

풍차형 초음파 전동기의 회전자에 인가된 힘이 회전특성에 미치는 영향

Effect of Pressing Force Applied to a Rotor on Revolution Characteristics in the Windmill Type Ultrasonic Motor

김영균*, 김진수*
(Young-Gyun Kim*, Jin-Soo Kim*)

Abstract

The ultrasonic motor have recently begun to be used for certain unique practical utilizations in the fields of industrial, medical, consumer, and automotive applications. Ultrasonic motor stimulated to ultrasonic oscillations by piezoelectrics to drive a rotor via friction contact. The metal and ceramic composite component was used as the stator element to generate ultrasonic vibrations. The ultrasonic motor used here was the windmill type ultrasonic motor operated by single-phase AC source. The windmill type ultrasonic motors has only three components: a stator element of two windmill shape slotted metal endcaps, a rotor and a bearing. In this paper, a prototype motor with 11.35 mm diameter was fabricated, then relationship between the pressing force applied to a rotor and the rotation characteristic of windmill type ultrasonic motor are investigated, when stator's slots was changed from 4, 6, 8 and thickness changed from 0.15, 0.20 mm, respectively. Optimum pressing force applied to a rotor in the six stators was 1.2 mN.

key words(중요 용어) : windmill type ultrasonic motor(풍차형 초음파 전동기), stator(고정자), piezoelectric(압전), pressing force(인가힘), endcap(엔드캡)

1. 서론

산업기술이 날로 발전함에 따라 소형화, 정밀도를 필요로 하는 분야가 증가하고 있다. 하지만 현재 가장 많이 사용되고 있는 동력원인 전자식 전동기를 고려해볼 때, 공장 자동화 등 정밀 산업분야에는 직경 1 cm 크기 이하의 소형전동기가 요구되고 있으나 전자식 전동기로는 충분한 에너지 효율을 얻기가 어렵다.^{1,2,3)}

따라서 이에 적합한 동력원이 필요하게 되었다.

본 연구에서 다루는 초음파 전동기(ultrasonic motor)가 그 대안이 될 수 있다. 초음파 전동기는 1973년 처음으로 IBM사의 바스(H. V. Barth)에 의해 제안되었으나 실용화되지 못하다가 일본의 사시다(T. Sashida)가 제안한 진동편형 전동기가 처음으로 실용화에 가까운 동작을 했다.⁴⁾ 그러나 이 전동기도 진동편과 회전자 접촉면의 마찰에 의한 심한 마모로 인해서 수명이 짧은 것이 문제점이었다. 이 문제를 해결하기 위해 Sashida는 1982년에 단성 표면파를 이용한 진동과형 초음파 전동기를 개발했다. 진동편형에 비해 효율은 다소 떨어지지만 내마모성, 정역회전 등을 할 수 있게 되었다. 그래서 현재 사용되고 있는 초음파 전동기는 이 진행

* : 한국교원대학교 기술교육과
(충북 청원군 강내면 다락리 산7, Fax: 0431-230-3787, E-mail: jskim@cc.knue.ac.kr)
2000년 1월 10일 접수, 2000년 4월 3일 심사완료

과형을 기본 원리로 하고 있다. 현재 상품화된 크기가 직경 30 mm 이상이므로 초소형 구동원이 요구되는 정밀산업 등에서는 사용하기가 어렵고, 또한 가격이 고가이므로 상용화에 어려움이 있다.

초음파 전동기는 고정자와 회전자간의 마찰력을 활용하여 회전을 하는 구동원이므로 최대 회전력을 얻기 위해서는 이 마찰력이 최적의 조건이 되어야 한다.⁵⁾ 본 연구에서는 반경 진동 모드(radial mode)와 비틀림 진동 모드(torsional mode)의 결합에 의해 회전하게 되는 원판형 초음파 전동기의 개량 형태인 풍차형 초음파 전동기⁶⁾를 탄성체의 슬롯수별(6, 8개), 두께별(각각 0.15, 0.20, 0.30 mm)로 총 6개 제작하였고, 고정자와 회전자간의 접촉 메카니즘을 측정하는 시스템을 제안하고, 이 제안된 시스템을 사용하여 최적의 접촉력을 측정·분석한다.

