

단상 초음파 전동기의 공진 및 진동 속도 특성에 관한 연구

논문
12-4-4

A Study on the Resonance and Vibration Velocity Characteristics in Single-Phase Ultrasonic Motor

박만주*, 김진수*

(Man-Ju Park*, Jin-Soo Kim*)

Abstract

In this study, the windmill type ultrasonic motor was fabricated, and then resonant frequency and vibration velocity characteristics of the stator were measured. 0.05PMN-0.95PZT composition was mixed with 0.7 wt% MnO₂ for the piezoelectric vibrator. Brass metal was pressed with umbrella-type using metal mold, and 4 kinds of slot were processed with different thickness. Among sixteen stators, the resonant frequency on vibration velocity was decreased remarkably in stator with the highest resonant point, but the resonant frequency on vibration velocity was not changed at the lowest resonant point in the stator. Vibration velocity increases with increasing applied voltage and with decreasing the thickness of the elastic body. As the applied voltage was changed from 30V_{max} to 100V_{max}, the maximum value of vibration velocity at 90V_{max} was 2.0[m/s].

Key Words(중요용어) : Windmill type ultrasonic motor(풍차형 초음파 전동기), Resonant frequency(공진 주파수), Vibration velocity(진동 속도), Elastic body(탄성체)

1. 서 론

초음파 전동기는 전자식 전동기와는 달리 고정자의 탄성 진동을 이용하여 고정자와 회전자 사이의 마찰력을 매개로 한 구동력을 얻기 때문에 그 원리가 전혀 다르다. 또한 저속에서의 높은 토크, 단위 중량당 높은 기계적 출력, 자계와 무관하기 때문에 전자 유도 장애가 없으며, 구조가 간단하고 가벼운 등의 여러 가지 장점¹⁾이 있어 차세대 정보기기용 전동기로 그 전망이 아주 밝다.

초음파 전동기는 고정자의 구조에 따라 원판형(disk type)²⁾, 원환형(ring type)³⁾, 선형(linear type)⁴⁾ 등의 종류가 있다. 본 연구에서는 단상(single-phase)의 고주파 전원만으로도 구동이

가능한 원판형 초음파 전동기의 개량 형태인 풍차형 초음파 전동기(windmill type ultrasonic motor)를 제작하여 고정자에서의 공진점 및 진동 속도를 측정·분석함으로써, 차후 더욱 개선된 초음파 전동기의 개발에 일조하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기는 크게 고정자와 회전자로 구성되어 있다. 고정자(stator)는 원판형의 압전 세라믹과 금속 탄성체의 결합체이며, 회전자(rotor)는 고정자의 금속 탄성체와 같은 재질의 황동을 이용하여 우산 형태로 제작했다. 본 연구에 사용된 압전 세라믹스는 0.05PMN-0.95PZT에 0.7wt%의 MnO₂를 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 820이다.

초음파 전동기의 특성을 가장 크게 좌우하는 부분

* : 한국교원대학교 기술교육과
(충북 청원군 강내면 다락리산7, Fax : 0431-230-3787 E-mail : jskim@cc.knue.ac.kr)

1999년 1월 4일 접수, 1999년 3월 31일 심사완료
(’98 추계학술회의에서 우수논문으로 추천됨)

은 고정자의 압전체와 탄성체이다.

구체적인 압전재료와 탄성체의 물성은 표 1과 표 2에 나타났다.

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	unit	constant
Dielectric constants($\epsilon T33/\epsilon_0$)		1500
Curie temperature(T_c)	℃	325
Resonant frequency(f_r)	㎐	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)	μF	1032
Resistance(R)	Ω	2.5
Sintering temperature(T)	℃	1200

표 2. 황동의 재료 특성

Table 2. Material properties of brass

property	constant
Component	70Cu - 30Zn
Density $[g/cm^3]$	8.8
Young's modulus $[N/m^2]$	11.0×10^{10}
Poisson's ratio	0.35
Thermal dilatation ratio $[ppm/℃]$	15

본 연구의 풍차형 초음파 전동기 고정자를 제작할 때, 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 세라믹과의 접착성이 좋으며, 접착 강도가 우수하고, 또한 압전 진동자

및 탄성체의 유전손실 및 기계적 손실(마찰손 등)에 의한 발열에 잘 견딜 수 있고, 내열성이 우수한 상온 경화 2 type 에폭시수지(에프스화학공업)를 사용했다.

