

# 풍차형 구조를 갖는 초음파 전동기의 회전 특성에 관한 연구

論 文  
48C - 10 - 1

## A Study on the Revolution Characteristics of the Ultrasonic Motor with Windmill Type Structure

金 鎮 洙\* · 李 德 出\*\*  
(Jin-Soo Kim · Duck-Chool Lee)

**Abstract-** In this study, a windmill type ultrasonic motor operated by single-phase AC electric field was fabricated, and then revolution characteristics and 3-dimensional vibration mode of the ultrasonic motor were investigated. Brass metal was pressed with umbrella-type using metal mold, then slot of 4 kind was processed at various thickness. It was found that the revolution speed of the ultrasonic motor increased with decreasing the thickness of elastic body. The revolution speed of the ultrasonic motor increased with increasing the slots of elastic body. When the characteristics was measured, applied voltage was changed from  $10V_{max}$  to  $100V_{max}$ . Then, revolution was began from  $30V_{max}$ , if voltage was applied over  $90V_{max}$ , revolution speed was saturated, and not increased. The maximum revolution speed was 510[rpm] when using elastic body with 6 slots and thickness of 0.15mm. And 3-dimensional displacement mode was rotated clockwise direction.

**Key Words :** ultrasonic motor, windmill type, revolution speed, elastic body, 3-dimensional vibration mode

### 1. 서론

압전 세라믹스를 이용한 초음파 전동기(ultrasonic motor)는 정밀 제어 및 구동용으로 이용될 수 있는 차세대형의 전동기로서 여러 분야에서 매우 각광을 받을 것으로 생각된다. 특히 기존의 전동기로는  $1 \times 1 \times 1$ cm크기의 L-형 제작이 불가능하므로 이를 해결하기 위하여 압전 초음파 전동기의 연구가 진행되고 있다. 따라서 이에 대한 구조 및 특성에 관하여는 꾸준히 연구가 보고되고 있으나 완전한 메카니즘의 규명에는 이르지 못하고 있는 실정이다.

초음파 전동기는 1973년에 최초로 Barth에 의하여 제안되었는데, 이는 회전자에 접촉되어 있는 고정자의 혼(horn)을 2개의 압전 진동자에 의하여 진동시킬 때 발생하는 마찰력을 매개로 하여 회전자를 구동시켰으며, 그 후 1976년에 Lavrinenco에 의하여 비슷한 원리에 의한 초음파 전동기가 제안되었지만 여러 가지 문제점이 많아 실용화에 이르지 못했다[1,2].

그러던 중 압전 진동자의 진동에 의한 진행파가 진동편을 전파할 때, 그 표면 질점에서의 타원 운동을 이용한 진동편형(wedge-type)의 실용적인 초음파 전동기에 대한 연구가 1982년 Sashida에 의해 수행된 이래 초음파 전동기에 대해서 연구가 진행되어 왔으나 대부분의 연구는  $90^\circ$  위상차를 갖는 2상(two-phase)의 고주파 교류 전원이 필요한 초음파 전동기에 대한 것들이었다[3,4,5]. 그러나 본 연구에서는 반경 진동 모드(radial mode)와 비틀림 진동 모드(torsional mode)의 결합에

의해 회전하게 되는 원판형(disk type) 초음파 전동기의 개량형체인 단상 교류(single-phase AC) 구동의 풍차형(windmill type) 초음파 전동기를 제작하였으며, 차후 정보기기 분야와 같은 정밀 제어가 가능한 초소형의 새로운 초음파 전동기를 개발하고자 하는 것을 목적으로 수행되었다. 본 연구에서는 초음파 전동기의 회전 특성과 3차원의 진동 모드를 측정했다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험 방법

본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기는 크게 고정자와 회전자로 구성되어 있다. 고정자(stator)는 원판형의 압전 세라믹스와 금속 탄성체의 결합체이며, 회전자(rotor)는 고정자의 금속 탄성체와 같은 재료의 황동을 이용하여 우산 형태로 제작했다. 본 연구에 사용된 압전 세라믹스는 0.05PMN-0.95PZT에 0.7wt%의  $MnO_2$ 를 첨가하여 만들었으며, 유전손(dielectric loss), 경방향의 전기기계결합계수(electromechanical coupling factor of radial mode), 기계적 품질계수(mechanical quality factor)는 각각 0.2%, 62.8% 및 820이며, 구체적인 압전재료의 물성은 표 1에 나타났다.

