

## 정사각틀 초음파 모터의 변위 특성

김종욱<sup>1</sup>, 박충효<sup>1</sup>, 임정훈<sup>1</sup>, 정성수<sup>2</sup>, 김명호<sup>1</sup>, 박태곤<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교

<sup>2</sup> 경남도립남해대학

## Displacement Characteristics of the Square-frame Ultrasonic Motor

Jong-Wook Kim<sup>1</sup>, Choong-Hyo Park<sup>1</sup>, Jung-Hoon Lim<sup>1</sup>, Seong-Su Jeong<sup>2</sup>,

Myong-Ho Kim<sup>1</sup>, and Tae-Gone Park<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

<sup>2</sup> Gyeongnam Provincial Namhae College, Namhae 668-801, Korea

(Received July 29, 2011; Revised August 23, 2011; Accepted August 24, 2011)

**Abstract:** A novel design of a simple square-frame USM (ultrasonic motor) was proposed. The stator of the motor consists of a square-frame shape elastic body and four rectangular plate ceramics. The four ceramics were attached to inner surfaces of the square frame elastic body. The same phase voltages were applied to the ceramics on horizontal surfaces, and 90 degree phase difference voltage were applied to the ceramics on vertical surfaces. To find a model that generates elliptical motion at outside of the stator, the finite element analysis program ATILA was used. The analyzed results were compared to the experimental results. As result, the model EL10EH3ET0.5CL4 which generates the maximum elliptical displacement was chosen by analyzing the resonance mode according to changes in frequency.

**Keywords:** Elliptical motion, FEA (finite element analysis), ATILA, Inner surface

### 1. 서 론

산업의 발달과 함께, 현재 전반적인 산업의 구조는 고부가가치의 지식기반 산업과 높은 정밀도를 요구하는 첨단 제조업 분야를 중심으로 개편되었다. 이와 더불어 제품의 고집적도 및 생산성 향상, 정밀 제어 등의 목적 등으로 초음파모터에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 초음파모터는 기존의 전자기 모터와는 달리 새로운 원리를 이용하는 모터이다. 초음파모터는 세라믹의 압전 역효과를 기본 원리로 하여 스테이터와 슬라이더 또는 로터와의 마찰력을 이용하여 구동하는 모터로써, 자계의 영향을 받지 않으며, 접촉

식 구동으로 인한 정밀 위치 제어가 가능하다는 특징을 가진다. 또한 구조가 간단하여 소형의 사이즈를 가지는 모터분야에서 큰 장점을 가진다 [1]. 이러한 특징을 바탕으로 본 논문에서는 보다 더 단순한 구조를 가짐으로써 제작 및 공정 시간을 단축하고 소형화가 쉬운 정사각형 형태의 초음파 모터를 제안한다. 제안된 초음파모터의 공진 특성, 변위 특성 등을 파악하기 위해 압전 유한요소해석 프로그램인 ATILA를 사용하였으며, 해석 결과를 바탕으로 실제 초음파모터를 가공 및 제작하였다. 제작된 모터의 실험을 위해 초음파모터 구동 시스템을 구축하였고, 공진점에서의 초음파모터의 속도 및 토크 특성, 인가전압의 변화에 따른 모터의 속도 및 토크 특성을 확인하였다. 이를 해석 결과와 비교하여 전압 및 주파수에 의

a. Corresponding author; [tgpark@changwon.ac.kr](mailto:tgpark@changwon.ac.kr)

한 모터의 속도 및 토크 특성의 상관관계를 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 구조 및 원리

#### 2.1.1 Square-Frame 구조

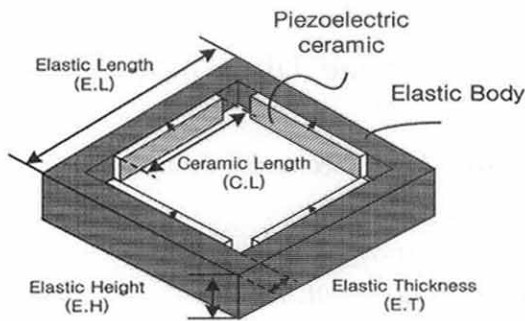


Fig. 1. Structure of the square-frame ultrasonic motor.