이와 같이 제작한 초음파 전동기의 공진 특성 및 진동 속도(vibration velocity) 특성을 측정하기 위해서 그림 1과 같이 시스템을 구성했다. 먼저 고정자의 공진점을 찾기 위해서 일반적인 방법인 impedance analyzer를 이용하지 않고, 본 연구에서는 vibrometer controller(Polytec OFV 3000, German) 및 sensor head(Polytec OFV 302, German)의 레이저광을 이용하여 20 MHz digital storage oscilloscope(HC5802, 홍창물산)를 통해 고정자의 공진점을 찾았다. 그 방법 및 과정을 간단히 소개하면, XY stage(micro control, USA)를 이용하여 고정자를 공간에 설치하여 놓고 타원 변위가 집중되는 고정자의 중앙 부분에 sensor head로 레이저광을 비추어 vibrometer controller를 통해 오실로스코프로 입력된 신호가 진동 속도 파형으로 나타나게 되는데 그 파형 중 가장 큰 파형을 찾은 것이다. 이 때 고정자와 sensor head의 거리는 측정 장비의 특성에 의해 60cm를 유지했다.

그리고 1차, 2차 및 3차 공진 주파수에서 가장 진폭이 큰 파형을 선택하여 진동 속도의 값으로 하였다.

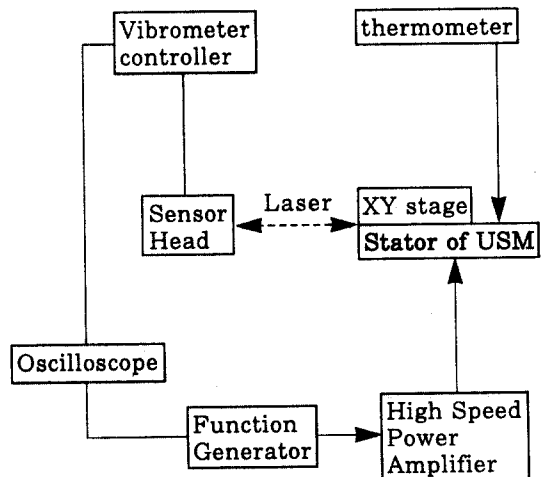


그림 1. 고정자의 특성 측정 시스템

Fig. 1. Measuring system of characteristics at stator

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 풍차형 초음파 전동기의 규격

본 연구에서 제작한 풍차형 초음파 전동기의 구조를 그림 2에 나타냈다.

고정자(stator)는 압전 세라믹의 상하에 탄성체를 접착하여 제작하였으며, 회전자(rotor)는 마찰 회전체와 축과 베어링으로 구성되어 있다. 표 1은 이와 같이 제작된 초음파 전동기의 규격을 나타냈다. 특히 본 연구에서 제작한 초음파 전동기는 직경 11.25mm의 소형이다.

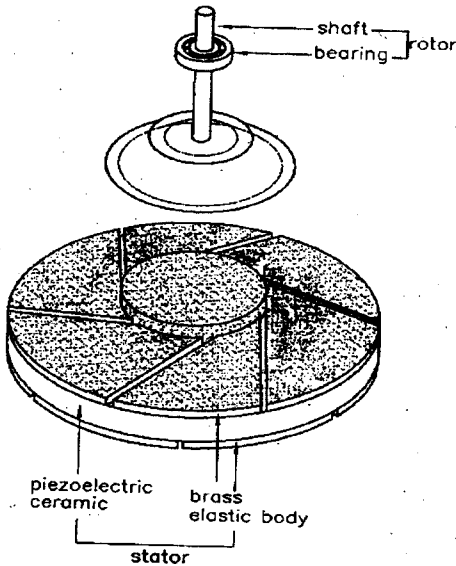


그림 2. 제작한 풍차형 초음파 전동기
Fig. 2. Fabricated ultrasonic motor of windmill type

표 3. 제작한 풍차형 초음파전동기 고정자의 규격
Table 3. A specification of fabricated stator of windmill type ultrasonic motor

Conditions	Value
Driving frequency [kHz]	73.6
Driving voltage [V _{max}]	100
Rated vibration velocity [m/s]	2.0
Stator weight [g]	1.33
Resistance of stator [Ω]	2.53

