

## T형상 압전 액추에이터의 설계 및 구동특성 연구

김태훈<sup>1</sup>, 박민호<sup>2</sup>, 정성수<sup>1</sup>, 전호익<sup>1</sup>, 천성규<sup>1</sup>, 박태곤<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> 창원대학교 전기공학과

<sup>2</sup> 국방기술품질원

### Study on Design and Driving Characteristics of T-Shaped Piezoelectric Actuators

Tae-Hoon Kim<sup>1</sup>, Min-Ho Park<sup>2</sup>, Seong-Su Jeong<sup>1</sup>, Ho-Ik Jun<sup>1</sup>, Seong-Kyu Cheon<sup>1</sup>, and Tae-Gone Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

<sup>2</sup> Defense Agency for Technology and Quality, Jinju 52851, Korea

(Received August 30, 2018; Revised September 19, 2018; Accepted September 28, 2018)

**Abstract:** A newly proposed T-shape piezoelectric actuator, composed of piezoelectric benders, was designed and studied. This actuator has four legs, and can walk in both forward and backward directions. The piezoelectric actuator has a simple structure and can be easily fabricated. It consists of a piezoelectric bender and a joint. The piezoelectric bender is composed of carbon and ceramic materials. Therefore, there is an advantage in that it can be fabricated on a very small scale. Elliptical displacements of the piezoelectric actuators were analyzed by finite element analysis. Elliptical motion at the tip occurred at two voltages having a 90-degree phase difference. Based on the finite element analysis results, prototype actuators with maximum displacements were fabricated, and the characteristics of their movements were characterized.

**Keywords:** Piezoelectric actuator, Piezoelectric bender, Elliptical motion, ANSYS, FEA, T-shape

### 1. 서론

인간을 포함한 모든 생명체는 환경에 대한 적응과 진화로 인하여 최적화 기능을 거친다. 이러한 생명체의 운동 메커니즘을 모방하여 사용처에 따라 그에 부합하는 효율적인 로봇의 구동을 위한 연구가 이루어지고 있으며, 최근에는 의료나 산업, 환경탐사 등 다양한 목적을 가진 로봇들의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 인간의 신체적 한계를 대신하여 임무를 수행하는 로봇의 문제점은 구조와 환경적인 측면에서 작용할 수 있다. 전자기 모터는 압전체를 이용한 모터에 비해 상대적으로 복잡한 형상을 갖추고 있기 때문에 소형화에

적합하지 않다. 압전체를 이용한 압전 벤더는 단순한 구조로 소형화에 적합하며 그에 따른 경량화가 동반된다. 또한 빠른 응답속도와 높은 출력값을 갖는다 [1,2].

본 논문에서는 전기에너지를 인가하여 기계에너지를 출력하는 압전 역효과를 응용한 T형상의 압전 액추에이터를 제안하였다. 압전 세라믹과 탄성체로 구성되어 진동을 발생시키는 압전 벤더가 T형 고정자에 부착되어 진동이 결합되는 액추에이터의 다리 끝단에서 타원 변위가 발생된다. 제안된 액추에이터의 구동특성을 확인하기 위하여 유한요소 해석 프로그램 ANSYS를 이용하여 변수 설정에 따른 해석을 진행하였다. 유한요소 해석 결과를 바탕으로 압전 벤더와 액추에이터의 부품을 제작하고 구동장비를 이용해 구동특성에 대한 실험을 진행하였다. 데이터의 신뢰성을 위해 동일한 모델과 비교 데이터를 확보하였고 압전 벤더의 형상설계를 위한 수정과 보완 과정으로 유한요소 해석의 자료를 구축하였다. 제안된 T형 압전 액추에이터의 지속적인 연

✉ Tae-Gone Park; [tgpark@changwon.ac.kr](mailto:tgpark@changwon.ac.kr)

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구를 통해 붕괴된 건축물의 내부 탐사와 생물 관찰, 군사용 등의 다양한 방면에서 활용 가능성을 확인하고자 한다 [3].