초음파 전동기의 특성을 가장 크게 좌우하는 부분은 고정자의 압전체와 탄성체이다. 그림 1은 초음파 전동기 고정자의 제작 과정을 나타낸 것인데, 황동 탄성체의 두께는 각각 0.15, 0.2, 0.25, 0.3mm의 것을 사용하였으며, 압전체와 탄성체를 접착하여 풍차형 초음파 전동기의 고정자를 제작했다. 이 때 접착제는 금속과 세라믹스와의 접착성이 좋은 상온 경화 2 type 에폭시 수지(에폰스 화학공업)를 사용했다.

\* 正 會 員 : 韓 國 教 員 大 技 術 教 育 科 副 教 授 · 工 博

\*\* 正 會 員 : 仁 荷 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1999年 3月 4日

最 終 完 了 : 1999年 9月 2日

2.2 특성 측정 방법

이와 같이 제작한 풍차형 초음파 전동기의 회전 특성 및 3차원 진동 모드를 측정하기 위해서 그림 2와 같이 시스템을 구성했다. 우선 함수발생기(HP33120A)에서 나온 초음파를 고속 전력증폭기(NF4015)에서 전압의 크기를 고속으로 증폭시켜 초음파 전동기를 구동시킨다. XY stage(micro control, USA)를

표 1 풍차형 초음파 전동기 제작에 사용된 0.05PMN-0.95PZT 압전 세라믹스 재료의 물성

Table 1 Material properties of 0.05PMN-0.95PZT piezoelectric ceramics for fabricating of the ultrasonic motor

property	symbol	unit	constant
dielectric constants	$\epsilon'_{33}/\epsilon_0$		1500
curie temperature	$T_c$	°C	325
resonant frequency	$f_r$	kHz	192
dissipation factor	$\tan \delta$	%	0.2
EM coupling coefficient	$k_p$	%	62.8
EM coupling coefficient	$k_{31}$	%	36.5
mechanical quality factor	$Q_m$		820
elastic compliance	$s_{11}^E$ (at E=0)	$[m^2/N] \cdot 10^{-12}$	13.15
piezoelectric coefficient	$d_{31}$	$[pC/N]$	138
voltage coefficient	$g_{31}$	$[Vm/N] \cdot 10^{-3}$	13.0
capacitance	C	pF	1032
resistance	R	$\Omega$	2.5
sintering temperature	T	°C	1200

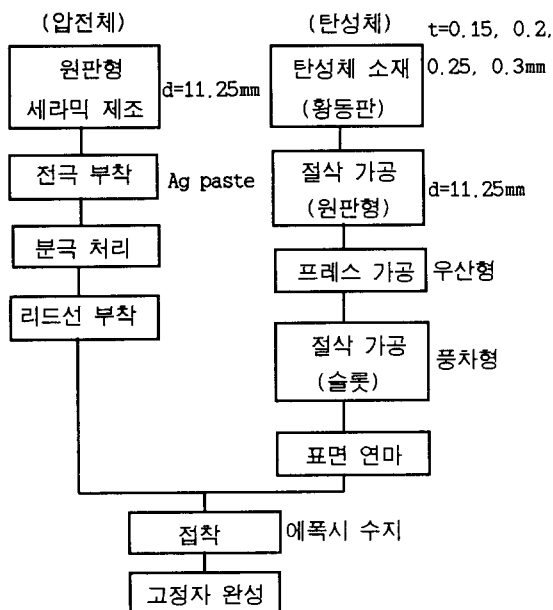


그림 1 풍차형 초음파 전동기의 고정자 제작 과정  
Fig. 1 Fabrication process of the stator of a windmill type ultrasonic motor

이용하여 초음파 전동기를 고정시킨 다음, vibrometer controller(Polytec, OFV 3000, Germany)에 접속된 optical scanning head(Polytec, OFV 055, Germany)에 의해 초음파 전동기에 laser를 비추면 변위를 감지하게 되는데, 이 때 computer(pentium, Korea)를 통해 변위를 출력함으로써 3차원 진동 모드를 측정했다. 그리고 analogue tachometer(Ametek, model c-809, USA)를 이용하여 초음파 전동기의 회전수를 측정했다.

