

압전초음파모터 제작 및 평가장치 개발 Development of an Ultrasonic Motor and Evaluation Device

신 성 수*, 류 영 수*, 김 유 만*
(S. S. Shin*, Y. S. Ryoo*, Y. M. Kim*)

요 약

압전초음파모터는 기존의 전자기식모터와는 달리 압전전체가 발생하는 초음파진동에 의한 마찰력으로 회전자의 구동력을 얻는 모터이다. 이는 구조가 간단하고, 저속에서 높은 토크를 얻을 수 있어 감속기구 없이 직접구동이 가능한 장점이 있어 주목을 받고 있다. 그러나 이 모터는 인가주파수, 인가전압, 2상의 구동신호사이의 위상차 및 구동신호의 duty비 등에 따라 그 특성이 변하므로, 모터를 제어하기 위해서는 이러한 변수들에 대해 정밀한 특성측정이 필요하다. 본 연구에서는 초음파모터의 제작과 함께 컴퓨터인터페이스된 압전초음파모터 평가장치를 개발하였고, 제작한 초음파모터의 특성을 여러 구동변수에 대해 측정하였다. 구동변수들은 모두 디지털로 처리되므로, 초음파모터의 특성측정을 쉽게 할 수 있을 뿐만 아니라, 차후 초음파모터의 디지털제어에 기본 바탕이 된다.

ABSTRACT

Ultrasonic motor is a motor driven by the stator via frictional contact forces generated from ultrasonic vibration of piezoelectric elements. In order to control the ultrasonic motor, it is essential to measure accurately the motor characteristics with respect to driving parameters such as frequency, voltage, phase difference and duty ratio of the driving signals. In this paper, a PC-interfaced evaluation device is developed, and the characteristic curves of the fabricated ultrasonic motor are measured with those parameters. All driving parameters are processed digitally. The developed evaluation device can facilitate characteristics measurements effectively, and provide a base for digital control of the ultrasonic motor.

1. 서 론

압전초음파모터는 압전세라믹(PZT)에 교류전압을 인가하였을 때 발생하는 초음파진동에 의한 고정자와 회전자 사이의 마찰력을 이용하여 구동력을 얻는 모터이다. 이는 기존의 전자기식 모터와는 달리 코일이 없어 구조가 간단하고, 정지시 홀딩 토크(holding torque)가 크고, 정역회전이 자유로우며, 응답성이 10 ms 정도로 빠르다는 장점이외에도 저속에서 높은 토크를 내기 때문에 기어와 같은 감속기구 없이 직접구동이 가능하기 때문에 차세대 모터로 주목을 받고 있다. 이러한 특성으로 인하여 초음파모터에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 또한 많은 종류의 초음파모터가 제안, 개발되어 왔다.^[1,3]

그러나 초음파모터는 마찰력을 구동력으로 하므로 아직까지 구동논리가 명확히 알려져 있지 않다. 또한 구동

특성에 영향을 미치는 파라미터가 여러가지이므로 이들을 고려한 초음파모터의 특성모델을 수학적으로 기술하기는 매우 어렵다. 따라서 초음파모터를 제어하기 위해서는 먼저 구동파라미터에 대한 모터의 구동특성을 정확하게 측정해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 현재 가장 실용성이 높은 ring type 진행과형 초음파모터를 제작하고, 그 구동특성을 측정하기 위한 컴퓨터인터페이스된 초음파모터평가장치에 대해 설명한다. 구동파라미터는 입력주파수, 인가전압, 인가되는 2상의 구동신호 사이의 위상차 그리고 구동신호의 듀티비(duty ration)로 하였다. 이들은 모두 디지털로 처리되었으며, 차후 초음파모터의 디지털제어를 위한 기본이 된다.

2장에서는 제작한 압전초음파모터의 진동특성 및 평가장치의 구성과 기능을, 3장에서는 실험 및 결과고찰을, 그리고 4장에서는 결론에 대해 기술하였다.

