

고분자 구동기를 이용한 마이크로 로봇

최혁렬*(성균관대학교 기계공학부), 정광목(성균관대학교 기계공학부), 남재도(성균관대학교 응용화학부)

Micro robot using actuators based on dielectric elastomer

H.R. Choi(Mechanical Eng., Sungkyunkwan Univ.), K.M. Jung(Mechanical Eng., Sungkyunkwan Univ.),
J.D. Nam(Applied Chemistry, Sungkyunkwan Univ.)

ABSTRACT

In this paper, we introduce a novel actuation method based on dielectric elastomer. Along with basic principles of actuation using dielectric elastomer a new design of actuator is discussed. The proposed design has advantageous features in reduction in size, speed of response, ease and ruggedness of operation. Using the actuator, a three-degree-of-freedom actuator module is developed, which can provide up-down, and two rotational degree-of-freedom motion. In the application of the proposed actuation method, a micro-robot mimicking the motion of an inchworm is developed.

Key Words : Dielectric elastomer(유전탄성체), Artificial muscle(인공근육), EAP(기능성 고분자), Actuator(구동기)

1. 서론

지금까지 로봇에 가장 보편적으로 사용되어 왔던 구동기는 모터와 같이 전자기 원리를 이용한 기기들이며 일부 압전소자나 형상기억합금등과 같은 새로운 구동기술이 시도되고 있으나 조만간 모터와 경쟁이 될 만한 새로운 기술의 등장은 기대하기 어렵다고 예상된다. 물론 공압이나 유압과 같은 구동기술이 오래 전부터 보편적으로 사용되어 왔다는 것은 사실이나 이의 응용분야는 로봇에 사용되는 모터와는 차별화된 분야에 국한되고 있으며 상기의 기술들은 상호보완적으로 사용되고 있다. 기능성고분자(ElectroActive Polymer)를 이용한 구동기술은 최근에 모터를 대체할 구동기술로 많이 연구되고 있는 기술로서 인간의 근육과 유사한 특성을 가지고 있다는 점으로부터 “인공근육구동기(Artificial Muscle Actuator)”라고도 불리운다. 기능성고분자는 다양한 재료를 포함하고 있으며 이들 각 재료의 특성 및 장단점에 따라서 다양한 형태의 구동기를 개발할 수 있으며 응용분야도 폭넓게 기대할 수 있다 [1-4]. 기능성고분자 재료중에서 최근에 많은 관심을 불러 일으키고 있는 재료는 고분자유전체(dielectric elastomer)이며 비교적 고압의 전원을 필요

로 함에도 불구하고 구동 및 가공의 용이함, 빠른 속도, 가격 등의 장점을 가지고 있는 재료이다. 지금까지 개발된 많은 유전 탄성체를 이용한 구동기들은 대부분 재료에 선장력(prestrain)을 인가한 상태에서 변위와 출력을 얻고 있다. 적용 방식에 따라 장단점이 있을 수는 있으나 선장력의 적용은 몇 가지의 부정적인 요소를 내재하고 있다. 먼저 선장력을 지지하기 위한 외부 구조물이 필요하다는 것이다. 외부 구조물의 필요는 동력 발생과 무관한 불필요한 중량의 증가를 가져오며 결국 출력 효율을 떨어뜨리게 된다. 또한 선장력에 의한 구동은 정확하게 표현하면 능동적인 구동이라기 보다는 수동적 구동에 가까운 구동방식이므로 구동기 외부에서 스프링과 같은 별도의 탄성체를 통하여 일정한 탄성력을 부여하여야 한다. 이러한 부가적인 요소들로 인하여 유전 탄성체를 이용한 구동기의 장점 중 하나인 큰 중량 대 출력비가 반감되는 결과를 가져오게 된다. 또한 초소형 구동기의 제작에 있어서도 부가적 구조물들은 전체 구동기의 크기와 형태를 제한하는 요소로 작용하게 된다. 고분자 유전체를 이용한 다른 구동방식은 전기장의 압축력에 의한 변형을 그대로 이용하는 방식이다. 이 방식은 주변 구조물의 증가라는 단점은 해결되었으나 상대

적으로 작은 변위와 출력을 나타내고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 선장력을 필요로 하지 않는 구동방식을 제안하며, 인치웜(inchworm) 방식의 소형 이동 로봇의 개발을 통해 제안된 구동기의 효율성을 입증할 것이다.

