

# 스테이터의 형태에 따른 Cross형 초음파 회전모터의 구동특성

論 文  
54C-10-1

## Driving Characteristics of the Cross Type Ultrasonic Rotary Motor Dependent on Shape of the Stator

鄭 鉉 昊<sup>†</sup> · 朴 泰 坤<sup>\*</sup>  
(Hyon-Ho Chong · Tae-Gone Park)

**Abstract** - This paper studied Rotary type ultrasonic motor which has cross type stator. The stator consists of hollowed cross type metal which has four piezoelectric ceramics on the ends of cross bars. When two harmonic voltages which have 90° phase difference given to ceramics, the elliptical motion was generated in the inside tips. Inside tips are contact with rotor and these elliptical motions are rotate the rotor. The finite element analysis was used to optimize the dimension and displacement of the stator. And the analyzed results were compared with the experimental results of the motor. As results, the speed and the torque of motor was increased by increasing width of the cross bar. And the speed and torque of motor was not influenced to length of cross bar. The speed and torque was linearly increased by increasing voltage. The maximum torque was generated when the motor fabricated length of cross bar and width of ceramics in the ratio of 1:2.

**Key Words** : 초음파 모터, 압전세라믹, FEM, 압전진동모드

### 1. 서 론

PZT압전세라믹의 개발 이후 압전세라믹의 온도특성과 압전특성이 개선됨에 따라 이를 이용한 초음파 모터의 경우 다양한 형태로의 개발이 시도 되고 있고 산업화를 위한 연구 또한 활발히 진행중이다. 소형경량이고 구조가 간단하며 소음이 적고 저속에서 고 토크를 얻을 수 있으며 다양한 형태로의 이용이 가능한 초음파 모터는 두 가지 방향으로 그 개발이 진행되고 있다. 첫번째는 저속, 고 토크의 초음파 모터로서 카메라 포커싱이나 공작기계로서의 활용 가능성을 제시하고 있으며 두번째는 소형화로서 핸드폰 카메라 모듈 혹은 의료용 등으로의 활용에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 초음파 모터의 연구는 모터의 토크가 커짐에 따른 열발생, 마모의 증가, 소형화에 따른 토크의 감소 등의 문제를 가지고 있으며 이를 해결하기 위한 다양한 형태와 내구성 강화등의 연구가 진행되고 있다<sup>(1)(2)</sup>.

본 연구에서는 간단한 구조를 가지면서 열발생을 줄이고 높은 토크와 속도를 얻을 수 있는 cross형태의 스테이터를 가진 초음파 모터를 고안하여 이를 설계, 해석 하여 cross형 모터의 사이즈의 변화에 따라 스테이터에서 발생하는 변위

를 살펴보고 이 변위가 속도와 토크에 미치는 영향을 살펴 보았다.

### 2. 본 론

#### 2.1 초음파모터의 구조와 원리

그림 1에서는 본 연구에서 제작된 모터의 스테이터의 형태를 보여준다. 그림 1에서 나타낸 cross형 초음파 모터의 스테이터에 부착된 세라믹의 폭(W)과 스테이터의 cross bar의 길이(L)를 변화시켜 9개의 모델로 분류 하고 이를 해석하여 사이즈에 따른 변위특성을 살펴보았으며 나타낸 각각의 모델은 표 1과 같다. 스테이터의 높이는 모두 7[mm]이며 압전세라믹의 두께는 1[mm]이다.

