

## 박형 초음파모터의 최적 설계

### Optimal Design of Thin Type Ultrasonic Motor

정성수<sup>1,a</sup>, 전호익<sup>1</sup>, 박태곤<sup>1</sup>  
(Seong-Su Jeong<sup>1,a</sup>, Ho-Ik Jun<sup>1</sup>, and Tae-Gone Park<sup>1</sup>)

#### Abstract

In this study, novel structured thin ultrasonic rotary motor has been proposed. Ultrasonic motors are based on an elliptical motion on the surface of elastic body. Thin brass plate was used as a cross shaped vibrator and eight ceramic plates were attached on upper side and bottom side of the brass plate. From the thin stator, elliptical displacements of the four contact tips were obtained. To find the optimal size of the stator, motions of the motors were simulated using ATILA by changing length, width and thickness of the ceramics. The stators had commonly three resonance peaks and contact tips of the stator moved on tangential or normal trajectories at these resonance peaks. The maximum displacements at the resonance peaks were compared. As results, maximum displacements of the contact tips were obtained at the length of 16 mm, width of 6 mm and thickness of 0.4 mm. Changes of the resonance frequencies were inversely proportional to the length of ceramic and proportional to the width of ceramic. The motor was fabricated by using the designed stator. And, the characteristics of the motor were compared with the simulated results. When the motor was fabricated with these results, speed fo 935 rpm was obtained by input voltage of 25 Vrms at 93.5 kHz.

**Key Words** : Thin ultrasonic motor, Piezo actuator, Elliptical motion, FEM, ATILA

#### 1. 서 론

초음파모터는 일반적인 전자기 모터에 비하여 소형경량이고, 구조가 간단하며 소음이 적고 저속에서 고 토크를 얻을 수 있으며, 다양한 형태로의 이용이 가능하다. 또한 전자기 노이즈를 발생시키지 않으며 전자기 노이즈에 영향을 받지 않는다. 접촉력에 의해 구동되므로 강한 정지토크를 지니고 있어 별도의 제동원이 필요치 않으며 응답속도가 매우 빠른 장점을 이용하여 의료용, 군사용 등 전자파에 예민한 기기의 모터로서 활용이 용이한 특성을 지니고 있어 그 응용 분야는 무척 넓다. 최근에는 고 토크의 초음파 모터로서 카메라 포커싱이나 공작기계 이송용으로의 활용가능성을 제시하

고 있다[1-4].

본 연구진은 다양한 형태의 초음파모터를 연구하였으며 전혀 새로운 형태의 cross형 초음파 회전모터를 제안하여 발표한 바 있으나 고정자의 두께면에 세라믹을 부착하므로 두께를 줄이는데 한계가 있고, 진동체를 가공하기가 어려운 단점을 지니고 있었다[5,10]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 카메라 포커싱에 적용할 수 있는 두께가 얇은 형태인 새로운 타입의 박형 초음파모터를 제안하였다. 유한요소해석 프로그램을 이용하여 압전세라믹의 길이, 폭, 두께의 변화를 변수로 하여 최적의 설계를 하였고, 최적 설계된 사이즈의 초음파모터를 직접 제작하고 특성실험을 통하여 카메라 포커싱용으로의 활용 가능성을 확인하였다[6-8].

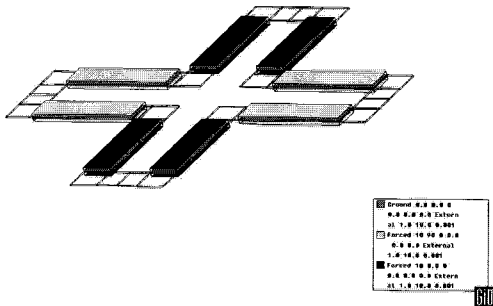
1. 창원대학교 전기공학과  
(경남 창원시 사림동 9)

a. Corresponding Author : ssjeong@changwon.ac.kr  
접수일자 : 2007. 10. 4  
1차 심사 : 2008. 1. 21  
심사완료 : 2008. 3. 17