2. 구동 원리 및 새로운 구동방식 제안

고분자유전체의 구동원리를 간단하게 설명하면 얇은 탄성체 필름 위에 유연한(compliant) 전극을 입히고 전압을 공급하였을 때, 필름의 두께는 감소하고 면적은 늘어나게 된다. 이는 정전기에 의하여 생성된 전기장으로부터 유발된 변형이며, 필름의 변형을 발생시킨 유효 압력 σ_z 는 전기장의 방향으로 수축을 일으키며 다음과 같이 구할 수 있다[5].

$$\sigma_z = -\epsilon_0 \epsilon_r E^2 = -\epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{t}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 E 는 전기장, t 는 탄성체의 최종 두께, V 는 인가된 전압, ϵ_0 , ϵ_r 은 각각 자유공간에서의 유전율과 고분자의 비유전율이다. 그러므로 유효 압력 σ_z 에 의해서 유발된 변형율은 작용된 전기장의 제곱에 비례한다. 압축력에 의한 최종 두께 $t=(1+\delta_z)t_0$ 로 표현할 수 있으며, 식(1)을 σ_z 에 의한 z 방향의 변형율로 표현하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_z}{Y} = \delta_z &= -\frac{1}{Y} \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{(1+\delta_z)t_0}\right)^2 \\ &= -\frac{1}{Y} \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{t_0}\right)^2 \frac{1}{(1+\delta_z)^2} \\ \delta_z^3 + 2\delta_z^2 + \delta_z &= -(1/Y)\epsilon_0 \epsilon_r (V/t_0)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Y 는 재료의 인장강도, δ_z 는 수직방향의 변형율이며 t_0 는 초기 두께이다. 식(2)에서 우변은 전압에 따른 상수항이므로 식(2)는 δ_z 에 대한 3차 방정식이다.

표 1 과 같은 물성을 갖는 실리콘 재료에 대하여 전압의 증가에 따른 δ_z 의 변화를 그림 1 에 나타내었다. 탄성체의 물성에 따라 차이는 있으나, 그림에서 알 수 있듯이 압축률은 불과 1~3%에 지나지 않는다. 물론 전압을 더욱 높게 인가한다면 더 높은 변형을 얻을 수 있으나, 이 경우 통상적인 고분자 재료의 절연과파 강도를 훨씬 초과하게 되어 구동기의 안정성에 심각한 문제를 야기 할 수 있다.

유전 탄성체는 비압축성이기에 구동기의 형태를 원형의 평면으로 가정한다면 수평 방향의 변형율 δ_r 은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} (1+\delta_r)(1+\delta_r)(1+\delta_z) &= (1+\delta_r)^2(1+\delta_z)=1 \\ \delta_r &= 1/\sqrt{1+\delta_z}-1 \end{aligned} \quad (3)$$

δ_r 은 식(3)과 같이 구할 수 있으나 급수전개를 통해 근사치를 구해보면 $\delta_r \approx -(1/2)\delta_z$ 로 계산되어 진다.

Table 1 Specifications of KE441 silicon

Elastic modulus (Mpa)	2
Break down (kV/mm)	20
Relative permittivity	2.8

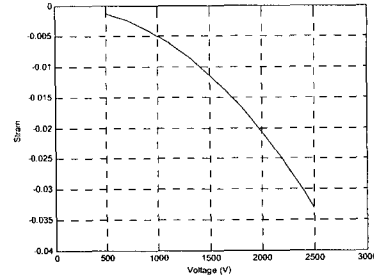


Fig. 1 Simulated strain curve for compressed direction

이와 같이 유전 탄성체의 변형율은 수직, 수평 방향 모두에 대해 상당히 제한적이다.

