

풍차형 초음파 전동기의 제작과 토크 및 정·역 회전특성

論 文

50C-3-1

Fabrication of the Windmill Type Ultrasonic Motor and Its Characteristics of Torque and Bidirectional Revolution

金永均* · 金鎮洙**
(Young-Gyun Kim · Jin-Soo Kim)

Abstract - In this paper, the windmill type ultrasonic motors with 11.35 mm diameter, 2.87 mm thickness of metal endcap and 1.47 g weight were fabricated. Effects of slots and thickness on torque characteristic in the windmill type ultrasonic motor were investigated, when stator's slots were changed from 4, 6, 8 and thickness 0.15 mm, respectively. Specially designed metal endcaps with windmill shaped cutting can provide longitudinal and torsional displacements simultaneously as the ceramic disk vibrates radially. The windmill type ultrasonic motor has only three components: a stator element with windmill shape slotted metal endcap, a rotor and bearing. Ultrasonic motor stimulated to ultrasonic oscillations by piezoelectrics to drive a rotor via friction contact. The ultrasonic motor fabricated here was the windmill type ultrasonic motor operated by single-phase AC source. Bidirectional revolution using single phase high frequency for driving the ultrasonic motor was presented.

Key Words : Windmill Type Ultrasonic Motor, Endcap, Piezoelectric Ceramic, Torque, Bidirectional Revolution

1. 서 론

정보통신, 의료, 공장 자동화 등 정밀 산업분야에서는 1cm³ 크기 이하의 소형 전동기가 요구되고 있으나, 현재 가장 많이 사용되고 있는 동력원인 전자식 전동기를 고려해볼 때, 전자식 전동기로는 충분한 에너지 효율을 얻기가 어렵다[1,2]. 초음파 전동기는 1973년 IBM의 H. V. Barth에 의해 처음으로 제안되었으나, 일본의 T. Sashida가 제안한 진동편형 전동기가 처음으로 실용화에 가까운 동작을 했다. 이어서 사시다는 1982년에 탄성 표면파를 이용한 진동편형 초음파 전동기를 개발했다. 이는 진동편형에 비해 효율은 다소 떨어지지만 내마모성, 정·역회전 등을 할 수 있게 되었다[3,4]. 현재 프로토타입의 초음파 전동기는 여러 장점에도 불구하고 크기가 직경 30 mm 이상이므로 초소형 구동원이 요구되는 정밀산업 등에서는 사용하기가 어렵고 가격도 비싼편이다. 코일을 사용하는 전자식 전동기가 100여년의 역사를 가지고 있는데 비해 초음파 전동기는 1980년대 이후부터 활발한 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 실제적인 응용이 되기 위해서는 압전 세라믹 개선, 고정자의 진동 특성, 내마모성, 효율, 토크 특성, 시장성 등의 구체적인 분석이 뒤따라야 할 것으로 생각된다. 가장 중요하고 어려운 문제는 진동 특성, 토크의 작용에 대한

상호 관련성 등이다. 이러한 몇 가지 문제점만 해결된다면 초음파 전동기는 저속에서의 고폭, 간단한 설계와 제작, 우수한 제어력 같은 특징을 갖게 되어 정밀산업, 통신, 의료분야 등에서 널리 상용화 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 탄성체의 두께를 0.15 mm, 슬롯수를 4개, 6개, 8개로 가공된 풍차형 초음파 전동기를 3개 유형으로 제작했다. 풍차형 초음파 전동기에서 고정자와 회전자간의 최적의 접촉력을 얻기 위해 회전자에 적당한 힘을 가해 최상의 접촉 조건을 분석한 결과는 이미 논문에서 발표하였으므로 [7,10], 본 논문에서는 선행연구에서 얻어진 최상의 접촉 조건 하에서 풍차형 초음파 전동기 각각의 토크 및 정·역회전 특성에 대하여 연구하고자 한다.