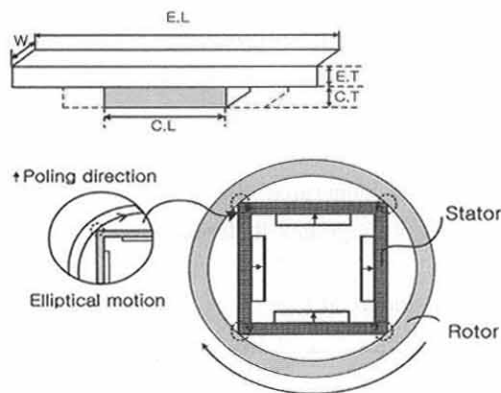


Fig. 2. Cross-section of the square-frame stator.

그림 1은 정사각틀 초음파모터의 스테이터를 나타낸다. 제안된 초음파모터의 스테이터는 정사각형 형태의 탄성체와 탄성체 안쪽 면에 부착된 4개의 압전 세라믹으로 구성된다. 그림 2는 각각 부착된 4개의 압전 세라믹의 분극 방향과 스테이터의 타원변위 발생 지점을 나타낸 것이다 [2]. 그림 2의 단면도를 기준으로 X축과 Y축에서의 세라믹은 동일한 방향의 분극 방향을 가지며 탄성체의 안쪽 면에 부착된다. 발생되는 타원변위의 경우 스테이터의 외부 4개의 모서리에서 발생되며, 스테이터의 진동이 로터에 직접적

Table 1. Material characteristics of the stator.

Size of the stator	E.L[mm]	E.T[mm]	E.H[mm]	C.L[mm]
	10	0.5	3	4 - 6
Material characteristics				
SUS303	Density	Young's module	Poisson's ration	
	8,080[kg/m <sup>3</sup> ]	19.3[10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> ]	0.31	
PZT4	Density	Qm	Poisson's ration	
	7,070[kg/m <sup>3</sup> ]	1,500	0.32	

#### 2.1.2 타원변위 발생 원리

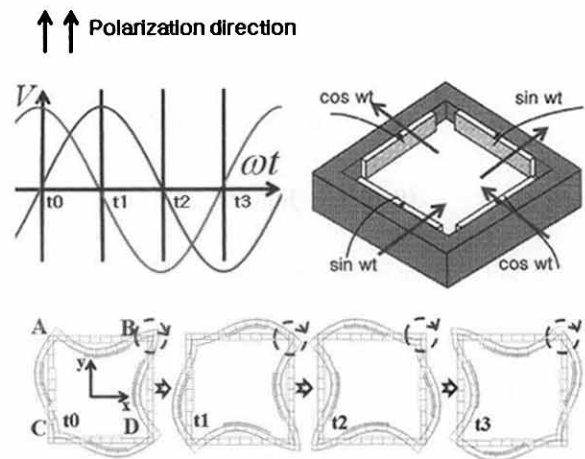


Fig. 3. Principle of the elliptical motion at the four contact point.

으로 전달하여 로터를 회전시키는 구조이다. 구성되어진 스테이터의 탄성체의 재질은 마찰에 강한 SUS303 (stainless and steel), 압전세라믹의 재질은 PZT4(PbZrTiO3) 이다. 표 1은 스테이터의 사이즈 및 재질 특성에 대해 나타낸 것이다 [3].

그림 3은 압전세라믹의 분극 방향 및 90도 위상차 인가전원에 의해 스테이터의 외부 4개의 모서리 (A,B,C,D) 에서 발생하는 타원변위를 나타낸다. 제안된 스테이터의 경우 압전 세라믹의 정재파 형태의 진동을 이용하여 X, Y축에서 발생한 정재파의 영향으로 외부 4 모서리(A,B,C,D)에서 타원변위가 발생하게 된다. 스테이터의 내부에 부착된 세라믹의 경우 X, Y축을 기준으로 동일한 축에는 동일한 분극 방향 및 동일한 위상의 전원이 인가되며, X, Y축의 세라믹에 인가되는 전원은 90도 위상차를 가진다. 인가되는 전원의 한 주기는 t0 -> t1 -> t2 -> t3 -> t0 로 반

복되며 이 주기 동안의 스테이터의 변위 형태는 그림 3과 같다.

