

## 압전벤더를 이용한 소형 다족 로봇 구동원

# The Multi-legged Small Sized Robot Drive using Piezoelectric Benders

박종만 · 김영현 · 정원찬 · 류정민\*  
국방기술품질원

Jong-man Park · Young-hyun Kim · Won-chan Jeong · Jeong-min Ryu\*  
Defense Agency for Technology and Quality, Gyeongsangnam-do, 52851, Korea

### [요 약]

본 연구에서는 구조가 간단하고 소형화 제작이 용이한 소형보행 로봇용 구동원을 제안한다. 두 개의 직교방향 모멘트를 편조 인트 구조의 다리에서 회전벡터로 변환하여 이동표면에 타원궤적이 발생하도록 설계하였고, 다른 구동원 대비 효율성과 에너지 밀도가 높은 압전 세라믹을 활용하여 압전벤더 액츄에이터를 제작하였다. 또한 사용된 압전 벤더 액츄에이터는 유한요소해석을 통한 자체 무게대비 최대의 출력을 낼 수 있도록 재질 및 형상을 최적화하였다. 두 개의 다리로 구성된 단위 액츄에이터는 모듈화 되어 여러 개의 액츄에이터로 결합이 가능하고 매우 빠른 속도로 이동 및 거친 지형에서도 운용이 가능하다. 실험결과로 T자형 로봇 액츄에이터의 다양한 속도 (2 mm/sec.에서 266 mm/sec까지)와 운송능력(최대 10 g에서 50 mm/s까지)을 확인 하였다.

### [Abstract]

I proposed small ambulatory robot actuators using piezoelectric benders. In order to make the motion of the biomimetic robot legs similar to the movements of the cockroaches or similar insects, two pairs of legs in the diagonal direction in the four leg structures are required to make the same movement. And elliptical displacement is realized by taking into account horizontal and vertical displacement of multimode oscillations and driving them by electrical signals with differences step by step, for example of 90° the T-shaped robot actuator showed wide range of speed (From 2 mm/sec. up to 266 mm/sec.) and ability of transportation (up to 10 g with 50 mm/s). Locomotive performance of the robot was competitive to the preceding robots, and moreover, the modular type actuators of a segmented myriapods robot could be added and removed for different tasks or performances.

**Key word** : Actuator, Myriapod, Multi-legged robot drive, Piezoelectirc benders, Walking robot.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.5.444>



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.

Received 28 September 2020; Revised 29 September 2020  
Accepted (Publication) 29 October 2020 (30 October 2020)

\*Corresponding Author; Jeong-min Ryu

Tel: +82-10-4610-9224

E-mail: jmryu@dtqa.re.kr

## 1. 서론

생체모방 로봇 공학의 시작은 생체의 움직임을 관찰하고 그 움직임을 모방하면서 시작되었으며, 특히 다양한 이동수단에서 이를 모방하는 시도에서 찾을 수 있다. 바퀴가 발명된 후, 바퀴가 운송 수단으로서 혁명적인 작업을 담당했던 것은 사실이나 실제 접근 가능한 바퀴의 면적은 잘 마모된 도로나 바퀴의 높이가 절반 이하의 장애물로 제한된다. 즉, 바퀴로 구동하는 로봇은 제한된 장소에서만 사용할 수 있어, 이런 문제를 극복하기 위해 유기체처럼 자유롭게 움직일 수 있는 메커니즘에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그 중 생체모방 로봇은 기존 구동원의 한계를 극복하기 위해 꾸준히 연구되어 왔다[1],[2]. 최근 30여 년간 생체모방 로봇용 구동원으로 다양한 종류의 구동원이 연구되어왔고, 그 중에서도 소형로봇용 구동원으로는 표 1과 같이 압전액츄에이터(piezoelectric)가 속도, 에너지밀도, 효율 등의 측면에서 가장 경쟁력 있는 구동원으로 조사되었다[3].

