

압전세라믹 벤더를 이용한 소형로봇용 구동원에 관한 연구

박종만, 송치훈*
국방기술품질원

Study on the Small Sized Robots Actuator using Piezoelectric Ceramic Bender

Jong-Man Park, Chi-Hoon Song*
Defense Agency for Technology and Quality

요 약 지난 수십 년간, 소형 로봇 가운데 동물과 곤충을 모방한 생체모방 로봇은 인간이 신체적으로 접근할 수 없는 영역에서 특별한 임무를 위해 개발되어 왔다. 최근 들어, 사람의 접근이 제한되는 공간(예 : 고농축 방사능 보관지역, 바이러스 지역, 대테러 위험지역 등)이 늘어나면서 로봇의 활용범위가 더욱 다양해지고 있으며, 과거에는 사람만 가능했던 많은 행위들이 소형 로봇으로의 대체가 시도 되고 있다. 그 중에서도 보행 로봇의 최적 움직임은 이동하는 표면의 특성(예: 거칠기, 곡률, 경사, 재료 등)에 의해 결정될 수 있다. 본 연구에서는 소형 보행 로봇에 적용하기 위한 구조가 간단하고 효율적으로 구동 가능한 압전세라믹 벤더 액추에이터를 제안하였다. 유한요소 해석법을 활용한 동적 모델링을 통해 구동원의 형상을 최적화하여 로봇의 이동 성능을 극대화 하였고, 제작과 실험을 통하여 그 결과를 검증하였다. 제작된 액추에이터는 무부하 조건에서 최대속도 236mm/s로 이동 하였고, 5g의 부하를 적재하고 156mm/s의 속도로 이동 가능함을 확인 하였다. 제안된 다축형 액추에이터는 수행해야 할 임무와 요구 성능에 따라 모듈식으로 추가가 가능한 장점이 있다.

Abstract This study proposed piezoelectric ceramic bender actuators for application to small walking robots. As the space where human access has recently become increasingly restricted (e.g., highly concentrated radioactive storage areas, viral contaminated areas, terrorist zones, etc.), the scope of using robots is becoming more diverse, and many actions that were possible only in the past have been attempted to be replaced by small robots. This robotic concept has the advantage of being simple in structure, making it compact and producing a large size work force. The dynamic modeling, using finite element analysis, maximized the robot's mobility performance by optimizing the shape of the actuator, and the results were verified through fabrication and experimentation. The actuator moved at a maximum speed of 236 mm/s under no load conditions, and it could move at a speed of 156 mm/s under load conditions of 5g. The proposed actuator has the advantage of modular additions depending on the mission and required performance, which ensured that they are competitive against similar drive sources previously created.

Keywords : Small Sized Robots Actuator, Ambulatory Robot, Piezoelectric Ceramic Bender Actuator, Finite Element Analysis, Biomimetic Robot

*Corresponding Author : Chi-Hoon Song(Defense Agency for Technology and Quality)
email: coolhoony@naver.com

Received March 27, 2020

Accepted May 8, 2020

Revised April 20, 2020

Published May 31, 2020

1. 서론

바퀴는 발명된 이후, 운송 수단으로서 혁명적인 역할을 담당했던 것은 사실이다. 하지만, 바퀴가 실제 접근 가능한 영역은 바퀴 높이의 절반 이하의 장애물로 제한된다. 생체모방 로봇 공학은 생체의 움직임을 관찰하고 그 움직임을 모방하면서 시작되었으며, 특히 다양한 형태의 이동수단으로 시도되었으며, 특히 바퀴의 장애물 극복한계의 대안으로 주목 받고 있다[1, 2]. 이러한 문제를 극복하기 위해 곤충과 같이 자유롭게 움직일 수 있는 메커니즘에 대한 관심이 학계에서 높아지고 있다. 생체모방 로봇은 이러한 관점에서 시작되었고 한계를 극복하기 위해 다양한 방법으로 연구가 되어 왔다[3, 4]. 최근 압전세라믹을 구동원으로 이용하는 액츄에이터(actuator)는 높은 에너지밀도로 인한 소형화가 가능한 장점으로 초소형 구동원으로 주목 받았다. 하지만 구동점에서의 작은 변위를 극복하지 못하고 있다[5]. 본 연구에서 압전 세라믹 벤더(piezoceramic ceramic bender)를 이용해 구조를 최적화하여 곤충의 움직임을 모방하고 작은 변위를 공진모드로 극복하는 생체모방 로봇 액츄에이터를 설계하였다.

