

심벌 액츄에이터의 제작과 변위 특성의 분석

논문
12-5-3

Fabrication of a Cymbal Actuator and Analysis of Displacement Characteristics

최성영*, 김진수*

(Sung-Young Choi*, Jin-Soo Kim*)

Abstract

In this study, brass endcap with 2, 3, 5, 7mm contact surface and bronze endcap with 3mm contact surface were machined using punch die while keeping the cavity diameter in 9.25mm and cavity depth in 1.5mm. Displacement characteristics of the cymbal actuator with each of endcap thickness in 0.15, 0.2, 0.3, 0.5mm were investigated. Displacement increased with increasing contact surface, while resonant frequency decreased. Displacement increased with decreasing endcap thickness. Displacement increased with increasing applied voltage. Displacement of the cymbal actuator with brass endcap was larger than that of the cymbal actuator with bronze endcap. In conclusion, when the cymbal actuator is fabricated, to increase displacement value, the contact surface of endcap should be wider and the stiffness of endcap material should be lower.

Key Words(중요용어) : Cymbal actuator(심벌 액츄에이터), displacement(변위), endcap(엔드캡), contact surface(윗면지름)

1. 서 론

최근 압전 세라믹을 이용한 압전 액츄에이터(piezoelectric actuator)가 미소변위 제어소자로 각광을 받고 있다. 압전 액츄에이터는 압전 구동방식이므로 자계의 발생이 없고, 미소 변위 제어가 용이하며 소형화 및 경량화가 가능하고 센서 기능까지 겸할 수 있기 때문이다. 기존의 압전 액츄에이터는 주로 바이몰프(bimorph)와 적층형(multilayer) 액츄에이터였는데, 바이몰프는 변위에 비해 발생력이 작고, 적층형은 발생력에 비해 변위가 작은 각각의 단점이 있었다.

따라서 이들 단점을 보완할 수 있는 압전 액츄에이터인 무니(moonie) 변환기가 개발되었다^[1]. 무니 변환기는 바이몰프와 적층형의 중간 특성을 가지고 있어 이들 단점을 보완할 수 있었다. 그러나 무니 변

환기는 위치에 따라 변위가 달라지고 발생력도 실제 기기에 사용하기에는 다소 작았다. 그에 비해 Dogan^[2] 등에 의하여 새로 개발된 심벌(cymbal) 액츄에이터는 무니보다 변위 및 발생력이 크다. 그러므로 심벌 액츄에이터는 무니보다 더 다양하게 센서나 액츄에이터로 사용될 수 있다^[3].

심벌 액츄에이터는 가속도(accelerometer)센서나 수중의 미약한 압력을 감지하는 수중 청음기(hydrophone) 및 어군 탐지기 등에 이용할 수 있다.

본 연구에서는 심벌 액츄에이터를 제작하여 엔드캡의 윗면지름에 따른 변위 특성을 알아보기 위해 엔드캡의 윗면지름을 변화시키면서 심벌 액츄에이터의 특성을 측정 및 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 심벌 액츄에이터의 제작

심벌 액츄에이터는 압전체, 엔드캡, 접착제의 세 부분으로 구성되어 있다. 압전체로는 0.05PMN-0.95PZT를, 엔드캡은 황동과 청동을, 접착제는 Ag과 epoxy 혼합수지를 사용하였다.

* : 한국교원대학교 기술교육과
(충북 청원군 강내면 다락리 산7, Fax: 0431-230-3787 E-mail: jskim@cc.knue.ac.kr)
1999년 2월 23일 접수, 1999년 3월 30일 심사완료

그림 1은 심벌 액츄에이터의 제작단계 사진으로 단계①은 황동 엔드캡을 일정한 크기(11.5×11.5mm)로 절단한 모양이고, 단계②는 선반으로 ①을 지름 11.25mm되게 절삭가공한 모양이고, 단계③은 펀치다이(punch die)에 ②를 놓고 프레스로 압착하여 심벌 모양으로 가공한 상태로 엔드캡의 윗면지름별(2, 3, 5, 7mm)로 가공하였다. 단계④는 원판형 압전 세라믹 상하면에 심벌 엔드캡 2개를 접착하기 전의 모양이며, 단계⑤는 압전 세라믹의 상하면에 심벌 모양의 엔드캡을 접착하고 리드선을 부착하여 심벌 액츄에이터가 완성된 모양이며, 그 구조의 단면도를 그림 2에 나타냈다.