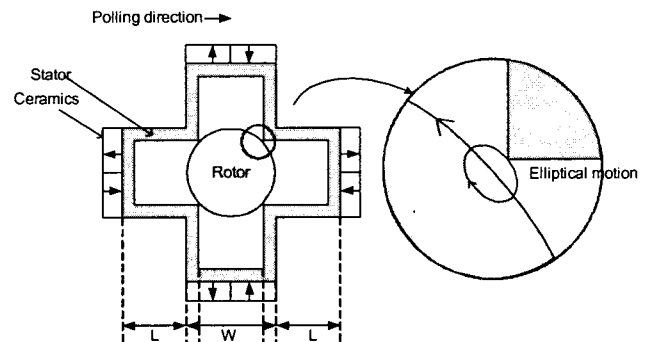


그림 1 Cross형 초음파모터의 구조  
Fig. 1 Structure of the Cross type stator

<sup>†</sup> 교신저자, 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 博士課程  
E-mail : sassy9@changwon.ac.kr

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 教授 · 工博  
接受日字 : 2005年 7月 4日  
最終完了 : 2005年 8月 19日

표 1 스테이터 모델의 크기

Table 1 Length and width of the stator

| Model  | L[mm] | W[mm] | Model  | L[mm] | W[mm] |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| L06W12 | 6     | 12    | L08W16 | 8     | 16    |
| L08W12 | 8     | 12    | L09W14 | 9     | 14    |
| L10W12 | 10    | 12    | L11W10 | 11    | 10    |
| L12W12 | 12    | 12    | L12W08 | 12    | 8     |
| L14W12 | 14    | 12    | -      | -     | -     |

이러한 두개의 보로 이루어진 스테이터의 진동은 그림 2(b)에서와 같이 두개의 다른 위상차를 갖는 전압이 각각의 세라믹에 인가되게 되면 스테이터의 보는 각각 90°의 위상차를 가지는 굽힘 진동을 일으키게 되며 이 90°의 위상차에 의해 빔은 A,B,C,D점에서 타원 궤적을 이루게 된다. 본 모터에서의 스테이터와 로터의 접촉점을 A,B,C,D라고 하면 90°의 위상차를 갖는 두개의 전압을 인가하였을 때 세라믹의 분극 방향과 인가된 전압을 고려하면 각점에서의 변위는 그림 2(b)와 같이 서로 교대로 로터에 접촉을 이루게 된다.

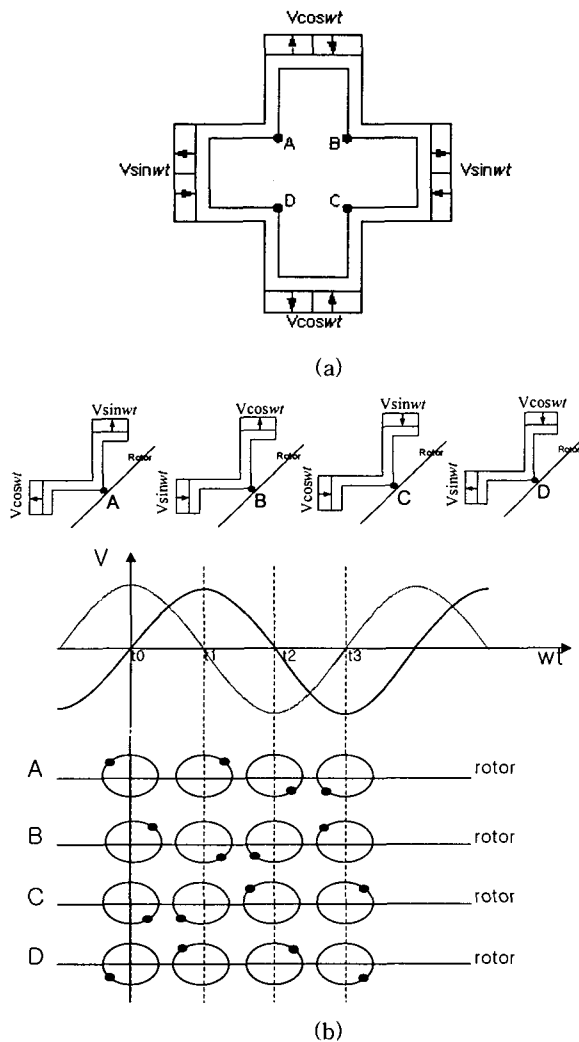


그림 2 스테이터의 접촉점에서의 타원궤적  
Fig. 2 Elliptical motions of the contact points of the stator

