

# 압전 세라믹스를 이용한 풍차형 초음파 전동기의 제작과 특성

논문  
10-9-4

## Fabrication of Ultrasonic Motors of Wind-Mill Type using Piezoelectric Ceramics and Its Characteristics

지승한\*, 이덕출\*, 김진수\*\*  
(Seung-Han Ji, Duck-Chool Lee, Jin-Soo Kim)

### Abstract

A miniaturized wind-mill type ultrasonic motor which has diameter in 12.7 mm and thickness in 2.0 mm using PMN-PZT piezoelectric ceramics was fabricated.

The wind-mill type ultrasonic motors has only three components ; a stator element consists of a PMN-PZT piezoelectric disk poled uniformly normal to the plate and of two wind-mill shape slotted metal endcaps, a rotor whose end is hollowed out so that its periphery fits with the shape of the stator, and a bearing to guide the rotor. A Finite Element Analysis was carried out to obtain the endcaps behavior under a radial displacement change of piezoelectric disk, and to optimize the structure of the number of slots. Increasing the applied voltage, the revolution speed of ultrasonic motors was increased. The maximum speed of 700 rpm and the maximum torque of 0.22 mN·m of the wind-mill type ultrasonic motors were obtained.

**Key words(중요용어)** : Ultrasonic motors(초음파 전동기), Wind-mill type(풍차형), Piezoelectric ceramics(압전 세라믹스), Finite Element Analysis(유한요소분석), Revolution speed(회전속도)

### 1. 서 론

전자식(electromagnetic) 전동기는 백여년 전에 개발되어 오늘날까지 사용되고 있는 매우 중요한 전기 기기이다. 그러나, 이 전자식 전동기는 1 cm<sup>3</sup> 정도의 크기 이하로 제작하기에는 어려움이 많고, 정보화 시대에 접하면서 초소형의 정보용 기기로서 전동기가 매우 많이 필요하게 되었다. 따라서, 새로운 개념의 high-power 초음파 에너지를 사용하는 전동기로서 초음파 전동기(ultrasonic motor)가 개발되기 시작했다.

초음파 전동기가 처음으로 제안된 것은 1973년에 IBM의 Barth에 의해서이며,<sup>1)</sup> 그 이후로 1980년대에 초음파 전동기에 대하여 많은 연구가 외국에서

이루어져 왔다.<sup>2)-5)</sup> 초음파 전동기를 분류하면, 그 구조에 따라 원판형(disk type), 원환형(ring type), 리니어형(linear type)이 있고, 동작 모드에 따라 정재파형(standing wave type)과 진행파형(travelling wave type) 등이 있다. 이러한 초음파 전동기의 장점으로는 간단한 구조임에도 불구하고 소형의 크기로 매우 낮은 속도에서도 큰 토크를 낼 수 있으며, 응답성이 매우 빠르고, 폭 넓은 속도 범위를 가지며, 정역전이 쉽고, 효율이 높고, 소음이 발생되지 않고, 소형 경량으로 만들 수 있고, 간단한 구조이므로 생산이 쉽고, 외부 자계나 방사선의 영향을 받지 않는 등의 장점이 많다. 그러므로 압전 세라믹스를 이용한 초음파 전동기는 의료용 기기, 정보 통신 기기의 구동 모터, 카메라의 자동 초점 조절기, 스테핑 모터의 대용, 로봇의 미세 구동 등 앞으로 응용 분야가 매우 많아질 것으로 생각된다.<sup>6)</sup> 일반적으로 초음파 전동기의 기본적인 개념 구조는 그림1에서와 같이 회전자의 면과 고정자 사이의 마찰력에 의하여 구동

\* : 인하대학교 공대 전기공학과

\*\* : 한국교원대학교 기술교육과

접수일자 : 1997년 7월 5일

심사완료 : 1997년 9월 3일

이 되는데, 즉, 고주파 전력 공급기에서 인가된 전기적 입력이 고정자 표면에서의 질점이 타원 궤도 운동을 할 때 이에 접촉되어 있는 회전자가 회전 운동을 하게 되어 기계적 출력으로 변환되는 것이다. 특히, 최근 수년 전부터 압전형 초음파 전동기에 대하여 국내에서도 연구가 이루어지고 있는데, 임기조,<sup>7)</sup> 김현재<sup>8)</sup> 등은 원환형 초음파 전동기에 대하여, 이덕출<sup>9)</sup> 등은 전동기의 응용에 관하여 논문을 발표하였다.