황동 엔드캡을 윗면지름별 4종류(2, 3, 5, 7mm)로 하여 그 각각에 대해 두께별(0.15, 0.2, 0.3, 0.5mm)로 제작하였다. 이때 공동깊이는 1.5mm, 공동지름 9.25mm로 고정하였다.

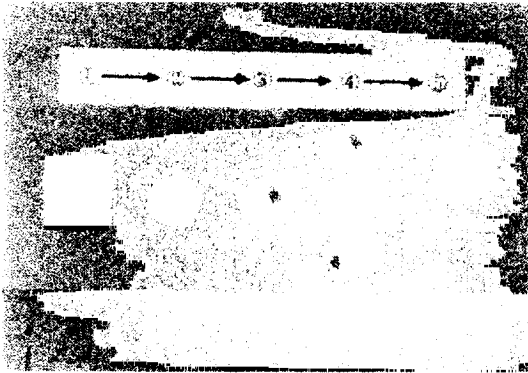


그림 1. 심벌 액츄에이터의 제작 단계
Fig. 1. Fabrication process of cymbal actuator

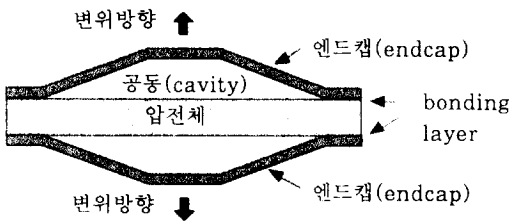


그림 2. 심벌 액츄에이터의 구조
Fig. 2. Structure of the cymbal actuator

2.2 측정방법

제작한 심벌 액츄에이터에 전압을 인가할때 발생하는 변위를 측정하기 위해 그림 3과 같이 측정 시스템을 구성하였으며, 인가전압에 대한 온도측정과 scanning vibrometer를 사용하여 3차원 진동모드를 측정하였다. 측정에 사용된 계기로는 function generator(HP33120A), high speed power amplifier(NF4015, Japan), digital storage oscilloscope(HC5802), laser vibrometer(OFV300 Germany)와 head(OFV302), scanning unit(OFV-055, OFV-303, OFV-3001-S)와 XY micro stage 등이다. 합수발생기에서 나온 초음파를 고속 증폭시켜 액츄에이터에 가하여 진동계로 변위를 측정하였다.

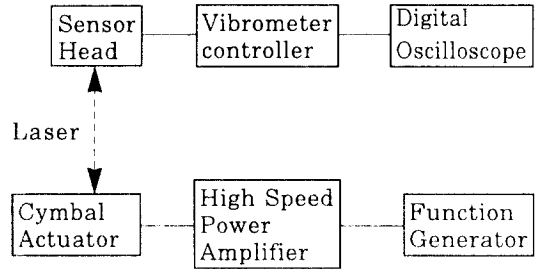


그림 3. 변위 특성의 측정 시스템
Fig. 3. Measuring system of displacement characteristics

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 엔드캡의 윗면지름에 따른 특성

엔드캡의 윗면지름을 변화시키면서 변위 특성과 공진주파수 특성 및 엔드캡의 두께 특성으로 나누어 나타낼 수 있다.