통상적으로 유전 탄성체에 선장력을 인가한 후 구동기로 이용하는 것은, 선장력에 의해 탄성체 내부에 잔류하게 되는 내부 응력이 재료의 변형에 따라 탄성 평형을 재구성하는 과정에서 변형량을 증폭시키는 역할을 하기 때문이다. 앞서 언급한 것과 같이 선장력의 필요는 구동기의 응용에 있어서 장단점을 동시에 지니고 있으나 초소형 메카니즘에 응용하기에는 중대한 제한 조건일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 선장력이 없는 상태에서도 큰 변위와 출력을 얻을 수 있는 다음과 같은 구동방식을 제안한다. 그림 2 에 나타낸 것과 같이 유전 탄성체 필름의 외곽을 고정할 경우 전기장의 인가에 의하여 필름이 확장될 경우를 생각하여 보자. 고분자유전체는 비압축성재료이며 외곽이 고정되어 있으므로 필름의 확장으로 인한 변형은 필름의 중심부의 원형 돌출로 나타나게 된다. 이와 같은 원리로 선장력이 없는 상태에서 효과적인 구동을 할 수 있게 되며 이에 관한 관계식은 간단하게 유도할 수 있다. 먼저 변형율 δ_a 에 대한 곡률 반경 r 과 θ 의 변화는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} b = a(1+\delta_a) &= r\theta, & r \sin(\theta/2) &= a/2 \\ \frac{\theta}{\sin(\theta/2)} &= 2(1+\delta_a) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 $\sin(\theta/2)$ 를 2 차까지 급수전개하면,

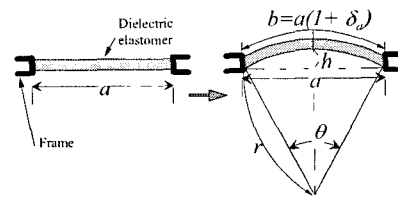


Fig. 2 Concept of the proposed actuation method

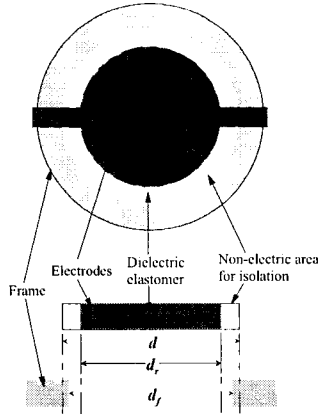


Fig. 3 Construction of dielectric elastomer actuator

Table 2 Dimensions of dielectric elastomer actuator

d (mm)	5.8	d _r (mm)	5.7
d _r (mm)	5.1	t (mm)	0.75

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{(\theta/2)^3}{3!} = \frac{\theta(24 - \theta^2)}{48}$$

이를 식(4)에 대입하고 정리하면 다음과 같다

$$\theta = \sqrt{24(1 - 1/(1 + \delta_a))} \quad (5)$$

앞서 식(2)와 (3)을 이용하여 δ_a 를 구할 수 있으며 식(5)에서 θ 를 얻을 수 있다. 또한 곡률 반경 $r = [(1 + \delta_a)a]/\theta$ 과 같다. 따라서 얻고자 하는 변위 h 는 다음 식을 통해서 계산된다.

$$h = r(1 - \cos(\theta/2)) \quad (6)$$

3. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션과 실험에 사용된 구동기는 그림 3 과 같이 설계되었으며 각 재료는 표 2 와 같다. 사용된 유전 탄성체는 평균 두께 50 μ m 의 박막을 14 회 적층하고 위, 아래면에 전극 보호 코팅을 하여 전체 두께는 750 μ m 로 제작 되었다. 유전 탄성체의 외곽에 전극이 없는 부분은 적층된 전극간의 절연을 위한 것이다. 그리고 탄성체의 직경(d)이 고정틀의 내경(d_f)보다 조금 큰 것은 탄성체에 초기 변형을 줌으로써 구동시 초기 변형된 방향으로 변위를 유도하기 위함이다. 구동기에 전압이 인가되면 전극이 덮여진 영역(d_r)에서만 압축력에 의한 반경 방향의 팽창 변형이 발생하게 되므로 이를 구동기 전체 영역의 변형률로 환산해야 한다.