## 2. 실험 방법

### 2.1 구조 및 원리

제안된 T형 압전 액추에이터의 구조는 그림 1과 같다. T형 고정자 상단에 z축으로 진동하는 압전 벤더가 부착되고, 하단에는 x축으로 진동하는 압전 벤더가 부착되어 다리부품과 연결 팁을 통해 결합된다. T형 압전 액추에이터는 압전 세라믹과 탄성체로 구성된 압전 벤더의 변위만으로 곤충의 운동 메커니즘을 모방한 구

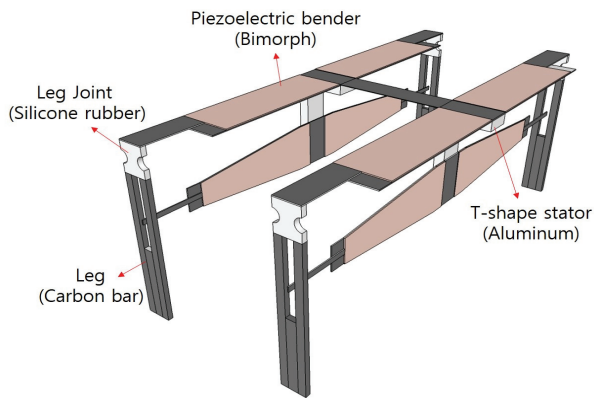


Fig. 1. Structure of the T-shaped.

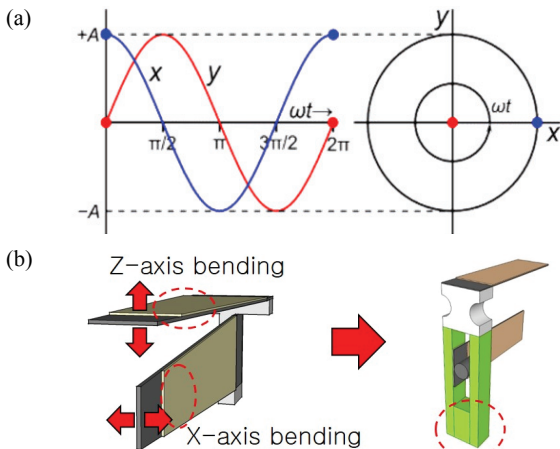


Fig. 2. Driving principle of the T-type actuator. (a) Displacement of piezoelectric benders and (b) phase difference of applied voltage.

동 원리를 가지며, 기존의 전자기 모터에 비해 굉장히 단순한 형태를 가지므로 소형화에 특화된 장점을 가진다. 4족 보행을 위한 다리는 추가적으로 연결하여 6족 또는 8족 이상의 형태로 구성할 수 있으며 안정적인 하중 분산을 유도할 수 있다 [4,5].

그림 2는 제안된 액추에이터의 운동 원리로서 다리 한쪽에 해당되는 그림을 나타낸다. 그림 2(a)와 같이 T형 고정자 상단에 부착된 압전 벤더의 z축 굽힘 진동과 하단에 부착된 압전 벤더의 x축 굽힘 진동이 그림 2(b)와 같은 교류 인가 전원의 90° 위상차에 따라 다리 끝에서 타원변위가 발생한다. 인가된 sine파와 cosine파를 반대로 입력하면 다리에서 일어나는 타원변위의 역회전이 발생한다.

### 2.2 유한요소해석

압전 벤더의 크기를 고려하기 위해 유한요소 해석 프로그램 ANSYS를 이용하여 설계를 진행하였다. 해석 진행의 목표로써 탄성체의 재질과 두께, 세라믹의 두께, 압전 벤더의 폭 변화에 따른 변위로 설정하였다. 그림 3은 유한요소 해석을 진행하기 위한 압전 벤더의 파라미터를 나타낸다.