그림 4는 인가전압 60 Vmax에서 측정한 엔드캡의 두께별 심벌 액츄에이터의 변위 특성 그래프이다. 심벌 액츄에이터의 윗면지름이 증가할수록 변위도 증가하였으나 엔드캡의 두께에 따라 변위 증가율이 매우 다르다. 엔드캡의 두께가 0.2mm이하인 경우 윗면지름이 증가하면 변위는 지수함수적으로 증가하지만, 엔드캡의 두께가 0.2mm이상에서는 윗면지름의 증가에 따라 변위는 거의 선형적으로 매우 작게 증가했다. 그 이유는 엔드캡의 두께가 얇으면 신축성(flexibility)이 증가하고 또한 윗면지름이 크면 심

벌 액츄에이터의 진동이 크게 일어나기 때문에 변위는 지수함수적으로 증가한 것으로 생각되며, 이는 3.3절의 3차원 진동 모드 측정을 통해 확인할 수 있었다.

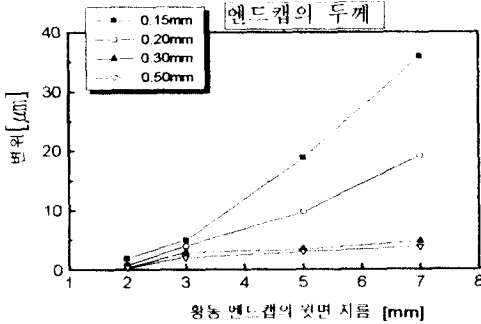


그림 4. 황동 엔드캡의 윗면지름에 따른 변위 특성
Fig. 4. Effect of contact surface on the displacement values of the cymbal actuators at various brass endcap thickness

그림 5는 엔드캡의 윗면지름을 변화시킬 때 공진 주파수의 변화를 엔드캡의 두께별로 나타낸 그래프이다. 일반적으로 디스크형 압전체의 공진주파수는 impedance analyzer로 측정하나 본 연구에서는 심벌 액츄에이터의 구조가 특이하므로 laser vibrometer의 변위 측정 장치를 이용하여 공진점을 확인하였다. 그림에서 보는 바와 같이 심벌 액츄에이터에서 공진 주파수는 엔드캡의 두께에는 비례하고, 엔드캡의 윗면지름에는 반비례하는 것으로 나타났다. Tressler 등의 연구에^[3] 의하면 공진 주파수는 엔드캡의 두께와 공동깊이에는 비례하고 공동지름에는 반비례하였다. 또한 공동지름(ϕ 12mm)이 큰 경우 윗면지름이 증가하여도 공진주파수는 거의 일정하였다. 본 실험 결과에서도 엔드캡의 두께와 공진 주파수의 관계는 일치하고 있으나, 공동지름이 9.25mm로 큰 경우이지만 윗면지름이 증가함에 따라 공진 주파수는 더욱 낮아졌다. 이는 윗면지름에 따라 공진 주파수가 변할 수 있음을 나타낸 것으로 Tressler의 연구와 비교하여 약간의 차이점이 나타났다.

그림 6은 엔드캡의 두께에 대한 변위특성을 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 통해 엔드캡의 두께가 증가할수록 변위는 지수함수적으로 감소하는 것을 알

수 있다. 이러한 경향은 심벌 액츄에이터와 약간 비슷한 구조를 갖는 무니 변환기에 대하여 연구한 여러 논문에서 찾아볼 수 있으며^[4], 무니 변환기와 같이 심벌 액츄에이터에서도 비슷한 결과를 보이고 있다. 그 이유는 엔드캡의 두께가 증가할수록 압전 세라믹의 반경 진동이 두께 방향으로 변환되기 어려워 변위는 감소하고, 반대로 엔드캡의 두께가 얇아지면 엔드캡의 신축이 증가하여 변위를 증가하지만 너무 얇으면 변형이 생겨 에너지 손실이 증가한다^[5].