2. 실험 방법

2.1 풍차형 초음파 전동기의 제작

고정자는 초음파 전동기에서 핵심 부분으로, 압전 세라믹과 탄성체로 이루어지며, 본 실험에서 사용한 풍차형 초음파 전동기는 탄성체에 부착된 황동의 중앙 부분을 약간 볼록한 엔드캡(endcap)으로 성형한 다음 비틀림 변위를 발생하기 위해 실톨을 사용하여 각각 6, 8개의 슬롯으로 등분하여 가공하였다.

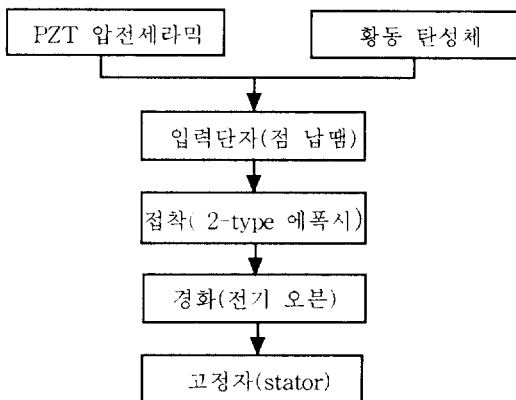


그림 1. 고정자의 제작 순서도
Fig. 1. Fabrication flowchart of stator

성형에는 CNC 선반(광주 남선 선반, MECCA-3, KOREA)으로 가공한 금속 볼드를 사용했다. 가공된

탄성체를 PZT 압전세라믹의 상하에 입력 전원으로 사용되는 리드선을 남땀하고 접착력이 좋은 2-type 에폭시의 주재와 경화제의 비율을 50:50으로 하여 탄성체의 가장자리에 얇고 고르게 바른 후 슬롯을 상하로 엇갈리게 접착하여 고정자를 완성했다. 그림 1은 고정자를 제작한 순서를 나타냈다. 접착면에서 발생할 수 있는 기포를 제거하기 위해 전기오븐에서 75 °C로 3시간 정도 유지했다. 회전자는 알루미늄을 이용하여 가공했다. 그림 2는 슬롯수가 6개인 풍차형 초음파 전동기의 완성된 모양이다.

완성된 고정자(stator)에 초음파의 단상 교류전압을 인가하면 압전체는 반경방향 진동(radial direction vibration)을 한다. 이 원판 세라믹의 반경진동에 의해 압전 세라믹 상하에 부착된 탄성체도 압전 세라믹과 똑같은 변위로 진동한다. 이 탄성체는 상하 똑같이 슬롯(slot)이 만들어져있고, 슬롯이 가공된 황동 탄성체 상하가 어긋나게 부착되어있기 때문에 종방향 변위(longitudinal displacement)와 비틀림 변위(torsional displacement)로 동시에 변환된다. 이들 두 변위가 탄성체에 가공된 슬롯에 의해 서로 중첩 결합함으로써 압전 세라믹에 부착된 황동의 윗부분에 있는 엔드캡(endcaps) 내부 원 주변에서 타원운동이 발생하게 된다.^{7,8)}