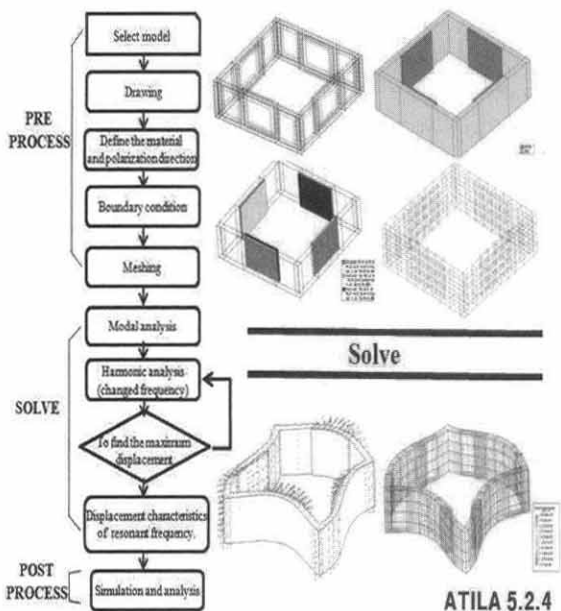
**2.2 유한요소해석**

제안된 정사각틀 초음파 모터의 진동 형상 및 변위의 크기를 확인하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ATILA를 사용하였다.

그림 4는 유한요소해석 프로그램의 처리과정을 블록 다이어그램으로 표현한 것이며, 스테이터의 설계 및 특성을 정의하는 전처리와 모터의 특성을 시뮬레이션 하기 위한 후처리로 나뉜다. modal 해석을 통해 스테이터의 공진 주파수 및 진동형상을 파악하고, harmonic 해석을 통하여 인가되는 전원 및 위상차에 따른 변위의 크기 및 형상을 파악하였다. 각각의 해석된 모델의 사이즈는 표 2와 같으며 탄성체 길이는 10[mm], 탄성체 두께는 0.5[mm], 탄성체 높이 3[mm] 고정으로 두며 세라믹의 길이를 4[mm]에서 8[mm] 까지 변화시켜 그 특성을 확인하였다 [4].

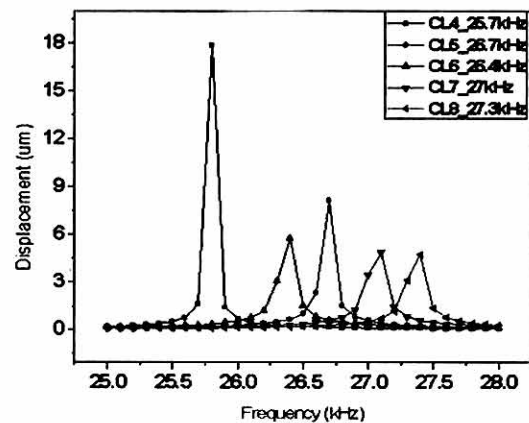
**Table 2.** Analyzed models depending on changed ceramics length.

Model	EL[mm]	ET[mm]	EH[mm]	CL[mm]
EL10ET0.5EH3CL4	10	0.5	3	4
EL10ET0.5EH3CL5	10	0.5	3	5
EL10ET0.5EH3CL6	10	0.5	3	6
EL10ET0.5EH3CL7	10	0.5	3	7
EL10ET0.5EH3CL8	10	0.5	3	8

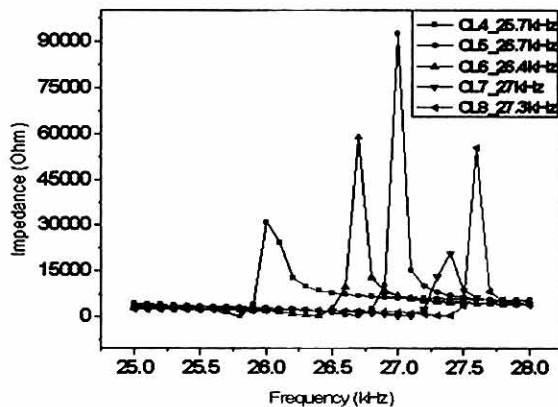


**Fig. 4.** Block diagram of finite element analysis by ATILA.

표 2를 통해 선정된 모델에 관한 유한요소해석 결과 세라믹 길이 C.L의 길이 변화에 따른 임피던스 특



**Fig. 5.** Impedance curve depending on changed ceramics length.



**Fig. 6.** Displacement magnitude at the resonance frequency.

성 곡선 및 공진점을 확인하였다. 이는 그림 5에 나타내어진다. 탄성체의 길이 두께에 대한 변수는 고정하며, 부착된 세라믹의 길이 변화에 따른 임피던스 특성곡선은 다음과 같다. 세라믹 길이 4[mm]일 때 가

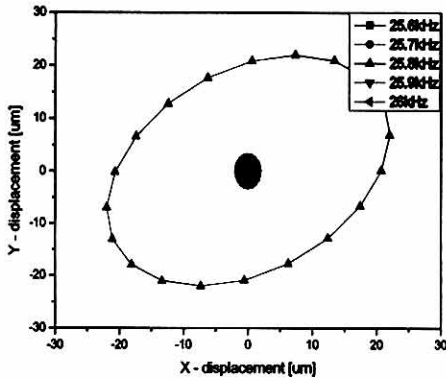


Fig. 7. Displacement characteristics depending on the nearby resonance frequency.

