

힌지-레버 기구를 채용한 압전 햅틱 액추에이터

김지호, 권정훈, 박지성, 임기조^a

충북대학교 전기공학과

Piezoelectric Haptic Actuator Using Hinge-lever Mechanism

Ji-Ho Kim, Jung-Hoon Kwon, Ji-Sung Park, and K. J. Lim^a

Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received July 31, 2015; Revised August 9, 2015; Accepted August 20, 2015)

Abstract: The haptic actuator needs to downsize in the mobile devices continually. In this work, the hinge lever mechanism was used in order to prevent lowering the vibration performances of the downsized actuator. The vibration performances of actuator with and without hinge-lever mechanism were simulated by the finite element method analysis. It is concluded that the hinge-lever mechanism may be a proper measure to prevent lowering the vibration performances in the downsized piezoelectric actuator.

Keywords: Actuator, Piezoelectric, Haptic devices, Unimorph, Hinge lever mechanism

1. 서 론

최근 햅틱 폰, 스마트 폰, 태블릿 PC, 웨어러블 기기 등의 모바일 기기에서 터치 스크린 패널(TSP) 입력방식이 채용되면서 촉감에 의한 피드백 기능을 갖는 햅틱 기능이 필수적으로 요구되고 있다 [1].

촉각 감지 센서인 수용기(receptor) 중에서 모바일 기기의 햅틱 기능에서는 손바닥이나 손가락의 피부감각인 털이 없는 피부(glabrous skin) 감각 수용기 중의 한 종류인 기계적 수용기(mechanoreceptor)가 주로 이용되고 있는 추세이다 [2,3]. 기계적 수용기도 여러 종류로 나뉘며 자극의 주파수 대역에 따라 반응하는 종류가 달라진다. Merkel's disk 수용기는 주로 저주파의 자극(0 ~ 3 Hz)을 잘 감지하며, Meissner corpuscle 수용기는 30 ~ 40 Hz의 자극을 잘 감지하

고, 피부 안쪽에 있는 Pacinian corpuscle 수용기는 200 ~ 250 Hz 주파수 대역의 자극을 잘 감지하는 것으로 알려져 있다. 따라서 앞에서 언급한 기계적 수용기들의 반응을 고려할 때, 모바일 기기용 햅틱 액추에이터는 250 Hz 이하의 진동 주파수 대역, 감지 가능한 임계치 이상의 큰 진동 크기, 다양한 햅틱 기능의 구현이 가능하도록 진동 주파수와 진동 크기의 독립적인 제어성, 빠른 응답 등의 성능이 요구된다 [4-6].

모바일 기기에 적용되는 햅틱 액추에이터는 장착 공간이나 소비전력 등의 제한으로 위의 요구 성능을 모두 만족시키기는 어렵다 [6,7]. 현재까지 모바일 기기용 햅틱 액추에이터로 제안된 것들은 진동모터, 보이스 코일 액추에이터, 압전 액추에이터가 있다 [6,8,9]. 진동모터에는 편심을 이용한 모터와 공진 현상을 이용한 선형 진동모터가 있다. 편심모터 경우 진동 주파수 대역이 100 ~ 200 Hz이며, 진동세기도 크기 때문에 Pacinian corpuscle 수용기 자극용으로 적합하다. 공진형 선형모터는 기계적 마모가 적고 동일 체적에서 가장 큰 진동량을 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 이들 진동모터는 모터의 회전속도의 제곱에 비례

a. Corresponding author; kjlm@chungbuk.ac.kr

하는 진동의 세기를 생성하기 때문에 진동 주파수와 세기를 독립적으로 제어할 수가 없으며, 응답 속도가 느리고, 주파수 대역폭이 좁은 단점이 있다 [3]. 보이스코일 액추에이터는 진동 주파수 대역이 0 ~ 300 Hz로 넓은 반면에 진동의 세기가 크지 않은 단점을 갖고 있다 [4]. 압전 액추에이터는 역압전 효과를 이용하여 진동을 발생시키는 원리로 진동모터의 느린 응답속도를 개선하기 위하여 제안되었다 [5]. 최초로 제안된 것은 두장의 압전체 판을 겹치고 한쪽 끝단을 고정한 구조였다. Physik Instrumente 사에서도 굽힘형 압전 액추에이터를 개발하였다. 압전 액추에이터는 진동주파수와 크기를 별도로 제어할 수 있고, 빠른 응답 속도를 갖는 장점이 있으나 진동세기가 진동모터에 비해서 크지 않다. 한편, 모바일 기기 내 액추에이터 장착 공간이 지속적으로 협소해지고 있기 때문에 액추에이터의 소형화가 계속적으로 요구되는 추세이다. 압전 액추에이터가 소형화되면, 일반적으로 진동 주파수 대역은 높아지고, 진동 진폭이 감소하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다층 압전소자를 적용하거나, 압전체에 부착하는 플레이트에 여러 종류의 재질(금속, 고무)을 적용하려는 연구들이 수행되고 있다 [9-11].