2. 진동이론 및 구동원리

2.1 외팔보(cantilever beam)의 공진

Fig 1과 같이 한쪽이 고정된 외팔보의 운동방정식은 Euler-Bernoulli 의 정리에 따라 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-(V+dV)+f(x,t)dx+V=\rho A(x)dx\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\pi r^3 \quad (1)$$

Where the transverse load $f(x,t)$, the transverse displacement $w(x,t)$, bending moment $M(x,t)$, and transverse shear $V(x,t)$, density of the beam ρ , sectional area $A(x)$

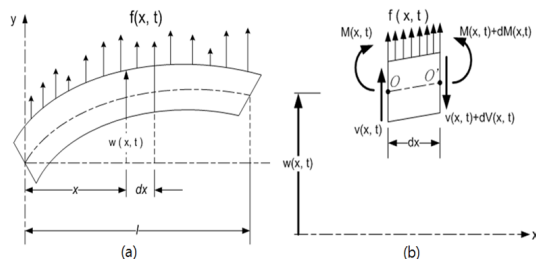


Fig. 1. The Euler-Bernoulli beam model

이때 외팔보의 횡방향 진동 주파수는 식(2)로 설명할 수 있다[6].

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

Where length of beam L , Young's modulus E , the second moment of inertia of the cross section I , density of the beam ρ , and sectional area A .

2.2 타원계적 운동

구동원은 연속구동을 위해서 접지면에서 타원계적 운동을 구현하면 효과적인 구동이 가능하다. 원주 A 를 따라 각속도 ωt 로 회전하는 한 점의 움직임은 Fig 2와 같이 나타나며, 각각 x 축과 y 축으로 투영된 변위는 식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있다.

$$x = A \sin \omega t \quad (3)$$

$$y = A \sin (\omega t + \theta) \quad (4)$$

Where angular frequency $\omega = 2\pi f$, amplitude A , and phase θ .

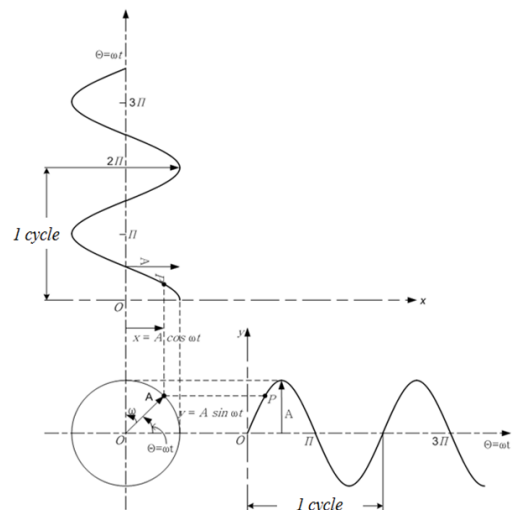


Fig. 2. Harmonic motion as the projection of the end of a rotating vector

만약 두 고조파의 진폭이 각각 u_0 과 u_1 로 다르고 위상차가 90° 일 때 궤도의 방정식은 다음 식(5)과 같다.