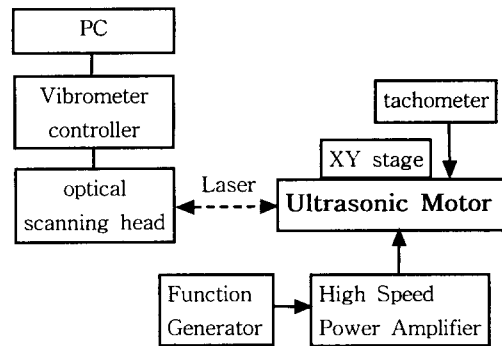


그림 2 풍차형 초음파 전동기의 특성 측정 시스템  
Fig. 2 Measuring system of characteristics of windmill type ultrasonic motor

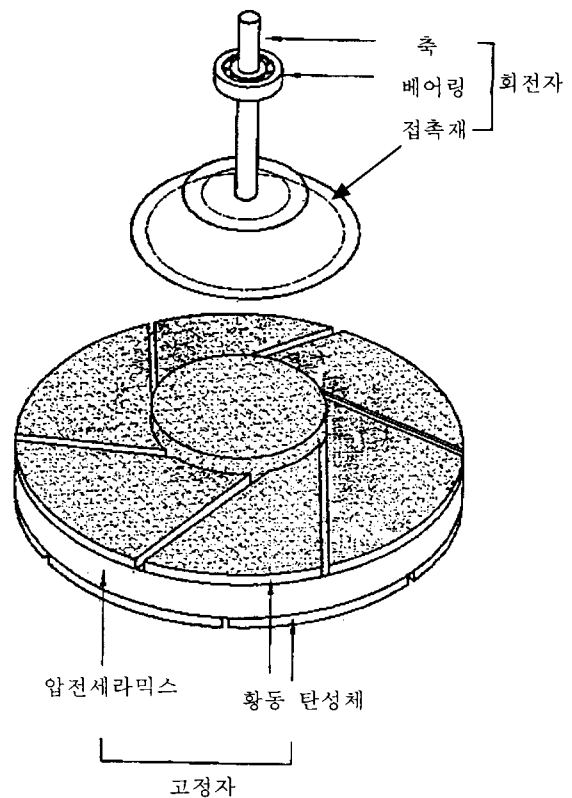


그림 3 제작한 풍차형 초음파 전동기  
Fig. 3 Fabricated ultrasonic motor of windmill type

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 제작한 풍차형 초음파 전동기의 규격

본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기의 구조를 그림 3에 나타냈다. 고정자(stator)는 압전 세라믹스의 상하에 탄성체를 접착하여 제작하였으며, 회전자(rotor)는 접착재, 축 및 베어링으로 구성되어 있다. 회전자의 압력(pressing force)에 따라 회전특성이 약간 달라질 것으로 생각되지만 본 실험에서는 압력에 관한 조건은 일정한 것으로 하였다. 표 2는 이와 같이 제작된 초음파 전동기의 규격을 나타냈다. 특히 본 연구에서 제작한 초음파 전동기의 압전체 두께는 1.01 mm이고, 직경은 11.25mm의 소형이다. 특히 초음파 전동기에 가하는 사인파 전압이 90 V<sub>max</sub> 이상이 되면 회전수는 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 전압 또는 주파수를 증가시키면 고정자의 온도가 상승하여 파괴되는 것으로 나타났다.