* 삼성전자 기술총괄 기반기술센터
접수일자: 1995년 4월 15일

II. 본 론

1. 초음파모터 제원 및 진동특성

그림 1에 사체 제작한 초음파모터의 제원을 나타내었으며 표시된 수치는 모두 mm 단위이다. 이는 일본 산성공업의 초음파모터 USR 45를 기준으로 한 것이다. 고정자의 지지를 위해서 내부에는 3개의 볼트구멍을 내었으며, 모터의 효율을 높이기 위하여 탄성체 ring의 표면에는 이빨을 내었다. 이는 탄성체가 진동할 때, 중립축의 위치를 아래로 치우치게 하는 효과가 있어 이빨표면에서의 진동변위가 크게 되어 모터의 효율을 증대시킨다. 탄성체의 재질은 황동이다.

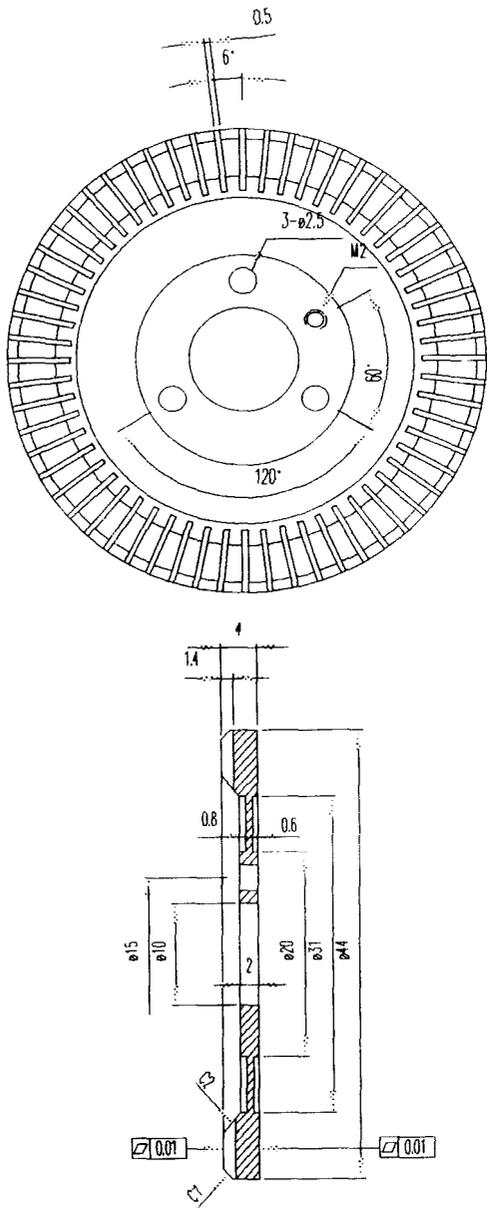


그림 1. 탄성체의 형상 및 치수
Fig. 1 Configuration of the elastic body

초음파모터에 인가하는 교류전압의 주파수를 설정하기 위해서는 압전세라믹과 집착된 탄성체로 이루어진 고정자의 진동해석이 필요하다. 이를 위해 유한요소법을 이용하였다. 그림 2에 탄성체의 유한요소모형을 나타내었다. 탄성체는 7개의 고정점과 각각 방향적으로 정해져 있어 컴퓨터의 계산시간 및 기억용량의 절감을 위해 원주방향으로 1/4 좌상단부를만을 모델링하고 한쪽은 symmetry 경계조건을, 다른 쪽은 skew symmetry 상계조건을 적용하였다. 반경방향의 경계조건은 $r=10\text{mm}$ 에서 clamped 경계조건을 주었으며, 나머지 부분은 free 경계조건을 주었다. ANSYS 해석을 통한 고유진동수는 44.18kHz로 계산되었으며, 이 때의 진동모드플 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 실선 및 점선은 각각 변형된 모습과 변형전의 모습을 나타낸다.