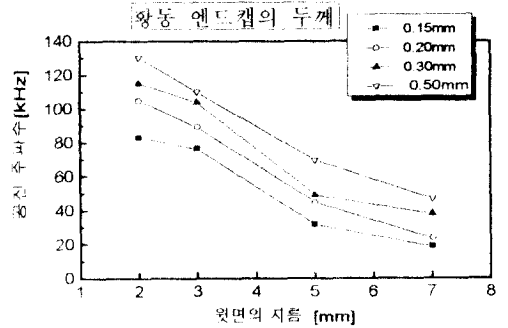


그림 5. 황동 엔드캡의 윗면지름에 따른 공진 주파수(공동깊이 1.5mm, 인가전압 60V_{max})
Fig. 5. Effect of contact surface on resonant frequency of cymbal actuator at brass endcap thickness(cavity depth 1.5mm, applied voltage 60V_{max})

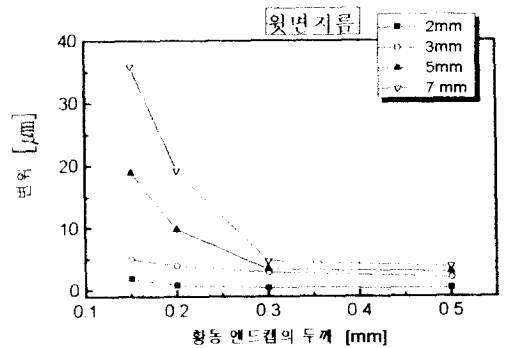


그림 6. 황동 엔드캡의 두께에 따른 변위특성
Fig. 6. Effect of endcap thickness on displacement values at various contact surface

3.2 인가 전압에 따른 변위 특성

그림 7은 엔드캡의 두께가 0.15mm인 황동 및 청동으로 엔드캡을 제작한 심벌 액츄에이터에 대하여 인가전압을 $30V_{max}$ 에서 $100V_{max}$ 까지 증가시키면서 변위를 측정한 그래프이다.

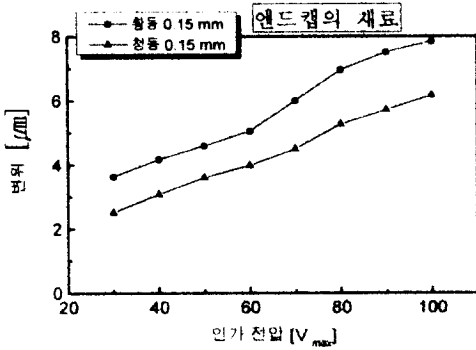


그림 7. 인가전압에 따른 변위 특성(공동깊이 1.5mm, 뒷면지름 3mm)

Fig. 7. Effect of applied voltage on the displacement values of the cymbal actuator at two endcap materials(cavity depth 1.5mm, contact surface 3mm)

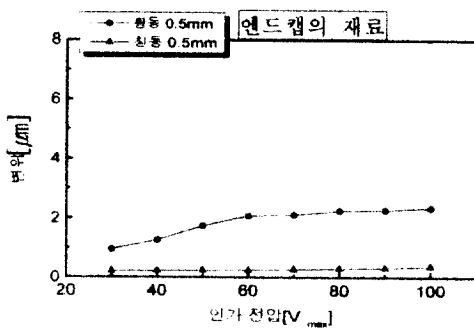


그림 8. 인가전압에 따른 변위 특성(공동깊이 1.5mm, 위면지름 3mm)

Fig. 8. Effect of applied voltage on the displacement values of cymbal actuator at two endcap materials(cavity depth 1.5mm, contact surface 3mm)

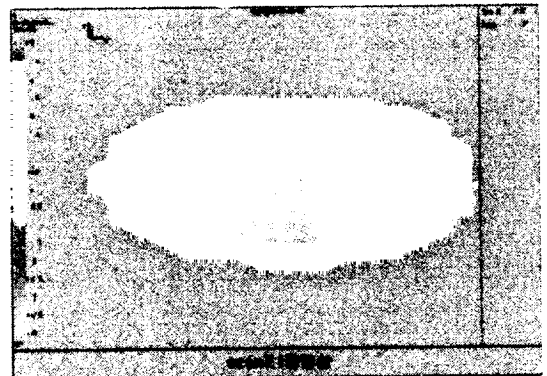
그림 8은 황동과 청동으로 만든 엔드캡의 두께가 0.5mm인 심벌 액츄에이터의 인가전압에 대한 변위 특성 그래프이다.