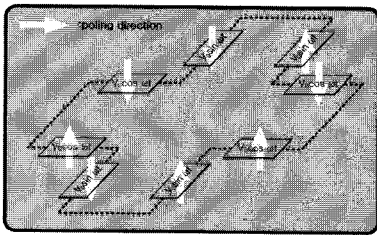
#### 2. 박형 초음파모터의 구조 및 원리

그림 1에서는 박형 초음파 모터의 구조와 분극

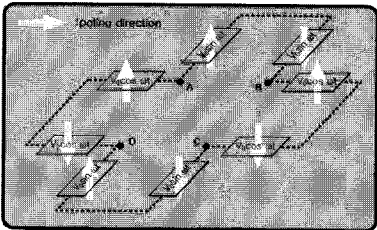
방향 및 인가전압을 보여준다. 그림 1(a)와 같이 얇은 탄성체에 압전 세라믹을 윗면과 아랫면에 각각 부착한 형태로서, 분극방향과 인가전압  $\sin$ 파와  $\cos$ 파를 각각 그림 1(b),(c)와 같이 인가하여 접촉점인 A, B, C, D 각 네 지점에서 순차적인 타원변위를 얻을 수 있는 구조이다. 그림 2에서와 같이 네 지점의 접촉점이 순차적으로 로터에 접촉하여 회전하는 원리를 이용하며,  $\sin$ 파와  $\cos$ 파를 반대로 가하였을 경우에는 회전방향도 바뀐다[4,9].



(a) stator 형상



(b) 분극방향 및 인가전압(윗면)



(c) 분극방향 및 인가전압(아랫면)

그림 1. 박형 초음파모터의 구조 및 분극방향.

Fig. 1. Structure and polarization of thin type ultrasonic motor.

### 3. 유한요소해석 결과 및 고찰

그림 2와 같은 구조를 기본으로 하여 유한요소 해석 프로그램을 통해 세라믹의 길이, 폭, 두께 및 탄성체의 재질을 변화 시켜 가장 큰 변위를 보이는

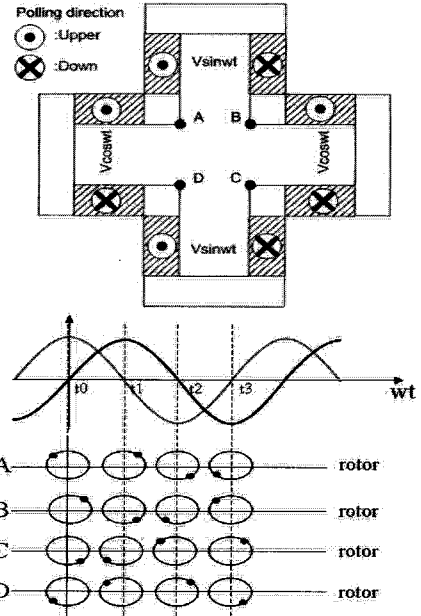


그림 2. 한 주기 동안의 변위변화.

Fig. 2. Change of displacements at one cycle.

모형을 선정하여 최적의 설계조건을 제시 하기 위해 다음의 해석과정을 행하였다.

GID 7.2를 사용하여 각각의 모형을 모델링 하였고, 각각의 요소를 지정한 후 탄성체와 압전체의 접촉면의 노드가 육면체의 형태로 동일한 형상이 되도록 meshing을 하였다. ATILA 5.2.4를 이용하여 공진모드, 공진 주파수, 변위의 크기를 계산하였다. modal 해석을 통해 공진점을 구하고, harmonic 해석을 통하여 실제 전압 인가에 따른 변위량을 구하였다. 회전자와의 접촉부인 네 접촉점에 x, y, z 방향의 변위를 구하여 원하는 진동면인 x-y상의 타원변위를 가장 크게 보이는 주파수영역을 선정하는 방식으로 모터의 동작 특성을 예측 하였다. 모든 모델은 인가전압 10 V, interval data의 step 300 Hz, 경계조건 Mid surface clamp로 동일한 조건으로 주었다. 정확한 결과를 얻기 위하여 처음에는 주파수를 20~200 kHz로 넓은 영역으로 해석한 후, 공진특성을 보이는 주파수 영역으로 좁혀서 재 해석한 결과를 검토하였다.

#### 3.1 세라믹 길이 변화에 따른 특성(FEM)

세라믹 길이 변화에 따른 기본 모델은 폭 4 mm, 세라믹 두께 0.5 mm, 탄성체 두께 0.2 mm로 정하고 세라믹 길이의 변수를 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22 mm의 일곱 개 모델을 각각 해석하였다. 해석결과

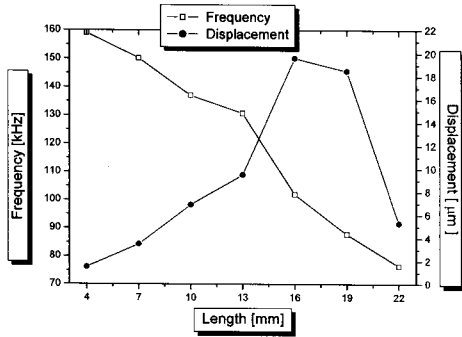


그림 3. 세라믹 길이에 따른 최대변위 주파수의 변화.