그림 4는 압전 벤더에 사용되는 탄성체의 재질에 따른 변위특성을 위한 하모닉 해석 결과이다. 액추에이터의 구동범위 주파수인 1~50 Hz에서 해석이 진행되었

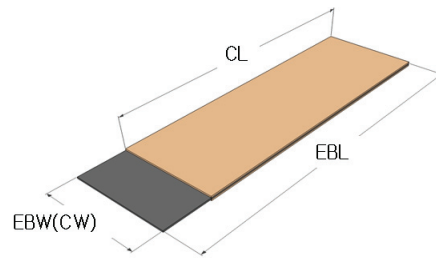


Fig. 3. Parameters of piezoelectric bender.

Table 1. Parameters of piezoelectric bender.

Parameter	
CL	Ceramic length
EBL	Elastic body length
EBW	Elastic body width
CW	Ceramic width
CT	Ceramic thickness
EBT	Elastic body thickness

다. Brass의 변위크기가 가장 크게 나타났으며, Carbon을 제외한 나머지 재질도 비슷한 변위가 나타나는 것을 확인할 수 있다. Carbon은 변위가 가장 큰 Brass와 1 Hz 주파수 기준으로 약 6  $\mu\text{m}$  차이로 구동범위에는 큰 영향을 끼치지 않는다. 제안된 액추에이터의 소형화 및 경량화 장점을 충족하기 위해서는 탄성력과 자중도 고려하여 설계되어야 한다. Carbon은 Brass보다 약 4배 작은 질량과 강도를 갖는 장점을 가지므로 Carbon을 채택하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 그림 5는 세

라믹의 두께에 따른 변위를 나타내는 하모닉 해석 결과이다. 압전 세라믹의 두께가 얇아질수록 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 해석 결과, 세라믹의 두께가 0.1 mm일 때 변위특성이 가장 우수하지만 외부응력에 의한 파손에 매우 취약하기 때문에 제작 시에는 0.2 mm의 세라믹을 사용한다. 그림 6에 나타난 결과는 압전 벤더의 폭 변화에 따른 변위특성을 규명하기 위한 하모닉 해석 결과이다. 압전 벤더의 폭을 줄이면 상대적으로 길이의 비율이 증가하므로, 길이를 35 mm로 고정하고 폭의 넓이만 변화시켜 해석을 진행하였다. 압전 벤더의 폭이 10 mm일 때, 가장 큰 변위를 보이는 것을 확인하였다.

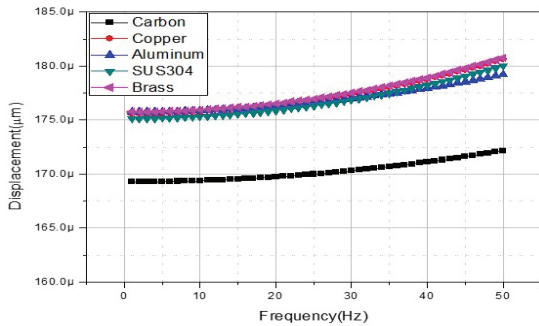


Fig. 4. Displacement characteristics according to elastic body material.

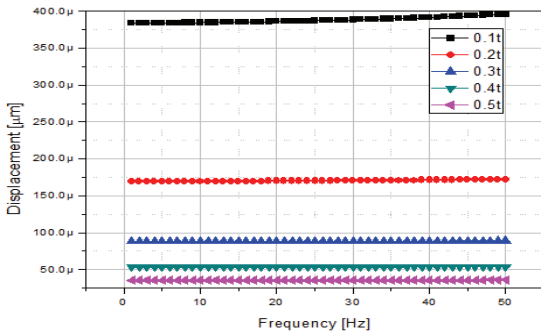


Fig. 5. Displacement characteristics depending on the elastic body thickness.