2.1 스테이터의 유한요소해석

설계된 모형을 바탕으로 스테이터의 폭과 길이의 변화에 대한 모터의 특성을 예측하기 위해 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 9.0을 사용하여 스테이터의 변위를 해석하였다. 해석을 위해 사용된 압전 세라믹은 Tokin 사의 NEPEC-6을 사용하였으며 스테이터의 재질은 SUS-20Cb-3을 사용하였고 그 물성치는 표 2와 같다.

표 2 스테이터의 물질상수

Table 2 Material properties of the stator

| 밀도[kg/m <sup>3</sup> ] | 영률[10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> ] | 프와송비 |
|------------------------|--|------|
| 8080                   | 19.3                                   | 0.31 |

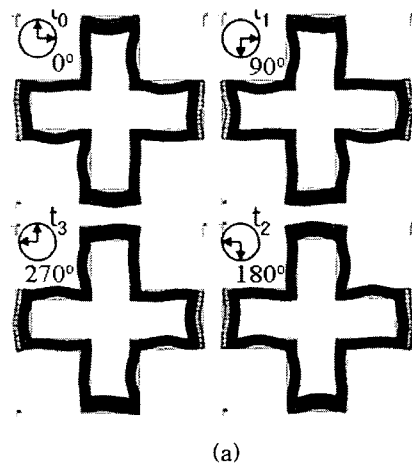
먼저 전처리 과정으로 그림 1에서와 과 같은 형태로 탄성체에 두께 1[mm]의 세라믹을 부착한 형태의 표 1의 고정자 모델들을 모델링 하였다. 표 2의 물질상수와 3차원의 coupled-field를 가지는 element-5를 이용하여 고정자 모델을 3차원 meshing 하였다<sup>[3][4]</sup>.

Modal 해석을 이용하여 스테이터의 고유진동수를 찾아내고 harmonic 해석을 이용하여 압전세라믹에 90°의 위상차를 갖는 전압을 각각의 세라믹에 인가하고 세라믹의 한쪽 면을 고정시킨 후 주파수를 변화시켜 가면서 최대변위를 나타내는 점을 찾아보았다. 표 3은 각각의 모델에서 최대 변위를 나타내는 공진 주파수를 나타내었다. 길이가 짧고 폭이 넓은 수록 높은 공진주파수를 나타내었다.

표 3 유한요소해석에 의한 공진주파수

Table 3 Resonant frequencies of the motors by FEM

| 모델     | 구동주파수[kHz] | 모델     | 구동주파수[kHz] |
|--------|------------|--------|------------|
| L06W12 | 165.7      | L08W16 | 84.50      |
| L08W12 | 138.7      | L09W14 | 76.75      |
| L10W12 | 111.2      | L11W10 | 75         |
| L12W12 | 90.5       | L12W08 | 74.75      |
| L14W12 | 76         | -      | -          |



(a)

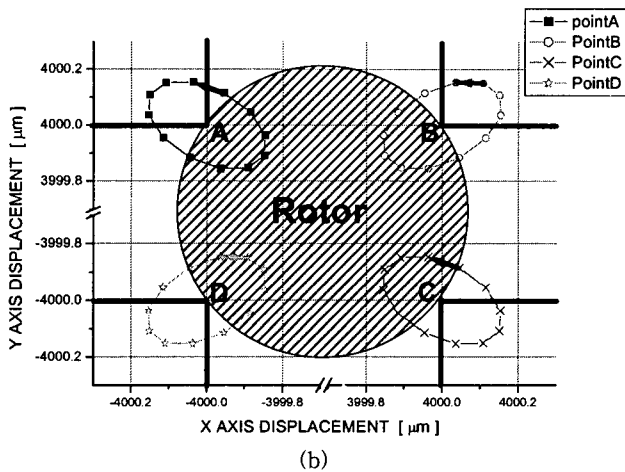


그림 3 유한요소해석의 의한 L12W12의 변위  
**Fig. 3** FEM analysis of the displacements of a motor L12W12