$$\delta_a = \delta_i + \left[\frac{(d - d_r) + d_r(1 + \delta_r)}{d} - 1 \right]$$

여기서 δ_a 는 구동기의 환산 변형률, δ_i 는 초기 조건에 의한 초기 변형률로 $\delta_i = (d/d_f - 1)$ 이며, δ_r 은 전압이 가해진 부분의 수평 변형률로 식(3)에 의해

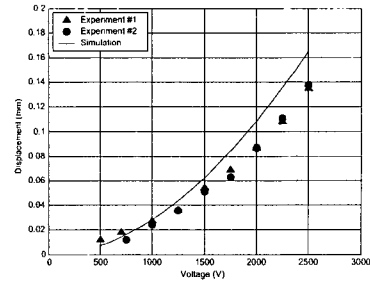


Fig. 4 Displacements from simulation and experiments

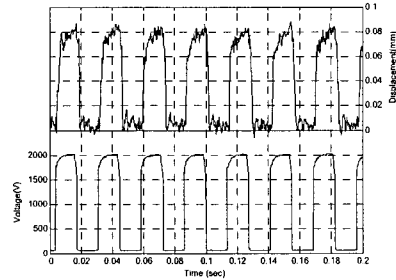


Fig. 5 Response of the actuator

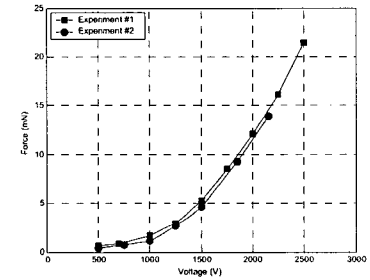


Fig. 6 Measured forces from experiments

얻어진다. 또한 제작된 구동기의 수직방향 변위 h 는 식(5)와 (6)를 통하여 구할 수 있다. 그 결과를 실험 결과와 함께 그림 4 에 보였다. 그림 4 에 나타난 것과 같이 거의 유사한 결과를 보여 주고있다. 약간의 오차는 구동기를 구성하는 14 개의 층의 두께가 조금씩 차이가 나는 것과 외부에 코팅한 보호막, 그리고 틀에 탄성체를 고정할 때 사용한 실리콘의 영향으로 생각할 수 있다.

그림 5 는 제작된 구동기의 응답 성능을 보여주고 있다. 구동 주파수는 약 25Hz 이며 2Kv 의 구형파가 입력으로 사용되었다. 그림 5 에서 알 수 있듯이 구동기는 전압에 따라 매우 빠르게 반응하며 용량성 부하의 특징을 보여 주고 있다. 그림 6 은 구동기의 전압에 따른 출력을 나타내고 있다.

4. 인치웜 로봇

인치웜 로봇을 개발하기 위하여 앞서 제안된 구동기의 원리를 이용하여 그림 7 에 보인 것 같이

3 자유도의 운동을 만들어 낼 수 있는 모듈 방식의 체절구동체를 개발하였다. 체절구동체는 총 12 개의 단위 구동기와 각 구동기에 전원을 공급하기 위한 배선을 포함하는 PCB 로 구성되어 있다. 이 체절구동체는 각 단위 구동기를 통합하여 로봇을 구동하는 동력을 제공할 뿐만 아니라 로봇의 기본 골격을 구성하게 된다. 따라서 로봇은 추가적인 기계적 구조물 없이 체절구동체의 적층만으로 제작이 가능하게 되었다. 제작된 체절구동체는 직경 20mm, 두께 3mm 의 크기를 가지며 무게는 0.4g 이다.

그림 8 은 제작된 인치웜 로봇을 보이고 있다. 로봇은 총 8 개의 체절구동체로 구성되었다. 각 구동체는 전원을 공급 받기 위한 4 가닥(공통 GND 1, 구동용 전원 3)의 직경 80 μ m 의 에나멜선으로 연결되었다. 체절구동체간의 연결은 직경 1mm, 높이 0.2~0.4mm(구동기간의 높이차 조정)의 절연체를 단위 구동기의 정점에 실리콘으로 집착하여 제작되었다. 전체 체절구동체는 앞, 뒤로 각 4 개씩 짝을 이루어 구동 된다. 이는 인치웜 방식의 이동 능력을 확보하기 위하여 앞, 뒤의 몸체가 순차 구동방식으로 이동할 수 있도록 구성한 것이다.