3.2 풍차형 초음파 전동기의 동작 원리

이 풍차형 초음파 전동기의 원리는 다음과 같다. PZT 압전세라믹의 양면에 금속 탄성체를 부착하여 만든 고정자(stator)에 함수 발생기와 고속 전력 증폭기를 사용하여 단상 교류 전압을 인가하면 압전체는 경방향(radial direction)으로 초음파 진동을 하게된다. 이러한 압전체의 경진동(radial vibration)은 2 개의 탄성체에 가공한 슬롯(slot)이 물리적으로 45° 만큼 어긋나 있기 때문에 종방향 변위(longitudinal displacement)와 비틀림 변위(torsional displacement)로 동시에 바뀌게된다. 이들 두 변위가 서로 중첩 결합함으로써 압전 세라믹의 윗부분에 위치한 탄성체의 중앙 내부원 주변에서 타원 운동이 발생하게 된다. 이 타원 운동이 결국 세라믹과 결합된 탄성체(고정자)와 회전자(rotor)의 상호 마찰에 의해 회전하게 되는 구동력이 되는 것이다⁵⁾. 이를 확인할 수 있는 3차원 진동 모드는 다음 논문에 발표할 예정이다.

3.3 고정자의 진동 속도에 따른 공진 주파수 특성

그림 3의 (a)와 (b)는 16개의 고정자 중 공진점이 가장 높은 고정자(탄성체의 두께 0.25mm, 탄성체의 슬롯수 3개, 공진 주파수 134.7kHz)와 가장 낮은 고정자(탄성체의 두께 0.15mm, 탄성체의 슬롯수 6개, 공진 주파수 73.6kHz)에 대한 그래프이다(1, 2, 3차 공진 주파수 중 진동 속도가 가장 빠른 것을

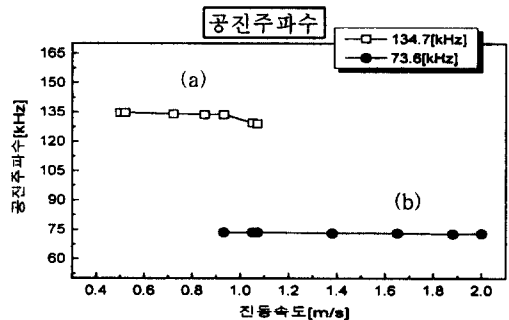


그림 3. 진동속도-공진주파수 (a) 두께 0.25mm, 슬롯수 3개 (b) 두께 0.15mm, 슬롯수 6개
Fig. 3. Vibration velocity vs resonant frequency (a) thickness 0.25mm, 3 slots (b) thickness 0.15mm, 6 slots

선택한 것임). 그림에서 보듯이 공진점이 높은 고정자는 진동 속도의 증가에 따라 공진주파수가 134.7kHz에서 129kHz까지 급격하게 감소한 반면, 공진점이 낮은 고정자는 공진 주파수 73.6kHz에서 73kHz로 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상들은 구동 주파수가 높아지면 고정자에서의 온도 상승으로 열손실을 가져오기 때문이라 생각된다.

이와 같은 연구는 이슬재 등의 연구⁶⁾에서도 지적한 바 있다. 따라서 구동 주파수의 높고 낮음에 관계없이 안정된 상태에서 구동을 하기 위해서는 온도 상승으로 인한 영향을 억제할 수 있는 압전 세라믹스의 조성에 대한 연구가 반드시 필요한 것으로 고려된다.

3.4 고정자의 인가 전압에 따른 온도 특성

그림 4는 16개의 고정자 중 진동 및 회전 특성이 가장 좋은 고정자(탄성체의 두께 0.15mm, 슬롯수 6개)에 대해 인가 전압에 따른 풍차형 초음파 전동기 고정자에서의 온도 변화를 측정된 그래프이다. 그래프에서 보듯이 인가 전압에 따라 온도가 상승하였는데, 공진 주파수가 가장 낮은(73.6kHz)인 1차 공진 주파수에서는 인가 전압이 최대 100V_{max}일 때 온도가 33℃로 열 발생이 적어서 그로 인한 열손실은 무시할 수 있는 것으로 나타났다. 인가 전압에 따라 고정자의 온도가 거의 비례적인 변화를 보이고 있는 반면, 2차 공진 주파수(104.6kHz)에서는 인가 전압이 최대 100V_{max}일 때 온도가 82℃로 비교적 많은 열이 발생하여 비교적 많은 열손실이 있는 것으로 나타났다. 또한 인가 전압이 70V_{max}와 80V_{max} 사이에서 온도가 급상승했음을 알 수 있다.