2. 풍차형 초음파 전동기의 동작원리와 제작

2.1 풍차형 초음파 전동기의 동작원리

본 연구에서 사용한 풍차형 초음파 전동기의 명칭은 고정자에 부착된 탄성체의 슬롯 모양이 풍차형으로 생겨 명명하였다. 원판형 PZT 압전 세라믹 상하 면에 황동 탄성체를 부착하여 만든 고정자(stator)에 초음파의 단상 교류전압을 인가하면 압전체는 반경방향 진동(radial direction vibration)을 한다. 이 원판 세라믹의 반경방향 진동에 의해 압전세라믹 상하에 부착된 탄성체도 압전 세라믹과 같은 방향으로 진동한다[5]. 이 탄성체는 상하 똑같이 슬롯(slot)이 만들어져

* 準 會 員 : 韓 國 教 員 大 技 術 教 育 科 碩 士 卒 業

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

接 受 日 字 : 2000 年 5 月 24 日

最 終 完 了 : 2001 年 2 月 28 日

있고, 슬롯이 가공된 황동 탄성체 상하가 어긋나게 부착되어 있기 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 앤드캡(endcaps) 내부 원 주변에서 타원운동이 발생하게 된다[10].

2.2 풍차형 초음파 전동기의 제작

앤드캡 위에 회전자가 접촉하고 있으므로 이 타원운동이 고정자와 회전자간의 마찰력으로 작용하여 회전자를 회전하도록 한다[6]. 고정자는 초음파 전동기의 구동원으로서 핵심 부분인데, 압전 세라믹과 탄성체로 이루어지며 접착력이 좋은 2-type 에폭시의 주체와 경화제의 비율을 50:50으로 하여 탄성체의 가장자리에 얇고 고르게 바른 후 압전체에 부착하여 제작했다. 접착면에서 발생할 수 있는 기포를 제거하기 위해 전기 오븐에서 75 °C로 3시간 정도 유지했다.

탄성체는 CNC선반(광주 남선 선반, MECCA-3, KOREA)을 사용하여 직경 11.37 mm로 가공하여 각각의 슬롯을 두께 0.35 mm 실톱을 사용하여 가공했다. 먼저 세라믹 상하면에 입력 전원으로 사용되는 리드선을 납땀하고, 슬롯을 낸 황동 탄성체를 2-type 에폭시 수지로 접착한다. 그림 1은 슬롯이 6개로 가공된 탄성체를 압전 세라믹 상하에 접착한 고정자위에 회전자를 결합한 풍차형 초음파 전동기의 완성된 모양이다[10].

본 실험에서 사용된 풍차형 초음파 전동기에서 회전 및 토크특성이 가장 좋은 시제품의 사양은 다음과 같다. 탄성체의 두께는 0.15 mm, 슬롯수는 8개, 고정자 직경은 11.35 mm, 앤드캡을 포함한 전체 두께 2.87 mm, 고정자와 회전자 전체 무게 1.44 g, 회전자에 인가되는 힘이 1.2 mN, 인가전압 100 Vmax에서 최대 회전수와 최대 토크는 각각 388 rpm, 7.2 μ N·m 로 나타났다.

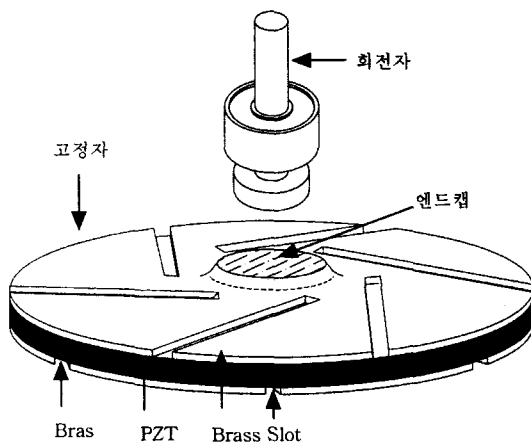


그림 1. 제작한 풍차형 초음파 전동기의 구조[10]
Fig. 1. Structure of windmill type ultrasonic motor