위의 두 그림 모두에서 인가전압이 증가함에 따라 변위는 약간씩 증가하고 황동 엔드캡 재료의 변위가 더 크게 나타났다. 특히, 그림 7에서 엔드캡의 두께가 얇은 0.15mm인 경우 거의 선형적으로 증가하지만, 두꺼운 0.5mm인 경우는 그렇지 않았다. 또한 청동 엔드캡보다 황동 엔드캡을 사용한 심벌 액츄에이터가 평균 $1.3\mu m$ (엔드캡의 두께 0.15mm) 더 큰 변위를 나타냈다. 황동이 청동보다 변위가 큰 이유는 K. Onitsuka 등의 연구^[6]에서 나타낸 바와 같이 황동이 청동보다 경도가 작기 때문으로 생각된다.

3.3 심벌 액츄에이터의 3차원 진동모드

그림 9는 심벌 액츄에이터의 3차원 진동모드를 scanning laser vibrometer 시스템으로 측정하여 시간에 따라 심벌 액츄에이터의 3차원 변위 운동을 나타낸 것이다. 그림에서 (a), (b), (c), (d)는 심벌 액츄에이터의 변위가 시간의 변화(t_1 에서 t_4 까지)에 따라 움직이는 모양을 나타낸 것으로 (a)는 변위가 최대로 내려간 상태이고 (d)는 최대로 올라간 상태를 나타낸 것이다. 이 방법은 FEA(유한요소분석법)로 측정하는 것보다 더 간단히 측정할 수 있으며 실시간 애니메이션 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다.

이상과 같은 특성을 가진 심벌 액츄에이터는 액츄에이터나 센서로 이용될 수 있으며, 특히 엔드캡에 슬롯을 내어 풍차형 전동기를 제작하였을 경우의 회전특성 및 3차원 진동모드에 대한 연구가 진행 중에 있다^[7-8].



(a) $t = t_1$

4. 결 론

본 연구에서 엔드캡의 윗면지름을 변화시키면서 심벌 액츄에이터의 여러 특성과 인가전압에 따른 심벌 액츄에이터의 변위 특성에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 엔드캡의 윗면지름이 증가할수록 심벌 액츄에이터의 변위는 지수함수적으로 증가하고 공진 주파수는 낮아진다
- (2) 심벌 액츄에이터의 변위는 엔드캡의 두께가 증가할수록 감소하였다.
- (3) 인가전압이 증가함에 따라 변위는 엔드캡의 두께가 얇은 경우(0.2mm이하) 거의 선형적으로 증가한다.
- (4) 황동 엔드캡을 사용한 심벌 액츄에이터의 변위가 청동 엔드캡을 사용한 것보다 더 크다.

이상에서와 같이 큰 변위를 얻을 목적으로 심벌 액츄에이터를 제작하기 위해서는 엔드캡의 윗면지름은 될수록 커야 하고 경도는 낮아야 한다. 그러나 오랜 시간 사용과 인가전압이 증가하면 압전체의 특성이 변하므로 이에 대한 high-power용 압전 세라믹의 조성에 관한 연구가 더 필요하다.