각 모델의 세라믹에 각각  $50\sin\omega t$ ,  $50\cos\omega t$ 의 전압을 인가하였을 때 스테이터의 끝점에서 나타나는 변위형상은 그림 3(a)와 같고 그 크기와 진행 방향은 그림 3(b)와 같다. 스테이터에서 굽힘이 그림 2에서와 같이 로터와 스테이터의 접촉부에서 차례대로 로터에 접촉을 이루므로써 로터를 시계방향으로 회전시킴을 확인할 수 있었다.

**2.3 제작 및 실험**

해석된 결과를 바탕으로 모터를 제작하기 위해 표 1에서의 크기에 맞추어 세라믹을 가공하였다. 길이와 폭이 다른 각각 3가지 모델의 탄성체에 두께 1[mm]의 압전세라믹을 접착제(353ND, Epotech社)를 이용하여 접착하였으며, 이를 silcon을 이용하여 아랫면을 고정하였다. 그림 4는 제작된 로터의 내부를 보여 주는 사진이다.

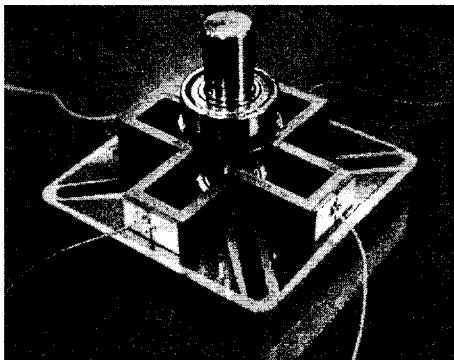


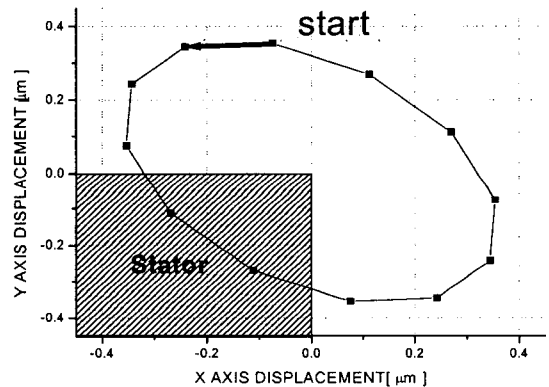
그림 4 제작된 초음파 모터(모델 L14W12)  
**Fig. 4** Fabricated ultrasonic motor (L14W12)

제작된 초음파 모터의 전압의 변화에 따른 속도를 측정하기 위해 주파수발생기(33120A, Agilent 社)에서 모터의 공진 주파수의 사인파를 인가하고, power amplifier(HSA4051,NF社)을 이용하여 증폭하였으며 동일한 파형의 전압을 phase

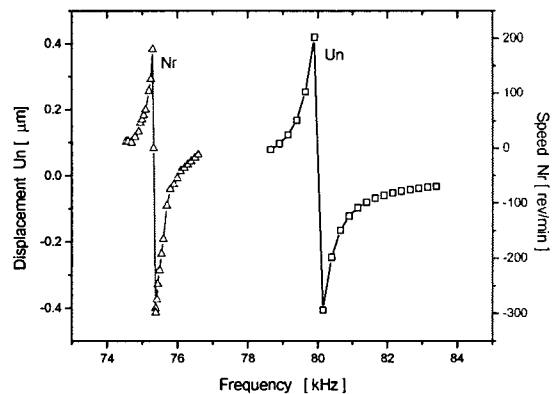
shift를 이용하여 90°의 위상차를 주어 변환하여 또 다른 power amplifier를 통해 증폭하였다. 증폭된 전압을 모터에 인가하여 공진주파수를 찾아내고 전압의 변화에 따른 속도와 토크를 측정하였다.