본 연구에서는 압전 액추에이터의 소형화 시 나타나는 문제점을 힌지 레버 기구를 채용하여 해결하고자, 힌지 레버의 기하학적 치수 변화에 따른 액추에이터의 진동 주파수와 진동진폭의 변화를 시뮬레이션을 통하여 검토해 보고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 압전 햅틱 액추에이터의 기본 구조

압전 소자를 이용한 압전 햅틱 액추에이터의 기본 구조를 그림 1에 나타냈다. 스틸 플레이트(steel plate)의 양 끝단이 지지대로 고정되며, 스틸 플레이트 밑면에 두께(상하) 방향으로 분극된 단층의 압전 소자가 부착되어 모노몰프 진동자 구조이다. 액추에이터의 진동 주파수를 낮추기 위하여 밀도가 높은 텅스텐바(tungsten bar)가 스틸 플레이트 중앙에 부착되어 있다.

압전 소자에 두께방향으로 교류전계가 인가되면 스틸 플레이트가 부착된 압전 소자는 인가 전계 주파수로 굴곡 진동이 그림 2와 같이 생긴다. 이 진동은 피

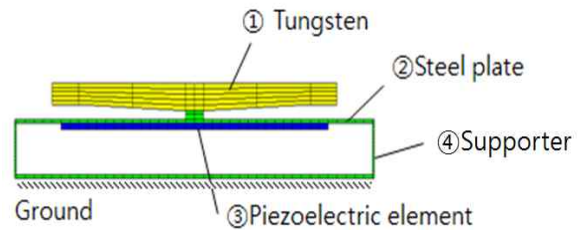


Fig. 1. Crosssectional view of the type 1 haptic actuator using piezoelectric element.

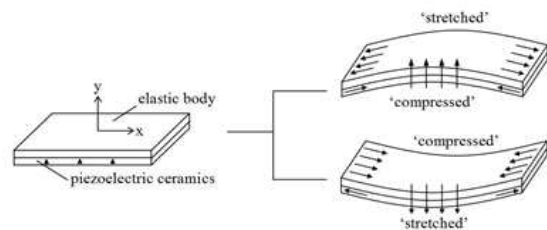


Fig. 2. Generation principle of flexural vibration.

부의 기계적 수용기들을 자극하는 햅틱 기능으로 이용된다.

2.2 힌지 레버 기구를 채용한 압전 햅틱 액추에이터의 성능평가 방법

햅틱 액추에이터를 장착할 공간은 지속적으로 축소될 추세이며, 그림 1과 같은 액추에이터 구조에서 소형화는 그림에서 가로 방향으로 축소시키게 될 것이다. 압전 소자가 부착된 스틸 플레이트를 가로 방향으로 축소하게 되면, 액추에이터의 강성(stiffness)이 높아져서, 진동 진폭은 감소하고 진동 주파수 대역은 증가하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 그림 1의 기본구조에 힌지 레버 기구를 채용한 그림 3(a)에 나타낸 Type 2 액추에이터 구조를 검토하였다. 힌지 레버 기구는 동일 재질 중에 가늘게 파인 힌지 부를 두어 지렛대 원리로 변위를 축소 또는 확대하는 기구이다. 액추에이터의 진동 특성에 미치는 이 기구의 채용 효과를 시뮬레이션을 통하여 평가하고자 한다.

시뮬레이션 입력 조건으로 사용한 Type 1과 Type 2 액추에이터의 각 구성부의 형상 치수와 재료상수들을 표 1에 보였다. Type 1과 Type 2 액추에이터에서 텅스텐의 질량, 스틸 플레이트와 압전 소자의 형상 치수는

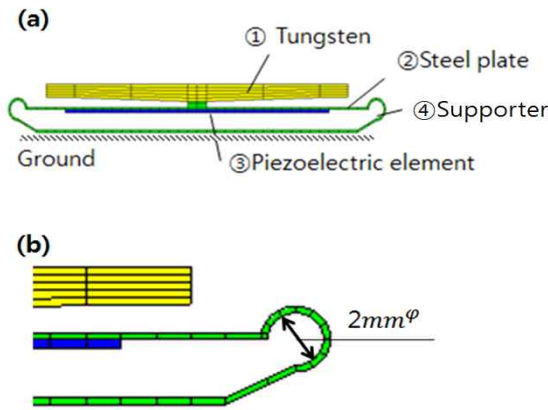


Fig. 3. Type 2 actuator using hinge-lever mechanism. (a) Cross-sectional view of the type 2 actuator and (b) diameter of circle in supporter; 2 mm.