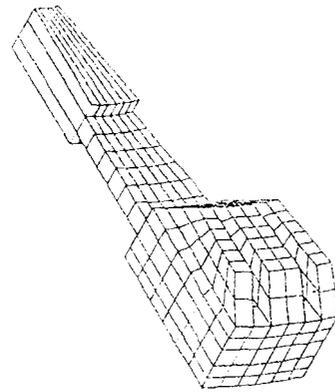
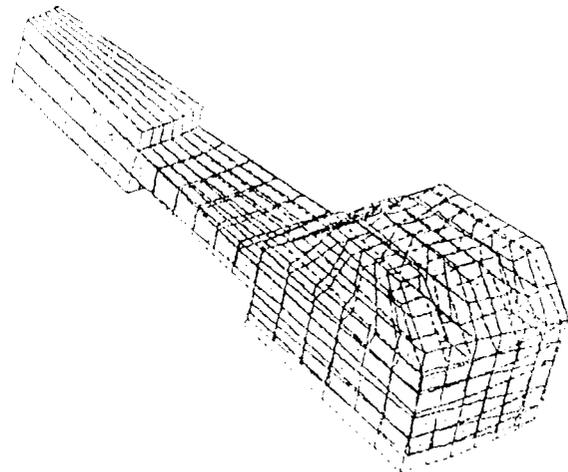


그림 2. 탄성체의 유한요소모델
Fig. 2 FEM model of the stator

계산으로 구한 고유진동수를 검증하기 위하여 고정자의 어드미턴스를 임피던스미터로 측정하였다. 그림 4에 그 모습을 나타내었다. 이 그림으로부터 고유진동수는 46.9kHz임을 알 수 있다. 계산결과와 약 2.5kHz의 오차가 발생한 것은 모델링의 간략함과 고정자 재질의 물성값을 정확히 알 수 없음에 기인한 것으로 판단된다.



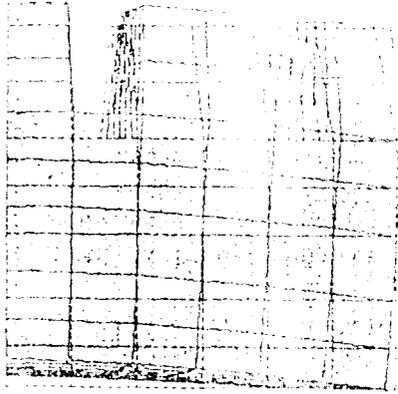


그림 3. 탄성체의 진동모드형상
Fig. 3 Mode shapes of the stator

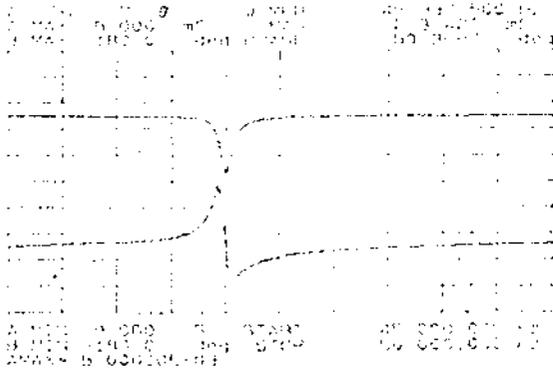


그림 4. 측정된 고정자의 어드미턴스 및 위상
Fig. 4 Measured admittance and phase of the stator

2. 압전초음파모터 평가장치

2.1 일반적인 압전초음파모터의 구동방법

압전초음파모터의 일반적인 구동방법에 대한 블록도를 그림 5에 도시하였다. 전압제어발진기(VCO: Voltage Controlled Oscillator)는 외부에서 정해주는 전압에 따라 일정 주파수의 펄스파형을 내는 요소로서 보통 555 timer로 구성되며, 모터의 구동주파수 f 의 4배인 $4f$ 의 주파수를 갖는 펄스파를 발생한다. F/F 분주기는 Flip-Flop으로 구성되는 분주기로 VCO에서 받은 신호를 위상차가 90° 이고 주파수가 f 인 4개의 펄스신호를 증폭회로로 보낸다. 증폭회로는 power transistor와 변압기로 구성되어 있다. 이는 분주기에서 보내온 4개의 펄스신호를 조합, 증폭하여 위상차가 90° 이고 주파수가 f 인 2상의 구동신호를 압전초음파모터에 보내어 모터를 구동시킨다.