Fig. 3. Change of the frequency of maximum displacement depending on the length.

값인 공진 주파수 및 접촉점의 변위크기를 그림 3에서 보여주고 있으며 최대변위를 보이는 지점은 길이 16 mm에서 19.6 μm으로 나타났다. 공진모드를 보이는 주파수는 세라믹 길이에 반비례 하였고, 길이 16 mm의 101.91 kHz에서 최대 변위를 보이는 지점을 확인할 수 있다.

### 3.2 세라믹 폭 변화에 따른 특성(FEM)

세라믹의 길이를 16 mm로 하고 세라믹 두께 0.5 mm, 탄성체 두께 0.2 mm로 정한 후 세라믹의 폭을 2, 4, 6, 8 mm로 달리하여 해석한 결과, 공진 주파수 및 접촉점의 변위크기를 그림 4에서 알 수 있다. 폭 6 mm에서 33.4 μm로 가장 큰 변위로 나타났고, 공진모드를 보이는 주파수는 세라믹 폭에 비례하여 나타났고, 폭 6 mm의 93.81 kHz에서 최대변위를 확인할 수 있다.

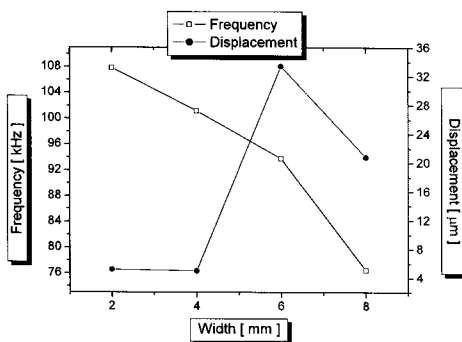


그림 4. 세라믹 폭에 따른 최대변위 주파수의 변화.

Fig. 4. Change of the frequency of maximum displacement depending on the width.

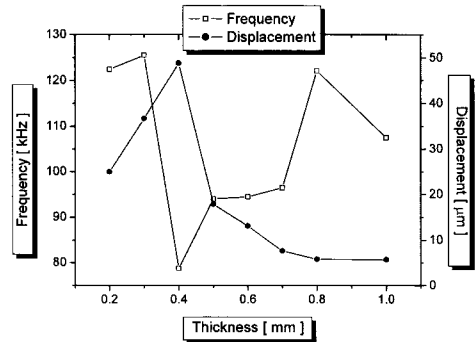


그림 5. 세라믹 두께에 따른 최대변위 주파수의 변화.

Fig. 5. Change of the frequency of maximum displacement depending on the thickness.

### 3.3 세라믹 두께 변화에 따른 특성(FEM)

세라믹 길이 16 mm, 폭 6 mm, 탄성체 두께 0.2 mm로 정한 후 세라믹 두께를 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0 mm로 달리 하여 해석한 결과를 그림 5에서 볼 수 있다. thick 0.4 모델에서 48.8 μm로 가장 큰 변위를 보임을 알 수 있고, 그 주파수는 78.75 kHz로 나타났다.

표 1. 탄성체 재질의 특성.

Table 1. Material properties of stators.

materials	Elasticity (E)	Poisson's ratio (σ)	Density (ρ)
Aluminum	$7.1E^{10}$	0.34	2780
Brass	$9.2E^{10}$	0.33	8270
Steel	$21.0E^{10}$	0.28	7800
SUS	$11.5E^{10}$	0.31	8080

### 3.4 탄성체 재질 변화에 따른 특성(FEM)

표 1과 같이 탄성체의 재질을 Aluminum, Brass, Steel, SUS로 달리하여, 세라믹 길이 16 mm, 폭 6 mm, 두께 0.4 mm로 정하여 해석한 결과를 그림 6에서 보여준다. 탄성체의 재질에 따른 접촉점의 최대변위를 보이는 모델은 Brass의 78.75 kHz에서 48.8 μm로 가장 큰 변위 값을 보였다.