지금까지 소형 구동원으로 사용되는 압전액츄에이터는 주로 압전 소재와 전극을 층층이 쌓아 스택 형태로 많이 이용되고 있다[4]. 이러한 스택은 상단 및 하단 표면에 수직인 방향으로 큰 힘을 발생시키지만 작은 변위를 생성하고, 압전 세라믹의 특성 때문에 매우 부서지기 쉬우며 취급과 접합 중에 우발적으로 파손되는 단점이 있다. 또한 타케시 모리아(Takeshi Moria)에 의해 제안된 이동체의 스틱-슬립(stick-slip) 현상을 이용한 스무드 임팩트 구동 메커니즘(SIDM; smooth impact drive mechanism) 액츄에이터는 기존 스택형태 압전액츄에이터의 작은 발생변위(수 $\mu\text{m}$ ~수십 $\mu\text{m}$  수준)의 문제로 이동거리와 속도의 한계로 소형로봇용 구동원으로는 적합하지 않았다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 대변위(수백 $\mu\text{m}$  수준)구동이 가능하며, 구조가 단순하여 소형화 제작이 용이한 바이몰프(Bi-morph)형태의 압전 세라믹 밴더를 적용한 SIDM 구동원을 제안하였다[5]. 하지만 이 또한 SIDM의 스틱-슬립(stick-slip)현상의 구동 특성상 이동할 수 있는 장소의 표면 거칠기나 굴곡 등의 환경에 따라 제한된 구동만 가능한 단점을 가지고 있었다. 본 논문에서는

표 1. 마이크로로봇 액츄에이터의 강점과 약점 비교 (출처 : 미래 우주선 임무를 위한 소형 액츄에이터 기술 조사[3])

Table 1. Comparison strength and weakness of microrobot actuators. (source : A survey of micro-actuator technologies for future spacecraft missions [3])

Method	Efficiency	Speed	Power Density
Electromagnetic	high	fast	high
Electrostatic	very high	fast	low
Thermomechanical	very high	medium	medium
Phase Change	very high	medium	high
<b>Piezoelectric</b>	<b>very high</b>	<b>fast</b>	<b>high</b>
Shape Memory	low	medium	very high
Magnetostrictive	medium	fast	very high
Electrorheological	medium	medium	medium
Electrohydrodynamic	medium	medium	low

스택 형태의 액츄에이터에 비해 단순한 구조로 제작이 용이하고 발생변위가 큰 압전밴더 액츄에이터(piezoceramic bender actuator)의 1차 굽힘 진동모드를 이용한 소형 보행로봇을 고안하였다.

## II. 배경 이론

### 2-1 외팔보의 굽힘 진동

보의 1차 진동방정식은 오일러-베르누이 보(Euler-Bernoulli Beam)의 이론에 따라 수식(1)로 표현되며, 여기서 E, I,  $\rho$ , A 는 각각 외팔보의 영률(Young's Modulus), 관성모멘트, 밀도와 단면적이다.

$$f_r = \frac{\beta_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

그림 1과 같이 길이가 L인 외팔보가 변위(y)가 시간(t)에 대해 순조화운동을 한다면 1차 진동의 해는 식(2)와 같이 표현된다. Mode 1 ~ Mode 4는 1차~4차 진동을 의미하며 본 연구는 1차 진동을 활용 하였다. 이는 원진동수(circular frequency  $\omega_n$ )과 공진주파수  $f_r$ 의 관계로 각각 식(2)와 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_n = \frac{\beta_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{\beta_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3)$$

### 2-2 조화운동과 회전벡터

동일주파수에서  $\theta$ 의 위상차를 가진 반지름이 A인 회전벡터의 변위는 그림 2의 x축과 y축의 조화운동(harmonic motion)으로 나타낼 수 있다. 이때 두 점에서의 조화운동은 식(4)와 식(5)로 나타낼 수 있다.

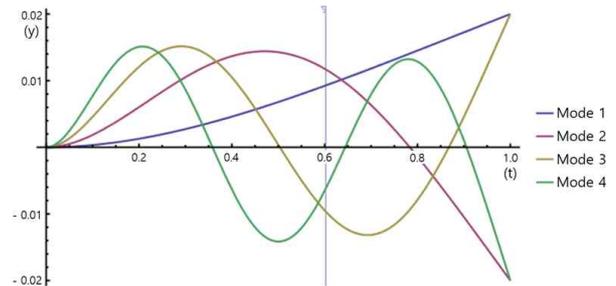


그림 1. 외팔보의 굽힘진동 모드

Fig. 1. The shape of the bending mode of a cantilever.