표 2 제작한 풍차형 초음파 전동기의 규격

Table 2 Specification of the fabricated windmill type ultrasonic motor

	Unit	Constant
Driving frequency	kHz	73.6
Driving voltage	V <sub>max</sub>	100
Rated speed	rpm	510
Stator weight	g	1.33
Rotor weight	g	0.18
Resistance of stator	Ω	2.53

#### 3.2 풍차형 초음파 전동기의 회전 특성

그림 4는 초음파 전동기에 인가하는 최대 교류전압 V<sub>max</sub>를 변화시키면서 탄성체(elastic body)의 두께(thickness)별로 무부하(no-load) 상태에서 측정된 회전수[rpm]이다. 이 때 탄성체의 슬롯(slot)수는 6개이며, 각 입력 전압의 인가시 구동 주파수는 공진 주파수로 하였으며, 모든 실험조건은 공진주파수로 하였다. 그림에서와 같이 인가 전압이 높아질수록 초음파 전동기의 회전수가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 탄성체의 두께가 얇을수록 회전수가 증가했는데, 그 이유는 탄성체의 두께가 얇아질수록 탄성체의 신축(flexibility)이 증가하기 때문으로 생각한다. 이와 같은 결과는 심벌 트랜스듀서(Cymbal Transducer)의 특성을 연구한 Koc이나 Dogan 등의 연구에서도 그 시사점을 얻을 수 있다[6,7]. 그러나 20V<sub>max</sub> 이하의 아주 낮은 전압에서는 회전이 되지 않았는데, 이는 본 연구에서 제작한 구조를 갖는 초음파 전동기는 일정 전압 이상의 기동 전압이 필요함을 보여주는 것으로 생각한다[8]. 그리고 고정자에 인가하는 전압이 90V<sub>max</sub> 이상이 되면 회전수는 더 이상 증가하지 않고 포화상태를 보였다. 그 이유는 인가 전압이 낮을 때는 고정자의 압전체 온도가 거의 상승하지 않았으나 인가전압이 70V<sub>max</sub>에서부터는 압전체의 온도가 상승하기 시작하면서 90V<sub>max</sub> 이상일 때는 고정자에서의 온도가 많이 상승하여 진동 손실이 증가되기 때문으로 생각되었으며, 이 부분에 대한 연구 결과는 다른 논문

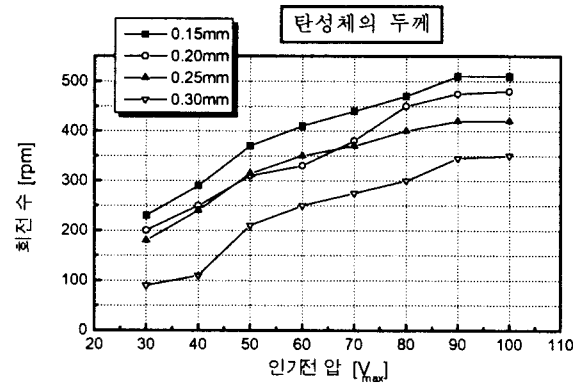


그림 4 탄성체의 슬롯수가 6개일 때 인가전압에 따른 회전수  
Fig. 4 Effect of applied voltage on revolution speed of the ultrasonic motor at various thickness of elastic body(6 slots)

에서 발표되었다[9]. 따라서 90V<sub>max</sub> 이상의 전압을 인가하여도 압전체 내부에서 열 발생(heat generation)이 최소화될 수 있도록 세라믹스 조성의 개발이 앞으로 이루어져야 할 것이다. 이러한 압전체의 고진동에 대한 특성에 관한 논문으로는 PYW-PZT에 관하여 발표가 되었다[10].

그림 5는 탄성체의 슬롯수가 6개일 때 탄성체의 두께를 변화시키면서 인가 전압별로 무부하 상태에서 측정된 초음파 전동기의 회전수이다.

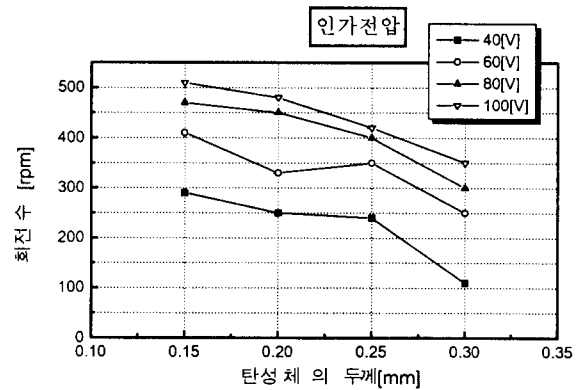


그림 5 탄성체의 슬롯수가 6개일 때 탄성체의 두께에 따른 회전수  
Fig. 5 Effect of thickness of elastic body on the revolution speed of the ultrasonic motor at various applied voltage (6 slots)