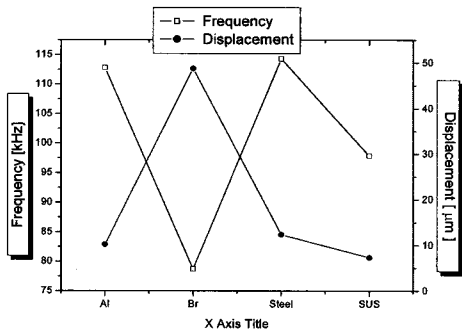


그림 6. 탄성체 재질에 따른 최대변위 주파수의 변화.

Fig. 6. Change of the frequency of maximum displacement depending on the material properties.

#### 4. 실험

##### 4.1 모터의 제작

그림 7은 초음파모터의 제작 과정을 보여준다. 두께 0.4 mm의 압전 세라믹을 다이아몬드 커터를 이용하여 가공하고, 두께 0.2 mm의 brass를 그림 6의 형태와 같이 가공하여 에폭시 접착제를 이용하여 접합한 후 전원선을 연결하였다. 제작된 스테이터의 고정은 변위의 값이 zero인 바깥면의 중심부 네 곳을 각각 고정하였다.

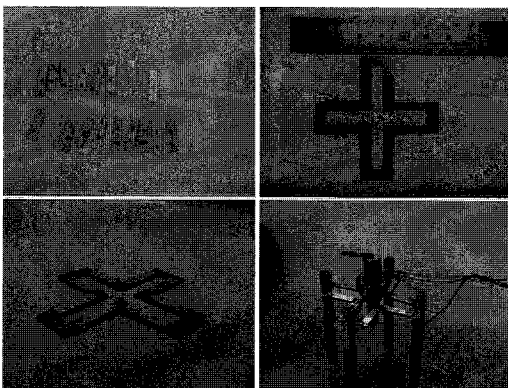


그림 7. 초음파모터의 제작.

Fig. 7. Fabrication of ultrasonic motor.

제작된 초음파모터의 특성을 측정하기 위한 장비의 모습을 그림 8에서 보여준다. 주파수발생기

(Agilent社, 33120A)에서 모터의 공진주파수인 정현파를 Phase shift를 이용하여 90도 위상차를 가지는 sin, cos파로 만들어 각각의 정현파를 Power amplifier(NF社, HSA4051)를 이용하여 증폭하여 모터에 인가하였다.



그림 8. 초음파모터의 특성측정장치.

Fig. 8. Measuring devices of ultrasonic motor.

측정 장비로 모터에 인가되는 주파수와 전압의 변화에 따른 모터의 속도와 토크를 측정한 결과를 그림 9에서 보여준다. 입력 전압의 증가에 따라서 비교적 선형적인 속도특성을 보였으며 25 Vrms에서 약 940 rpm를 보였다. 25 Vrms이상의 전압을 인가할 경우, 스테이터와 로터의 결합이 완벽하지 못한 실험 구조 때문에 정확한 측정이 힘들었다.

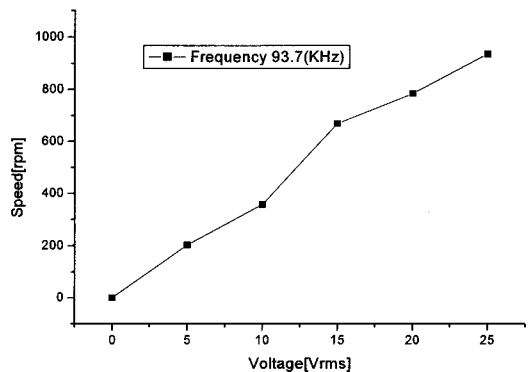


그림 9. 입력전압의 변화에 따른 속도.

Fig. 9. Speeds depend on the input voltage.

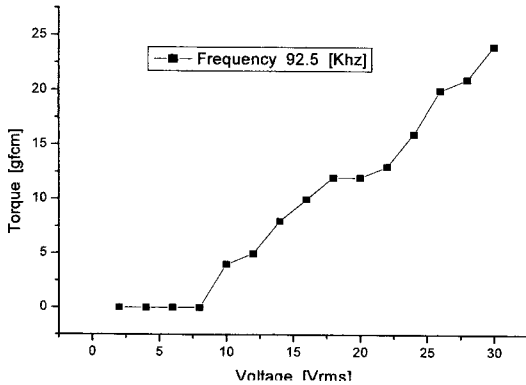


그림 10. 입력전압에 따른 토크.

Fig. 10. Toques depend on the input voltage.