공진 주파수가 가장 높은(115.3kHz) 3차 공진 주파수에서는 인가 전압이 최대 100V_{max}일 때 온도가 103℃로 아주 많은 열이 발생하여 열손실이 심각한 것으로 나타났다. 또한 온도의 변화 정도가 크며, 인가 전압이 60V_{max}와 70V_{max} 사이에서 온도가 급상승했음을 알 수 있다.

이와 같은 온도 특성을 분석해보면, 2차 및 3차와 같이 높은 공진 주파수일 때는 구동 주파수에 따라 온도가 급상승하는 구간이 다른데, 이는 공진 주파수가 상대적으로 낮거나 높기 때문에 나타나는 현상이다. 이러한 급상승 구간 이상의 전압에서는 고정자에서의 온도 상승에 의한 열손실로 진동 속도나 변위가 불규칙적으로 변화하는 등의 불안정한 상태가 되는데, 이와 같은 결과는 압전 세라믹 자체

의 조성에 문제가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 풍차형 초음파 전동기의 안정된 구동을 위해서는 적절한 구동 주파수를 선택하고, 알맞은 전압으로 구동시킴으로써 온도에 의한 영향을 해소할 수 있을 것으로 판단된다⁷⁾. 이를 위해서는 고정자에 미치는 영향을 억제하기 위한 압전 세라믹스의 조성에 대한 연구가 반드시 필요함을 알 수 있다.

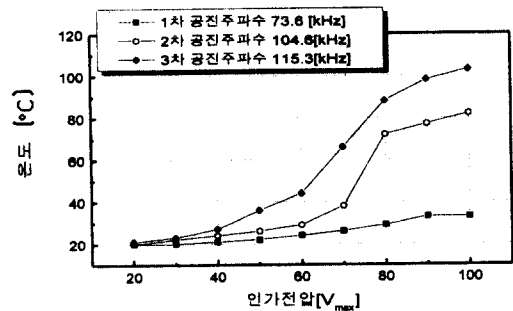


그림 4. 인가 전압에 따른 고정자에서의 온도변화
Fig. 4. Change of temperature in stator with applied voltage

3.5 고정자의 진동 속도 특성

(1) 탄성체의 두께에 따른 인가 전압의 변화

그림 5는 고정자에 가하는 인가 전압(이하 인가 전압이라 하면 최대치 V_{max}를 말함)을 변화시키면서 탄성체의 두께별로 무부하(no load) 상태에서 측정된 진동 속도이다. 이 때 탄성체의 슬롯수가 6개이며, 각 입력 전압의 인가시 구동 주파수는 공진 주파수로 하였다. 그림에서와 같이 인가 전압이 높을수록 초음파 전동기 고정자의 진동 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 탄성체의 두께가 얇아질수록 진동 속도가 증가했는데, 그 이유는 탄성체의 두께가 얇을수록 탄성체의 신축(flexibility)이 증가하기 때문이다. 이와 같은 결과는 무니트랜스듀서(Moonie Transducer)의 특성을 연구한 Dogan 등의 연구⁸⁾에서도 그 시사점을 얻을 수 있다. 20V_{max} 이하의 아주 낮은 전압에서는 거의 진동이 일어나지 않았는데, 이는 본 연구에 이용된 초음파 전동기는 일정 전압 이상의 기동 전압이 필요함을 보여주는 것이었다. 인가 전압이 낮을 때는 고정자의 온도가 거의 상승하지 않았으나 인가전압

이 $70V_{max}$ 에서 부터는 온도가 상승하기 시작하면서 $90V$ 이상일 때는 고정자에서의 온도의 상승 정도가 심해졌다. 즉 고정자에 인가하는 전압이 $90V_{max}$ 이상이 되면 진동 속도는 더 이상 증가하지 않고 포화되어 고정자에서의 열손실만을 증가시켰다.

Dogan 등의 연구⁸⁾에서 탄성체의 두께가 두꺼워지면 변위가 감소하는 것으로 나타났는데, 본 연구의 그래프에서도 탄성체의 두께가 얇을수록 고정자의 진동 속도가 증가했다. 그 이유는 탄성체의 두께가 얇을수록 탄성체의 신축이 증가하는 것으로 생각할 수 있다⁹⁾. 또한 인가 전압이 높아질수록 고정자의 진동 속도는 증가하는 것으로 나타났다.