동일하다. 지지대 형상 면에서 단순한 형상의 지지대 (supporter)를 갖는 Type 1과 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 지지대에 지름 2 mm의 원형 부분을 갖는 힌지 레버 기구를 포함한 Type 2가 있다.

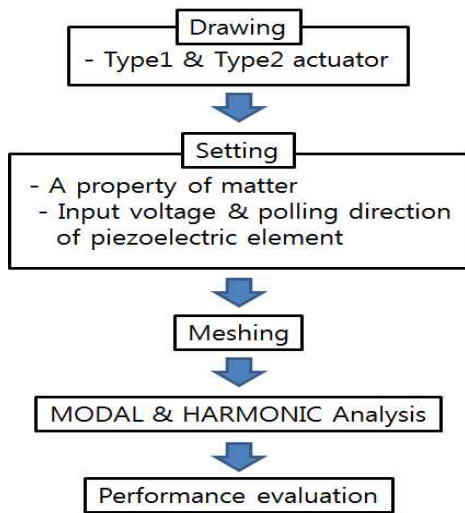


Fig. 4. Flowchart for simulation of performance of type 1 & type 2 actuator.

Type 1, Type 2 액츄에이터의 진동 주파수, 진동 진폭을 상용 FEM 소프트웨어(ATILA)를 이용하여 알아보았다.

Table 1. Material properties and dimensions of the haptic actuator in Fig. 1 and Fig. 3.

Dimension	Type 1	Type 2	
Tungsten mass [g]	1.5	1.5	
Steel plate [mm]	$40^l \times 2^b \times 0.2^t$	$40^l \times 2^b \times 0.2^t$	
Piezoelectric element [mm]	$30^l \times 2^b \times 0.3^t$	$30^l \times 2^b \times 0.3^t$	
Supporter [mm]	$0.2^l \times 2^b \times 2^h$	$2^b \times 2^b \times 2^h$	
Material	Young's modulus [GN/m ³]	Piezoelectric strain constant [pm/V]	Density [kg/m ³]
Tungsten	N/A	N/A	17,470
Steel plate	210	N/A	7,800
Piezoelectric element	65	-123	7,500

성능평가를 위한 시뮬레이션 과정은 그림 4와 같다. 압전 소자에 인가된 전압은 $100 V_{pp}$ 이었으며 분극방향은 두께방향으로 설정하였다. Modal analysis 과정을 통해 전기기계결합계수가 가장 큰 진동 공진주파수를 도출하고, harmonic analysis 과정을 통해 해당 주파수에서의 진동변위를 도출한다. 압전 소자의 길이를 28 ~ 34 mm, 지지대의 원형 부분의 지름을 1 ~ 3 mm로 변화시키면서, 각 경우에 발생하는 진동의 공진주파수와 진동변위를 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

Type 1과 Type 2 액츄에이터의 주파수에 따른 진동변위를 표 1의 조건에서 시뮬레이션 한 결과를 그림 5에 보였다.

Type 1의 공진주파수와 최대 진동변위는 226.9 Hz, 935.2 μm 이고, Type 2의 공진주파수와 최대 진동변위는 216.7 Hz, 1,050 μm 를 보였다. Type 2는 Type 1에 비해 공진주파수는 5% 정도 낮으며, 최대 진동변위는 12.3% 정도 증가하였다. 이는 힌지 레버 기구 도입으로 Type 2의 지지대의 강성이 Type 1 보다 낮은 것에 기인한 것으로 생각된다.

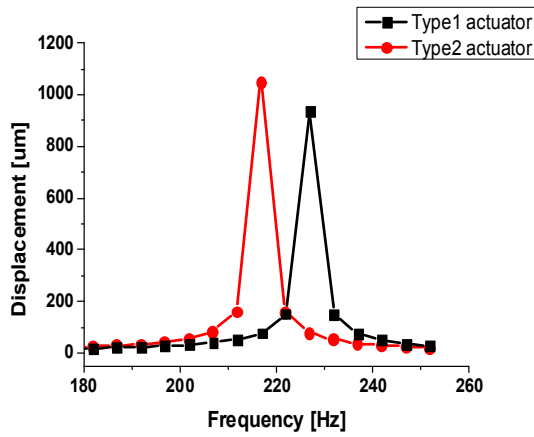


Fig. 5. Displacement depending on frequency of Type 1 and Type 2 actuator.