따라서, 본 연구에서는 PMN-PZT 압전 세라믹스를 이용하여 기존의 구조와는 다른 형태를 갖는 풍차형(wind-mill type) 초음파 전동기를 제작하고자 하며, 회전 및 토크 특성을 조사하고, 유한요소 분석(Finite Element Analysis) 방법에 의한 진동 모드 분석을 하고자 한다.

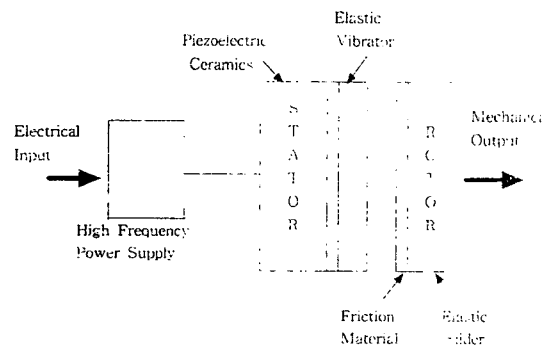


그림1. 초음파 전동기의 기본 개념도  
Fig.1. Fundamental concept of ultrasonic motors

## 2. 실험 방법

### (1) PMN-PZT 압전체의 제조와 물성

본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기의 고정자로는 PMN-PT-PZ 압전 세라믹스를 사용하였는데, 시편의 조성은 0.125Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-0.435PbTiO<sub>3</sub>-0.44PbZrO<sub>3</sub>으로 하여 MnO<sub>2</sub>를 0.5 wt% 첨가한 것이며, 시편의 제조 과정은 일반적인 압전 세라믹스와 마찬가지로 혼합, 하소, 분쇄, 성형 공정을 거쳐 1270℃에서 2시간 동안 소결 하여 시편을 얻었는데,<sup>10)</sup> 초음파 전동기의 제작에 사용한 압전 세라믹스의 주요한 물리적 특성을 표1에 나타냈다. 표에서 보는 바와같이 초음파 전동기의 고정자로 사용한 압전체의 유전 손실은 0.82 %로 매우 작았고, 경방향의 전기기계결합계수는 55.1%로 높았고, 기계적품질계수 값도 886으로 높게 나타났기 때문에, 초음파 전동기의

고정자로서 적당한 재료라고 생각된다. 특히, 본 조성으로 초음파 전동기의 고정자를 만든 이유는, high power 인가시 진동자 내부에서 큰 손실이 발생하기 때문에, 유전 손실이 매우 작고 기계적 품질계수가 큰 것이 적당하기 때문이다.

표 1. 초음파 전동기의 제작에 사용된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 유전 및 압전 특성

Table 1. Dielectric and piezoelectric properties of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics used ultrasonic motor fabrication

Properties	constant
density (g/cm <sup>3</sup> )	7.71
dielectric constant	570
dielectric loss (%)	0.82
piezoelectric coeff., d <sub>33</sub> (pC/N)	222
voltage coeff., g <sub>33</sub> (10 <sup>-3</sup> Vm/N)	44
Remanent Polarization, Pr (μC/cm <sup>2</sup> )	19.18
Coercive Field, Ec (kV/cm)	9.63
EM coupling Factor, kp (%)	55.1
Mechanical quality Factor, Qm	886
Curie temp (°C)	307