$$\frac{x^2}{u_0^2} \times \frac{y^2}{u_1^2} = 1 \quad (5)$$

Where the two harmonic oscillations is different as u_0 and u_1

3. 최적화 설계를 위한 유한요소 해석

3.1 압전세라믹 벤더의 최적화 설계

초소형 로봇용 구동원의 특성상 구동원 자체의 중량을 최소화하는 것이 필수적이다. 따라서 구동원의 자체 중량 대비 최대의 기계적 에너지 발생이 가능하도록 최적화 설계가 필요하다. 구동원의 최적화 설계를 위해 성능에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자를 Fig 3 에 나타내었으며, 본 연구에서는 여러 인자 중 에너지 발생의 근원이며 액추에이터의 근본 구성단위인 압전세라믹 벤더의 최적 설계를 유한요소 해석 프로그램인 ANAYS를 통하여 진행하였다. 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 압전세라믹의 움직임을 해석하기 위한 Element는 3차원의 8개 노드(node)를 가진 SOLID5(Coupled-field solid element)가 사용되었으며, Fig 4에서 Body(Base) 부분에 X, Y, Z축 방향으로 기계적 구속상태에서 Body(Tip)의 중심부 변위를 확인하였다[7]. 본 연구에서는 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 통하여 액추에이터의 기본 구성단위인 압전세라믹 벤더의 최적설계를 진행하였다. 따라서 압전세라믹 벤더의 중량대비 끝점에서 발생하는 최대의 기계적 에너지를 얻기 위해, Fig 4와 Table 1 같이 팁과 베이스 폭의 비율(W_r)과 압전체와 벤더의 길이의 비율(L_r)을 변수로 정하여 최적 설계를 하였다. 해석 결과는 Fig 4(a) 와 (b) 에서와 같이 중량, 공진 주파수, 변위, 기계적 에너지가 계산되었다.

세라믹/벤더 길이 비율(L_r)과 팁/베이스의 폭 비율(W_r)이 클 경우 변위와 기계적 에너지도 다소 증가했지만 중량은 더욱 크게 증가하였고 이 때 Fig 4(a)와 (b)에서 $L_r = 0.86$ 와 $W_r = 0.5$ 일 때 기계적 에너지/중량이 최대임을 확인 할 수 있었다. 참고로 유한요소해석을 위한 재질정수는 Table 2와 3에 나타내었다.

해석의 결과를 반영하여 최적 설계된 압전세라믹 벤더의 치수는 Fig 6에 나타내었다.

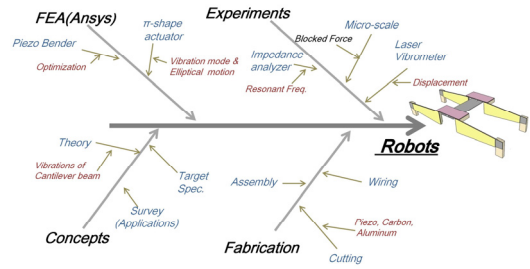


Fig. 3. Fishbone Diagram of robot actuator.

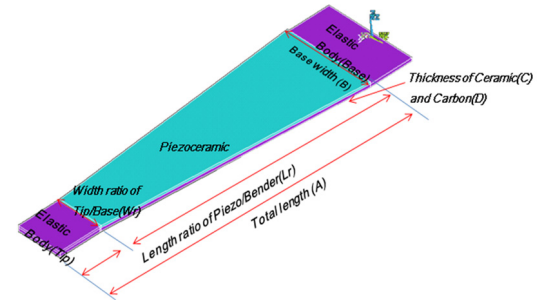
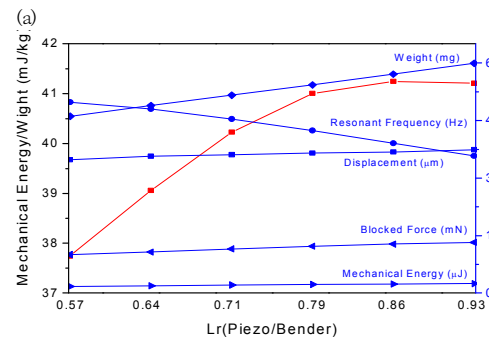


Fig. 4. The shape of piezoelectric bender and FEA parameters

Table 1. FEA parameters of piezoelectric bender

	Parameters	Symbols	Size & (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	W_r	(0.1~0.9)
	Length ratio of Ceramic/Bender	L_r	(0.57~0.93)



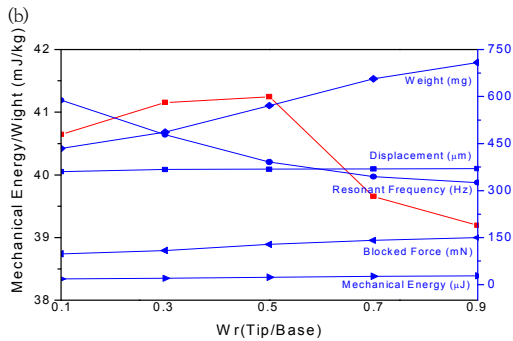


Fig. 5. (a) The maximum mechanical energy/weight depending on length ratio (Lr) and (b) width ratio (Wr)