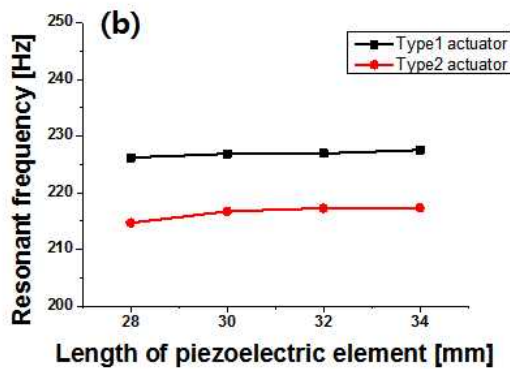
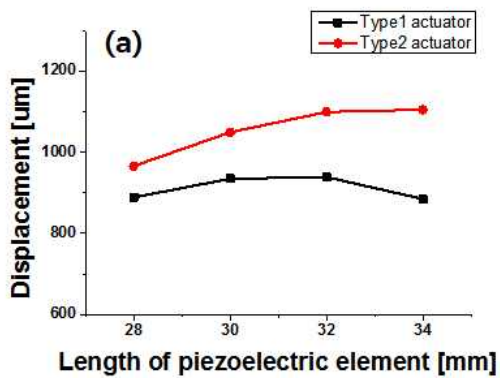


Fig. 6. Length of piezoelectric element dependence of displacement and resonant frequency of Type 1 and Type 2 actuator; (a) maximum displacement of actuator and (b) resonant frequency of actuator.

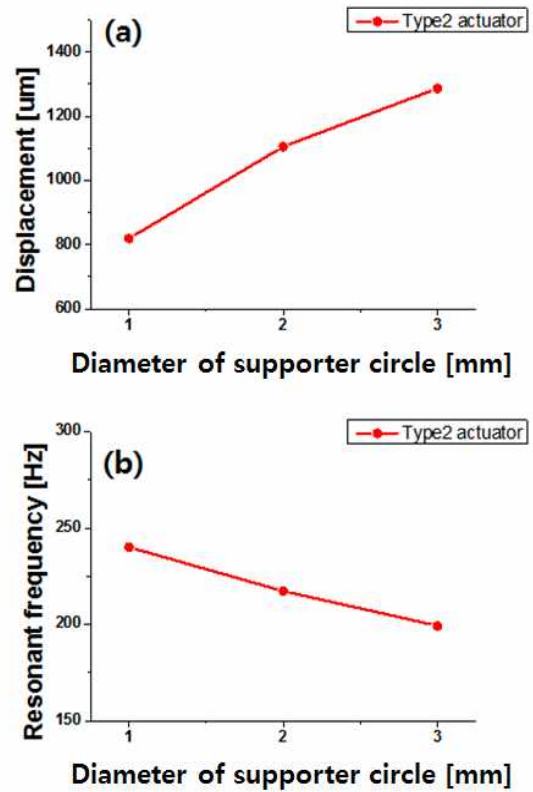


Fig. 7. Diameter of support circle dependence of displacement and resonant frequency of Type 2 actuator; (a) maximum displacement of actuator and (b) resonant frequency of actuator.

Table 2. Performance and dimensions of the haptic actuator using hinge-lever mechanism.

	Resonant frequency [Hz]	Displacement [um]
Performances	199.3	1286.9
Dimension	Piezoelectric element [mm]	$34^l \times 2^b \times 0.3^t$
	Steel plate [mm]	$40^l \times 2^b \times 0.3^t$
	Circle diameter of supporter [mm]	3

그림 6(a), (b)는 압전 소자의 길이의 변화에 따른 각 액츄에이터의 진동 공진주파수와 최대 진동변위의 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. Type 2는 Type 1에 비해서 압전 소자의 길이 검토 범위 내에서 공진

주파수는 5% 정도 낮았고, 각 액츄에이터에서 압전 소자의 길이에 따른 진동 주파수 차이는 크지 않았다. 최대 진동변위는 Type 2가 Type 1에 비해 약 15% 높게 나타났다. 이는 힌지 레버의 지렛대 작용에 의해 변위가 확대된 결과로 보여진다. 또한, Type 1 경우 압전 소자의 길이가 32 mm에서 34 mm로 증가될 때, 최대 진동변위가 오히려 낮아지고 있다. 여기서 검토된 진동자는 그림에서 보듯이 모노몰프 구조인데, 이 진동자에서 고정된 길이를 갖는 스틸 플레이트에 부착한 압전 소자 길이를 증가시키게 되면 진동자의 진동 변위가 증가될 수 있고, 또 다른 측면에서 압전 소자의 길이를 증가시키면 스틸 플레이트와 압전 세라믹의 겹쳐진 부분이 증가하게 되어 강성이 증가되고 진동 변위가 감소될 수 있을 것인데, 이 경우 전자보다 후자의 영향이 큰 것으로 보여진다. 반면에 Type 2의 경우는 지지대의 강성이 Type 1에 비해 낮기 때문에 압전 소자의 길이가 32 mm에서 34 mm로 증가할 때, 최대 진동변위는 상승하는 경향을 보인 것으로 생각된다.