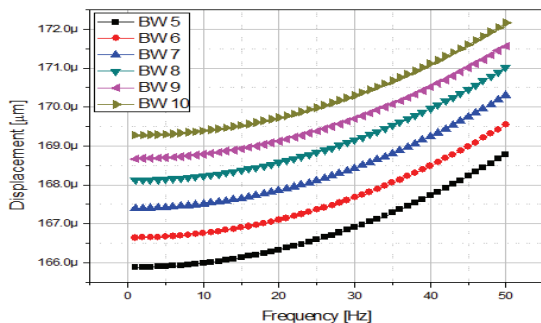


Fig. 6. Displacement characteristics depending on the piezoelectric bender width.

### 2.3 제작 및 실험

해석된 결과를 바탕으로 T형 압전 액추에이터를 제작하기 위해 압전세라믹과 탄성체를 가공하였다. 압전 세라믹(PI사 PIC252)은 외부 충격에 취약하기 때문에 가공할 때 주의하지 않으면 균열이 생기거나 특성이 달라지므로 세밀한 작업이 요구된다. 세라믹과 탄성체는 Epotech사의 353ND 접착제를 이용하여 압전 벤더를 제작하였다. 제작된 압전 액추에이터의 구동특성을 측정하기 위해 2CH의 함수발생기(33120A, Agilent사)로 90° 위상 차를 갖는 2개의 파형을 발생시키고 증폭기(NF HSA 4051-4008)로 신호를 증폭시켜 액추에이터에 인가된다.

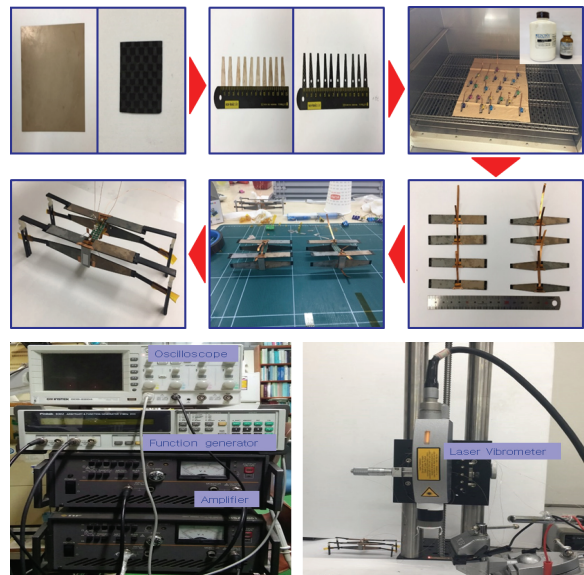


Fig. 7. T-type actuator fabrication and driving system.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전압 변화에 따른 T형상 압전 액추에이터의 속도

그림 8은 T형상 압전 액추에이터에 인가되는 전압의 변화에 따른 속도 측정 결과이다. 전압은 60~90 V까지 인가하였고, 주파수는 액추에이터의 실제 구동범위인 10 Hz에서 60 Hz로 설정하였다. 10 Hz와 20 Hz에서는 90 V를 인가하였을 때 각각 63 mm/s와 87 mm/s로 가장 빠른 속도를 보였으며, 30 Hz 이상의 주파수에서는 80 V를 인가하였을 때 최대 속도가 낮고, 60 Hz 주파수에서는 속도가 현저히 감소하는 것을 확인하였다.

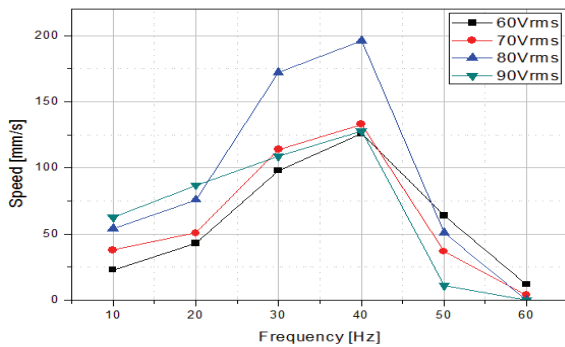


Fig. 8. Speed of T-type actuator depending on voltage.