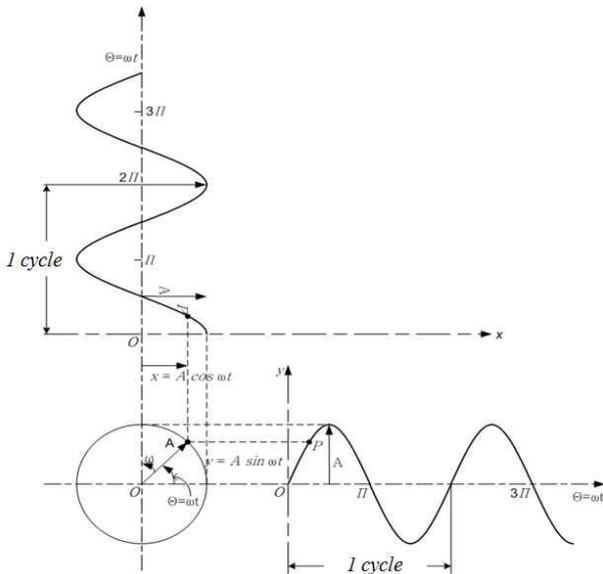


그림 2. 회전벡터의 조화운동

Fig. 2. Harmonic motion as the projection of the end of a rotating vector.

$$x = A \sin \omega t \tag{4}$$

$$y = A \sin (\omega t + \theta) \tag{5}$$

이때  $\theta = \pi/2$  일 때 회전벡터는 식(6)과 같이 정리되고, 만약 변위가 각각  $u_0$  와  $u_1$  일 경우 타원궤적의 방정식은 식(7)으로 정리된다.

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2} = 1 \tag{6}$$

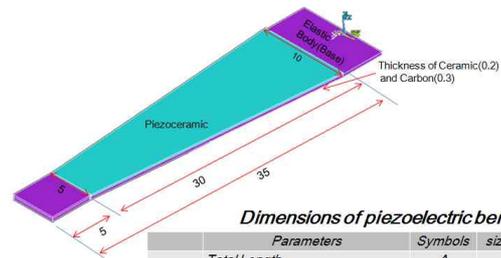
$$\frac{x^2}{u_0^2} + \frac{y^2}{u_1^2} = 1 \tag{7}$$

### III. 액츄에이터의 설계 및 제작

#### 3-1 압전벤더 액츄에이터의 최적화 설계

소형로봇용 구동원으로 적용하기 위하여 압전벤더 액츄에이터의 자체 중량대비 최대의 에너지가 발생되도록 형상과 소재 등의 최적화 설계를 위하여 유한요소 해석법을 적용하였다[6]. 그 결과 벤더의 탄성체는 0.3 mm의 카본파이버 시트(carbon fiber sheet)를 사용하였으며 벤더의 고정부와 동작부 폭의 비율(Wr)은 0.5, 탄성체와 압전세라믹 길이의 비율은 0.86으로 제작되었으며, 세부 결과는 그림 3에 나타내었다.

#### 3-2 T형 로봇 액츄에이터



**Dimensions of piezoelectric bender**

	Parameters	Symbols	size(mm)and (ratio)
Fixed	Total Length	A	35
	Base Width	B	10
	Ceramic Thickness	C	0.2
	Carbon Thickness	D	0.3
Variable	Width ratio of Tip/Base	Wr	(0.5)5
	Length ratio of Ceramic/Bender	Lr	(0.86)30

그림 3. 압전 벤더 형상 및 유한요소해석 결과

Fig. 3. Geometry and FEA parameters of piezoelectric bender.

T형 로봇 액츄에이터는 최근 소형로봇설계에 다양하게 적용되는 곤충과 같은 생체모방에서 설계의 영감을 얻었다. SIDM 액츄에이터 보다 거친 이동 평면에 적용하기 위해 제안되었다. 핀 조인트와 슬롯형 구멍으로 연결된 다리의 타원형 변위를 두 개의 직교 모멘트에 생성함으로써 움직이는 표면의 장애물을 극복할 수 있는 능력이 향상되었다. T자형 구조는 핀 조인트를 이용하여 다리의 타원 운동을 얻기 위해 외팔보의 1차 굽힘 진동모드를 이용한 수평진동과 수직진동의 조합으로 설계되었다.