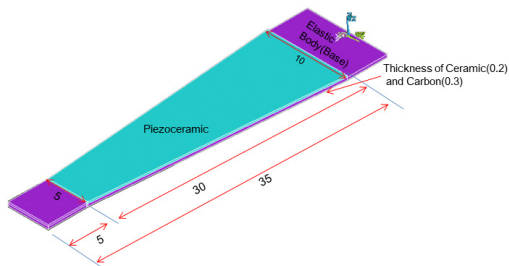


Fig. 6. Dimensions of piezoelectric bender reflecting FEA results

Table 2. Parameters of piezoceramic materials (PIC151, Physik Instrumente GmbH&Co.)

Physical and Dielectric Properties		Unit	PIC151
Density		g/cm^3	7.80
Curie Temperature		$^{\circ}C$	250
Relative permittivity	in the polarization	-	2400
	direction $\perp$ to polarity	-	1980
Dielectric loss factor		10-3	20

Table 3. Material properties of Carbon Fiber sheet

Characteristics [Unit]	Carbon Fiber (Sheet, 0.3t)
Density [kg/m^3]	1760
Young's modulus [N/m^2]	83.2
Poisson's Ratio	0.32
Tensile Strength 90° [MPa]	600

3.2 압전세라믹 벤더 액츄에이터의 구조 및 모듈화

본 연구에서는 액츄에이터의 두 끝점에서 발생하는 타원 운동을 이용한 선형 구동 시스템을 제한하였다. 압전

세라믹 벤더 중 하나는 액츄에이터 중앙에 위치하고, 양 방향의 이음매(Joint, 알루미늄(AL6061))부분에 외팔보 형태로 사다리꼴모양의 압전세라믹 벤더가 부착되었다. 두 개의 벤더 끝에는 알루미늄(AL6061) 재질의 팁(Tip)이 부착되어있다. 본 연구에서 제안된 압전세라믹 벤더가 조합 액츄에이터는 제작이 용이한 단순한 구조로 Fig 7 (a)와 (b)와 같이 로봇의 입구에 따라 여러 개를 연결한 모듈형으로 구성할 수 있는 장점이 있다. 액츄에이터의 구동은 기계적 공진주파수와 동일한 정현파 전원을 입력하여 비공진 주파수 구동방식과 대비하여 수십~수백배의 변위 발생이 가능하게 되어 고속구동이 가능한 것 또한 큰 장점이다.

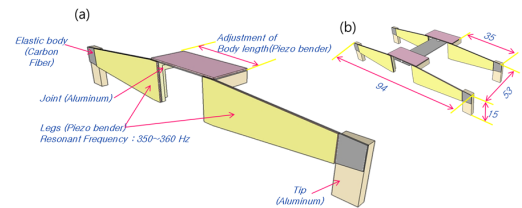


Fig. 7. (a) Structure of actuator and (b) The segmented myriapods robot

3.3 액츄에이터의 구동원리 및 최적화 설계

Fig 8(a)와 같이 외팔보의 1차 굽힘 모드로 진동하는 다리(Leg)부분 압전세라믹 벤더의 수평방향(X-axis) 진동과 몸체(Body)부분 압전세라믹 벤더의 수직방향(Z-axis) 진동이 동일한 주파수에서 발생하도록 설계하였다. Fig 8(b)와 같이 90° 위상 차이를 갖는 동일한 주파수의 2개의 정현파 전압을 액츄에이터의 다리와 몸체 부분에 입력하면 다리의 끝(Tip)부분에서 타원 운동이 발생한다. 또한 방향전환을 위하여 한쪽 벤더의 위상을 -90° 로 변환하면 반대방향으로 이동 가능하다[8, 2].