3. 실험장치 및 실험방법

풍차형 초음파 전동기의 회전수 및 토크, 정·역회전 특성을 측정하기 위해서 그림 2와 같은 시스템을 구성했다. 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), digital multimeter(Mastech, Korea) 등이다. 풍차형 초음파 전동기는 회전자와 고정자간의 마찰력으로 회전을 하게 되므로 최적의 마찰력을 측정할 필요가 있다[8]. 그림 2의 측정 시스템에서 풀리를 제거하면 인가힘과 정·역회전을 측정하는 장치가 된다. 신호발생기에서 단상의 고주파 신호를 발생시켜, 이 고주파 신호를 고속 전력증폭기를 통하여 원하는 크기의 전압으로 증폭시킨 다음, 초음파 전동기의 고정자에 인가한다. 고정자위에 회전자를 올려놓으면 마찰력에 의해 회전자는 회전한다. 전자저울(OHAUS, USA)로 질량을 측정된 베어링을 풍차형 초음파 전동기의 회전자 축에 끼워서 누르는 힘 효과로 사용한다. 베어링의 가압력을 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 mN으로 변화하면서 그때의 회전수를 회전속도계로 측정한다.

토크특성 측정시에는 최적의 인가힘을 회전자에 가한 상태에서 탄성체의 두께 및 슬롯수에 따라 공진 주파수에서 단상 전압을 인가하여 속도계(Tachometer)로 회전수를 측정하고 축에 직경 8 mm의 풀리를 고정하여 양쪽에 질량을 매달아 토크를 측정했다.

구체적인 측정 내용은 다음과 같다.

- (1) 탄성체의 두께 0.15 mm, 슬롯이 4개인 고정자로 된 초음파 전동기를 제작하여 각각 최대 전압 70, 80, 90, 100 Vmax를 인가하면서 회전수에 따른 토크, 정·역회전 특성을 측정한다.
- (2) 슬롯수를 6개로 변화시켜 (1)과 같은 방법을 반복한다.
- (3) 슬롯수를 8개로 변화시켜 (1)과 같은 방법을 반복한다.

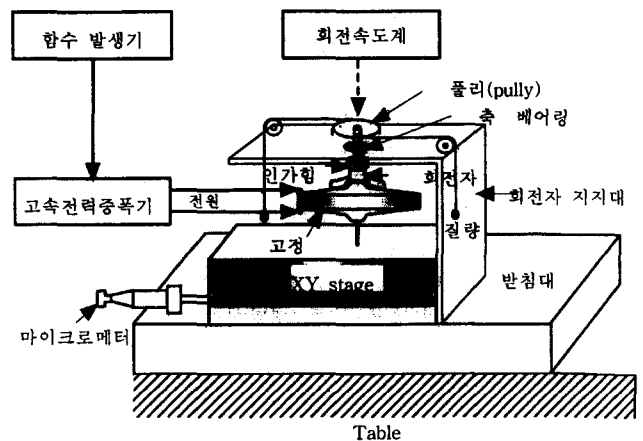


그림 2 풍차형 초음파 전동기의 토크 측정 시스템
Fig. 2 Torque measuring system of windmill type ultrasonic motor

4. 실험결과 및 고찰

4.1 토크 특성

그림 3은 회전자에 1.2 mN의 힘을 가하면서 탄성체의 두께 0.15 mm, 슬롯수 4개인 고정자에 각각 최대 전압 70, 80, 90, 100 Vmax를 인가하여 토크에 따른 회전수를 측정하고 결과를 나타낸 그림이다. 무부하 회전수는 각각 171, 203, 231, 247 rpm이었다. 인가전압이 100 Vmax일 때 0.8 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 213 rpm이고, 1.6 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 192 rpm, 2.4 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 178 rpm, 4.0 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 153 rpm, 4.8 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 136 rpm이었다. 최대 토크는 124 rpm에서 4.8 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$