제작된 로봇의 외부에는 그림 8 의 오른쪽 상단에 보인 것과 같은 외피로 감싸졌다. 이 외피는 인체에 무해하며 인장 강도와 신율이 높은 실리콘을 이용하여 자체 개발한 3D 몰딩(molding) 방식으로 제작되었다. 외피에는 구동기의 수축, 팽창 운동을 방해하지 않게 하기 위하여 모듈 간격에 맞추어 주름이 삽입되었으며 제작된 외피의 두께는 100 μ m 이다. 따라서 개발된 인치웜 로봇은 전원을 공급하기 위한 전선을 제외하고는 모든 부분이 실리콘과 플라스틱만으로 제작되었다. 개발된 로봇의 제원은 표 3 에 나타내었다.

5. 결론

본 논문에서는 고분자유전체를 이용한 새로운 구동기를 제안하였다. 제안된 구동 방식은 외부 구조물을 최대한 배제함에 따라 선장력을 이용한 방법에 비하여 가벼우며 소형의 구동기 제작이 가능하였다. 또한 시뮬레이션과 실험을 통하여 기존의 단순 팽창을 이용한 구동기에 비해 큰 출력과 변위를 얻을 수 있음을 입증하였다. 개발된 인치웜 로봇은 인체에 무해한 실리콘 외피에 의해 완전한 캡슐 형태로 제작되었으며 튜브형상의 대상물 내부를 주행하기 위하여 3 자유도를 갖도록 설계되었다.

Table 3 Specifications of the developed inchworm robot

Size (D×L, mm)	20 × 45	Speed (mm/sec)	2.5
Weight (g)	4.7	Load (g)	> 10

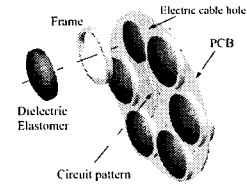


Fig. 7 Design of actuator module

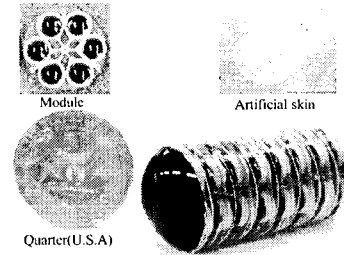


Fig. 8 Inchworm robot wrapped with artificial skin

후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어연구개발사업인 지능형마이크로시스템개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었음(과제협약번호 MS-02-113-01).

참고문헌

1. Ron Pelrine, Peter Sommer-Larsen, Roy Kornbluh, Richard Heydt, Guggi Kofod, Qibing Pei, Peter Gravesen, "Applications of Dielectric Elastomer Actuators", Proc. of SPIE Smart Structures and Materials, vol. 4329, pp. 335-349, 2001
2. Andreas Wingert, Mathew Lichter, Steven Dubowsky, Moustapha Hafez, "Hyper-Redundant Robot Manipulator Actuated by Optimized Binary Dielectric Polymers", Proc. of SPIE Smart Structures and Materials, vol. 4695, pp. 415-423, 2002.
3. H. R. Choi, S. M. Ryew, K. M. Jung, H. M. Kim, J. W. Jeon, J. D. Nam, R. Maeda, K. Tanie, "Micro Robot Actuated by Soft Actuators Based on Dielectric Elastomer", Proc. of the 2002 IEEE/RSJ IROS, pp. 1730-1735, 2002.
4. H. R. Choi, K. M. Jung, J. W. Kwak, S. W. Lee, H. M. Kim, J. W. Jeon, J. D. Nam, "Multiple degree-of-freedom digital soft actuator for robotic applications", Proc. of SPIE Smart Structures and Materials, vol. 5051(29), 2003.
5. Ronald E. Pelrine, Roy D. Kornbluh, Jose P. Joseph, "Electrostriction of Polymer Dielectrics with Compliant Electrodes as a Means of Actuation", Sensor and Actuators A: Physical 64, pp. 77-85, 1998.