

신축 진동 모드를 이용한 초음파 모터의 설계 및 특성

12-6-5

Design and characteristics of the ultrasonic motor using extensional vibration mode

강형원*, 윤석진*, 백동수*, 김현재*, 정형진*, 박창엽**

(Hyung-Won Kang*, Seok-Jin Yoon*, Dong-Soo Paik*, Hyun-Jai Kim*, Hyung-Jin Jung*, Chang-Yub Park**)

Abstract

Ultrasonic motors using extensional vibration mode were designed and fabricated with three compositions, $0.05\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3 - 0.95\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ (PAN-PZT), $0.375\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.25\text{PbZrO}_3 - 0.375\text{PbTiO}_3 + 0.5\text{wt}\%\text{MnO}_2$ (PMN-PZT) and $0.05\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.45\text{PbZrO}_3 - 0.5\text{PbTiO}_3$ (PMS-PZT). The piezoelectric ceramic was directly contacted to the shaft without elastic body to transfer the vibration of the piezoelectric ceramics. The problem of adhesion between the piezoelectric ceramics and the elastic body in the stator was eliminated. The properties of the ultrasonic motor, such as the revolution speed and the temperature rise during the operation were measured. The temperature was inversely proportional to the mechanical quality factor of the piezoelectric ceramics. The maximum revolution speed of the ultrasonic motor was achieved at the resonant frequency.

Key Words(중요용어) : Ultrasonic motor(초음파 모터), Extensional vibration mode(신축 진동 모드), Piezoelectric ceramics(압전 세라믹스)

1. 서 론

압전효과란 결정체가 압력을 받아 결정체 내에 전하가 발생하거나 반대로 결정체에 전계를 가할 때 기계적 변형을 일으키는 것을 말한다. 이러한 효과가 발생하는 PZT계 압전 세라믹스에 원소들을 미량 첨가함으로써 각종 용도에 적합한 실용적인 재료를 만들 수 있는 것으로 알려져 있으며 [1, 2], 그 응용은 의료기기, 비파괴 검사, 소나 등의 초음파 응용에서부터 공장 자동화, 로봇, 정밀 위치 결정 등에 이용되는 액츄에이터에까지 다양하다 [3]. 액츄에이터란 어떤 가동에너지를 기계적인 변위 또는 용력으로 변환하는 것으로 일반적인 액츄에이터용 변위 소자는 발생 변위량이 크고, 변위량의 외부 조건에 의한 제어

가 가능하며, 위치의 재현성이 좋고 응답이 빨라야 한다. 이러한 액츄에이터 중 초음파 모터는 초음파 영역의 전기 입력 신호에 의해 진동하는 고정자와 회전자 사이에서 발생하는 마찰력을 회전력으로 변환시키는 것을 말한다.

일반적인 초음파 모터의 경우 고정자는 압전 세라믹스가 탄성체에 접촉되어 있는 구조로 인하여 압전 세라믹스에서 발생하는 진동이 탄성체로 완전히 전달되지 못하며 간단한 구조와 소형화하는데 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 탄성체 없이 압전 세라믹스만을 고정자로 하고 회전축에 직접 접촉시켜 고정자 내부의 접촉 부분으로 인해 발생하는 영향을 제거하고 압전 세라믹스에서 발생하는 변위를 회전축에 그대로 전달시킬 수 있는 초음파 모터를 설계하고 그 특성을 비교, 분석하고자 한다.

2. 초음파 모터의 설계

압전 세라믹스의 전기 기계 결합 계수 및 기계적 품질 계수는 초음파 모터의 효율을 결정짓는 가장 중요

* : 한국과학기술연구원(KIST) 박막기술연구센터
(서울시 성북구 하월곡동 39-1 번지, Tel : 02-958-5114/6114,
Fax : 02-958-5478)

** : 연세대학교 전기공학과
1999년 2월 9일 접수, 1999년 5월 20일 심사완료

한 변수이다. 그런데 이 값들은 진동 모드에 따른 공진, 반공진 주파수의 값에 따라 결정된다. 여기서는 신축 진동 모드를 이용하는 초음파 모터를 설계하였다. 신축 진동 모드를 최대한 이용하는 초음파 모터의 경우, 사용되는 압전 세라믹스의 내경과 외경의 비를 내경/외경 = 0.3이 되도록 해야 한다[4].

이미 압전 특성이 확인된 조성들[7, 8, 9]을 사용하여 압전 세라믹스의 내경, 외경, 두께를 각각 6mm, 20mm, 0.8mm가 되게 가공하였다. 이때 압전 세라믹스와 초음파 모터의 회전축(shaft)과의 접촉면을 좋게 하기 위해 내경을 그림 1처럼 45° 비스듬하게 가공하였다.