그러나 이 방법은 압전초음파모터의 구동주파수에 대한 특성밖에 알 수 없고, 또한 555 timer의 특성이 작은 전압변화에 대해 큰 주파수 변화를 일으키며, 또한 주변 수동소자의 온도에 따른 특성변화로 인해 안정된 주파수를 얻기가 어려운 단점이 있다. 따라서 정확한 구동파라

미터에 대한 초음파모터의 특성측정은 이 방법으로는 한계가 있다. 다음절에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 구동주파수 뿐만 아니라, 구동전압, 2상의 구동신호 사이의 위상차, 펄스의 duty비등, 구동파라미터를 디지털화하여 컴퓨터인터페이스된 평가장치에 대해 설명한다.

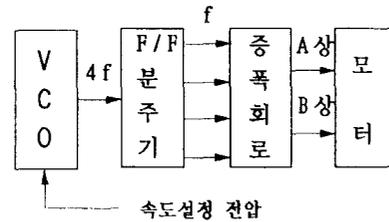


그림 5. 압전초음파모터의 구동방법
Fig. 5 Conventional method for driving ultrasonic motor

2.2 압전초음파모터 평가장치의 구성 및 기능

압전초음파모터는 다변수시스템(multivariable system)이다. 즉, 모터의 회전에 관계하는 변수가 여러개이며, 각 변수의 모터회전에 대한 영향을 측정, 평가해야만 압전초음파모터 전반에 걸친 성능평가와 더불어 그 설계법을 확립할 수 있다. 따라서 압전초음파모터의 성능을 측정, 평가할 수 있는 평가장치의 제작은 개발과정의 필수요건이 된다.

개발한 평가장치는 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 모터의 구동신호를 발생시키기 위한 회로부분은 컴퓨터 인터페이스와 차후의 원칩(one chip)화를 위하여 전부 디지털소자로 구성되었으며, 기구부분은 고정자와 회전자 및 이들 사이에 압착력을 주는 가압기구, 그리고 회전수측정을 위한 엔코더로 구성되어 있다. 소프트웨어부분은 구동신호의 생성과 제어에 필요한 데이터 및 엔코더로부터의 신호를 처리하여 모터의 위치 및 속도를 계산한다.

(가) 회로부분

그림 6에 평가장치의 회로부분에 대한 블록도를 나타내었다. 기본적으로 컴퓨터와의 인터페이스를 위한 address decoder와 구동신호발생을 위한 카운터회로, D/A 컨버터, multiplexer, 증폭회로, 그리고 엔코더 신호처리회로로 구성된다. 이 평가기는 주파수, 위상차, 듀티비를 12비트 카운터를 이용하여 제어한다. 카운터회로는 80 MHz를 기본 클럭으로 하였고, 주파수의 가변범위는 20 kHz에서 4.7MHz까지이다. 일반적으로 초음파모터구동에 이용되는 주파수영역(30~80kHz)에서 약 50Hz 정도의 해상도를 가진다. 위상차의 가변범위는 $10^\circ \sim 170^\circ$ 이고, 듀티비의 가변범위는 5~45%이다. 위상차 및 듀티비의 해상도는 각각 1° , 1% 미만이다. 전압제어에는 8비트 D/A컨버터를 이용하였다.