그림 4(a)와 같이 동일한 형상의 두 개의 압전 벤더 액츄에이터를 서로 직교방향으로 배치하여 액츄에이터의 양쪽 끝단에서 직교방향 모멘트를 생성하고 핀조인트 형상(pin-joint structure)의 다리를 통해 직교운동을 결합하였다. 이때 두 직교운동을 그림 4(b)와 같이 90°의 위상차를 두어서 다리 끝점에서 회전벡터를 생성함으로써 로봇이 보행 가능하도록 설계하였다.

그림 5(a)는 T자형 구동원의 형상과 사용된 소재와 구성을 나타내었고, 그림 5(b)는 모듈화 된 형태를 나타내었고 제작된 액츄에이터의 크기는 약 110 mm × 48 mm 정도이다. 또한 보행 로봇의 주어진 임무와 환경에 따라 복수의 모듈을 연결이 가능하도록 설계되었다.

#### 3-3 재료선정 및 제작

유한요소해석을 통해 얻은 결과에 기초하여 압전벤더 액츄에이터를 제작하였다. 분극화된 상태의 압전세라믹(Physik Instrument GmbH&Co. 사 PIC151 압전세라믹)과 탄소섬유로 된 탄성체는 설계된 치수로 절단하고 EPO-TEK 사 353ND 에폭시 본드를 압전세라믹과 탄성체 사이에 도포한 후 120°C에서 30분간 가열하면서 고온 양생하여 접착을 하였다. 이때 에폭시 본드에 의한 압전세라믹의 도전성 및 탄성 저하를 최소화하기 위해 탄소섬유와 압전세라믹이 접촉하는 부위에 에폭시 층을 최대한 얇게 도포하고 고온 양생 과정에서 강한 압착을 가했다. 이는 압전 세라믹의 진동을 탄성체에 전달하는 과정에서 접

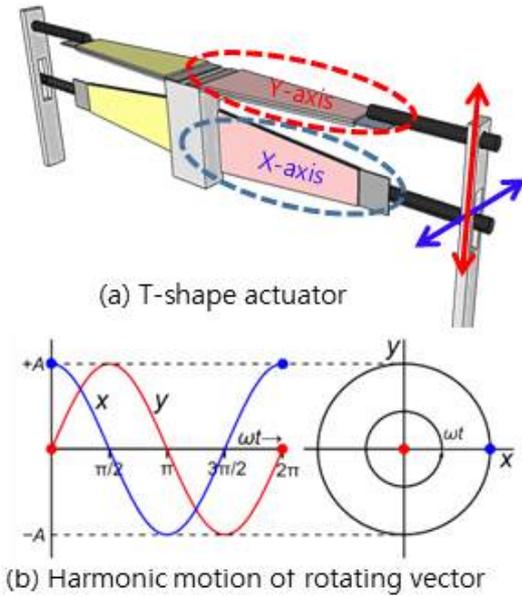


그림 4. (a) T형 액츄에이터의 수직 및 수평 진동 및  
(b) 인가 전압 및 타원운동  
Fig. 4. a) Vertical and horizontal bending vibration of T-shape actuator and (b) Applied voltage and elliptical motions.

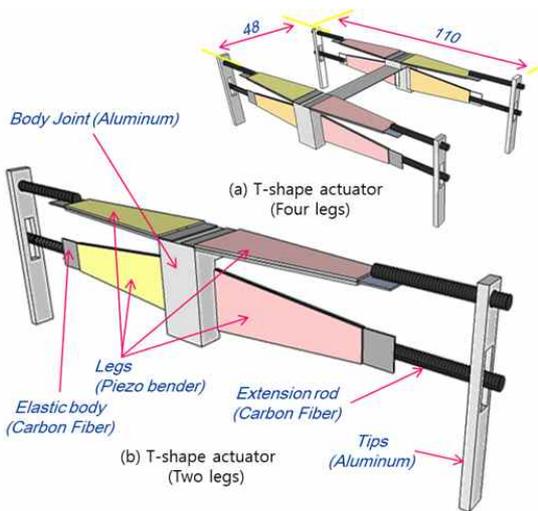


그림 5. (a) 모듈화된 보행로봇  
(b) T자형 구동원의 형상 및 소재  
Fig. 5. (a) The modular type actuators of a segmented myriapods robot and (b) Structure and materials of T-shape actuator.