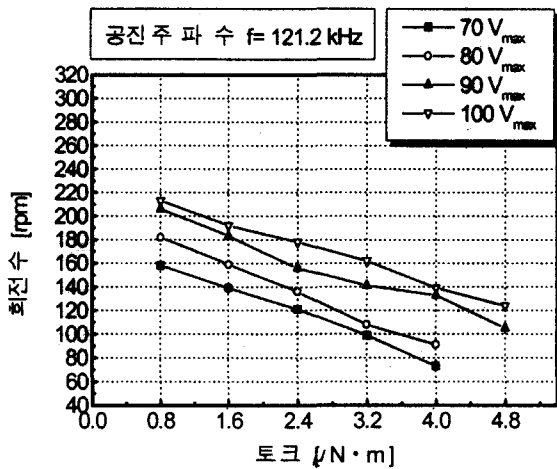


그림 3 탄성체의 슬롯이 4개인 풍차형 초음파 전동기의 토크 특성(탄성체 두께 0.15 mm)
 Fig. 3 Torque characteristics of windmill type ultrasonic motor(thickness 0.15mm, 4 slots)

m 를 기록했다. 토크의 증가에 따라 회전수는 감소했다. 인가전압에 따라 70 Vmax에서는 4.0 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$, 80 Vmax에서는 4.0 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$, 90 Vmax에서는 4.8 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 이었다.

그림 4는 회전자에 1.2 mN의 힘을 가하면서 탄성체의 슬롯 6개, 두께 0.15 mm 고정자에 각각 최대 전압 70, 80, 90, 100 Vmax를 인가하여 토크에 따른 회전수를 측정하고 결과를 나타낸 그림이다. 무부하 회전수는 각각 213, 229, 247, 279 rpm이었다. 인가전압이 100 Vmax일 때 1.6 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 230 rpm이고, 2.4 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 202 rpm, 3.2 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 178 rpm, 4.0 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 153 rpm, 4.8 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 136 rpm, 5.6 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 109 rpm이었다. 최대 토크는 94 rpm에서 6.4 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 로 같은 두께의 슬롯이 4개인 탄성체에 비해 1.6 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 만큼의 토크가 증가되었다.

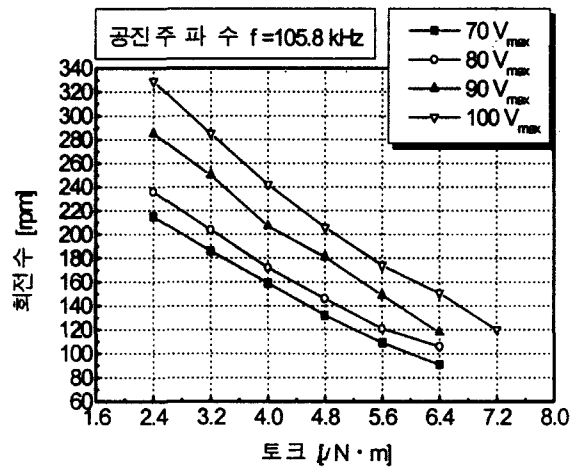


그림 5 탄성체의 슬롯이 8개인 풍차형 초음파 전동기의 토크 특성(탄성체 두께 0.15 mm)
 Fig. 5 Torque characteristics of windmill type ultrasonic motor(thickness 0.15mm, 8 slots)

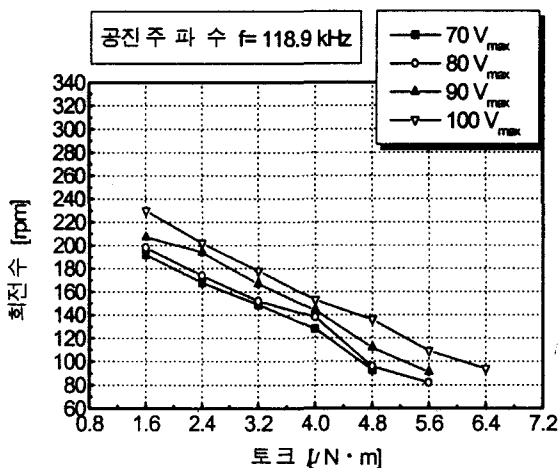


그림 4 탄성체의 슬롯이 6개인 풍차형 초음파 전동기의 토크 특성(탄성체 두께 0.15 mm)
 Fig. 4 Torque characteristics of windmill type ultrasonic motor(thickness 0.15mm, 6 slots)