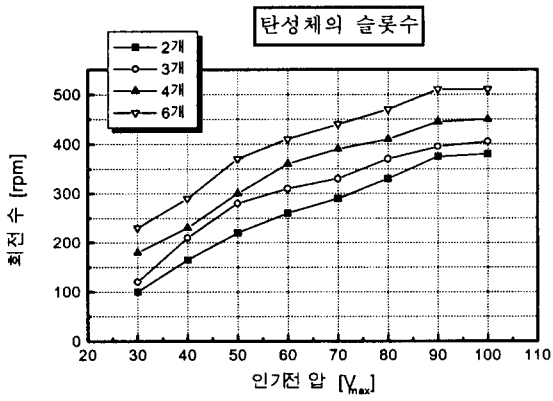


그림 6 탄성체의 두께가 0.15mm일 때 인가전압에 따른 회전수  
 Fig. 6 Effect of applied voltage on revolution speed of the ultrasonic motor at various slots of elastic body (thickness 0.15mm)

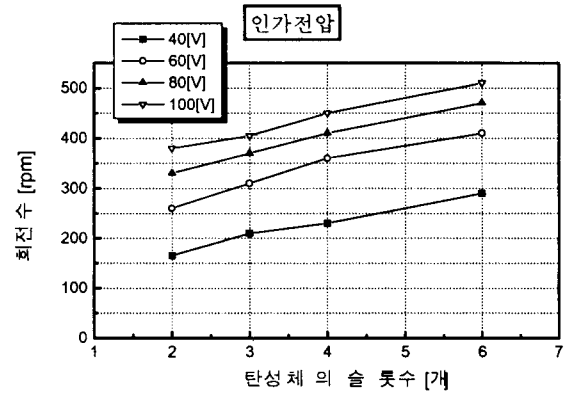
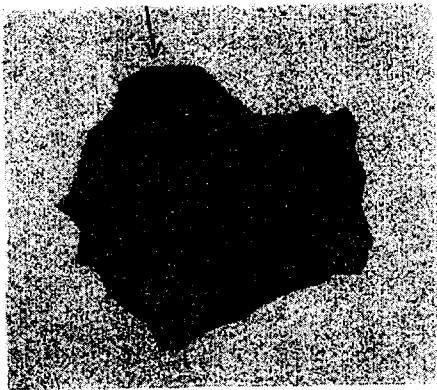
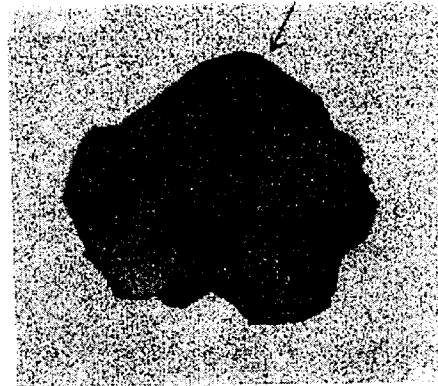


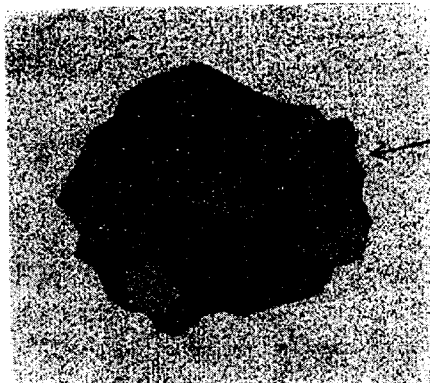
그림 7 탄성체의 두께가 0.15mm일 때 탄성체의 슬롯수에 따른 회전수  
 Fig. 7 Effect of slots of elastic body on the revolution speed of the ultrasonic motor at various applied voltage (thickness of elastic body: 0.15mm)