**3. 결과 및 고찰**

Harmonic 해석에 의한 L09W14모델의 80.15[kHz]에서 50[V] 전압을 인가하였을 때 A점(그림 2a)에서의 FEM 해석에 의한 변위를 그림 5(a)에 나타내었다. 이때의 스테이터의 변위가 로터방향으로 타원궤적을 이루며 움직이는 것을 확인할 수 있었다. 그림 5(b)는 입력전압의 주파수에 따른 스테이터의 A점에서의 로터의 법선방향으로의 변위와 제작된 모터의 회전속도를 나타낸다. 각각의 변위의 크기는 타원궤적의 회전방향에 따라 (+:cw, :ccw)로 나타내었으며 그 형태는 압전세라믹의 어드미턴스의 특성과 동일한 양상을 나타낸다<sup>[5]</sup>. 80.15[kHz]이상의 주파수에서 타원궤적의 방향이 바뀌어짐을 확인할 수 있었다. 제작된 모터에서도 주파수의 차이는 있었지만 그 회전 방향이 바뀌어 짐을 확인할 수 있었으며 타원궤적의 방향에 따라 회전 방향이 바뀌어 짐을 확인할 수 있다. 또한 그 변위의 크기는 80.15[kHz]에서 최대변위인 0.41[μm]를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 5 L09W14모델의 A점의 변위와 방향  
**Fig. 5** Rotational direction and displacement of the motor L9W14

Cross bar의 폭과 길이의 변화에 따른 변위를 그림 6에 나타내었다. Cross bar의 폭이 증가할수록 그 변위는 증가하였으나 폭이 길이의 2배 이상이 되었을 때 로터의 법선방향으로의 변위는 감소함을 보였다. Cross bar의 길이가 증가함에 따른 변위를 그림 6 (b)에 나타내었다. 그 길이의 변화에 따른 변위의 크기는 큰 차이를 보이지는 않았으나 그 길이가 길어질수록 로터와의 접선방향의 변위는 감소하고 법선방향의 변위가 증가함을 보였다. 이는 스테이터의 cross bar에서 일어나는 bar의 종진동과 횡진동에 의한 것으로 사료되어진다.[6][7]