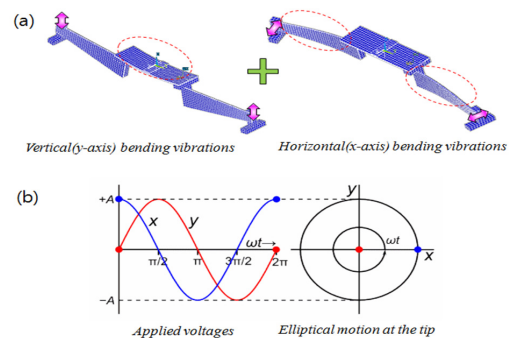


Fig. 8. (a) Vertical and horizontal bending vibration of π -shape actuator and (b) Applied voltage and elliptical motions.

Fig 9. 에서 다리 끝의 수평(x-축) 진동과 수직(z-축) 진동을 동기화하려면 두 진동이 동일한 공진주파수가 되어야 한다. 액츄에이터 중심부에 위치한 직사각형 모양의 몸체(Body) 벤터의 공진주파수를 최적화된 다리(Legs) 벤터와 일치시키기 위해 몸체 벤터의 길이를 가변하면서 몸체와 다리벤터의 공진주파수를 유한요소해석(FEA)을 통하여 계산하였다.

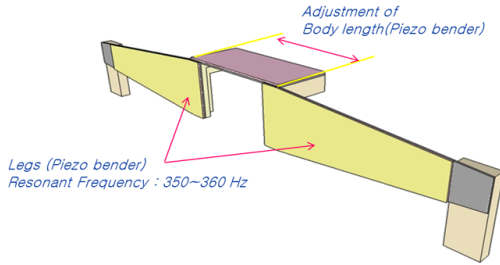


Fig. 9. Resonance frequency matching

그 결과 Fig 10과 같이 z축 진동에 대한 공진주파수는 몸체의 길이가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였지만 x축 진동에 대한 공진주파수는 거의 변하지 않았다. 두 축의 교차점에서 수직 및 수평 진동이 동일한 주파수로 발생한다. 따라서 최적화된 몸체(Body)의 길이는 30 [mm]로 결정되었고 이때 공진주파수는 350Hz ~ 360Hz 부근임을 확인하였으며 이때 주파수별 두 방향의 변위는 Fig 11와 같다.