그림 5는 탄성체의 슬롯수 8개, 두께 0.15 mm 고정자의 토크에 따른 회전수를 측정하고 결과를 나타낸 그림이다. 무부하 회전수는 각각 256, 287, 343, 388 rpm이었다. 인가전압이 100 Vmax일 때 최대 토크 7.2 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 를 120 rpm에서 얻었는데 제작된 3개의 풍차형 초음파 전동기 중에서 가장 큰 토크를 나타냈다. 인가전압에 따른 최대 토크는 70 Vmax와 80 Vmax, 90 Vmax에서 6.4 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 로 같은 값을 기록했다. 슬롯수가 많아질수록 토크 크기도 증가되었고, 직류전동기와 마찬가지로 수하특성(dropping characteristic)이 나타났다. 슬롯이 4개인 경우 최대 토크는 124 rpm에서 4.8 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 을 기록했고, 슬롯이 6개일 때 최대 토크는 96 rpm에서 5.6 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$, 슬롯이 8개일 때 최대 토크는 120 rpm에서 7.2 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ 을 기록했다. 토크의 증가에 따라 회전수가 감소하는 결과는 J. Tsujino 등의[9] 실험에서도 확인되었다.

4.2 정·역회전 특성

그림 6은 탄성체의 슬롯수 4개, 두께 0.15 mm인 고정자를 갖는 풍차형 초음파 전동기의 회전자에 1.2 mN의 힘으로 접촉하고, 인가전압을 80 V_{max}로 했을 때, 주파수에 따른 정·역회전 현상을 나타낸 그래프이다. 139.1 kHz~143.0 kHz에서 129, 137, 148, 151 rpm의 회전속도로 반시계방향으로 회전하기 시작해서 146.9 kHz~150.8 kHz에서는 시계방향으로 95, 120, 135, 128 rpm의 회전수가 기록되었다. 반시계방향의 회전수가 시계방향보다 회전수가 더 많았다.

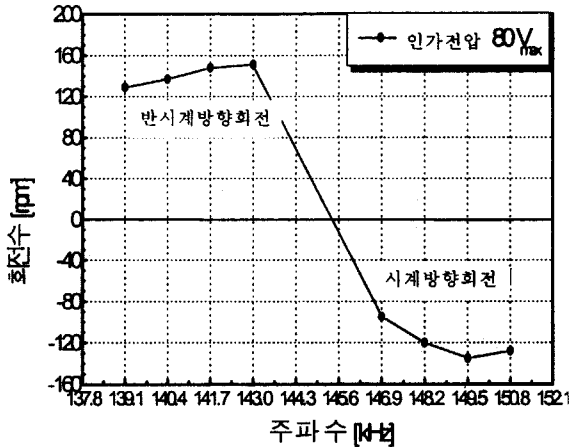


그림 6 탄성체의 슬롯이 4개인 풍차형 초음파 전동기의 정·역회전 특성(탄성체 두께 0.15 mm)
 Fig. 6 Bidirectional revolution characteristic of windmill type ultrasonic motor (thickness 0.15mm, 4 slots)

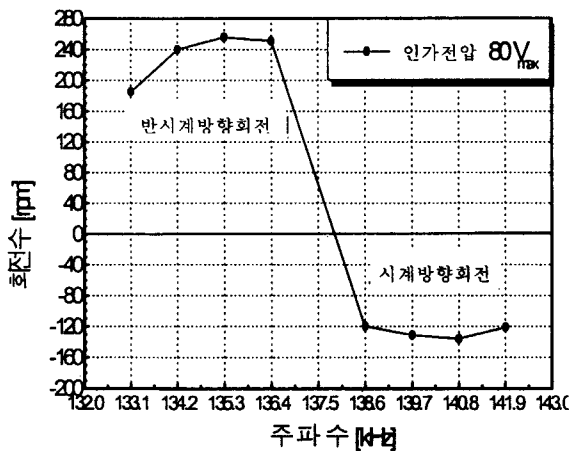


그림 7 탄성체의 슬롯이 6개인 풍차형 초음파 전동기의 정·역회전 특성(탄성체 두께 0.15 mm)
 Fig. 7 Bidirectional revolution characteristic of windmill type ultrasonic motor(thickness 0.15mm, 6 slots)