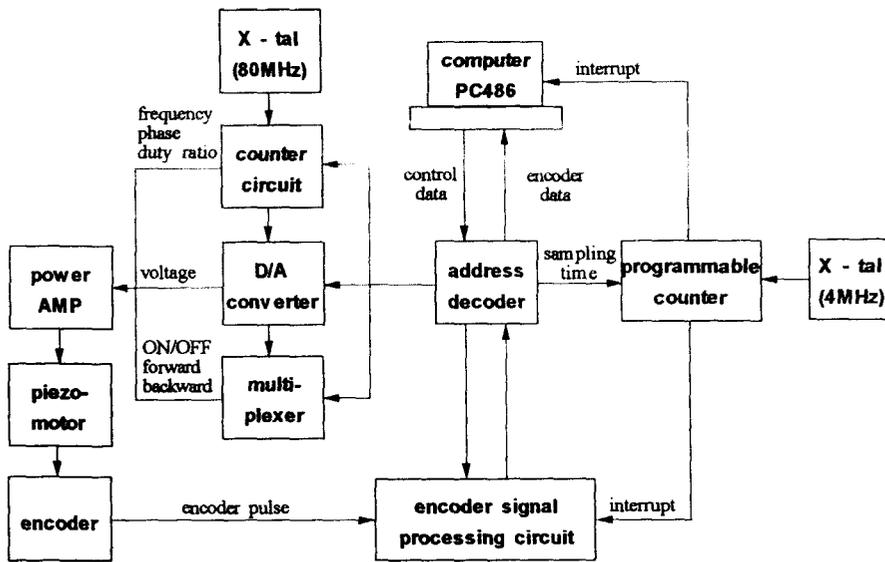


그림 6. 압전초음파모터 평가장치회로의 블럭도
Fig. 6 Block diagram of evaluation circuit

증폭회로는 power-FET와 변압기로 구성되었으며, 변압기의 1차 및 2차측의 권선비는 1:10이다. 이로부터 구동전압의 범위를 20~280V_{p-p}에서 조절할 수 있다.

엔코더 신호처리회로는 intel의 8254 programmable counter에서 발생하는 신호를 인터럽트(interrupt)원인으로 하여, 모터의 회전에 따른 엔코더펄스의 변화를 컴퓨터로 전송하는 역할을 하며, 이 데이터를 기초로 컴퓨터

내부에서 모터의 회전위치와 속도가 계산된다.

(나) 기구부분

그림 7에 평가장치의 기구부분의 구성을 나타내었다. 모터의 회전측정을 위한 엔코더는 Canon의 Rotary Encoder R-10을 사용하였으며, 한 회전당 81,000펄스의 해상도를 갖고 있다.

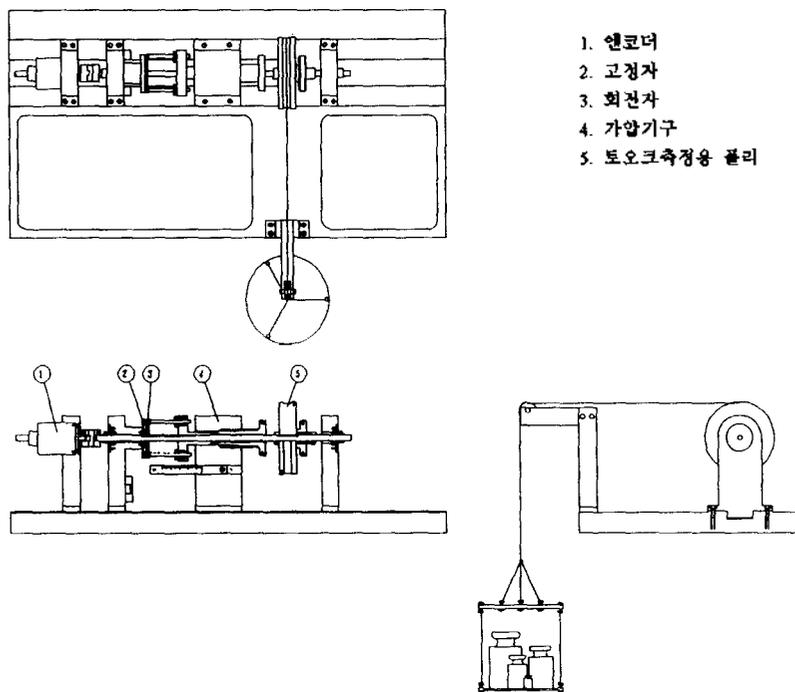


그림 7. 압전초음파모터 평가장치 기구 부분의 구성
Fig. 7 Mechanical part of the evaluation device

가압기구는 고정자와 회전자 사이의 마찰력을 가면서
키기 위한 것으로 균일한 압력이 가해지도록 4개의 스프
링을 고정자의 ring부위에 배치하였고, 토오프측정을 위
한 풀리(pulley)도 설치하였다.