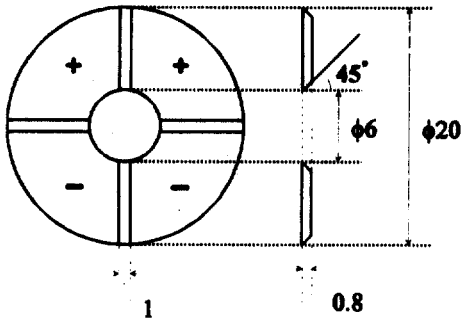


그림 1. 압전 세라믹스의 전극 구조
Fig. 1. Electrode structure of the piezoelectric ceramics

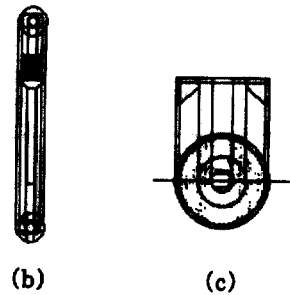
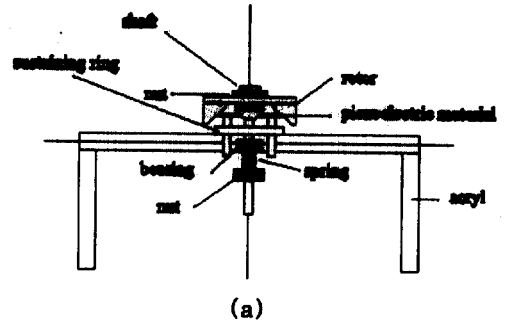


그림 2. 초음파 모터의 구조 (a) 개략도 (b) 회전축
Fig. 2. Structure of the ultrasonic motor (a) Schematic (b) Shaft

3. 구동 및 특성

설계된 압전 초음파 모터의 구조는 그림 2(a)와 같으며 (b)는 회전축을 나타내었다. 회전축은 내마모성과 진동의 온도 특성 등이 우수한 황동을 선택하여 제작하였으며 회전축의 각을 45°로 하여 이미 제작된 압전 세라믹스와의 접촉을 좋게 하였다.

한편 회전축이 직접 압전 세라믹스와 접촉할 경우에는 진동에너지의 전달과 압전 세라믹스의 마모와 같은 문제가 발생하므로 회전축에 마찰계수가 큰 마찰 재료(frictional material)를 사용하여 압전 세라믹스와의 접촉 부위에 붙여야 한다[5]. 여기서는 효율과 출력력을 고려하여 teflon을 사용하였다[6]. 압전 세라믹스에 위상차가 90°인 sin과 cos신호를 인가하기 위해 압전 세라믹스에 두께 0.2mm의 구리 ring을 압전 세라믹스가 지지대와 닿는 부분의 안과 바깥쪽에 접촉시켰고 압전 세라믹스를 지지하기 위해서 ring형태로 acryl을 가공한 후 acryl은 황동으로 고정시켰다.

초음파 모터를 구동시키기 위한 구동도를 그림 3에 나타내었다. 설계된 초음파 모터의 실제 구동주파수를 알기 위해서 한성제인 압전 세라믹스의 공진 주파수를 Network Analyzer를 이용하여 측정하였다.

주파수 발생기(Freq. generator)를 통해 이미 측정된 공진 주파수 값을 갖는 미세한 sin 신호를, 증폭기 2(Amp 2)를 거쳐 직접 초음파 모터에 인가하고 또 미분기 회로를 거쳐 cos 신호로 바꾼 후 증폭기 1(Amp 1)을 이용하여 초음파 모터에 인가한다. 이렇게 하여 크기가 같고 위상차가 90°가 되는 sin 신호와 cos 신호를 동시에 인가하였다. 여기서 D.C source는 미분기 회로의 OP-AMP를 구동하기 위한 것이다. 초음파 모터의 회전속도는 Hand Tachometer (TM-4000)를 이용하여 측정하였고 구동시 압전 세라믹스(고정자)의 발생되는 온도는 Non-contact infrared thermometer(CT-30)를 사용하여 측정하였다.

조성에서 공진 주파수가 높을수록 빨랐다. 또한 각 조성에서 공진 주파수 근처일수록 더욱 빨리 회전하였다.