그림 7은 탄성체의 슬롯수 6개, 두께 0.15 mm 고정자일 때 회전자에 가하는 힘을 1.2 mN으로 하고, 인가전압을 80 V_{max}로 했을 때, 주파수에 따른 정·역회전 현상을 나타낸 그래프인데, 슬롯수가 4개일 때와 비교해서 전체적으로 회전수는 많이 증가되었고 주파수는 다소 낮아졌다. 133.1 kHz에서 185 rpm, 134.2 kHz에서 240 rpm, 135.3 kHz에서 256 rpm, 136.4 kHz에서 251 rpm으로 반시계방향 회전이 되었고 138.6 kHz부터 141.9 kHz까지는 시계방향으로 회전하였다. 반시계방향에서 회전속도는 135.3 kHz에서 최고속도인 256 rpm이었고, 시계방향에서 최고속도는 140.8 kHz에서 136 rpm으로 점선방향인 반시계방향에서 회전수가 시계방향보다는 높게 나타났다.

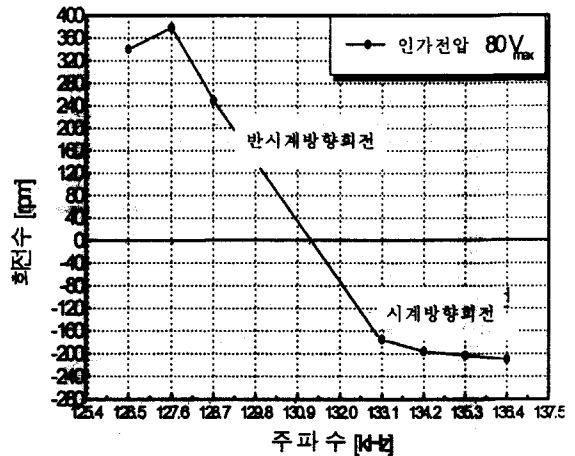


그림 8 탄성체의 슬롯이 8개인 풍차형 초음파 전동기의 정·역회전 특성(탄성체 두께 0.15 mm)
 Fig. 8 Bidirectional revolution characteristic of windmill type ultrasonic motor(thickness 0.15mm, 8 slots)

그림 8은 탄성체의 슬롯수 8개, 두께 0.15 mm 고정자인 경우 정·역회전 현상을 나타냈다. 슬롯수 4개, 6개일 때와 비교해서 가장 좋은 회전수를 기록했다. 주파수 범위도 3개 시제품 중에서 가장 낮게 나타났다. 126.5 kHz에서부터 129.8 kHz까지는 반시계방향으로 각각 340, 378, 249, 143 rpm의 회전수가 나타났는데 127.6 kHz에서 3개 시제품 중에서 최고 회전수인 378 rpm을 기록했다. 133.0 kHz부터 136.3 kHz까지는 시계방향으로 회전하였다. 다른 시제품과 마찬가지로 반시계방향에서 회전속도가 시계방향에서의 회전속도보다 더 높게 나타났다. 이것은 슬롯의 모양이 반시계방향으로 기울어진 형태이므로 기울어진 방향과 같은 반시계방향에서 회전수가 높았다. 주로 정·역회전이 되는 주파수 크기는 탄성체의 슬롯수가 적을수록 높아졌다. 단상 전원만으로도 주파수를 변화시켜 인가하면 풍차형 구조의 초음파 전동기는 정·역회전이 가능함을 발견했다. 이는 아주 특이한 현상으로서 본 논문에서 처음 발표하는 것이며, 이 부분에 대한 메카니즘 규명을 위한 연구가 현재 진행중이다.

5. 결 론

풍차형 초음파 전동기에서 고정자와 회전자간의 최적의 접촉력을 얻기 위해 회전자에 적당한 힘을 가해 최상의 조건을 분석하였다. 얻어진 최상의 접촉 조건하에서 제작된 풍차형 초음파 전동기 각각의 토크 및 정·역회전 특성을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 토크 특성

- ① 회전자에 가하는 힘을 1.2 mN로 일정하게 고정하고 풍차형 초음파 전동기의 토크를 측정했다. 탄성체의 슬롯수가 많아질수록 토크 특성이 향상되었고 최대 토크도 증가하였다.
- ② 슬롯이 4개인 경우 최대 토크는 100 Vmax에서 4.8 μ N·m 이었고, 슬롯이 6개인 경우에 최대 토크는 100 Vmax에서 6.4 μ N·m 로 슬롯이 4개일 때보다 토크는 다소 증가되었다.
- ③ 슬롯이 8개인 경우 최대 토크는 7.2 μ N·m 이었는데 제작된 3개의 초음파 전동기 중에서 토크 특성이 가장 좋았다.