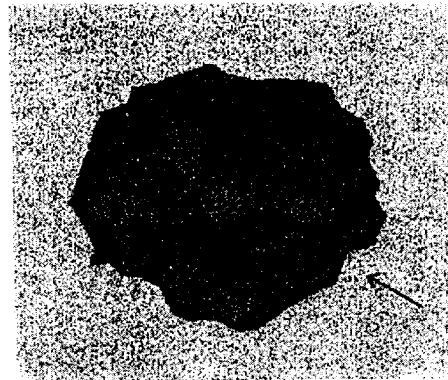
(a)  $t=t_1$



(b)  $t=t_2$



(c)  $t=t_3$



(d)  $t=t_4$

그림 8 스캐닝 진동계로 측정된 풍차형 초음파 전동기의 3차원 진동 모드(탄성체의 두께 0.2mm, 슬롯수 4개)  
 Fig. 8 Three-Dimensional vibration mode of a windmill type ultrasonic motor measured by scanning vibrometer (thickness of elastic body 2.0mm, 4 slots)

최성영 등의 연구<sup>9)</sup>에 의하면 심벌 액츄에이터 특성에서 탄성체의 두께가 두꺼워질수록 변위(displacement)가 감소함을 밝힌 바 있다[11]. 이러한 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서도 탄성체의 두께가 얇아질수록 초음파 전동기의 회전수가 증가했는데, 그 이유는 탄성체의 두께가 얇아질수록 탄성체의 신축이 증가하기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 또한 인가 전압이 높아질수록 초음파 전동기의 회전수는 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 전압 제어에 의하여 초음파 전동기의 회전 속도 조절이 가능함을 보여주는 결과라고 생각한다.

그림 6은 초음파 전동기에 인가하는 전압을 변화시키면서 탄성체의 슬롯수별로 무부하 상태에서 측정된 회전수이다. 이때 탄성체의 두께는 0.15mm이다. 그림에서와 같이 인가 전압이 증가할수록 초음파 전동기의 회전수는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 탄성체의 슬롯수가 많을수록 초음파 전동기의 회전수가 증가하는 것으로 나타났는데, 그 이유는 탄성체의 슬롯수가 증가할수록 회전 구동력이 되는 비틀림 변위(torsional mode)가 더욱 많이 발생하는 것으로 생각할 수 있으며, 이를 확인하기 위한 구체적인 3차원 진동 모드는 그림 8에 나타냈다.

그림 7은 탄성체의 두께가 0.15mm일 때 탄성체의 슬롯수를 변화시키면서 인가 전압별로 무부하 상태에서 측정된 초음파 전동기의 회전수이다. 그림에서 보는 바와 같이 탄성체의 슬롯수가 많아질수록 초음파 전동기의 회전수가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 풍차형 초음파 전동기의 원리에 따라 탄성체의 슬롯수가 증가함에 따라 비틀림 변위가 더욱 많이 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 탄성체의 슬롯수가 일정할 때, 인가 전압이 클수록 전동기의 회전수는 크게 나타났다.

### 3.3 풍차형 초음파 전동기의 3차원 진동 모드 특성

그림 8은 스캐닝 진동계에 연결된 vibrometer scanning head 에서 오는 레이저를 거리 30cm 떨어져있는 초음파 전동기의 고정자에 비추게 되면 초음파 전동기 고정자 표면에서의 진동을 3차원의 입체적인 애니메이션을 얻을 수 있으며, 이를 프린터에 의해 출력한 그림이다. 이때 그림 2의 측정 시스템에서 optical head에서 송수신된 레이저 신호를 vibrometer controller에서 3차원 진동모드의 애니메이션으로 직접 영상화한 후 PC로 데이터를 저장한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이  $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_4$  순서로 임의의 시간의 경과에 따라 화살표로 나타낸 것처럼 3차원 진동 변위가 시계 방향으로 회전하므로 초음파 전동기는 반대 방향으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 여기서 붉은색은 변위가 3차원의 z축 방향으로 진동함을 나타내고 녹색은 변위가 -z축 방향으로 진동함을 나타낸 것이다. 따라서 풍차형 초음파 전동기의 고정자에서의 이러한 타원 구동력이 회전자를 회전시킬 수 있음을 보여주는 중요한 결과라 할 수 있다[12].