### (2) 풍차형 초음파 전동기의 제작

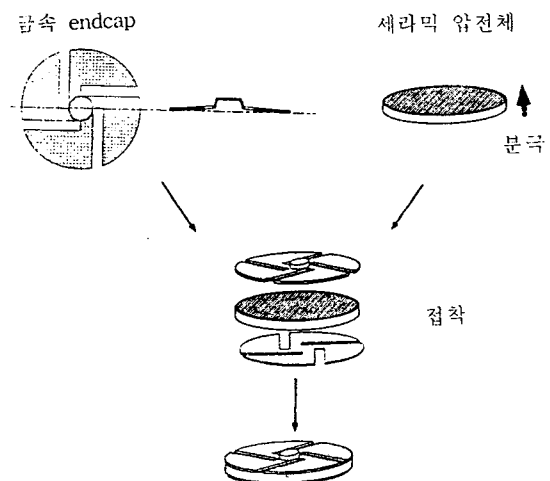


그림 2. 압전 세라믹스와 brass endcaps을 사용한 풍차형 초음파 전동기의 제작  
Fig. 2 Fabrication of ultrasonic motors of wind-mill type using piezoelectric ceramics and brass endcaps

초음파 전동기의 제작에 사용한 PMN-PZT 압전체의 직경은 12.7 mm이고 두께는 2.0 mm의 원판형이며, 이 압전체는 소결 및 분극 과정을 마친 것이다. 그리고, 그림2에서와 같이 brass 금속봉을 이용하여 4개의 슬롯(slot)을 갖도록 풍차형(wind-mill type)으로 적당하게 가공된 brass endcaps의 직경은 압전체와 같은 12.7 mm이며 두께는 0.2 mm 정도로 하였다. Endcaps의 중앙부분은 회전자가 접촉될 수 있도록 가공하였다. 이 세라믹 압전체와 brass endcaps을 전기인두를 사용하여 접착시키면 초음파 전동기의 고정자가 만들어지며, 이 고정자의 제작 공정도를 그림2에 나타냈다. 그리고 완성된 초음파 전동기의 구조를 그림4에 나타냈다. 특히 회전자 구조는 다른 초음파 전동기에 비하여 크기가 작기 때문에 제작이 간편하고 별도의 고분자 마찰재(lining materials)가 없이도 고속 회전이 가능하다.

(3) 측정

제작한 풍차형 초음파 전동기의 회전수 및 토크 측정을 위하여 그림3과 같은 시스템을 구성하였고, 사용된 계기 및 장치로는 15 MHz function generator (HP33120A), high speed power amplifier(4005, NF electronic instruments, Japan), 100 MHz oscilloscope(HP54600B), digital tachometer(Japan), impedance/gain-phase analyzer(HP4194), XYZ control stage(micro control, France) 등이다. 이때 함수발생기를 이용하여 고주파 신호를 발생시켜, 이 고주파 신호를 고속 전력 증폭기로써 원하는 전압의 크기까지 증폭시켜서 초음파 전동기의 고정자에 인가하였다. 이때 전기적 입력을 인가하기 위하여 가스에나멜 동선을 사용하여 납땜으로 접속하였다. 인가 전압에 따른 초음파 전동기의 회전 속도 측정을 위하여는, 전동기를 실험대 위에 수직하게 놓은 상태

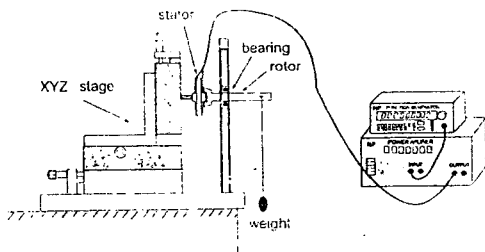


그림 3. 초음파 전동기의 특성측정장치  
Fig. 3 Experimental setup for measuring of ultrasonic motors characteristics

에서 하였으며, 토크 특성의 측정을 위하여는 그림3과 같은 측정 시스템을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기의 구조를 그림 4에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 구조가 매우 간단한데, 기존의 원환형 초음파 전동기는 링 형태로 압전체를 가공하기가 번거롭고, 회전을 위하여는 2상 교류(two-phase)의 고주파 신호를 인가하여야 하지만, 본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기는 단상(single-phase)의 고주파 신호를 가하기만 하면 된다.