참 고 문 헌

1. R. E. Newnham, Q. C. Xu, and S. Yoshikawa U.S patent, 4998819, March 12, 1991.
2. A. Dogan, K. Uchino, R. E. Newnham, "Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps 'Cymbal'", IEEE, Trans on UFFC, Vol. 44, No. 3, pp. 597-605, 1997.
3. J. F. Tressler, K. Uchino, R. E. Newnham, "Finite Element Analysis of Cymbal-type Flexensional Transducer", IEEE Trans. on UFFC, Vol. 45, No. 5, pp. 1363-1369, 1998.
4. A. Dogan, Q. C. Xu, K. Onitsuka, S. Yoshikawa, K. Uchino, R. E. Newnham, "High Displacement Ceramic Metal Composite Actuators(Moonie)", Ferroelectrics, Vol. 156, pp. 1-6, 1994.
5. B. Koc, A. Dogan, J. F. Fernandez, R. E. Newnham, K. Uchino, "Accelerometer

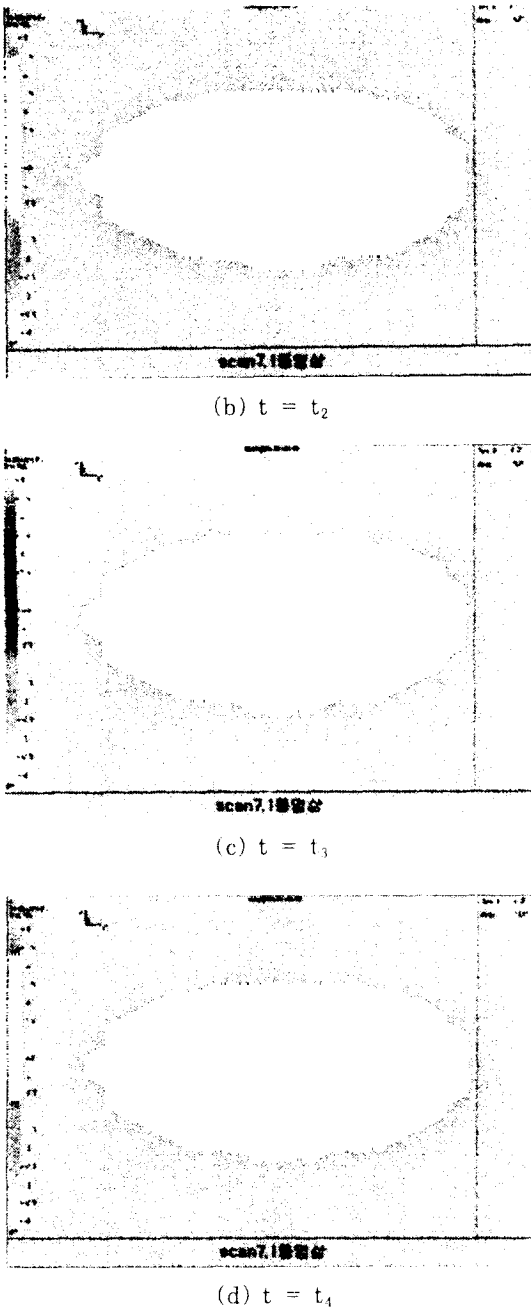


그림 9. 스캐닝 진동계로 측정한 심벌 액츄에이터의 3차원 진동모드(윗면 지름 7mm, 공동 깊이 1.5mm, 인가 전압 90V_{max})

Fig. 9. Three-dimensional vibration mode of the cymbal actuator measuring a scanning vibrometer system.

Application of the Modified Moonie(Cymbal) Transducer”, Jpn. J. Appl. Vol. 35, pp. 4547-4549, 1996.

6. K. Onitsuka, A. Dogan, Q. C. Xu, S. Yoshikawa, R. E. Newnham, “Design Optimization for Metal-Ceramic Composite Actuator, ‘Moonie’”, Ferroelectrics, Vol. 156, pp. 37-42, 1994.
7. 지승한, 이덕출, 김진수, “압전 세라믹스를 이용한 풍차형 초음파 전동기의 제작과 특성”, 전기전자재료학회논문지 10권, 9호, pp. 889-894, 1997.
8. Jin-Soo Kim, Man-Ju Park, Kenji Uchino, “Composite ultrasonic motors using a piezoelectric disc and an elastic body of ‘windmill’ type”, Ferroelectrics(98, 12 submitted).