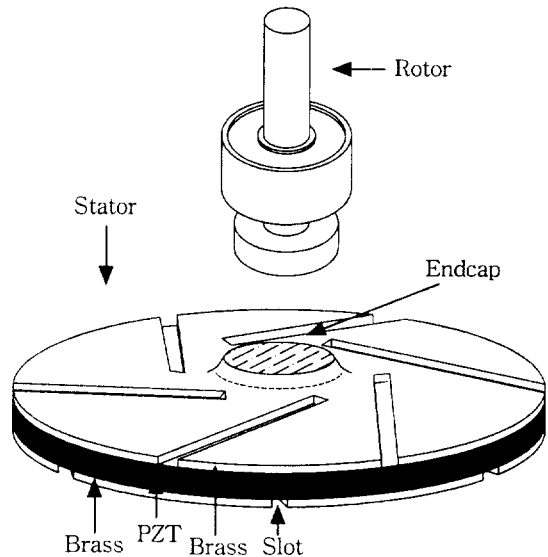


그림 2. 슬롯이 6개인 풍차형 초음파 전동기의 구조
Fig. 2. Structure of windmill type ultrasonic motor with 6 slots

엔드캡 부분에 회전자를 올려놓으면 마찰력에 의해 회전을 하게 된다.

PZT 압전 세라믹은 풍차형 초음파 전동기에서 핵심부분으로 본 연구에서 고정자 제작에 사용되는 압전 세라믹은 재원신소재 산업(한국)에서 시판하는 것으로 $Pb[(Mg_{1.3}Nb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti]O_3 + 0.7wt\% MnO_2$ 조성식을 가지며, 구체적인 특성은 표 1과 같다.

표 1. 0.05PMN-0.95PZT 압전세라믹스의 재료특성
Table 1. Material properties of 0.05PMN-0.95 PZT piezoelectric ceramics

특 성	상 수
직경(D)	11.35 mm
두께(t)	1.01 mm
밀도(ρ)	$7.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
공진 주파수(f_r)	190 kHz
반공진 주파수(f_a)	226.8 kHz
유전손실($\tan \delta$): 1[kHz]	0.02 %
정전용량(C): 1[kHz]	1042 pF
전기기계 결합계수(k_p)	61.8 %
전기기계 결합계수(k_{31})	35.8 %
기계적 품질계수(Q_m)	858
비유전율(ϵ_r)	1174
탄성 컴플라이언스(s_{11}^E): E=0	$13.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
압전계수(d_{31})	$132 \times 10^{-12} \text{ m/V}$

2.2 특성 측정

풍차형 초음파 전동기는 회전자와 고정자간의 마찰력으로 회전을 하게 되므로 최적의 마찰력을 측정할 필요가 있다.⁹⁾ 그래서 그림 3처럼 측정 시스템을 설치했다. XY stage로 고정자를 고정하고, 아르벨을 이용하여 설치한 회전자를 고정자위에 올려놓고 회전자 축(shaft)에 끼워지는 베어링으로 힘을 가하여 고정자와 회전자간의 접촉특성을 측정하였다. 사용 계기 및 실험 장치로는 15 MHz function/arbitrary waveform generator(HP 33120A, USA), high speed power amplifier(4015, NF Electronic Instrument, Japan), analogue tachometer(Ametek, model C-809, USA), XY stage(micro control, USA)이다. 신호발생기에서 단상의 고주파신호를 발생시켜, 이 고주파신호를 고속 전력증폭기를 통

하여 원하는 크기의 사인과 전압으로 증폭시킨 다음, 초음파 전동기의 고정자에 인가한다. 고정자위에 회전자를 올려놓으면 마찰력에 의해 회전자는 회전한다. 전자저울(OHAUS, USA)로 질량을 측정 한 베어링을 풍차형 초음파 전동기의 회전자 축에 끼워서 누르는 힘 효과로 사용했다. 베어링을 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 mN로 변화하면서 그때의 회전수를 회전속도계(Ametek, model C-809, USA)로 측정한다.