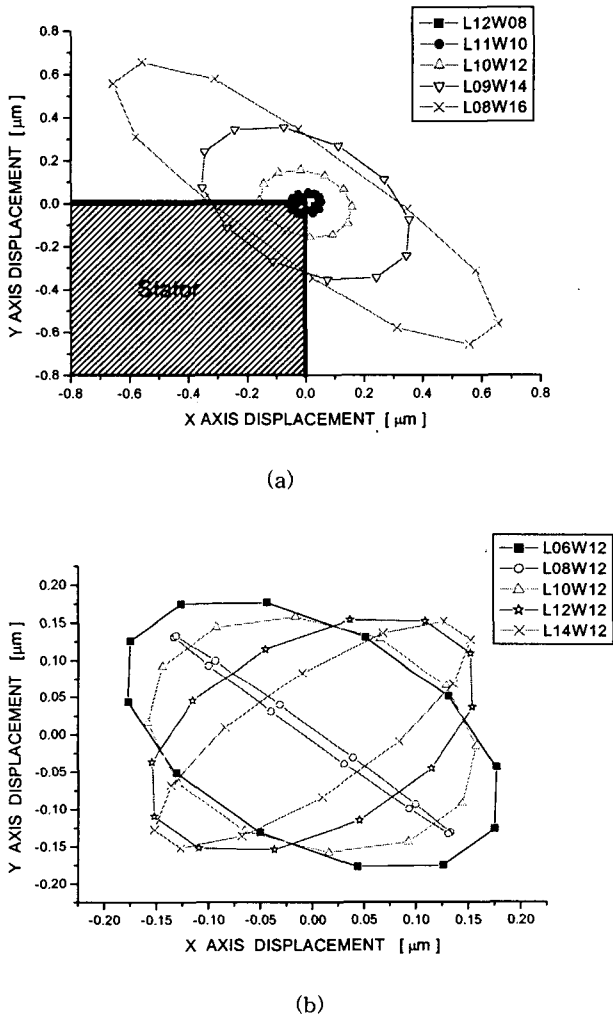
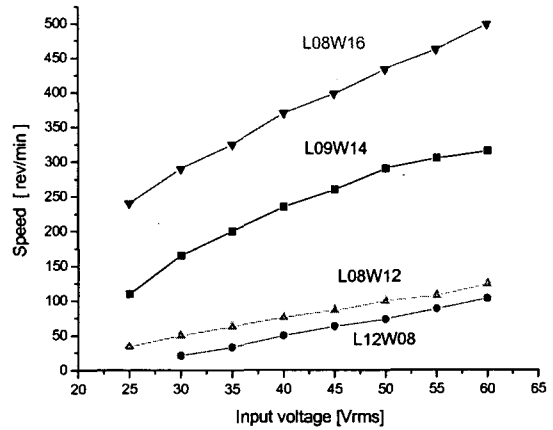
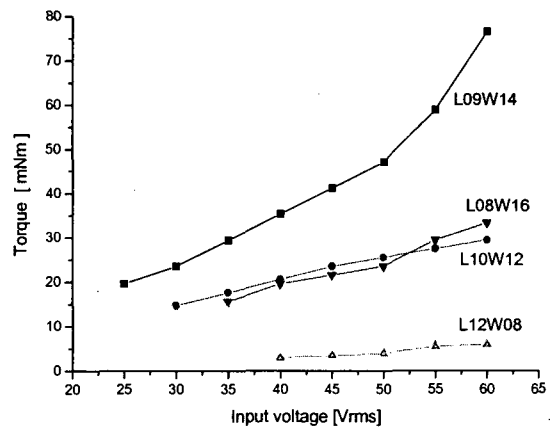


그림 6 유한요소해석에 의한 각 모델의 변위  
Fig. 6 Displacements dependent on the size of the motors

이러한 해석결과를 바탕으로 제작된 초음파 모터의 각 모델의 공진주파수에서의 입력전압에 따른 속도와 토크를 그림 7에 나타내었다. Cross bar의 폭이 증가할수록 모터의 속도가 높아졌으며 토크 또한 증가하는 양상을 보였다. 그러나 길이가 길어짐에 따른 모터의 특성변화는 특정한 변화를 찾을 수 없었다. 또한 각각의 모터에서 구동시의 온도변화는 5도 이하를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 7 각 스테이터모델의 구동특성  
Fig. 7 Driving characteristics of the fabricated motors

#### 4. 결 론

본 연구에서는 cross형태의 스테이터를 가진 초음파모터를 설계, 제작 하였고 cross bar의 형태의 변화에 따른 구동특성을 살펴보았다. 로터와 스테이터의 접촉점에서의 타원계적을 통해 로터의 회전을 얻어 낼을 유한요소해석을 통해 확인할 수 있었다. 위상의 변화와 주파수의 변화를 통해 모터의 정역회전을 얻을 수 있음을 해석을 통해 예상할 수 있었으며 제작된 초음파 모터를 통해 이를 확인할 수 있었다.