착부위가 떨어지지 않도록 강한 접착력이 필요한 부분이기도 하다. 그림 6과 같이 완성된 액츄에이터에 에나멜 구리선으로 전원 공급 라인에 연결했고, 조인트와 팁의 연결부도 에폭시 본드로 접합하였다.

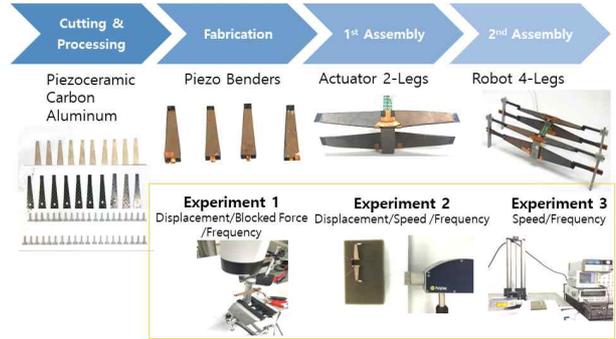


그림 6. 액츄에이터의 제작순서 및 실험  
Fig. 6. Process of fabrication and experiment of robot actuator.

#### IV. 실험 및 고찰

완성된 액츄에이터는 그림 7(a)와 같이 전원 공급용 전원 라인에 연결되었고, 구동하기 위한 전원은 위상차가 90°인 2개의 정현파를 공급하는 protek 사 9302 함수발생기를 NF 사 HSA4051-4008 전압증폭기에 연결하였다. polytec 사 OFV-534 레이저 변위 센서를 활용하여 액츄에이터의 X축과 Z축의 다리 끝점 변위를 먼저 측정한 다음 그림 7(b)와 같이 아크릴 플라스틱 플레이트에 올려놓고 주행 속도를 측정하였다.

설계된 의도에 맞게 동일한 주파수에서 다리 끝단에서 직교 방향 모멘트가 생성되고 핀조인트 형상의 다리를 통해 직교운동이 결합하여 회전벡터의 생성여부를 확인하기 위하여 T자형 액츄에이터에 30 Hz, 80 Vrms의 정현파 전압을 인가하였다. 이때 X축과 Y축에 각각 레이저 변위센서를 통하여 다리의 움직임을 확인하였다. 그림 8에서 움직임을 측정된 위치와 변위를 나타내었다. 그 결과 X축과 Y축은 동일한 30 Hz에서 90°의 위상차로 진동하는 것을 확인하였으며 이때 최대 변위는 X축 약 2.94 mm, Y축 약 3.64 mm 임을 확인하여 다리에서 회전벡터가 생성됨을 확인하였다.

다음으로 제작된 T자형 로봇 액츄에이터를 전원 공급장치에 연결하여 구동 특성을 측정하였다. 그림 9와 같이 액츄에이터

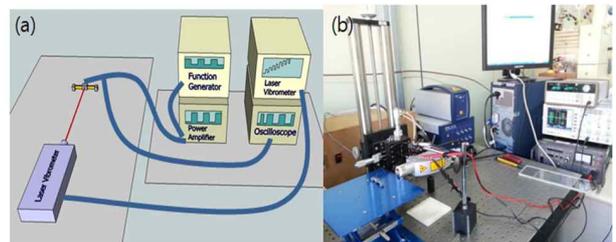


그림 7. (a) 액츄에이터를 구동하기 위한 실험 설정  
(b) 측정장치  
Fig. 7. (a) Experimental setup for driving the actuator and (b) Measurement device

의 속도는 주파수와 인가 전압의 증가에 따라 속도가 증가함을 확인하였다. 특히 40 Hz에서 90 Vrms 입력 조건에서 최대 속도 266 mm/sec.가 측정되었으며 주파수가 50 Hz 이상에서는 속도가 감소하였다. 다음은 인가된 부하에 따른 구동특성을 확인한 결과 그림 10에서와 같이 6 g의 부하에서 200 mm/sec.의 속도를 확인하였으며, 8 g 이상부터는 속도가 현저히 줄어드는 것을 확인하였고, 10 g의 부하에서 50 mm/sec.로 이동하였다. 본 연구의 실험결과를 유사한 목적의 이전연구 결과와 비교해 봤을 때, T자형 로봇 액츄에이터는 크기 대비 속도(Body length/sec)가 월등히 우수한 것으로 확인할 수 있었다.