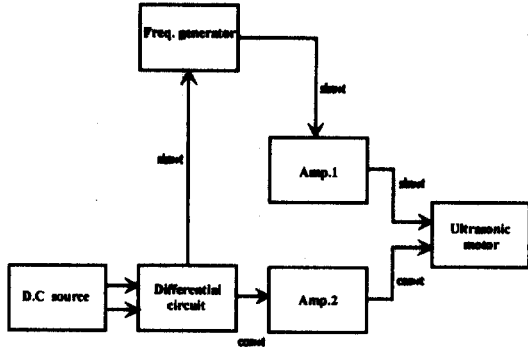
표 1. 압전 세라믹의 특성

Table 1. Properties of the piezoelectric ceramics

	k_p (%)	Q_m	d_{33} ($10^{-12}C/N$)
PAN-PZT	55	83	381
PMN-PZT	53	1729	315
PMS-PZT	47	1893	251

이 결과는 회전수에 영향을 주는 것이 공진 주파수임을 의미한다. 한편 기계적 품질 계수와 회전수를 비교해 보면 기계적 품질 계수의 증가에 따라 회전수가 증가한 것은 사실이지만 이것이 회전수에 직접적인 영향을 주었다고는 볼 수 없다. 왜냐하면 기계적 품질 계수의 값은 PAN-PZT, PMN-PZT, PMS-PZT가 각각 83, 1729, 1893로 증가한 반면에 회전수는 889, 1132, 1935로 값에 비례해서 증가하지 않았기 때문이다. 실제로 기계적 품질 계수는 기계적 진동의 크기와 비례하지만 [10] 그 크기가 회전수와 어떠한 관계가 있는지는 밝혀진 바 없다.

실험한 세가지 조성 중 가장 낮은 기계적 품질 계수를 나타낸 PAN-PZT의 회전수도 현재 사용되고 있는 글록 진동 모드의 초음파 모터가 갖는 약 600rpm [10]보다 높은 값을 나타내었다.



D.C source : Dual DC regulated power supply (model : MC-2330AD)

Amp.1 : High speed power amplifier (NF 4005)

Amp.2 : High speed power amplifier (NF 4010)

Differential circuit : 미분기 회로

Freq. generator : High frequency power supply

Ultrasonic motor : 초음파 모터

그림 3. 초음파 모터 구동도

Fig. 3. Block diagram of the ultrasonic motor drive

4. 결과 및 고찰

4.1 압전 세라믹스의 특성

실험에 선택된 조성에 대한 압전 특성은 표 1과 같다. 전기 기계 결합 계수와 기계적 품질 계수의 변화에 따른 초음파 모터의 특성을 보기 위해 3가지 조성을 선택하였다. 기계적 품질 계수는 $0.375Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-0.25PbZrO_3-0.375PbTiO_3+0.5wt\%MnO_2$ (이하 PMN-PZT) [7]와 $0.05Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O_3-0.45PbZrO_3-0.5PbTiO_3$ (이하 PMS-PZT) [8]가 $0.05Pb(Al_{0.5}Nb_{0.5})O_3-0.95Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ (이하 PAN-PZT) [9]보다 월등하게 높았다. 그러나 전기-기계 결합 계수는 PAN-PZT가 가장 높게 나타났다.

4.2 초음파 모터의 특성

초음파 모터의 주파수 변화에 따른 회전 특성은 그림 4와 같다. 초음파 모터가 회전하는 주파수 범위는 PAN-PZT의 경우 75.8~79.4 [kHz] 였고, PMN-PZT의 경우 97.2~99.0 [kHz] 였으며, PMS-PZT의 경우 95.9~99.9 [kHz] 였다. 회전수는 표 1의

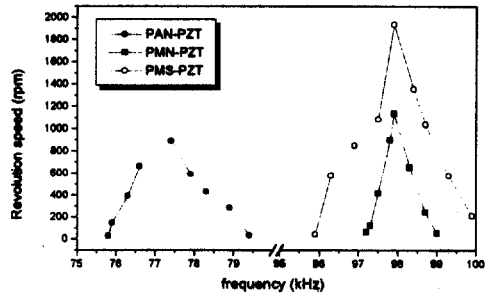


그림 4. 주파수에 따른 초음파 모터의 회전 특성 ($V_{pp} = 130$)

Fig. 4. Properties of rotation of the ultrasonic motor according to frequency ($V_{pp} = 130$)

그림 5에 각 조성의 공진 주파수에서 전압에 따른 초음파 모터의 회전 특성을 나타내었다.

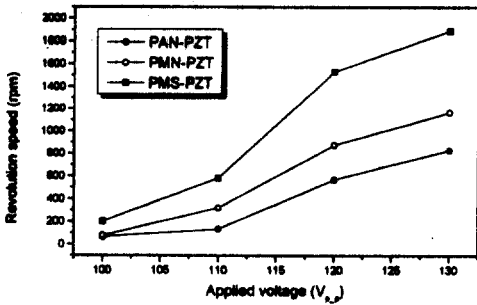


그림 5. 공진주파수에서 인가 전압에 따른 초음파 모터의 회전 특성

Fig. 5. Rotation properties of the ultrasonic motor according to the applied voltage in the resonant frequency

결과를 보면 PMS-PZT가 가장 높은 값을 나타내었고 PAN-PZT가 가장 낮은 값을 나타내었다. 처음 회전하기 시작하는 전압부터 일정한 회전수에 이르는 전압까지의 간격이 매우 짧게 나타났는데 이것으로 보아 전압의 인가에 따른 정확한 회전수 조절이 공진주파수에 의한 회전수 조절보다 어려울 것으로 생각된다.