풍차형 초음파 전동기의 구조가 간단한 이유는, 세라믹스와 금속을 접착시켜서 매우 큰 변위를 얻을 수 있는 moonie형 액츄에이터를 A. Dogan 등이<sup>11)</sup> 개발하게 된 것에서 착안하게 된 것이다. 즉 moonie형 액츄에이터는 진동체의 변위를 두께 방향으로 최대로 하기 위하여 PZT 압전체에 brass endcap을 상하로 접착시킨 구조를 갖는다.

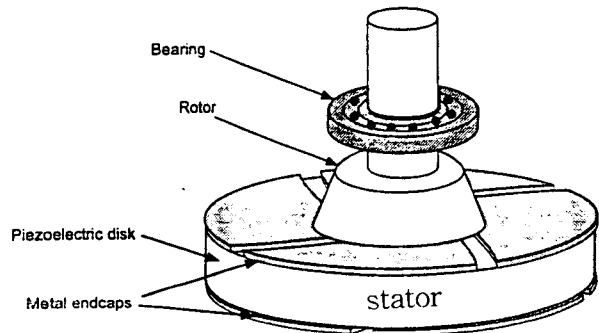


그림 4. 풍차형 초음파 전동기의 구조  
Fig. 4 Structure of the ultrasonic motors of wind-mill type

이 풍차형 초음파 전동기의 동작 특성과 FEA 특성을 설명하면 다음과 같다. 압전체 양면의 전극에 brass endcaps가 물리적으로 접착되어 있는 고정자(stator)에, 함수 발생기와 고속 전력 증폭기(high speed power amplifier)를 통하여 경방향 모드의 공진 주파수를 인가하면 압전체 자체가 경방향으로 초음파 진동을 발생한다. 이 때 압전체의 양면에 접착되어 있는 두 개의 상하 brass endcaps은 서로 45°만큼 어긋나게 위치하고 있으므로, 압전체의 경방향

진동은 결국 longitudinal과 torsional 변위로 동시에 바뀌게 된다. 이들 longitudinal과 torsional 변위가 서로 중첩 결합함으로써 압전 세라믹스의 윗부분에 있는 endcaps의 내부원 주변에서 타원 운동이 발생된다.

또한, endcaps 위에 회전자(rotor)가 접촉되어 있으므로, 고정자인 endcaps의 초음파 진동과 회전자 사이에 마찰의 상호 작용 때문에 회전자가 회전운동을 하게 되는 것이다. 이 때 압전체가 경방향 진동을 할 때에 brass endcaps의 진동 변화를 자세히 알아보기 위하여 유한요소분석(Finite Element

Analysis)을 한 결과를 그림 5에 나타냈다. 단, 이 분석은 ABAQUS ver5.4를 이용하여 endcaps의 Z축 방향에서만의 변화를 본 것이며, 차후에는 2차원 및 3차원의 보다 더 정확한 FEA가 되어야 할 것으로 생각한다.

즉, 고정자는 그림 5의 번호 순서대로 작동하고 있는 것이며, 처음의 상태에서 출발하여 ④번의 경우와 같이 초음파 진동이 발생할 때 endcaps의 경방향으로 최대 변위가 발생되었다가 ⑧번에서와 같이 원래의 상태로 되돌아감으로써, endcaps에 접촉되어 있는 회전자가 마찰력에 의해 회전할 수 있음을 알 수 있다.

일반적으로, 원판형 및 원환형 초음파 전동기의 동작 원리와 해석에 대하여는 여러 해 동안에 걸쳐서 외국에서 많은 발표가 있어 왔다. 그런데, 풍차형 초음파 전동기의 구조와 원리에 대하여는 그림4와 5에서 설명하였지만, 그 동작 원리와 메커니즘에 대하여는 보다 더 정확한 초음파 진동의 해석이 필요하다고 생각하는데, 그 이유를 그림 6의 공진-반공진 특성 곡선에서 설명하고자 한다.