(다) 소프트웨어부분

컴퓨터는 address decoder를 통하여 회로와 연결되어
디지털소자의 동작을 제어하므로, 모터의 정, 역회전과
ON/OFF는 물론, 엔코더 신호처리에 있어서의 샘플링시
간의 변경, 원하는 주파수, 위상차, 듀티비를 가지는 구
동신호의 생성 등을 프로그램을 통하여 구현할 수 있다.
따라서 압전초음파모터의 각 구동파라미터에 대한 성능
평가를 쉽고 빠르게 수행할 수 있으며, 차후 디지털제어
를 구현할 수 있는 바탕이 된다.

III. 실험결과 및 고찰

제작한 압전초음파모터의 특성에 대한 평가를 위해,
개발한 평가장치를 이용하여 각 구동변수에 대한 모터의
회전속도의 변화를 관찰하였다. 그림 8, 9, 10, 11에 주파
수, 위상차, 듀티비, 전압에 따른 모터의 회전속도의 변
화를 각각 나타내었다. 이는 모두 무부하상태에서의 실
험결과이다.

그림 8에서 알 수 있듯이 고정자의 공진주파수(46.9
kHz)에서 최대의 속도가 나타남을 볼 수 있으며, 이 때
의 회전속도는 대략 초당 3회전(180 rpm) 정도이다. 또
한 46.6~48.2kHz 영역이 모터의 회전가능영역임을 알
수 있다. 그리고 공진주파수이하의 영역에서는 모터의
회전이 불안정하고, 공진주파수를 약간 넘는 47kHz이상