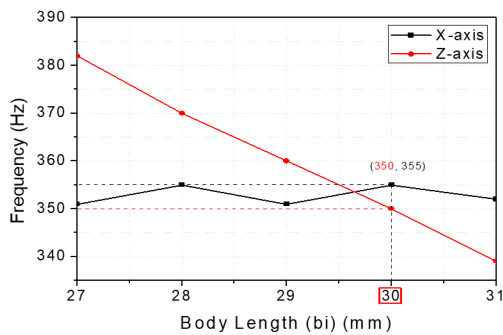


Fig. 10. Resonance frequency of body bender depending on length by FEA result

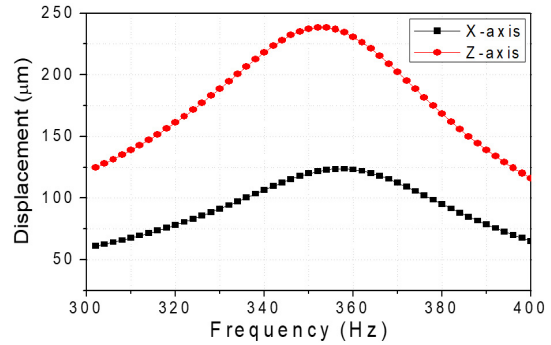


Fig. 11. Displacement of X-axis and Z-axis by FEA result

4. 제작 및 실험

4.1 액츄에이터 제작 및 실험

유한요소해석을 통하여 얻어진 결과에 기초하여 Fig 12의 순서로 압전세라믹 벤터 액츄에이터를 제작하였다. 분극화된 상태의 압전세라믹(PIC151, Physik Instrument GmbH&Co.)과 탄소섬유로 된 탄성체는 설계된 치수로 절단하고 에폭시 본드(353ND, EPO-TEK)를 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 압전세라믹의 진동을 탄성체에 전달하는 과정에서 접촉부위가 떨어지지 않도록 강한 접착력이 필요한 부분이기도 하다. Fig 13과 같이 완성된 액츄에이터에 에나멜 구리선으로 전원 공급 라인에 연결했고, 조인트와 팁의 연결부도 에폭시 본드로 접합하였다. 완성된 액츄에이터는 전원 공급용 전원 라인에 연결되었고, 구동하기 위한 전원은 위상차가 90°인 2개의 정현파를 공급하는 함수발생기(9302, Protec)를 전압증폭기(HSA4051-4008, NF)에 연결하였다. 레이저 변위 센서(OFV-534, Polytec)를 활용하여 액츄에이터의 X축과 Z축의 다리 끝점 변위를 먼저 측정한 다음, 그림 12(b)와 같이 아크릴 플라스틱 플레이트에 올려놓고 주행 속도를 측정했다. Fig 14는 완성된 형태의 액츄에이터 사진이다.

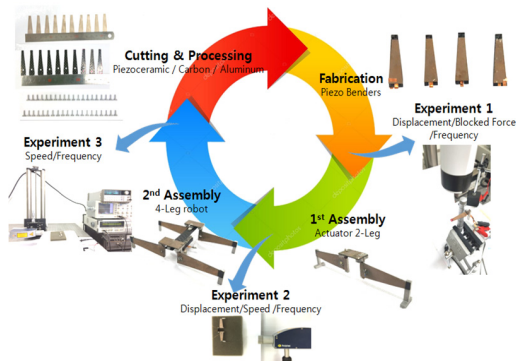


Fig. 12. Process of fabrication and experiment of robot actuator.

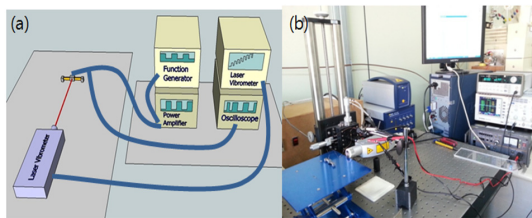


Fig. 13. (a) Experimental setup for driving the actuator and (b) measurement device.

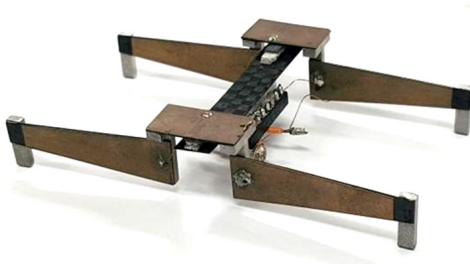


Fig. 14. The assembled model of π -shape robot actuator.

5. 실험결과

제작된 액츄에이터와 유한요소 해석결과를 비교하기 위하여 양쪽 팁 부분의 X, Z축 방향 변위를 입력주파수의 변화에 따라 측정한 결과 Fig 15와 같이 Z축의 변위는 X축보다 컸으며 이는 앞서 유한요소해석의 결과(Fig 10)와 거의 일치한 결과이다. 그리고 x축의 최대 변위는 360~370Hz에서, Z축의 최대 변위는 365Hz에서 발생하였다. 이 결과는 Fig 10의 유한요소 해석 결과와 약 6% 차이가 나는 것으로 제작 과정에서 완성도가 부족하

기 때문인 것으로 판단된다.

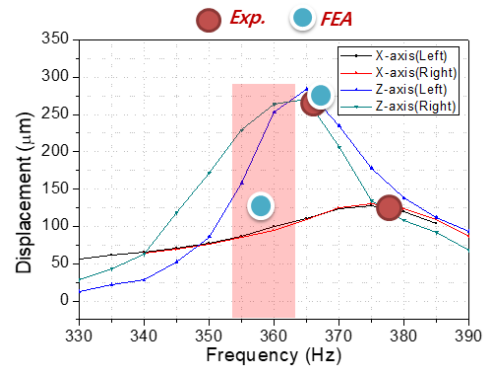


Fig. 15. X and Z-Axis displacement at the tip of legs

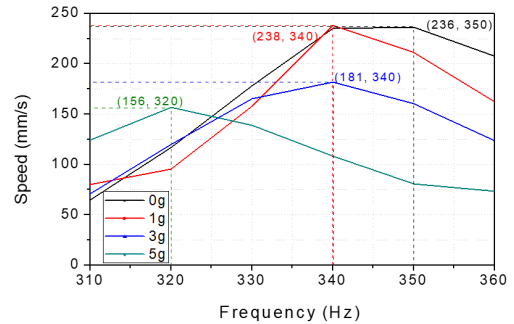


Fig. 16. Speed depending on frequency and load.