그림 6(a)는 그림2에서 압전체 제조를 위하여 분

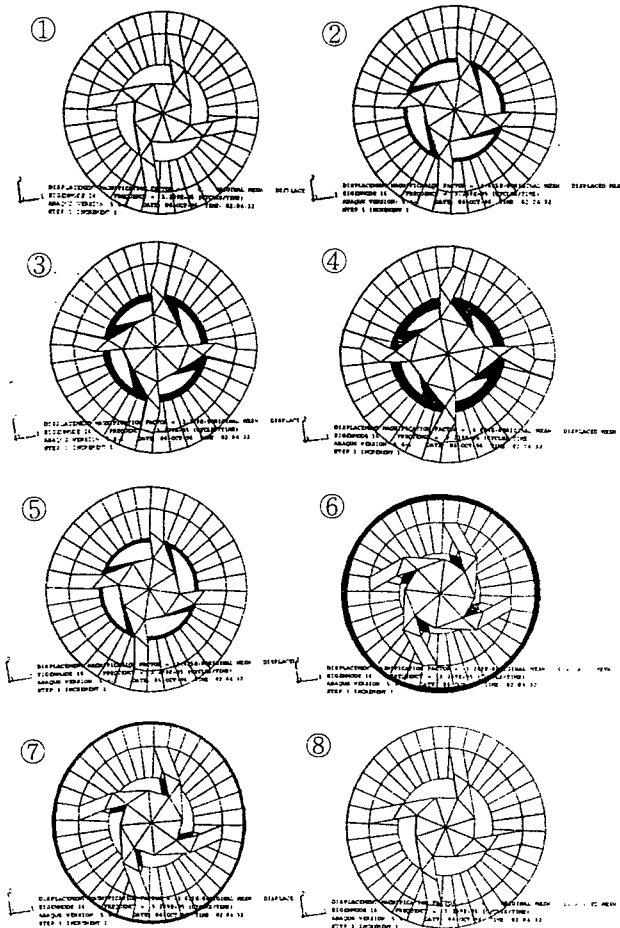
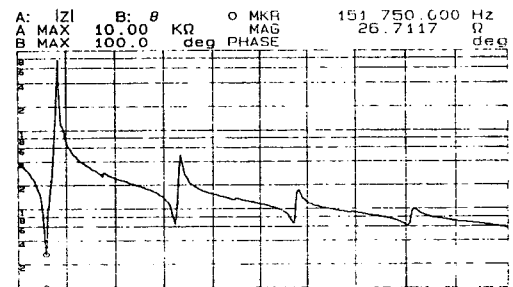
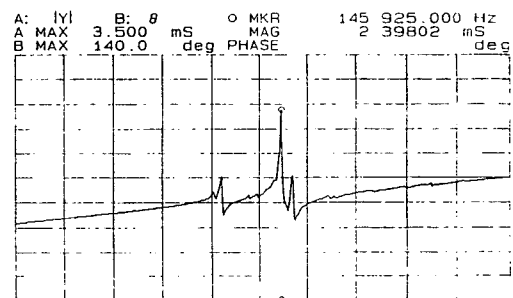


그림 5. 압전체가 경방향 진동할 때 위에서 본 금속 endcaps의 특성 분석

Fig. 5 Metal endcaps behavior when piezoelectric ceramics vibrates to radial mode of top view



(a)



(b)

그림 6. 초음파 전동기의 진동 모드 특성 (a) 압전 세라믹스 (b) 고정자

Fig. 6 Vibration mode characteristics of (a) piezoelectric ceramics (b) stator

극 공정까지 마친 PMN-PZT 압전 세라믹스의 경방향 진동 모드를 나타낸 것이다. 임피던스 분석기를 사용하여 측정된 경방향 진동의 공진 주파수는 151.75 kHz로 나타났으며 공진 특성 곡선도 양호하게 나타났지만, 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 압전 세라믹스에 endcaps를 접착시킨 후 측정된 경방향 진동의 공진 주파수는 145.925 kHz로 약간 바뀔 때 공진 특성 곡선도 약간 다르게 나타남을 알 수 있다. 이는 단순한 경방향 진동만이 아니고 2개 이상의 서로 다른 진동 모드가 중첩되어서 초음파 진동으로 나타나는 것이라고 생각되며, 이 부분에 대한 자세한 초음파 진동의 메커니즘 규명이 차후에 필요하다고 생각한다.