스테이터의 전체 폭을 동일하게 하고 압전세라믹의 폭을 증가 시켰을 때 폭이 증가할수록 그 로터의 접선방향의 변위는 증가하였으며 이로 인해 모터의 속도가 증가하였다. 그러나 법선방향의 변위는 세라믹의 폭의 길이가 cross bar의 길이의 2배가 되는 L09W14 model에서 가장 컸으며 토크역시 가장 컸다. 이로 미루어보다 로터와의 접선방향의 변위가 증가할수록 모터의 속도가 증가하며 법선방향의 변위가 증가할수록 모터의 토크가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 cross 형 초음파 모터의 경우 cross bar의 길이와 압전세라

믹의 폭의 비가 1:2부근일 때 최대 토크가 나타났으며 이 비율이 가장 뛰어난 토크특성을 얻을 수 있는 cross형 초음파 모터의 스테이터의 형태로 사료된다. Cross bar의 길이만의 변화에 따른 모터의 특성은 유한요소 해석 시에는 길이가 길어짐에 따라 접선방향의 변위가 줄어들고 법선방향의 변위가 증가함을 보였다. 이는 스테이터의 cross bar에서 일어나는 bar의 종진동과 횡진동에 의한 것으로 길이가 길어지면 종진동의 영향이 커지게 되어 법선방향의 변위가 증가하게 되며 길이가 짧아질 경우 횡진동이 주로 영향을 미치게 되어 접선방향의 변위가 커지는 것으로 사료되어진다. 그러나 실제 제작된 초음파 모터의 경우 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 실제적인 변위의 차이가 미소하여 제작시의 문제점(접착제의 양, 세라믹의 크기, 공진주파수)에 의해 그 변화의 확인이 불가능 하였던 것으로 보여진다. 또한 제작된 모터들을 30분 이상 구동하여 온도를 측정하였을 때 그 변화는 5[°C]이하로 매우 미소하였다.

이상의 결과를 바탕으로 cross형 스테이터를 가진 초음파 모터를 제작하였을 때 간단한 구조를 가지면서 열발생이 적었으며, 60[Vrms]의 입력전압으로 300[rev/min]의 속도와 80[mNm]의 토크의 특성을 얻을 수 있었다. 또한 cross형 초음파 모터의 크기를 줄이고 토크를 증가시키기 위해서는 cross bar의 길이를 줄이고 세라믹의 폭을 늘리는 것이 보다 유리할 것임을 확인 할 수 있었다.

**감사의 글**

본 연구는 교육인적자원부와 산업자원부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

**참 고 문 헌**

[1] Toshiku Sashida and Takashi Kenjo, " An introduction to ultrasonic motors", Oxford, pp17-23, 1993.  
 [2] 박태곤, 김명호, "압전세라믹 리니어 모터의 동작원리와 응용", 전기전자재료학회지, Vol.14, No.4, pp8-15, 2001.

[3] Allik, H., and Hughes, J. R., "Finite Element for Piezoelectric Vibration", International Journal Numerical Methods of Engineering, No. 2, pp.151-157, 1970.  
 [4] Matweb, automation creations, Inc., http://www.matweb.com, (1996-2005).  
 [5] 박창엽, "壓電 세라믹스", 김영출판사, p.25, 1987.  
 [6] Rao, S.S., "Mechanical vibration", Addison-wesley publishing company, pp511-541, 1995.  
 [7] Taegone Park, Beomjin Kim, Myong-ho Kim and Kenji Uchino "Characteristics of the First Longitudinal-Fourth Bending Mode Linear Ultrasonic Motors", J.J.A.P., Vol. 45, pp.7139-7144, 2002.

**저 자 소 개**



**정 현 호 (鄭 鉉 昊)**

1976년 12월 20일생. 2000년 창원대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2002~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.  
 Tel : 055-283-8376, Fax : 055-263-9956  
 E-mail : sassy9@changwon.ac.kr



**박 태 곤 (朴 泰 坤)**

1954년 2월 20일생. 1976년 홍익대 전기공학과 졸업. 1985년 연세대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1989~1990 일본 동경공대 객원연구원. 1998~1999 미국 Pennsylvania주립대 객원교수. 1987년~현재 창원대 전기공학과 교수.  
 Tel : 055-279-7511, Fax : 055-263-9956  
 E-mail : tgpark@changwon.ac.kr