## 4. 결론

본 연구에서는 PMN-PZT 압전세라믹스를 사용하여 풍차형 초음파 전동기를 제작하였으며, 이 전동기의 회전 특성 및 3차원 진동 특성을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고정자의 탄성체 두께가 얇아질수록 회전수가 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 고정자의 탄성체 슬롯수가 많아질수록 회전수가 증가하는 것으로 나타났다. 인가 전압이 100V<sub>max</sub>이고, 탄성체의 두께 및 슬롯수가 각각 0.15mm, 6개일 때 최대 회전 속도는 510[rpm]이었다.
- 3) 인가전압에 따라 초음파 전동기의 회전수는 거의 선형적으로 증가하였으며, 30V<sub>max</sub>이하일 때는 회전이 거의 이루어지지 않았고, 90V<sub>max</sub>이상일 때는 회전수는 더 이상 증가하지 않고 포화상태를 보였다.
- 4) 스캐닝 진동계를 이용하여 측정된 3차원의 애니메이션 진동 모드는 회전 운동에 대한 메카니즘을 시각적으로 보여주는 중요한 결과이다.

앞으로는 고정자의 온도 상승을 억제할 수 있는 압전 세라믹의 조성 개발, 토크 특성 등에 대한 연구가 진행 중이다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. V. Barth, "Ultrasonic Driven Motor", IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 16, No. 7, p.2263, 1973.
- [2] V. V. Lavrinenko, V. S. Vishnevski, I. K. Kartashev, "Izvestiya Vysshikh Uchevnykh Zavedenii", Radioelektonica, 13, p.57, 1976.
- [3] T. Sashida, "Applied Physics", Vol.51, No. 6, pp.713~720. 1982.
- [4] 채홍인, 임기조, "원환형 압전세라믹의 굴곡진동 모드를 이용한 초음파 모터의 특성", 대한전기학회논문지, 제43권, 제8호, pp.1293-1299, 1994.
- [5] 지승환, 이덕출, 김진수, "압전 세라믹스를 이용한 풍차형 초음파 전동기의 제작과 특성", 전기전자재료학회논문지, Vol. 10, No. 9, pp. 889-894, 1997.
- [6] B. Koc, A. Dogan, J. F. Fernandez, R. E. Newnham, K. Uchino, "Acceleromotor Application of the Modified Moonie(Cymbal) Transducer", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, No. 8, pp.4547--4549, 1996.
- [7] A. Dogan, S. Yoshikawa, K. Uchino, R. E. Newnham., "The effect geometry on the characteristics of the moonie transducer and reliability issue", Ultrasonics Symposium, pp. 935~939, 1994.
- [8] 박만주, 김진수, "단상 초음파 전동기의 공진 및 진동 속도 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회 논문지, 12, 4, pp.312-318, 1999.
- [9] 박만주, 김영균, 김진수, "풍차형 초음파 전동기 고정자의 공진 및 진동 특성", 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, 영남대, pp. 231~234, 1998.
- [10] 윤석진, Kenji Uchino, "Pb(Y<sub>2/3</sub>W<sub>1/3</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> 계 세라믹스의 고출력 특성", 전기전자재료학회 논문지, 11, 5, pp.394-399, 1998
- [11] 최성영, 김진수, "심벌 액츄에이터의 제작과 변위 특성의 분석", 한국전기전자재료학회 논문지, 12, 5, pp.401-406,

1999

- [12] Jin-Soo Kim, Man-Ju Park and Kenji Uchino, "Composite Ultrasonic Motors using a Piezoelectric Disk and an Elastic Body of Windmill Type", *Ferroelectrics* (1999. 10 게재예정)

## 저 자 소 개



### 김진수 (金鎭洙)

1960년 9월 6일 생. 1986년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1997년 미국 Pennsylvania State University에서

Post-doc. 현재 한국교원대학교 기술교육과 부교수

Tel : (0431) 230-3743

E-mail : jskim@cc.knue.ac.kr



### 이덕출 (李德出)

1939년 1월 22일 생. 1963년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1966년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년 9월 일본 Nagoya대학 전기공학과 졸업(공학박사).

1981~1982년 일본 나고야 대학 전기공학과 방문 교수. 1996년~1998년 인하대 공대 학장. 1998년 대한전기학회 회장. 현재 인하대학교 전기공학과 교수

Tel : (032) 860-7393

E-mail : leedc@dragon.inha.ac.kr