그림 10은 인가전압에 따른 토크특성을 보여준다. 저전압에서는 아주 낮은 토크를 보였고, 16 Vrms에서 10 gfc, 30 Vrms에서 24 gfc가 측정되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 카메라 포커싱에 적용할 수 있는 두께가 얇은 형태인 새로운 타입의 박형 초음파 모터를 제안하였다. 최적설계를 위하여 유한요소해석 프로그램인 Atila 5.2.4를 이용하여 각각의 모델을 모델링하고 해석하여 최적설계를 하였고, 이를 제작하여 실험을 통하여 속도 및 토크 등의 특성을 측정하여 카메라 포커싱용 초음파 모터로서의 활용 가능성을 검증하였다.

기본 모델을 폭 4 mm, 세라믹 두께 0.5 mm, 탄성체 두께 0.2 mm로 정하고 첫 번째로 세라믹 길이의 변화를 주어서 가장 큰 변위를 나타내는 모델을 선정하고, 그 다음으로 세라믹의 폭, 세라믹의 두께, 탄성체의 재질 변화 순으로 유한요소해석을 하였다. 각각의 변수에 따른 해석 결과, 가장 큰 변위를 나타내는 모드는 가장 큰 어드미턴스 값을 보이는 주파수 영역이었으며 세라믹의 길이 변화 결과 길이 16 mm 모델의 101.91 kHz에서 19.6  $\mu\text{m}$ 으로 가장 큰 변위를 보였고, 공진모드를 보이는 주파수는 세라믹 길이에 반비례하였다. 세라믹의 폭 변화에 따른 특성은 폭 6 mm 모델의 93.81 kHz에서 33.4  $\mu\text{m}$ 로 가장 큰 값을 보였고, 공진모드를 보이는 주파수는 세라믹 폭에 비례하여 나타났다. 세라믹의 두께 변화 특성은 thick 0.4

모델의 78.75 kHz에서 48.8  $\mu\text{m}$ 로 가장 큰 변위를 보였다. 탄성체의 재질 변화에 따른 특성은 brass에서 가장 큰 변위를 보였다. 이상의 해석결과로서 박형 초음파 모터의 길이 : 폭 : 두께 비가 16 : 6 : 0.4 인 비율에서 밀도가 큰 brass 재질을 적용했을 때 가장 큰 변위를 보임을 확인하였고, 이 최적설계 모델을 직접 제작하여 실험한 결과 25 Vrms에서 940 rpm의 높은 속도특성을 보였고, 30 Vrms에서 24 gfc의 토크 특성을 보임으로서 카메라 포커싱을 위한 구동 액츄에이터로의 이용이 가능함을 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-D00287-103080).

## 참고 문헌

- [1] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kuroaswa, and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD, p. 4, 1993.
- [2] T. Sashida, "Trial construction and operation of an ultrasonic vibration driven motor", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, p. 713, 1982.
- [3] Y. Tomikawa, T. Takano, and H. Umeda, "Thin rotary and linear ultrasonic motors using a double-mode piezoelectric vibrator of the first longitudinal and second bending modes", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 30, p. 3073, 1992.
- [4] T. Kosawada, K. Suzuki, and T. Tomikawa, "A card sending linear ultrasonic motor using multi-beam piezoelectric vibrators", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, Vol. 2, No. 4, p. 285, 1992.
- [5] H. H. Chong, T. G. Park, and M. H. Kim, "A study on driving characteristics of the cross the ultrasonic rotary motor", Journal of Electroceramics, Vol. 17, p. 561, 2006.
- [6] M. Bexell and S. Jogansson, "Microassembly of a piezoelectric miniature motor", Journal of electroceramics, Vol. 3:1, p. 73, 1999.
- [7] 박태곤, 김명호, "압전세라믹 리니어 모터의

- 동작원리와 응용”, 전기전자재료, 14권, 4호, p. 8, 2001.
- [8] T. G. Park, B. J. Kim, M. H. Kim, and K. Uchino, "Characteristics of the first longitudinal-fourth bending mode linear ultrasonic motors", Jpn, J. Appl. Phys., Vol. 41, p. 7139, 2002.
- [9] H. W. Kim, S. Dong, P. Laoratanakul, K. Uchino, and T. G. Park, "Novel method for driving the ultrasonic motor", IEEE, Vol. 49, No. 10, p. 1356, 2002.
- [10] 정현호, 박태곤, "스테이터의 재질에 따른 Cross형 초음파 회전모터의 구동특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 891, 2005.