#### 3.2 부하에 따른 T형상 압전 액추에이터의 속도

제안된 액추에이터는 자율적인 구동을 위해 전원을 공급해 줄 드라이버와 임무 수행을 위한 카메라 등의 부하를 견딜 수 있어야 하기 때문에 부하의 변화에 따

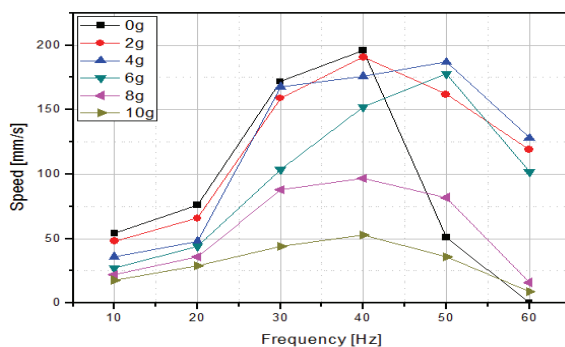


Fig. 9. Speed of T-type actuator depending on load.

른 속도 실험을 진행하였다. 실험을 위한 부하의 변화는 0~10 g까지 추가하였고, 전압은 90 V 주파수는 10~60 Hz까지 인가하였다. 부하가 0 g일 때는 40 Hz 이상의 주파수에서 불안정한 구동특성을 보였으나, 부하가 가해졌을 때는 2~10 g에서 모두 안정적인 구동 특성을 보였다.

#### 3.3 마찰 면에 따른 T형상 압전 액추에이터의 속도

T형 액추에이터는 압전 벤더의 90° 위상차에 따른 타원변위를 구현하여 지면과의 마찰로 이동한다. 마찰면의 거친 정도에 따라 숫자로 표기하는데, 입자가 굵어 표면이 거칠수록 낮은 숫자로 표기한다. 마찰면의 실험 조건으로 샌드페이퍼 P80-P320을 이용하여 실험을 진행하였다. 인가되는 전압은 90 V, 주파수는 3~17 Hz의 범위로 측정하였다. P100까지는 안정적인 구동을 보였으나, P80일 때 11 Hz부터는 속도가 현저히 감소하는 것을 확인하였다.

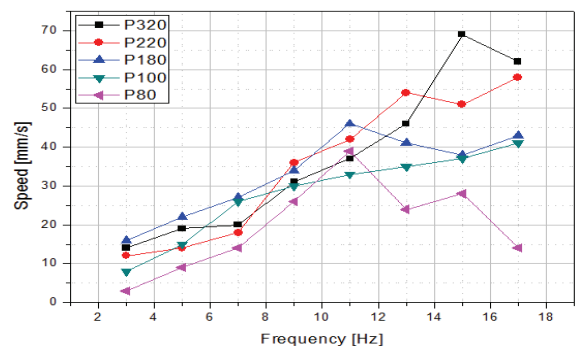


Fig. 10. Speed of T-type ambulatory robot depending on surface.

#### 3.4 경사면에 따른 T형상 압전 액추에이터의 속도

로봇의 환경에 따른 유동적인 대처를 위하여 장애물을 통과할 수 있는 충분한 등판력이 요구된다. 전압 변화에 따른 결과에서 가장 우수했던 인가전압 80 V, 주파수 40 Hz의 조건에서 경사각도를 2°씩 조정하여 두 개의 보행로봇으로 실험을 진행하였다. 경사각이 6°일 때 첫 번째 보행로봇인 T-type 1은 23 mm/s의 속도를 보였고, 두 번째 보행로봇인 T-type 2는 28 mm/s의 속도가 확인됐다. 경사각이 증가함에 따라 두 개의 로봇 모두 선형적인 속도 감소를 보였으며 16°의 각도에서는 동작 불가능한 상태가 되었다. 전압과 주파수, 무게 등을 조절하여 협소한 공간이나 경사각이 있