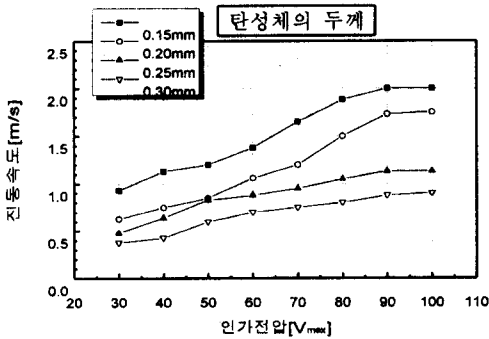


그림 5. 탄성체의 두께별 인가전압에 따른 고정자의 진동속도(슬롯수 : 6개)

Fig. 5. Effect of applied voltage on the vibration velocity of stator at various thickness of elastic body(6 slots)

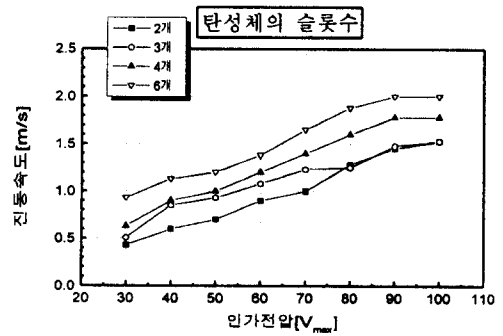


그림 6. 탄성체의 슬롯수별 인가전압에 따른 고정자의 진동속도(두께 0.15mm)

Fig. 6. Effect of applied voltage on the vibration velocity of stator at various slots of elastic body(thickness 0.15mm)

(2) 탄성체의 슬롯수에 대한 인가전압의 변화

그림 6은 고정자에 가하는 인가 전압을 변화시키면서 탄성체(elastic body)의 슬롯수별로 무부하 상태에서 측정한 진동속도이다. 이 때 탄성체의 두께가 0.15mm이며, 각 입력 전압의 인가시 구동 주파수는 공진 주파수로 하였다.

그래프에서 보듯이 인가 전압이 증가할수록 고정자의 진동 속도는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 탄성체의 슬롯수가 많을수록 고정자의 진동 속도가 증가하는 것으로 나타났는데, 그 이유는 슬롯수의 증가에 따라 비틀림 변위가 더욱 많이 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

(3) 탄성체 두께의 변화

그림 7은 탄성체의 슬롯수가 6개인 고정자에 대해 탄성체의 두께를 변화시키면서 인가 전압별로 무부하 상태에서 측정한 고정자의 진동 속도이다. 이 때 각 입력 전압의 인가시 구동 주파수는 공진 주파수로 하였다. 무니 트랜스듀서의 특성을 연구한

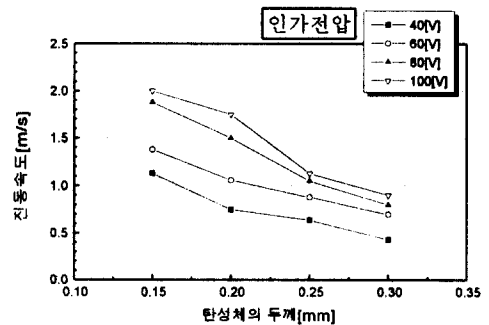


그림 7. 인가 전압별 탄성체의 두께에 따른 고정자의 진동 속도(탄성체의 슬롯수 : 6개)

Fig. 7. Effect of thickness of elastic body on the vibration velocity of stator at various applied voltage(6 slots)

(4) 탄성체 슬롯수의 변화

그림 8은 탄성체의 두께가 0.15mm인 고정자에 대하여 탄성체의 슬롯수를 변화시키면서 인가 전압별로 무부하 상태에서 측정된 진동 속도이다.