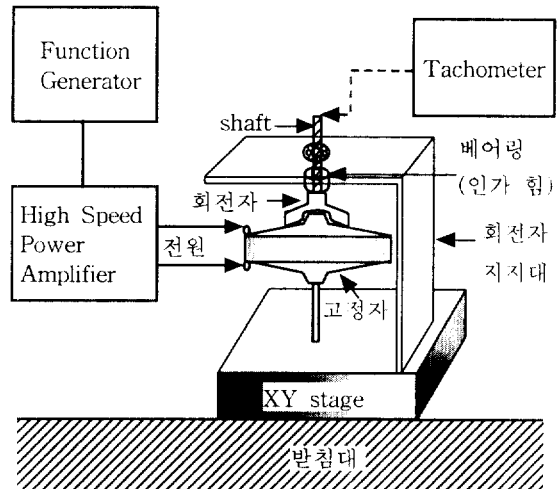


그림 3. 최적의 인가힘 측정 시스템

Fig. 3. Measuring system of optimum pressing force applied to a rotor

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 풍차형 초음파 전동기의 규격

본 실험에서 사용된 풍차형 초음파 전동기는 총 6개가 있는데 그 중에서 회전 특성이 가장 좋은 슬롯수 8개, 탄성체 두께 0.15 mm를 갖는 시제품을 표 2에 나타냈다. 다른 시제품도 인가되는 공진 주파수에서 차이가 있었고, 같은 인가힘에서도 회전 수 등이 탄성체의 두께와 슬롯수별로 차이가 발생했다.

특히 PMN-PZT 세라믹 시편의 경우 공진 주파수는 190 kHz(표1)이지만, 금속 엔드캡을 세라믹 양면에 부착시켜서 만든 고정자의 공진주파수는 105 kHz(표2)로 바뀌었다.

고정자 직경은 11.35 mm, 엔드캡을 포함한 전체 두께 2.87 mm, 고정자와 회전자를 합해진 전체 무게 1.44 g, 회전자에 인가되는 힘이 1.2 mN, 인가 전압 100 V_{max}에서 최대 회전수는 388 rpm 이었다. 즉 최고의 회전수는 회전자와 고정자간에 1.2 mN의 힘을 가할 때 얻어졌다.

표 2. 제작된 풍차형 초음파 전동기의 규격
Table 2. A specification of fabricated windmill type ultrasonic motor

properties	constants
슬롯수	8개
탄성체 두께	0.15 mm
직경	11.35 mm
전체 높이(엔드캡 중심)	2.87 mm
고정자 무게	1.11 g
회전자 무게	0.33 g
구동 전압	100 V _{max}
최대 회전수(1.2 mN 조건)	388 rpm
구동 주파수	105.8 kHz

3.2 슬롯이 6개인 초음파 전동기의 인가힘 특성

그림 4는 회전자에 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 mN의 힘을 가하면서 각각 최대 전압 70, 80, 90, 100 V_{max}를 인가하면서 회전수를 측정 한 결과를 나타낸 그림이다. 여기서 그림 (a)는 탄성체의 두께가 0.15mm이고, 그림 (b)는 탄성체의 두께가 0.2 mm 이고, 그림 (c)는 탄성체의 두께가 0.3 mm인 점이 다르다.

그림 4(a)는 회전자에 가하는 힘이 1.2 mN일 때 최대 회전수는 279 rpm을 100 V_{max}에서 기록하였다. 최저 회전수는 인가 힘 3.0 mN, 인가전압 70 V_{max} 조건에서 158 rpm이었다. 인가 전압이 증가할수록 회전수도 증가하였다. 1.2 mN에서 회전수는 최대 279 rpm에서 최소 213 rpm으로 66 rpm만큼의 변화가 생겼다.