아올러, C. Peclat 등의<sup>12)</sup> 연구에 의하면, 타원 형태로 두 개의 풍차형 날개를 갖는 초음파 전동기의 경우에서도 1차원적인 FEA 방법으로 진동 모드를 해석하고자 하였으며, 보다 많은 연구의 필요성을 제시하였다.

다음은 본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기의 인가전압에 따른 무부하 회전 특성을 그림 7에 나타냈다. PMN-PZT 압전체의 직경은 12.7 mm이며, 이 때 초음파 전동기에 가한 전압이 증가할수록 무부하 회전속도는 비례적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 인가 전압이 40 V<sub>p-p</sub>일 때는 290 rpm 정도가 되었지만, 100V<sub>p-p</sub>일 때 초음파 전동기의 회전수는 약 700 rpm이 되었다.

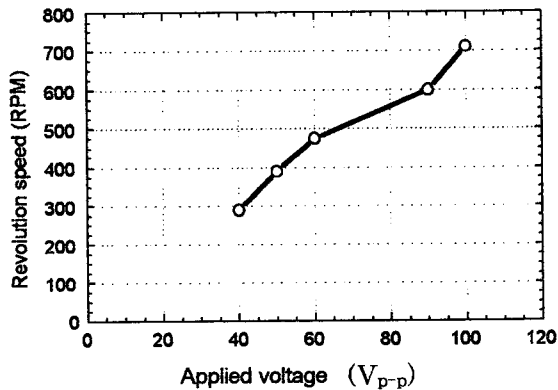


그림 7. 초음파 전동기의 인가 전압에 따른 회전 특성

Fig. 7 Revolution characteristics as a function of applied voltage of the ultrasonic motors

그림 8은 앞에서 설명한 측정 시스템을 사용하여 얻은 토크와 회전속도 특성이다. 이 때의 인가 전

압은 그림 7의 특성 곡선을 바탕으로 100V<sub>p-p</sub>로 하여 경방향 모드의 공진 주파수 영역에서 초음파 진동이 발생되도록 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 초음파 전동기의 회전수와 토크는 반비례 관계에 있음을 알 수 있으며, 회전수가 160 rpm일 때 최대 토크 0.22 mN·m를 얻을 수 있었다.

이상과 같이 본 연구에서는 PMN-PZT 세라믹스와 brass endcaps를 사용하여 새로운 모델의 풍차형 초음파 전동기를 시제작하여 간단한 회전 특성을 알아보았으며, 차후에는 보다 상세한 초음파 진동의 메커니즘 규명 등의 연구가 이루어져야 할 것이라 생각한다. 특히 세라믹 압전체와 금속 endcaps의 접착 조건 및 고정자의 slot 수와 크기 등에 관하여도 추후 연구하여 발표할 예정이다.

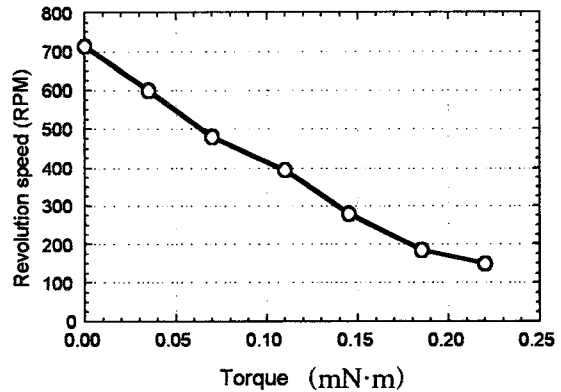


그림 8. 초음파 전동기의 토크와 회전 특성  
Fig. 8 Revolution characteristics as a function of torque of the ultrasonic motors