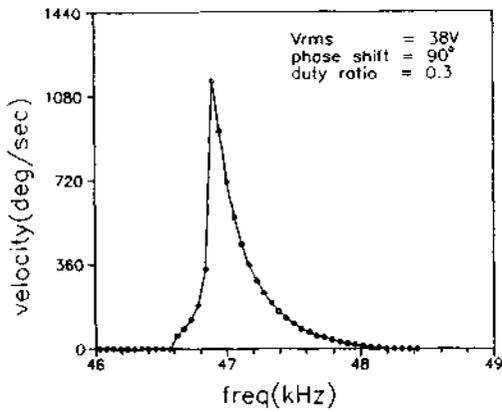


그림 8. 주파수에 따른 속도변화
Fig. 8 Motor speed versus frequency curve

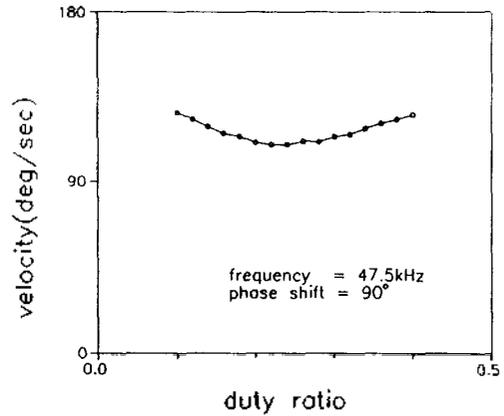


그림 10. 듀티비에 따른 속도변화
Fig. 10 Motor speed versus duty ratio curve

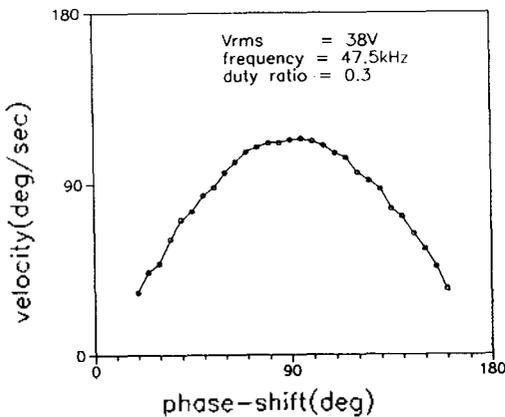


그림 9. 위상차에 따른 속도변화
Fig. 9 Motor speed versus phase difference curve

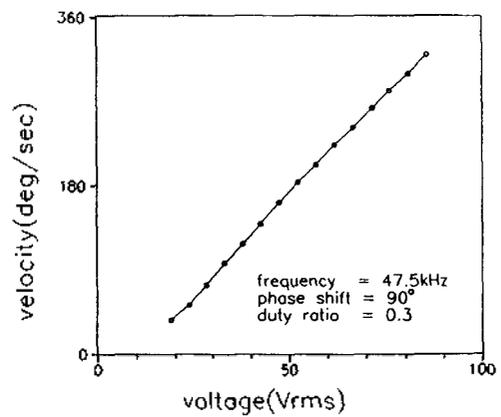


그림 11. 구동전압에 따른 속도변화
Fig. 11 Motor speed versus voltage curve

에서 모터가 안정하게 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 9는 고정자에 인가되는 2개의 구동신호사이의 위상차에 대한 회전속도의 변화를 나타낸 것으로 예상한 비례(약 90°)의 위상차에의 최대속도가 얻어진다. 위상차가 0°와 180°에 접근할수록 속도, 0에 가까워지며, 전체적으로 sine함수와 같은 모양을 보인다. 이는 위상차가 90°일때, 고정자에는 100%의 진행과가 생기지만, 위상차가 90°에서 벗어날수록 고정자의 진동이 상재파로 전이되어 회전자에 구동력을 전달하지 못하기 때문이다.

그림 10은 증폭회로로 들어가는 구동신호 펄스의 듀티비에 따른 모터의 회전속도변화를 나타낸 것이다. 이 변화량은 다른 변수에 비하여 비교적 작다. 그리고 이 그림에서는 어떤 일정한 경향을 보이고 있으나 다른 실험영역에서는 또 다른 경향을 보이고 있음을 관측할 수 있었다. 듀티비의 변화는 다른 변수와는 달리 압전초음파 모터에 직접적으로 관계하는 변수가 아니고, 증폭회로의 power-FET와 변압기를 거쳐 모터로 작용되기 때문에 정밀한 해석이 어렵다. 듀티비의 영향에 대해서는 많은 실험과 고찰이 요구되지만, 현상적으로는 다른 구동변수에 비해 적은 속도변화를 보이고 있으므로, 제어에 있어서는 변수로서의 취급보다는 모터의 효율을 고려한 일정한 값(대략 0.2~0.3)으로 고정시키는 것이 바람직하다고 생각된다.

그림 11은 고정자의 압전체에 인가되는 전압의 RMS 값에 따른 모터의 회전속도이다. 동작점이상에서는 전압과 회전속도는 거의 선형적인 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 각 구동변수에 대한 압전초음파모터의 회전속도의 민감도(sensitivity)는 서로 다르며, 이는 모터를 제어할 때, 큰 속도의 변동에는 주파수를, 작은 속도의 변동에는 위상차 또는 전압을 변화시키는 등의 제어 알고리즘 구축에 적절히 참고해야 할 사항이다.

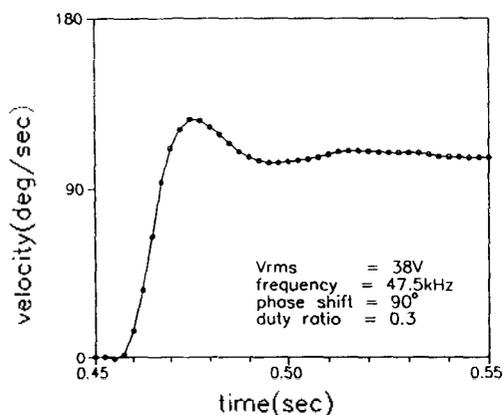


그림 12. 압전초음파모터의 기동응답특성
Fig. 12 Start response of the fabricated ultrasonic motor

또한 초음파모터를 기동할 때의 회전속도 응답특성을 그림 12에 나타내었다. 이로부터 압전초음파모터는 정상 속도에 도달하는 시간이 10ms 정도로 빠른 응답성을 보이고 있음을 알 수 있으며, 이는 정역회전을 빠르게 구현할 수 있는 장점이 된다.