그림 7(a), (b)는 Type 2 액츄에이터에서 힌지 레버 기구의 형상에 따른 진동 성능을 검토한 결과로서 지지대의 원형 부분의 지름을 1~3 mm 변화시킬 때 액츄에이터 진동의 공진주파수와 최대 진동변위의 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 원형부의 지름이 커질수록 최대 진동변위는 증가하였으며 공진 주파수는 감소하였다. 이는 원형부가 커질수록 강성이 낮아지기 때문이다.

이상과 같이 검토한 치수범위 내에서 가장 우수한 진동 성능을 보인 경우는 표 2와 같다. 진동 공진주파수 약 200 Hz, 최대 진동 변위 약 1,290 μm 이다. 또한 이상의 검토를 통해서 액츄에이터의 소형화에 따른 진동 주파수 대역의 고주파화, 진동 진폭의 저하를 힌지 레버 기구의 채용으로 강성을 줄이고 지렛대 원리를 이용하여 방지할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

햅틱 모바일 기기의 소형화, 고기능화에 따라 햅틱 액츄에이터의 장착 공간은 더욱 협소해지는 추세이다. 압전 액츄에이터를 소형화시켰을 때 나타나는 진동 주파수 대역의 고주파화, 진동 진폭의 저하 등의 진동 성능 저하를 방지할 목적으로 힌지 레버 기구 도입효과를 시뮬레이션으로 평가하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 힌지 레버 기구를 도입한 액츄에이터(Type 2)의 진동 공진주파수는 기본형 액츄에이터(Type 1)에 비해 5% 가량 낮게 나타났다. 이는 기본형에서 액츄에이터 길이 축소 시 나타나는 진동 주파수 상승을 힌지 레버 기구 도입으로 억제함을 의미한다.

2) 힌지 레버 기구를 도입한 액츄에이터의 진동 변위 진폭은 기본형에 비해 약 15% 정도 높게 나타났다. 1)과 2)의 경향은 힌지 레버 기구의 채용에 따른 강성의 저하에 기인한 것으로 생각된다.

3) 힌지 레버 기구를 도입한 액츄에이터에서 압전 소자의 길이 증가에 따라 진동 변위 진폭은 증가하였으며, 이런 경향은 강성의 저하로 설명할 수 있다.

검토한 치수 범위 내에서 우수한 진동 특성을 보인 액츄에이터의 경우, 진동 공진주파수는 약 200 Hz, 최대 진동 변위는 약 1,290 μm 이다. 또한 힌지 레버 기구 도입은 액츄에이터의 소형화에 따른 진동 주파수 대역의 고주파화, 진동 진폭의 저하를 방지할 수 있는 좋은 대안 중의 하나가 될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] L. A Jones, *Kinesthetic Sensing*, 1687 (MIT Express, In Human and Machine Haptics, 2000).
- [2] E. Piaggio, *Cutaneous Mechanoreceptors*, <http://www.centropiaggio.unipi.it>
- [3] H. Tajalli, *Mechanoreceptor Transduction*, <http://alford.bios.uic.edu>
- [4] T. Kaaresoja and J. Linjama, *Conf. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System*, 253 (2005).
- [5] T. K. Ha and Y. W. Chang, *Conf. on Human Factors in Computing System*, 17 (1998).
- [6] S. M. Choi, *Perceptual Characteristics of Mobile Device Vibrations*, <http://www.dbpia.co.kr/Article/2579699> (2008).
- [7] I. Poupyrev, S. Maruyama and J. Rekimoto, *Symp. of User Interface Software & Technology*, p. 51 (2002).

- [8] H. Zhou, B. Henson, and A. Bell, *Linear Piezo-actuator and Its Applications*, <http://zhouhx.tripod.com> (2001).
- [9] J. Shen and Y. Zhao, *Conf. on Electr. Meas. & Instruments*, 294 (2009).
- [10] W. Xu and T. G. King, *IEE Colloquium on Innovative Actuators for Mechatronic Systems*, 1 (1995).
- [11] J. Shen and Q. Zhou, *Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, 1864 (2006).