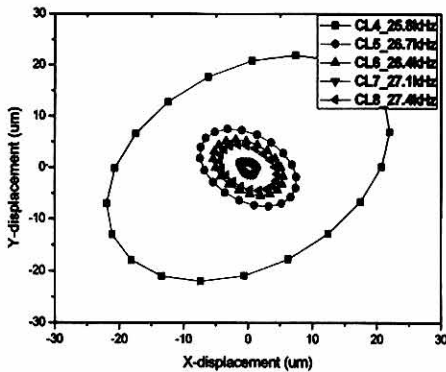


Fig. 8. Elliptical displacement depending on the changed ceramics length.

장 낮은 공진 주파수를 나타내었으며, 이후 세라믹 길이가 길어짐에 따라 세라믹 길이 8[mm] 일 때 27.3 kHz 주파수로 가장 높았다 [5].

그림 6은 세라믹 길이 변화에 따른 스테이터 내부 센터에서 발생하는 변위량을 나타낸 것이다. 실제 스테이터와 로터와 접촉하는 부분이기도 하며 이때 발생하는 변위를 통해서 로터를 회전시킨다 [6]. 그림 5에서 가장 낮은 임피던스를 가지는 점을 공진 주파수로 정의하며, 공진주파수에서 가장 큰 변위특성을 나타내었다. 이때 가장 큰 변위량을 가지는 세라믹의 길이는 4[mm]이며 이때의 공진 주파수는 25.7 kHz이다. 스테이터의 최대 변위는 임피던스가 가장 낮은 공진주파수에서 나타나며, 실제 초음파모터를 구동하기 위한 타원변위의 형태는 공진점 근처 주파수 대역에서 나타난다.

그림 7은 최대 변위량을 가지는 세라믹 길이

4[mm] 모델에 관한 공진주파수 근처 주파수 변화에 따른 타원변위 크기를 나타낸다. 공진점의 경우 가장 큰 변위량을 지나 실제 발생하는 타원 변위의 형태는 25.8 kHz에서 가장 큰 변위가 나타났다.

그림 8은 세라믹 길이 변화에 따른 최대 타원변위를 나타내는 구동 주파수 및 타원변위의 크기를 나타낸 것이다. 그림 6에서의 변위량 해석 결과와 동일하게 세라믹 길이 4[mm] 일 때의 타원변위의 형태가 가장 크게 나타나며, 세라믹 길이가 증가할수록 모델별 구동주파수는 올라갔다.

### 3. 결과 및 고찰

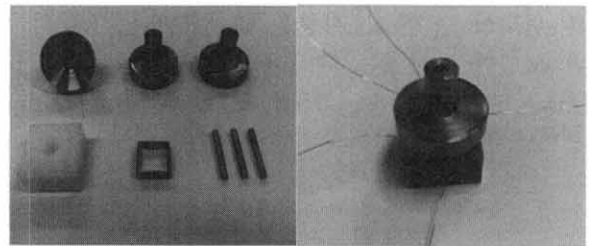


Fig. 9. Fabricated stator and ultrasonic motor.

그림 9는 제작되어진 정사각틀 초음파모터를 나타낸다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 최대 타원변위를 가지는 모델 EL10ET0.5EH4CL4를 선택하여 가공하였다. 가공된 스테이터를 고정하기 위한 케이스를 가공하였고 스테이터 외부 모서리와 접촉할 수 있는 rotor (100°-120°)를 10° 각도 별로 3개를 제작하였다. 정사각틀 탄성체에 부착된 4개의 압전 세라믹의 사이즈는 4×3[mm]의 크기를 가진다. 이는 탄성체의 내부 센터를 기준으로 X축에 부착된 2개의 세라믹의 분극 방향은 동일하며, Y축에 부착된 2개의 압전 세라믹의 분극방향과 수직을 이룬다. 압전 세라믹을 부착하기 위하여 에폭시 (Epotek)을 사용하였고 이를 가열 건조하였다. 제작된 스테이터의 수직축에는  $\sin\omega t$  전원을 인가하기 위한 전원선이 연결되고 수평축에는 이와 90도 위상차를 가지는  $\cos\omega t$  전원이 인가되는 전원선이 연결되었다. 제작된 스테이터의 구동주파수 및 인가전원에 따른 모터의 특성을 확인하기 위하여 그림 10의 실험 시스템을 구축하였다. 이는 90도 위상차의 신호를 출력하는 함수 발생기와 이를 증폭하는 증폭기, 그리고 출력 신호를 확인하기 위한 오실