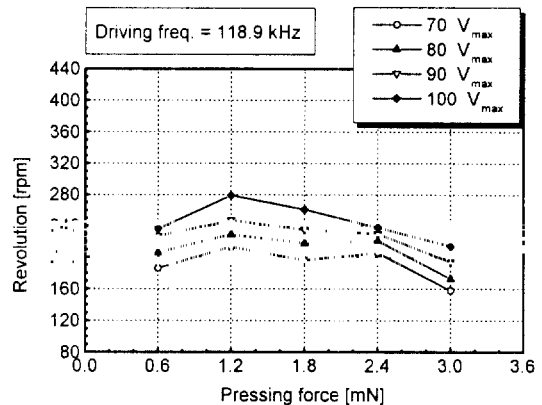
그림 4(b)는 회전자에 가하는 힘이 1.2 mN일 때 최대 회전수는 272 rpm을 100 V_{max}에서 기록하였고, 탄성체 두께가 0.30, 0.20, 0.15 mm로 얇아질수록 회전수는 236, 272, 279 rpm으로 차츰 증가하는 경향이 생겼다. 최저 회전수는 인가 힘 3.0 mN, 인가 전압 70 V_{max} 조건에서 171 rpm이었다. 0.15 mm의 두께에 비해 최저 회전수는 158 rpm에서 171 rpm

으로 증가되었는데 가공상의 문제점으로 여겨진다.

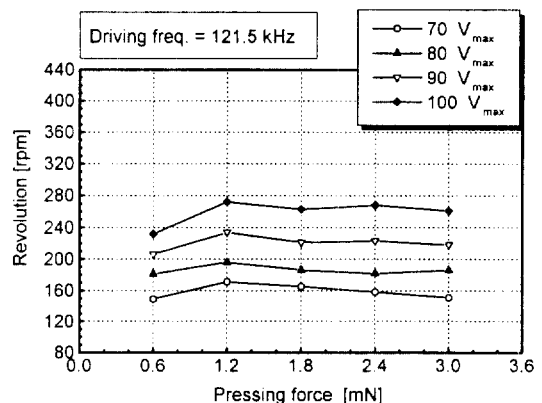
그림 4(c)는 인가하는 전압이 100 V_{max}일 때 0.6 mN에서는 회전수가 212 rpm이고, 1.2 mN에서는 회전수가 236 rpm으로 최대가 되었다가 차츰 감소하여 3.0 mN에서는 회전수가 218 rpm으로 떨어졌다. 최저 회전수는 인가 힘 3.0 mN, 인가전압 70 V_{max} 조건에서 160 rpm이었다. 슬롯이 6개인 탄성체에서 0.15, 0.20 mm 두께에 비해 회전수의 증가폭이 낮은 특성을 나타냈다.

이때 고정자 탄성체의 슬롯수는 6개로 일정하고, 탄성체의 두께가 0.15, 0.2, 0.3 mm로 증가함에 따라 공진주파수가 증가하였기 때문에 구동주파수를 증가시킨 것이다.

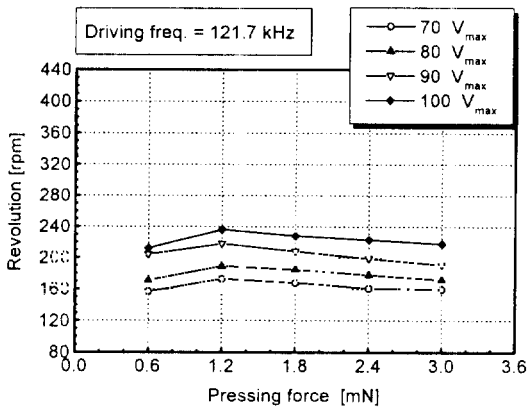
이처럼 인가힘에 따라 회전수가 달라지는 현상은 C. Kusakabe 등의 연구에서도 본 연구와 비교해서 인가하는 힘에서는 차이가 있지만 회전특성에 영향을 미친다고 발표한바 있다⁹⁾. 즉 최적의 인가힘에서 최대회전수를 정점으로 회전수가 감소하는 포물선 형태의 회전특성이 나타나고 있다.