IV. 결 론

전자기식 모터와는 달리 구동방식이 전혀 다른 압전초음파모터가 가지는 장점은 저소음, 고토크, 저속회전 등이다. 그러나 단점으로는 고속회전이 불가능하며, 마찰구동 및 압전체의 파로한계로 인해 수명에 제한이 있다는 것이다. 이와 같이 장단점이 혼재하는 가운데 현재 카메라의 자동초점장치 및 자동차의 파워윈도우 구동 등의 실용화가 전개되고 있다. 100년 이상의 역사와 연구가 집대성된 전자기식 모터에 비하여 십여년의 역사밖에 갖지 못한 압전초음파모터는 구동논리에 대한 명확한 해석이 없고, 또 그 난이도로 인하여 아직 연구할 부분이 많이 남아 있다. 보다 큰 출력이 가능한 압전재료의 개발, 고정자와 회전자 사이의 마찰 및 마찰재료, 고효율화를 위한 고정자의 최적설계, 구동회로, 그리고 제어기술 등의 개발이 압전초음파모터에서 요구되어지는 필수기술이다.

본 연구에서 우리는 압전초음파모터의 제작과 병행하여 평가장치를 개발, 특성측정을 시도하였다. 압전초음파모터의 특성상, 회전이 가능한 주파수의 대역이 겨우 1kHz 정도로, 구동주파수의 해상도가 정확하게 확보되지 않고서는 모터의 특성을 신뢰성있게 측정할 수 없는 상황에서 평가장치의 개념이 도출되었고, 평가장치의 제작으로 인하여, 이후 정밀특성실험을 쉽고 빠르게 할 수 있게 되었다. 또한 평가장치의 회로부분은 원칩(one chip)으로, 소프트웨어부분은 메모리의 제어로직으로, 기구부분은 필요한 부분만 축소하면 초음파모터 및 그 구동회로를 손쉽게 단품화 할 수 있다.

비록 본 연구에서는 초음파모터에 관계하는 전기적인 파라미터에 대한 기초적인 특성측정과 결과만을 보였지만, 앞으로 고정자와 회전자사이의 가압력 및 마찰 등을 고려한, 보다 심도있는 압전초음파모터의 해석과 실험을 수행할 것이다.

참 고 문 헌

1. 秋山勇治, 超音波 モータ/アクチュエタ, トリケップス, 1987.
2. 見城尚志, 指田年生, 超音波モータ入門, 総合 電子出版社, 1991.
3. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, Ultrasonic Motors Theory and Applications, CLARENDON PRESS, 1993.
4. Zhen Wu, Piezoelectric motors, sensors/actuators and their applications in robotics, M.S. Thesis Pen State Univ., Dec. 1991.

5. Y. Izuno, R. Takeda and M. Nakaoka, "New fuzzy resonance-based high performance speed/position servo control schemes incorporating ultrasonic motor." IEEF IAS, Vol.28(3), pp.613-618, 1992.

▲신 성 수(S. S. Shin)



1991년: 인하대학교 공과대학 기계공학과 졸업
 1994년: 한국과학기술원 기계공학 석사
 현재: 삼성전자 기술총괄 기반기술센터 주임연구원
 ※주관심분야: 유한요소법, 진동공학

▲류 영 수(Y. S. Ryoo)



1989년: 고려대학교 공과대학 기계공학과 졸업
 1991년: 한국과학기술원 기계공학 석사
 현재: 삼성전자 기술총괄 기반기술센터 전임연구원
 ※주관심분야: 컴퓨터 인터페이스, 진동공학

▲김 유 만(Y. M. Kim)



1985년: 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업
 1987년: 한국과학기술원 기계공학 석사
 1993년: 한국과학기술원 기계공학 박사
 현재: 삼성전자 기술총괄 기반기술센터 전임연구원

※주관심분야: 압전체이용 센서/액츄에이터, 진동 및 음향학