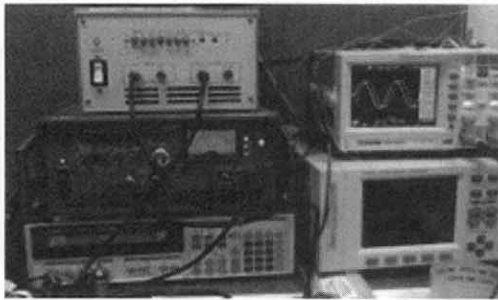


Fig. 10. Ultrasonic motor experiment system.

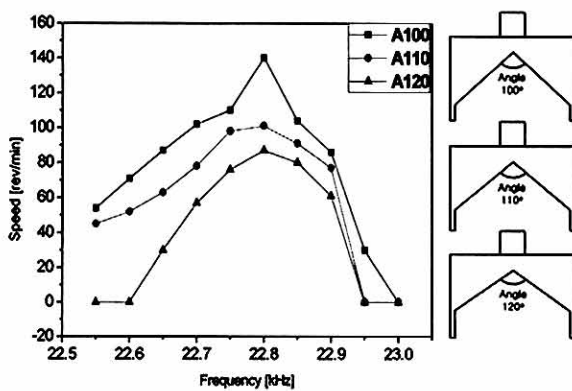


Fig. 11. Speed characteristics depending on changed angle of the rotor.

로스코프로 구성되어 있다.

초음파모터 실험 시스템을 구축으로 초음파모터에는 90도 위상차의 교류전원이 인가되며 이때 비접촉 속도 측정기와, 토크 게이지를 통해 주파수 및 인가 전압 변화에 따른 모터의 속도 및 토크 특성을 측정하였다. 또한 케이스와 결합되는 로터의 내부 각도가 100°인 A100에서 110°인 A110, 120°인 A120에 대한 속도 특성을 비교하였다.

회전자 내부 각도 변화에 따른 모터 속도 특성은 그림 11과 같다. 회전자의 내부 각도 변화에 따라 스테이터의 외부 모서리와 접촉되는 각도가 달라진다. 실제 스테이터에서 발생하는 타원변위의 형태는 X, Y축을 포함하는 타원변위를 발생하며 회전자의 내부 각도가 작아질수록 모터의 회전자와 스테이터 간의 변위 전달이 더 많아지며 이는 A100이 더 높은 속도 특성을 나타냄을 확인하였다.

그림 12는 주파수 변화에 의한 모터의 속도 및 토크 특성을 나타낸 것이다. 모터의 구동 주파수는 22.85 kHz일 때 최대 속도 145 [rpm] 최대 토크 3[ $gf/cm$ ]

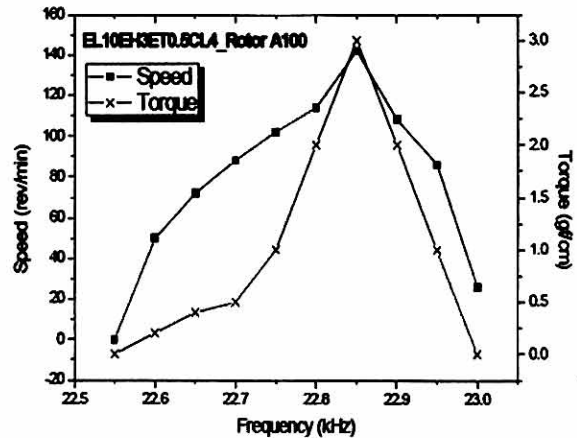


Fig. 12. Speed and torque characteristics of the motor depending on the frequency.

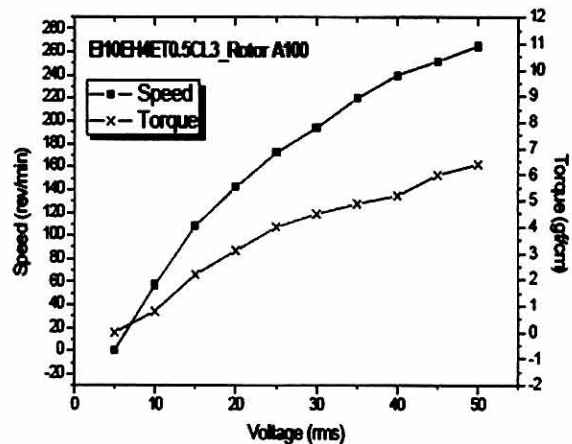


Fig. 13. Speed and torque characteristics of the motor depending on the applied voltage.