(a) 탄성체 두께 0.15 mm, 슬롯 6개



(b) 탄성체 두께 0.20 mm, 슬롯 6개



(c) 탄성체 두께 0.30 mm, 슬롯 6개

그림 4. 회전자에 가한 힘에 따른 회전 특성
Fig. 4. Rotation characteristic by pressing force applied to a rotor

3.3 슬롯이 8개인 초음파 전동기의 인가힘 특성

그림 5는 회전자에 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 mN의 힘을 가하면서 각각 최대 전압 70, 80, 90, 100 V_{max}를 인가하여 회전수를 측정된 결과를 나타낸 그림이다. 회전자에 가하는 힘이 1.2 mN일 때 최대 회전수를 기록하였는데 100 V_{max}에서 388 rpm이었다. 제작된 9개의 고정자 중에서 최대 회전수를 기록했다. 탄성체의 슬롯수가 많을수록, 두께가 얇아질수록 회전수가 증가한다는 사실은 김진수 등의 연구에서도 발표된다 있다⁷⁾. 회전수를 증가하려면 탄성체의 두께를 얇게, 슬롯수를 많게, 인가전압을 포화 전압이내에서 크게, 또한 적절한 힘으로 고정자와 회전자를 접촉할 필요가 있다. 최소 회전수는 인가 힘 0.6 mN, 인가전압 70 V_{max} 조건에서 236 rpm이었다.

그림 6은 탄성체 두께가 같은 조건에서는 슬롯수가 많을수록 회전수가 증가하였다. 슬롯수가 4, 6, 8개로 많아질수록 회전수는 191, 272, 338 rpm으로 증가되고 있다. 회전자에 가하는 힘이 1.2 mN일 때 최대 회전수를 기록하였는데 100 V_{max}에서 338 rpm이었다. 1.2 mN에서 회전수 증감 폭은 243 rpm에서 338 rpm까지 95 rpm만큼의 변화가 있었다. 최소 회전수는 0.6 mN, 70 V_{max}에서 193 rpm으로 슬롯이 4개, 탄성체 두께 0.20 mm의

최대 회전수와 유사한 회전수를 기록했다.

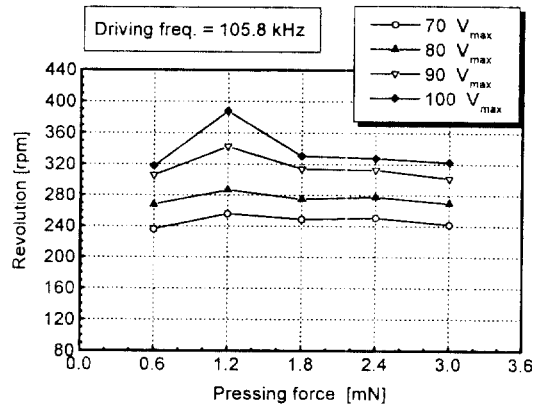


그림 5. 회전자에 가한 힘에 의한 회전 특성
(두께 0.15 mm, 슬롯 8개)
Fig. 5. Rotation characteristic by pressing force applied to a rotor (thickness 0.15mm, 8 slots)

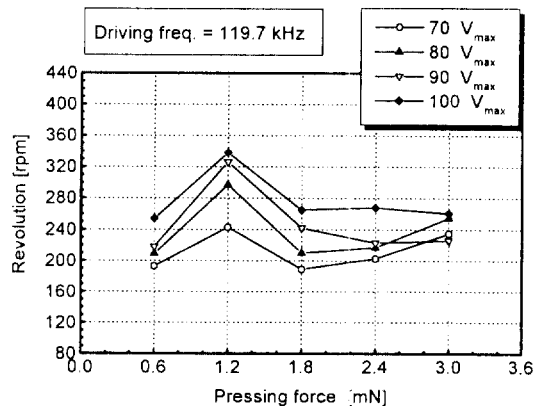


그림 6. 회전자에 가한 힘에 의한 회전 특성
(두께 0.20 mm, 슬롯 8개)
Fig. 6. Rotation characteristic by pressing force applied to a rotor (thickness 0.20mm, 8 slots)

그림 7은 두께 0.30 mm, 슬롯 8개인 경우, 회전자에 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 mN의 힘을 가하면서 회전수를 측정된 결과이다. 최대 회전수는 296 rpm이고, 최소 회전수는 151 rpm으로 증감 폭이 145 rpm이나 되었다. 인가전압 70 V_{max}에서는 누르는 힘에 따라 회전수의 변화 폭이 37 rpm이었지만,

인가전압 100 V_{max}에서는 누르는 힘에 따라 회전수의 변화 폭이 88 rpm이었다. 이 초음파 전동기도 회전자와 고정자간의 접촉력이 1.2 mN로 되었을 때 최상의 회전 특성을 얻었다.