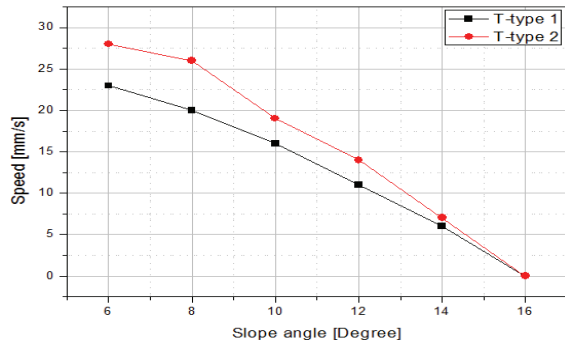


Fig. 11. The speed of T-type ambulatory robot depending on angle of slope.

는 공간을 탐사하는 용도로 활용 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 곤충의 운동 메커니즘을 모방하여 협소한 공간을 탐사하기 위한 목적을 가진 T형 보행로봇을 제안하였다. T형 보행로봇은 서로 다른 축으로 진동하는 두 개의 압전 벤더에  $90^\circ$  위상차를 가진 전원이 인가되어 타원변위를 구현하여 구동된다. 제작을 위한 유한요소 해석 결과 압전 세라믹의 두께가 0.1 mm일 때 가장 큰 변위 값을 보였지만, 파손의 이유로 0.2 mm로 선택하였고, 탄성체의 두께도 제작 결과, 0.1 mm의 탄성체는 보행로봇의 무게를 지탱하지 못하였기 때문에 0.2 mm로 선택하였다. 탄성체 재질에 따른 변위 해석으로 Brass와 Carbon의 변위 차이가 1 Hz 기준으로 약 6  $\mu\text{m}$  차이를 보이는 것을 확인하였고, 재질에 따른 물성 값을 고려하여 강도와 탄성력 면에서 우수한 Carbon plate를 선택하였다. 해석 결과를 기반으로 제작을 진행하여 실험을 진행하였다. 전압 변화에 따른 속도특성은 80 V의 전압이 인가되었을 때 196 mm/s로, 90 V의 전압보다 주행이 안정적인 것을 확인하였고, 적정 전압과 주파수를 벗어났을 때 진행에

방해가 생기는 것을 확인하였다. 부하 변화에 따른 속도특성은 2 g의 부하에서 가장 안정적인 구동 양상을 보였으며, 마찰 면은 샌드페이퍼의 거친 정도 P100까지 안정적인 구동특성을 나타내었다. 경사각도는  $2^\circ$ 씩 변화하여 측정하였으며  $6^\circ$ 일 때, 23 mm/s의 속도를 보이나,  $12^\circ$  각도까지는 일정하게 감소하는 경향을 보였고  $14^\circ$  이상의 경사각도에서는 구동이 불가능한 것을 확인할 수 있었다. 관절구조나 다리구조, 부품 간의 결합 방법 등을 보완하여 협소한 공간의 소형 파이프 내부 검사나, 재해로 인해 붕괴된 구조물 내부 탐사 등의 임무를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

#### ORCID

Tae-Gone Park

<https://orcid.org/0000-0003-1972-4714>

#### 감사의 글

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

#### REFERENCES

- [1] F. Pfeiffer, H. J. Weidemann, and P. Danowski, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation* (IEEE, Cincinnati, USA, 1990) p. 1458. [DOI: <https://doi.org/10.1109/robot.1990.126211>]
- [2] N. M. White, *Ind. Robot*, **39** (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1108/ir.2012.04939daa.010>]
- [3] T. Ozaki and K. Hamaguchi, *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **3**, 4217 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2863104>]
- [4] L. Sun, *Chin. J. Mech. Eng. (Engl. Ed.)*, **15**, 303 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.3901/cjme.2002.04.303>]
- [5] H. Hariri, Y. Bernard, and A. Razek, *Smart Mater. Struct.*, **23**, 025013 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/2/025013>]