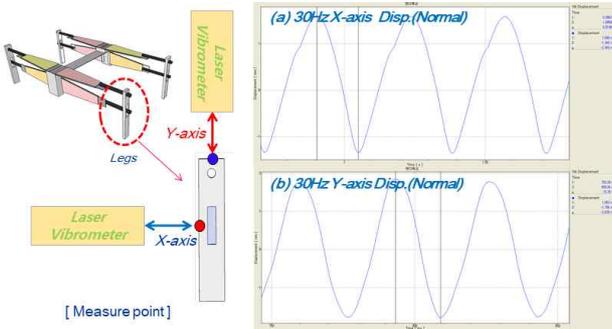


그림 8. 다리 끝단에서 회전운동 및 변위  
 Fig. 8. Elliptical motion and displacement at the Legs.

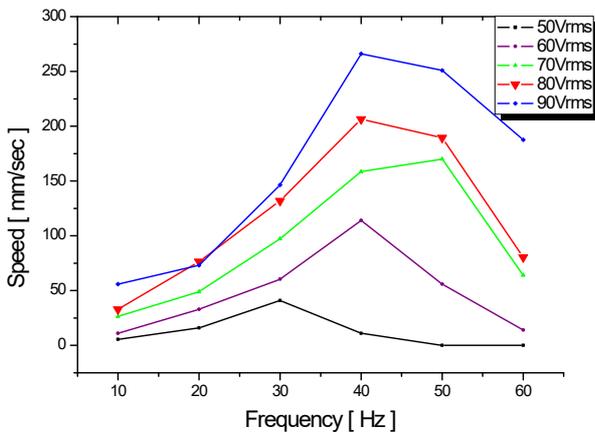


그림 9. 주파수 및 전압에 따른 액츄에이터의 속도  
 Fig. 9. Speed of the T-shape robot actuator depending on frequency and voltage.

V. 결론

본 논문에서는 구조가 간단하여 소형화 제작이 용이한 소형 보행 로봇용 구동원을 제안하였다. 타구동원 대비 효율성과 에너지 밀도가 높은 압전 세라믹을 이용하여 압전벤더 액츄에이터를 제작하였다. 두 개의 직교방향 모멘트를 핀조인트 구조의

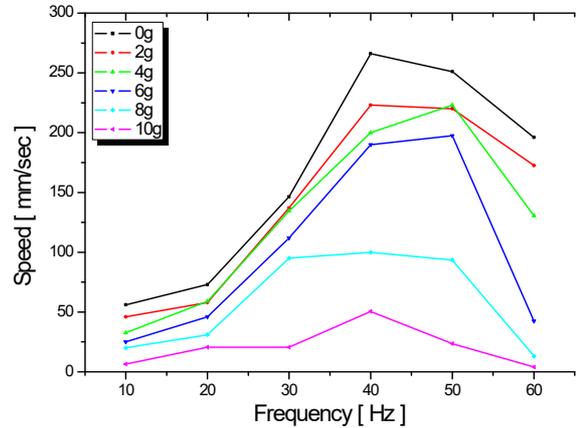


그림 10. 주파수 및 부하에 따른 액츄에이터의 속도  
 Fig. 10. Speed of the T-shape robot actuator depending on frequency and load.

표 2. 실험결과와 이전 실험과의 비교  
 Table 2. The experiment results and comparisons with previous works.