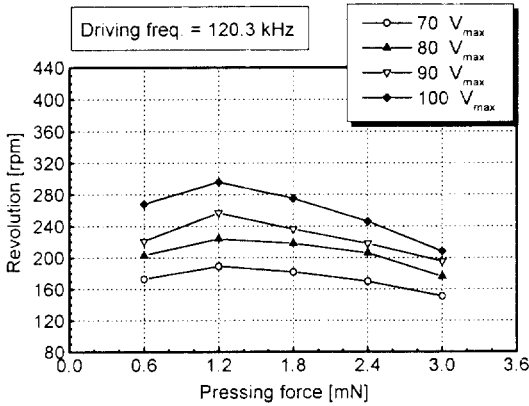


그림 7. 회전자에 가한 힘에 의한 회전 특성
(두께 0.30 mm, 슬롯 8개)

Fig. 7. Rotation characteristic by pressing force applied to a rotor
(thickness 0.30mm, 8 slots)

4. 결론

압전 세라믹스의 상하에 부착되는 탄성체의 슬롯수가 6, 8개이고 두께는 각각 0.15, 0.20, 0.30 mm 일 때 최대 회전수는 회전자에 가하는 힘을 1.2 mN으로 했을 때 나타났다. 고정자와 회전자간에 적절한 힘에 의해 접촉시키면 회전 특성을 향상시킬 수 있음이 확인되었다. 탄성체의 슬롯이 6개일 때 최대 회전수는 인가 힘 1.2 mN, 인가전압 100 V_{max}에서 279 rpm이었고, 0.20 mm에서는 272 rpm, 0.30 mm에서는 236 rpm이었다. 탄성체의 슬롯이 8개이고 두께는 각각 0.15, 0.20, 0.30 mm 일 때 최대 회전수는 인가 힘 1.2 mN, 인가전압 100 V_{max}에서 각각 388, 338, 296 rpm이었다. 풍차형 초음파 전동기에서 회전자에 1.2 mN의 힘을 가할 때 가장 좋은 회전 특성이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 KAIST의

EMDEC 센터의 장비를 일부 사용하였기에 감사합니다.

참고 문헌

- [1] 지승한, 이덕출, 김진수, 전기전자재료학회논문지, Vol. 10, No. 9, pp. 889~894, 1997.
- [2] J. Wallaschek, J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, pp. 71~83, 1995.
- [3] 엄우식, 송준광, 이해욱, 전기전자재료학회지, Vol. 10, No. 7, pp. 727~731, 1997.
- [4] T. Sashida and T. Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, Clarendon press, Oxford, pp. 1~5, 1993.
- [5] S. Ueha, Y. Tomikawa, Ultrasonic Motors, Clarendon Press, Oxford, pp.234~238, 1993.
- [6] 박만주, 김진수, 전기전자재료학회 논문지, Vol. 12, No. 4, pp. 312~318, 1999.
- [7] Jin-Soo Kim, Man-Ju, Park, K. Uchino, Ferroelectrics, Vol. 232, pp. 185~190, 1999.
- [8] B. Koc, A. Dogan, Y. Xu, R. E. Newnham, and K. Uchino, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, pt. 1, No. 10, pp. 5659~5662, 1998.
- [9] C. Kusakabe, Y. Tomikawa, S. Takahashi, and T. Takano, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, part 1, No. 5B, pp. 2966~2969, 1998.