를 나타내었다. 이는 발생하는 타원변위의 크기가 모터의 속도와 토크에 영향을 미치는 초음파모터의 가장 큰 특징이다. 실험에서의 인가전압은 20 Vrms이며 스테이터의 모델은 EL10EH3ET0.5CL4, rotor의 각도는 100°이다.

그림 13은 초음파 모터의 최대 속도 및 토크를 가지는 구동 주파수 22.85 kHz는 고정으로 두고, 초음파모터에 인가되는 전압변화에 따른 모터의 속도 및 토크 특성을 나타낸 것이다. 초음파모터의 특징으로 스테이터의 발생하는 진동을 이용해 로터를 회전시킨다. 전압의 증가에 따라 발생하는 진동역시 비례적으로 증가하며 실제 실험에서 인가전압 5-50[Vrms] 까지 증가 시 모터의 속도 및 토크는 선형적으로 증가

하는 그래프를 나타내었다. 이는 인가전원에 의해 발생하는 타원변위의 크기는 모터의 속도 및 토크에 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 정사각틀 형태의 단순한 구조를 가지는 초음파모터를 제안하였다. 제안된 초음파모터는 세라믹이 부착된 각각의 외팔보의 정재파 형태의 진동을 이용하여 스테이터의 4개의 외부 무서리에서 타원변위를 생성한다. 발생하는 진동형상 및 공진주파수 특성을 파악하기 위하여 유한요소해석을 실시하였고 그 결과 최대 타원변위를 가지는 모델 EL10EH3ET0.5CLA를 선정하였다. 선정된 모델을 가공하여 제작하고, 실험을 위한 구동시스템을 구축하였다. 회전자 내부 각도 변화, 인가 주파수, 인가전압에 따른 모터의 속도 및 토크 특성을 확인하였다. 스테이터와 회전자의 결합 시, 회전자의 내부 각도가 작을수록 수직에 가까워지며 이는 스테이터의 X, Y축에서 발생하는 타원변위와 접촉하여 더 높은 속도 특성을 나타내었다. 유한요소해석 결과 주파수 변화에 따른 진동 형상 및 실제 주파수 변화에 따른 모터의 속도 및 토크 특성을 비교하였고 실제 실험에서의 구동주파수는 22.85 kHz로 나타내어졌다. 초음파 모터의 특징으로 구동주파수를 벗어나게 되면 스테이터의 타원변위는 감소하게 되며 이는 실험에서 모터의 속도 및 토크의 감소로 나타나게 된다. 인가전압의 변화 시 발생하는 타원변위의 크기는 비례적으로 증가, 감소하게 되며 실제 실험에서 인가전압의 증가 시 모터의 속도 및 토크는 선형적인 증가 곡선을 나타냄을 확인하였다.

이는 인가전압 제어를 통해 모터의 속도 및 토크 제어가 가능함을 나타낸다. 향후 모터의 보다 더 안정적인 구조 및 사이즈의 최적화를 통해 단순한 구조에서 보다 더 높은 특성을 가지는 새로운 형태의 모터 개발이 가능할 것으로 보이며, 이는 곧 소형 모터 산업에서 초음파 모터의 특수성을 이용한 산업 전반의 발전에 기여할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구에 참여한 연구자는 "2단계 BK 21 사업"의 지원비를 받았음. 본 연구는 교육과학기술부에서 시행한 「경남 창원과학연구단지육성사업」 기초·원천 R&D 과제 지원사업으로 수행되었음.

#### REFERENCES

- [1] H. H Chong and T. G. Park, *J. KIEEME*, 18, 891 (2005).
- [2] Y. Tomikawa, T. Takano, and H. Umeda. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31, 3073 (1992).
- [3] T. G. Park, B. J. Kim, M. H. Kim, and K. Uchino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 7139 (2002).
- [4] K. UCHINO, "FEM and Micromechatronics with ATILA Software" (CRC Press, Florida, 2008) p. 245.
- [5] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Applications," (Oxford, Clarendonpress, 1993) p.8.
- [6] H. Allik and J. R. Hughes, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 13, 151 (1970).