#### 4. 결 론

본 연구에서는 MnO<sub>2</sub>가 첨가된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스 압전체를 이용하여 풍차형 초음파 전동기를 제작하였다. 이 초음파 전동기는 매우 간단한 구조로 소형화할 수 있었으며, 직경 12.7 mm의 압전체와 brass endcaps를 사용하여 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이 초음파 전동기는 151 kHz 영역의 경방향 진동을 이용하여 초음파 진동을 발생하였으며, FEA 분석을 통하여 endcaps의 동작 상태를 알아보았다.
2. 초음파 전동기에 가한 전압이 증가할수록 회전자의 회전속도도 증가하였다.
3. 인가 전압이 100V<sub>p-p</sub> 일 때 초음파 전동기의 회전수는 약 700 rpm이 되었다.

4. 100V<sub>p-p</sub>의 전압을 인가한 상태에서 회전자의 회전수와 토크는 반비례 관계가 되었으며, 회전수가 160 rpm일 때 최대 토크는 0.22 mN·m가 되었다. 이상의 결론에서와 같이 새로운 모델인 풍차형 초음파 전동기의 동작 메커니즘 등에 관한 자세한 해석에 대하여는 계속해서 연구되어야 할 과제로 생각한다.

### 참 고 문 헌

1. H. V. Barth, "Ultrasonic driven motor", IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 16, No. 7, p.2263, 1973
2. T. Sashida, "A prototype ultrasonic motor-principles and experimental investigations", Applied Physics, 51, pp.713-720, 1982
3. A. Kumada, "A piezoelectric motor", Jpn. J. Appl. Phys., 24, Suppl.24-2, pp.739-741, 1985
4. Y. Tomikawa, T. Ogasawara, T. Takano, "Ultrasonic motors constructions/ characteristics/ applications", Ferroelectrics, 91, pp. 163-178, 1989
5. K. Uchino, K. Kato, M. Tohda, "Ultrasonic Linear Motors using a Multilayered Piezoelectric actuator", Ferroelectrics, 87, pp.331-334, 1988
6. T. Sashida, T. Kenjo, An introduction to ultrasonic motors, Clarendon press, Oxford, pp.17-24, 1993
7. 임기조 외, "원환형 압전세라믹의 굴곡 진동 모드를 이용한 초음파 모터의 특성", 전기학회 논문지, 43권, 8호, pp.1293-1299, 1994
8. 김현재 외, 압전 초음파 모터의 개발, 과학기술처 연구 보고서, 1993
9. 이덕출 외, "L<sub>1</sub>-B<sub>2</sub> 다중모드 압전 진동자를 이용한 초음파 모우터의 특성과 카드 이송 장치에의 응용에 관한 연구", 전기학회 논문지, 42권, 4호, pp.39-46, 1993
10. Jin-Soo Kim, Kenji Uchino, "Effect of sintering temperature on piezoelectric properties in 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics for ultrasonic motor applications", 19th ICAT Smart Actuator Symposium, State College, PA, USA, Oct. 7, 1996
11. A. Dogan, K. Uchino, et al, "High displacement

ceramic metal composite actuators moonie", Ferroelectrics, vol.156, pp.1-6, 1994

12. C. Peclat et al, "Single phase piezoelectric motor with sensorless position detection", 5th Int'l Conf. on New Actuators, Bremen, Germany, pp.221-224, 1996.6

### 지자소개

#### 지승한

1969년 8월 2일생. 1991년 경원대 공대 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



#### 김진수

1960년 9월 6일생. 1986년 2월 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1988년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 8월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년 1월-1997년 1월 미국 Pennsylvania State University의 MRL에 Visiting scholar. 현재 한국교원대학교 기술교육과 조교수.



#### 이덕출

1939년 1월 22일생. 1963년 2월 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1966년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년 9월 일본 나고야대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1981년 8월-1982년 7월 일본 나고야대학 전기공학과 방문교수. 1995년 1월-12월 한국전기전자재료학회 감사. 1997년 현재 인하대학교 전기공학과 교수 및 공대학장.