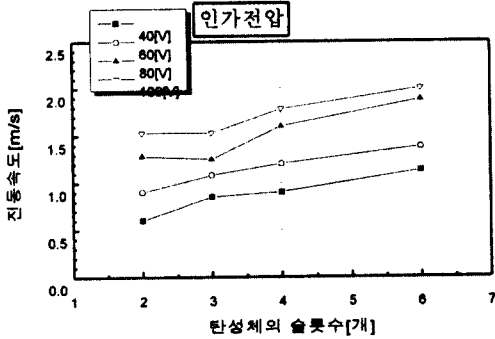


그림 8. 인가 전압별 탄성체의 슬롯수에 따른 고정자의 진동 속도(탄성체의 두께 : 0.15mm)

Fig. 8. Effect of slot of elastic body on the vibration velocity of stator at various applied voltage(thickness of elastic body : 0.15mm)

이 때 각 입력 전압의 인가시 구동 주파수는 공진 주파수로 하였다. 탄성체에 가공한 슬롯에 의해 비틀림 변위가 발생하는 것은 풍차형 초음파 전동기의 원리이다. 이러한 원리에 근거하여 본 연구 결과에서도 탄성체의 슬롯수가 많아질수록 변위량의 증가로 인해 고정자의 진동 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 그래프에서 보듯이 인가 전압이 증가할수록 고정자의 진동 속도는 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

풍차형 초음파 전동기 고정자의 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 풍차형 초음파 전동기 고정자는 탄성체 두께가 얇아질수록, 슬롯수가 많아질수록 진동 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 이 때 최대 진동 속도는 2.0[m/s]였다. 슬롯수가 8개 이상인 탄성체는 수공으로 정밀한 가공을 할 수 없었다.
- (2) 인가전압에 따라서 진동 속도는 거의 선형적으

로 증가하였으며, 20V_{max}이하일 때는 진동 이 거의 이루어지지 않았고, 90V_{max}이상일 때는 진동 속도는 더 이상 증가하지 않고 포화상태를 보였다.

- (3) 구동 주파수와 구동 전압이 높아질수록 고정자의 온도가 상승하였는데 전압의 영향보다 주파수에 의한 영향이 더욱 심각한 것으로 나타났다.

이러한 온도 상승으로 인한 영향을 억제할 수 있는 압전 세라믹스의 조성에 대한 연구¹⁰⁾, 압전체와 탄성체의 접착 방법 모색, 스캐닝 진동계(Scanning vibrometer)를 이용한 정확한 3차원의 실시간 진동 특성 연구 등은 향후 초음파 전동기의 개발을 위한 중요한 과제라 생각한다.

참 고 문 헌

1. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Nakamura, *Ultrasonic Motors Theory and Applications*, Clarendon Press, Oxford, pp. 1 ~5, 1993.
2. 菅野伸和, “超音波 モータ”, 松下電氣産業(株) 모-타 事業部, 超音波 모-타 프로젝트, pp. A1-1-1~A1-1-11.
3. T. Takano, H. Hirata, Y. Tomikawa, “Analysis of nonaxisymmetric vibration mode piezoelectric annular plate and its application to an ultrasonic motor”, IEEE U.F.F.C., vol. 37, No 6, pp. 558~565, 1990.
4. M. Tohda, S. Ichikawa, “Ultrasonic linear motor using a multilayered piezoelectric actuator”, *Ferroelectrics*, vol. 93, pp. 287~294, 1989.
5. 지승한, 이덕출, 김진수 “압전 세라믹스를 이용한 풍차형 초음파 전동기의 제작과 특성”, 전기전자 재료학회 논문지, 10권, 9호, pp. 889~894, 1997.
6. 이윤재, 김영석, “초음파 모터의 위치 제어를 위한 최대속도 알고리즘”, 인하대학교 컴퓨터 과학 응용연구소 논문집 제2집, pp. 127~132, 1998.
7. 박만주, 김진수, “압전 초음파 전동기의 고정자 구조에 따른 회전 특성”, 대한전기학회 추계학술 대회 논문집, 인하대, pp. 749~751, 1998.
8. A. Dogan et al., “The effect geometry on the characteristics of the moonie transducer

단상 초음파 전동기의 공진 및 진동 속도 특성에 관한 연구.....박만주, 김진수

- and reliability issue”, Ultrasonics symposium, pp. 935~939, 1994.
9. Jin-Soo Kim, Man-Ju Park, Kenji Uchino, “Ultrasonic Motors Operated by Single-Phase High Frequency”, *Ferroelectrics* (submitted, 98).
10. 윤석진, Kenji Uchino, “ $\text{Pb}(\text{Y}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 계 세라믹스의 고출력 특성”, *전기전자재료학회 논문지*, 11권, 5호, pp. 394~399, 1998.