(2) 정·역회전 특성

- ① 단상 교류전원만으로도 정·역회전을 시킬 수 있다.
- ② 회전자에 1.2 mN의 힘을 가해 고정자에 접촉시켜 주파수 크기를 변화시키면서 회전 특성을 측정하였는데 일정 주파수 범위에서 정·역회전이 나타났다.
- ③ 전체적으로 3개의 시제품 각각에서 정·역회전되는 주파수 크기는 차이가 있지만, 탄성체에 가공된 슬롯수가 많을수록 주파수 크기가 낮아졌다.

참 고 문 헌

- [1] J. Wallaschek, "Piezoelectric Ultrasonic Motors", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, pp. 71-83, 1995.
- [2] Q. C. Xu, S. Yoshikawa, J. R. Belsick, and R. E. Newnham, "Piezoelectric Composites with High Sensitivity and High Capacitance for Use at High Pressures", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 38, No. 6, pp. 634-638, 1991.
- [3] 김진수, 이명훈 공역, 초음파 전동기의 이론과 응용, 성안당, pp. 59-68, 2000
- [4] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, and N. Nakamura, Ultrasonic Motors Theory and Applications, Clarendon Press, Oxford, pp. 1-7, 1993.
- [5] Jin-Soo Kim, Man-Ju, Park, K. Uchino, "Composite Ultrasonic Motors Using a Piezoelectric Disc and an Elastic Body of 'Windmill' Type", Ferroelectrics, Vol. 232, pp. 185-190, 1999.
- [6] B. Koc, A. Dogan, Y. Xu, R. E. Newnham, and K. Uchino, "An Ultrasonic Motor Using a Metal-Ceramic

Composite Actuator Generating Torsional Displacement", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, pt.1 No. 10, pp. 5659- 5662, 1998.

- [7] 김영균, 김진수, "압전 초음파 전동기의 토크측정 시스템", 대한전기학회학술대회 논문집, 용평리조트, pp. 1780-1782, 1999.7.
- [8] C. Kusakabe, Y. Tomikawa, S. Takahashi, and T. Takano, "Effect of Pressing Force Applied to a Rotor on Disk-Type Ultrasonic Motor Driven by Self-Oscillation", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, part 1, No. 5B, pp. 2966-2969, 1998.
- [9] J. Tsujino, R. Suzuki, and M. Takeuchi, "Load Characteristics of Ultrasonic Rotary Motor Using a Longitudinal-Torsional Vibration Converter with Diagonal Slits. Large Torque Ultrasonic Rotary Motor", Ultrasonics, Vol. 34, pp. 265-269, 1996.
- [10] 김영균, 김진수, "풍차형 초음파 전동기의 회전자에 인가된 힘이 회전특성에 미치는 영향", 한국전기전자재료학회 논문지, 13권, 5호, pp. 390-395, 2000

저 자 소 개



김 영 균 (金永均)

1961년 4월 9일 생. 1984년 충남대 전기공학과 졸업. 1998년-2000년 한국교원대 대학원 기술교육과 파견(석사). 현재 목포기계공업고등학교 전기과 교사.

Tel : 061-273-6135

E-mail : youngkul@hanmail.net



김 진 수 (金鎭洙)

1960년 9월 6일 생. 1986년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1992년 경원전문대학 조교수 역임, 1996년-1997년 미국 Pennsylvania State University (Post-doc.). 현재 한국교원대 기술교육과 부교수. 현재 대한공업교육학회 편집위원장. 주관심분야 : 초음파 전동기, 압전세라믹 액츄에이터. 전기공업기술교육 등

Tel : 043-230-3743, Fax : 043-230-3787

E-mail : http://cc.knue.ac.kr/~jskim