $\{N^E\}$와 $\{M^E\}$ 는 각각 다음과 같다.

$$\{N^E\}=\Delta E^2 \sum_{k=1}^{n}\{\overline{Q}\}_k\{d\}_k\{h_k-h_{k-1}\}$$

$$\{M^E\}=\frac{1}{2}\Delta E^2 \sum_{k=1}^{n}\{\overline{Q}\}_k\{d\}_k\{h_k-h_{k-1}\}$$

이러한 과정을 거쳐서 도출한 PT6100s 유니모프 구동체의 곡률을 계산한 결과는 Figure 8과 같다. 전압을 인가하면, PT6100s의 양쪽 표면 전극에 맥스웰 응력이 생기고, 우레탄 전극의 두께 차이에 의해서 모멘트가 발생하여 굽힘 운동을 한다. 모델링에 쓰인 변수들은 유니모프를 구성하는 PT6100s와 우레탄 전극의 물성실험에서 측정된 두께와 모듈러스, 유전율 등을 사용하였고, 이를 Table 2에 나타내었다. Figure 8에서 곡률은 전압의 증가에 따라서 크게 증가하는 모습을 보이며, 곡률로부터 구한 곡률 반지름은 1 kV에서 2 kV로 변화할 때 크게 감소한다. 정전기력의 식 (12)에서 발생하는 힘은 전압의 제곱에 비례함과 연관하여 생각해 볼 때, 곡률도 지수함수 형태로 나타남을 알 수 있다.

Table 2. Properties of Laminate

	thickness	modulus	relative dielectic constant(e')at 1 kHz
PT6100s	75 μm	16 MPa	4
carboneblack/ urethane electrode	25 μm 40 μm	50 MPa	-

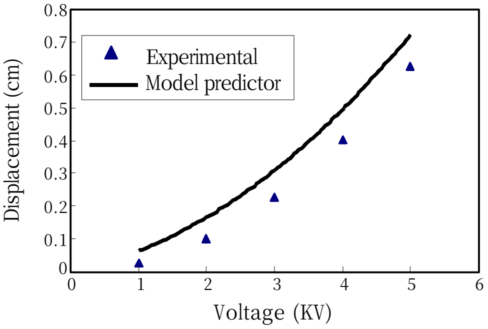


Figure 9. Comparison of model prediction and experimental results for PT6100s.

모델링에서 얻은 곡률을 이용하여 Figure 3과 같은 형태의 PT6100s 유니모프 구동체 하단 변위를 계산하고, 실제의 PT6100s의 전압과 변위와의 관계를 실험하여 얻은 값을 관찰하여 비교한 것이 Figure 9이다. 실험치와 모델링에 의해 예측한 값은 약 0.02 cm정도의 오차를 보이지만, 형태상으로는 매우 유사한 모습을 가지며, 전압의 증가에 따른 변위의 증가분이 점차로 늘어난다. 오차는 탄성체의 $\{\overline{Q}\}$를 구할 때 적용한 완전탄성체의 가정과 고전적 적층이론 도입시의 기본 가정에 의하여 발생된 것으로 사료된다. Figure 9에서 보이는 예측 곡선은 모델링에서 1, 2, 3, 4, 5 kV의 수치를 대입하여 식 (18)에서 얻은 곡률로부터 변위를 계

산하여 각 점을 회귀법을 이용하여 얻은 것이다. 완성된 모델링에 의하여 전기변형 고분자 구동체에서 발생하는 힘이나 모멘트 등 다른 형태의 값들을 예측할 수 있다.

결 론

유니모프 형태의 구동체를 통하여 얻어진 유전성 엘라스토머의 전기변형 효과는 주파수와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있었고 특히, 동적 유전율 측정에서 얻어진 자료를 토대로 물질이 갖는 유전완화 시간의 거동에 따라 유니모프 형태의 진폭이 영향을 받음을 알 수 있었다. 또한 고전적 적층 이론을 통하여 유니모프 구동체의 힘과 모멘트, 곡률을 이론적으로 해석하였고 이를 통하여 적절한 구동체의 두께와 물성치 등을 설정할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글 : 본 연구는 21C 프론티어 사업인 지능형 마이크로 시스템 과정연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. Kornbluh, R. Pelrine, Q. Pei, S. Oh, and J. Joseph, *Proceedings of SPIE,* 3987, 51 (2000).
2. R. Kornbluch, R. Perine, J. Eckerie, and J. Joseph, *Procedings of the 1998 IEEE International conference on Robotics and Actuation,* p. 2147 (1998).
3. H, Choi, S. Ryew, S. Cho, J.-D. Nam, J. W. Jeon, and H. Kim, *SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, p. 97, March 4-8 (2001).
4. J. W. Jeon, K. C. Park, S. Y. An, J. -D. Nam, H. Choi, and H. Kim, *SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, p. 98, March 4-8 (2001).
5. S. Cho, S. Ryew, Jae wook Jeon, Hunmo Kim, J.-D. Nam, H. Choi, and K. Tanie, *Proceedings of 32nd ISR 2001 in conjunction with 1st IMS 2001*, 1963 (2001).
6. R. Kornbluh, R. Perline, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, and Seiki Chiba, *Proceedings of SPIE*, 3669, 149 (1999).
7. Q. Zhang, V.Bharti, and X. Zhao, *Science*, 280, 2101 (1998).
8. Yoseph Bar-Cohen, "Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles", 1st ed., p. 458, SPIE, Washington, 2001.
9. T, Flukawa and N. Seo, *Japanese J. Applied Physics*, 29, 675 (1990).
10. Y. Osada and A. Matsuda, *Nature*, 376, 219(1995).
11. K. Oguro, Y. Kawami, and H. Takenaka, *J. Micromachine Society*, 5, 27 (1992).
12. M. Shainpoor, *J. Intelligent Material Systems and Structures*, 6, 307 (1995).
13. Ronald E. pelrine, Roy D. Kornbluch, and Jose P. Joseph, *Sensor and Actuator*, A64, 77 (1998).
14. K. C. Park, J. W. Youn, J. W. Jeon, H. Choi, H. Kim, and J.-D. Nam, *Proceedings of 32nd ISR 2001 in conjunction with 1st IMS 2001*, p. 1869, April 19-21 (2001).
15. K. C. Park, J. H. Kim, J. W. Jeon, H. Kim, J.-D. Nam, and H. Choi, *Proceedings of 32nd ISR 2001 in conjunction with 1st IMS 2001*, p. 1877, April 19-21 (2001).
16. K. Hwang, H. Kim, S. Oh, J. W. Jeon, J.-D. Nam, H. Kim, H. Choi, and S.-J. Youn, *Proceedings of 32nd ISR 2001 in conjunction with 1st IMS 2001*, p. 1818, April 19-21 (2001).
17. R. Pelrine, R. Kornbluch, and G. Koford, *Adv. Mater.*, 16, 1223 (2000).
18. H. Kim, S. Hwang, H. Choi, H. Kim, J. W. Jeon, and J.-D. Nam, *SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, p. 100, March 4-8 (2001).
19. K. S. Pister and S. B. Dong, *J. Eng. Mech. Division, ASCE*, 1 (1959).
20. E. Ressner and Y. Stavsky, *J. Appl. Mech.*, 402 (1961).
21. R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", Hemisphere Publ. Co., New York, 1975.
22. M. Daniel and O. Ishai, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, New York, 1994.
23. P. Hedivig, "Dielectric Spectroscopy of Polymers", chapter 1 and 2, John Wiley and Sons, New York, 1977.