그림 6에 구동 시간에 따른 초음파 모터의 고정자의 온도 특성을 나타내었다. 온도 특성 측정에 대한 조건은 각 조성으로 이루어진 초음파 모터에 입력전압 130V_{pp}, 각 조성의 최고 회전수, 그리고 각 조성의 공진주파수에서 초음파 모터의 온도 특성을 측정한 것으로 측정결과 사용되는 조성의 압전 특성 중 기계적 품질 계수에 크게 영향을 받는다[10]는 것을 알 수 있다.

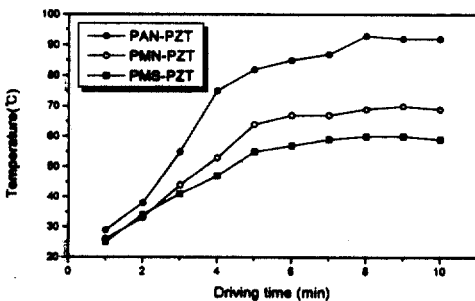


그림 6. 시간에 따른 초음파 모터의 온도 특성
Fig. 6. Properties of the temperature of the ultrasonic motor according to the driving time

기계적 품질 계수의 값이 작을수록 손실이 크며 그 손실은 열의 형태로 발산한다. PAN-PZT, PMN-PZT, PMS-PZT의 기계적 품질 계수는 표 1에 나타난 바와 같이 각각 83, 1729, 1893로 PAN-PZT가 가장 낮았고 온도 변화를 보면 PAN-PZT를 사용한 초음파 모터의 온도가 다른 두 조성을 사용한 것보다 컸다. 따라서 초음파 모터의 발생 온도는 구동원으로 사용된 압전 세라믹스의 기계적 품질 계수와 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다. 그리고 발생 온도는 약 8분 정도 경과된 후에 일정하게 유지되었다.

5. 결 론

초음파 모터에서 발생하는 판성체로 인한 문제를 해결하기 위하여 신속 진동 모드를 이용하면서 판성체를 제거하였고 압전 세라믹스만을 고정자로 하여 압전 세라믹스에서 발생하는 변위를 회전축에 최대한 전달시킬 수 있도록 초음파 모터를 설계, 제작하였다.

초음파 모터의 최대 회전은 PAN-PZT, PMN-PZT, PMS-PZT 순으로 각각의 공진주파수에서 889, 1132, 1935 [rpm]의 값을 가졌다. 압전 세라믹스의 기계적 품질 계수 Q_m 값은 순서대로 83, 1729, 1893였고 기동시 초음파 모터의 발생 온도는 구동 8분 경과 후 93, 70, 60°C였다. 각 모터의 회전수는 공진주파수에서 최대였고 모터의 기동시 발생 온도는 기계적 품질 계수 값에 반비례하였으며 회전수 제어는 공진주파수에 의한 제어가 전압의 인가에 의한 제어보다 용이하였다.

실험을 통해 사용한 조성 중 최대 회전수를 갖고 구동시 발생 온도가 낮은 PMS-PZT가 초음파 모터에 적합한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. B. Jaffe, R. S. Roth, and S. Marzullo, "Properties of Piezoelectric Ceramic in the Solid-Solution Series Lead Titanate-Lead Zirconate-Lead oxide : Tin Oxide and Titanate-Lead Hafnate", *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 55[5], 239(1955).
2. K. Okazaki, "Developments in fabrication of piezoelectric ceramics" *Ferroelectrics*, 41, 77-96(1982).
3. K. Uchino, "Electrostrictive Actuators", *Am.*

- Ceram. Soc. Bull.*, 65[4], 647-52(1986).
4. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Nishimura, "Ultrasonic Motors : Theory and Applications", Clarendon Press, 64(1993).
 5. 見城尙志, 指田年生, 超音波 モタ 入門, 総合電子出版社(1990).
 6. Y. Tada, M. Ishikawa, and N. Sagara, *Polymer Preprints* 4 17-23(1991).
 7. 일본 특허 53-6642(1953).
 8. Seok-Jin Yoon, Hyung-won Kang, Sergey I. Kucheiko, Hyun-Jai Kim, Hyung-Jin Jung, "Piezoelectric properties of $Pb[Zr_{0.45}Ti_{0.5-x}Lu_x(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}]O_3$ ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.* 81[9], 2473-76(1998).
 9. 이흥렬, 윤석진, 김현재, 정형진, *전기 전자 재료 학회지* 5[2], 207-215(1992).
 10. K. Uchino, "Piezoelectric Actuators/Ultrasonic Motors" Kluwer academic publishers 361(1996).