제작된 2개의 압전세라믹 벤더를 연결한 로봇 액츄에이터의 구동특성 실험 결과는 그림 15와 같다. 30Vrms의 입력전원을 310Hz에서 360Hz까지 가변하면서, 액츄에이터의 중앙에 부하를 0g에서 5g까지 증가시키며 레이저 변위 센서(Polytec, OFV 534)로 속도를 측정하였다. 그 결과 350 Hz에서 236 mm/sec의 속도로 이동을 하였으며, 부하가 증가할수록 속도가 줄어들었으며 5g의 부하에서는 156 mm/sec까지 줄었다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서 동일한 공진주파수에서 두 방향의 직교운동이 결합하여 팁 부분에서 타원 운동을 발생하는 소형의 로봇 구동용 압전세라믹 벤더 액츄에이터를 제안하였다. 구조가 간단하여 소형화에 용이하며, 동일한 구동 주파수에서 직교하는 방향 구동원의 위상(90°)만 변경하면

방향의 전환이 가능하여 비교적 간단한 구동회로로 제작이 가능한 장점이 있다. 유한요소해석을 통하여 구동원 자체의 중량 대비 최대 출력 구현을 위한 액츄에이터의 형상을 최적화하고 동일한 수평 및 수직 방향의 공진주파수로 형상을 튜닝 하였다. 따라서 기존의 압전세라믹 구동원에의 단점으로 주목되는 부족한 변위문제를 공진 주파수에서 구동 되도록 설계하여 개선하였다. 또한 실제 제작된 액츄에이터의 실험을 통하여 유사한 결과를 얻어 유한요소해석의 유효성을 입증하였다. 제안된 다축형 액츄에이터는 수행해야 할 임무와 요구 성능에 따라 모듈 식으로 추가가 가능하여 다양한 임무를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] P Dariot, R Valleggit, M C Carrozzat, M C Montesi and M Cocco, "Microactuators for microrobots", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 2, Number 3, 141, 1992.
- [2] K. Spanner, "Survey of the Various Operating Principles of Ultrasonic Piezomotors", *Physik Instrumente GmbH & Co. KG*, 2006.
- [3] S. Avadhanula, R. S. Fearing, "Flexure Design Rules for Carbon Fiber Microrobotic Mechanisms" *IEEE*, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570339>
- [4] R.J.Wood, S.Avadhanula, R.Sahai, E.Steltz, R.S.Fearing, "Microrobot Design Using Fiber Reinforced Composites" *Journal of Mechanical Design*, 130(5), 052304(11 pages), 2008. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2885509>
- [5] D. Campolo, R Sahai, R. S. Fearing, "Development of piezoelectric bending actuators with embedded piezoelectric sensors for micromechanical flapping mechanisms" *IEEE*, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1242106>
- [6] Euler-Bernoulli beam theory, https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory
- [7] ANSYS 5.3 Verification manual. VM175-176
- [8] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", *Oxford University Press*, pp. 8-10, 1993.

박 종 만(Jong-Man Park)

[정회원]



- 2009년 2월 : 경상대학교 산업공학과 (산업공학사)
- 2008년 12월 ~ 2019년 7월 : 두산중공업 주식회사 원자력 Business Group 근무
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술평가원 연구원

〈관심분야〉

국방, 전기전자, 산업공학

송 치 훈(Chi-Hoon Song)

[정회원]



- 2002년 2월 : 창원대학교 전기공학과 (전기공학석사)
- 2002년 2월 ~ 2006년 10월 : 한국항공우주산업(주) T-50/KHP 비행제어팀 근무
- 2006년 11월 ~ 현재 : 국방기술평가원 선임연구원

〈관심분야〉

국방, 전기전자, 소프트웨어