Robots (Unit)	Length (mm)	Weight (g)	Speed (mm/sec.)	Body length /sec.
<b>T-shaped Actuator</b>	<b>48</b>	<b>13.5</b>	<b>266</b>	<b>5.54</b>
Silicon µbot [7]	1.5	0.08	0.6	0.4
Mesoscale Quadruped [8]	90	104	270	3
LIPCA Hexapod [9]	120	35	180	1.5
RoACH [10]	30	2.4	30	1

다리에서 회전벡터로 변환하여 이동표면에 타원궤적이 발생하도록 설계하였다. 사용된 압전 벤더 액츄에이터는 유한요소 해석을 통한 자체 무게대비 최대의 출력을 낼 수 있도록 재질 및 형상을 최적화하였다. 두 개의 다리로 구성된 단위 액츄에이터는 모듈화 되어 복수의 액츄에이터로 결합이 가능하고 매우 빠른 속도로 이동하여 거친 지형에서도 운용이 가능하며, 향후 주어진 임무에 따라 각종 센서나 카메라 등을 탑재하는 소형 지상 정찰용 로봇의 구동원 등으로 적용이 가능할 것이다.

References

[1] K Ikuta, "Micromachine-its current state and future micro-machine system," *Journal of Robotics and Mechatronics*, pp. 60-64, 1991.  
 [2] A. M. Flynn, R. A. Brooks, W. M. Wells and D. S. Barlett, "Intelligence for miniature robots," *Sensors Actuators*, Vol. 20, pp. 187-96, 1989.  
 [3] R. G. Gilbertson and Journal D. Busch, "A survey of micro-actuator technologies for future spacecraft missions," in *First Presented at the Conference*, New York: NY, pp. 231,

- Aug. 1994.
- [4] Takeshi Morita, Hiroaki Murakami, Takami Yokose, and Hiroshi Hosaka, "A miniaturized resonant-type smooth impact drive mechanism actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 178, pp. 188-192, Feb. 2012.
- [5] M. H. Park, H. H. Chong, B. H. Lee, S. Jeong, and T. G. Park, "Study on the new type of piezoelectric actuator utilizing smooth impact drive mechanism," *Ferroelectrics*, Vol. 500, 218-228, Oct. 2016.
- [6] J. M. Park and C. H. Song, "Study on the small sized robots actuator using piezoelectric ceramic bender," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 5, pp 337-343, May 2020.
- [7] T. Ebefors, J. U. Mattsson, E. Kalvesten, and G. Stemme, "A walking silicon micro-robot," in *The 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Sendai: Japan, pp.1202-205, Jun. 1999.
- [8] M. Goldfarb, M. Gogola, G. Fischer, and E. Garcia, "Development of a piezoelectrically-actuated mesoscale robot quadruped," *Journal of Micromechatronics*, Vol. 1, No. 3, pp.205-219, Jan. 2001.
- [9] A. Yumaryanto, J. An, and S. Lee, "A cockroach-inspired hexapod robot actuated by lipca," in *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Bangkok: Thailand, pp. 1-6, Jun. 2006.
- [10] A. Hoover, E. Steltz, and R. Fearing, "Roach: An autonomous 2.4g crawling hexapod robot," in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice: France, pp.136-139, Sep. 2008.



**박 종 만 (Jong-Man Park)**

2009년 2월 : 경상대학교 산업공학과 (공학사)  
 2008년 12월 ~ 2019년 7월 : (주)두산중공업 원자력품질관리팀 근무  
 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 품질인증팀 근무  
 ※ 관심분야 : 로봇제어, 원자력 품질관리, 품질경영시스템인증, 국방품질



**김 영 현 (Young-Hyun Kim)**

2012년 2월 : 부산대학교 재료공학부 (공학사)  
 2012년 1월 ~ 2015년 7월 : (주)포스코AST 품질기술팀 근무  
 2019년 2월 : 경상대학교 산업공학과 (석사)  
 2015년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 품질인증팀 근무  
 ※ 관심분야 : 품질관리, 품질경영, 국방품질



**정 원 찬 (Won-Chan Jeong)**

2015년 8월 : 한양대학교 산업경영공학과 공학박사  
 2017년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원 품질인증팀 근무  
 ※ 관심분야 : 동적 모델링, 최적화, 품질경영, 국방품질



**류 정 민 (Jeong-min Ryu)**

2011년 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)  
 2014년 : 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학사)  
 2014년 ~ 현재 : 국방기술품질원 품질인증팀 근무  
 ※ 관심분야 : 신호처리, 무선통신, 시험평가, 품질경영시스템인증