

초음파 모터의 2상 정현파 구동특성

최정석, 백수현, 김 용, 윤신용, 최철용  
 동국대학교 전기공학과

The Driving Characteristics of Two-Phase Sinusoidal in Ultrasonic motor

Jung-Seok Choi, Soo-Hyun Baek, Yong Kim, Shin-Yong Yoon, Chul-yong Choi  
 Dongguk University

**Abstract** - In this paper, the driving characteristic for a traveling-wave type ultrasonic motor is described. For driving of ultrasonic motor, a two-phase resonant inverter and Digital IC was made. The driving circuit simulation results are compared with measured frequencis and amplitudes.

1. 서 론

초음파 모터는 압전 소자에 의한 초음파 진동을 이용한 마찰 구동형 모터로써 기존 전자식 모터와는 달리 자기 회로 즉, 철심과 코일이 없는 새로운 형태의 소형모터로 압전세라믹(piezo-ceramics)의 진동에 의해 발생되는 초음파 영역의 기계적 진동을 이용하여 고정자와 회전자 사이의 마찰에 의해 회전을 한다. 따라서 기존의 전자식 모터와 비교할 때, 저속, 큰 토크, 고 응답성, 구조의 단순성, 형태의 다양성, 자기장의 영향에 무관하고 초음파 영역의 진동을 사용하기 때문에 소음이 적다는 장점이 있다. 또한 자기회로가 없으므로 자장이 강한 특수 환경에서도 적용할 수 있기 때문에 그 이용도가 높게 평가받고 있고 연구가들에 의해 연구, 개발, 해석이 급속도로 진전되어 오고 있다.[1][2] 본 논문에서는 진행파형 초음파 모터의 구동특성을 연구대상으로 하였다. 초음파 모터의 구동을 위해 20kHz이상의 고주파 전원이 필요하기 때문에 2상 공진형 인버터와 디지털IC를 이용하여 정밀한 구동회로를 제작하여 속도에 따른 구동전압의 주파수 및 크기 등을 측정하여 구동회로 시뮬레이션 결과와 비교검토하였다.

2. 본 론

2.1 초음파 모터의 구동원리

초음파 모터는 교류전압을 인가한 압전소자의 진동을 마찰력으로써 회전자가 회전하는 원리를 이용한 것이다. 그림 2.1은 초음파 모터의 구동원리를 나타낸 것으로 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 모터내부는 압전소자, 전극, 고정자 및 고정자에 부착된 회전자로 이루어져 있다. 고정자의 하부에 부착된 압전소자에 교류전압을 인가하면 전원의 극성에 따라 탄성체(고정자)의 표면에 상하의 진동이 발생하게 되는데 이러한 진동을 정상파(standing wave)운동이라 한다.[1][2] 이때 전압의 크기는 같고 위상이 다른 교류전압을 인가하게 되면 상하의 진동이 회전방향을 갖는 타원운동으로 바뀌게 되며 이를 진행파(travelling wave) 운동이라 한다. 진행파가 발생되고 있는 고정자 상단에 부착된 회전자에는 타원운동으로 인하여 진행파의 방향과 반대방향으로 마찰력이 작용하게 되므로 회전력이 발생하게 된다.

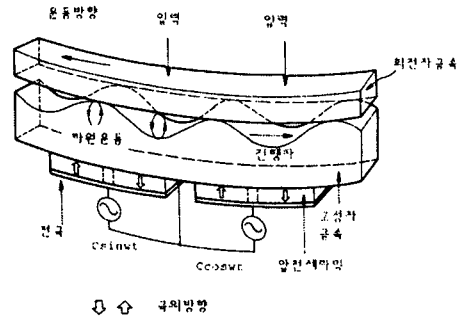


그림 2.1 초음파 모터의 구동원리

2.2 초음파 모터의 등가회로

진행파형 초음파 모터는 압전세라믹 소자에 가해지는 2상의 정현파 전압에 의해 발생하는 진동을 여기원으로 하여 회전자가 회전한다. 그림 2.2은 직렬 인덕터를 포함한 진행파형 초음파 모터의 한상에 대한 전기적인 등가회로를 나타낸 것이다. 모터의 각 파라미터에 대한 설명은 표1과 같다. 여기서 모터의 기계적 상수인  $L_m$ ,  $C_m$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_m = m / A^2 \tag{2.1}$$

$$C_m = A^2 / K \tag{2.2}$$

초음파 모터는 식(2.1)과 (2.2)의 기계적 요소에 의하여 공진을 하게 되며 공진주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_m = 1/2\pi\sqrt{1/C_m L_m} = 1/2\pi\sqrt{K/m} \tag{2.3}$$

한편 초음파 모터와 공진을 일으켜 모터 입력단 전압이 정현파가 되도록 하기 위하여 외부 인덕터  $L_i$ 를 삽입한다. 통상의 경우  $L_i$ 와 압전세라믹의 블록킹 캐패시턴스  $C_d$ 만을 고려하여 모터의 공진주파수와 식(2.4)로 표현되는  $L_i$ 와  $C_d$ 의 공진주파수가 일치하도록  $L_i$ 를 선정한다.

$$f_0 = 1/2\pi \cdot \sqrt{1/C_d L_i} \tag{2.4}$$

그러나 그림 2.2의 등가회로에서 알 수 있듯이  $L_i$ 는  $C_d$ 에 의해서만 공진을 하는 것이 아니고 병렬로 연결된  $L_m$ ,  $r_0$ ,  $C_m$  루프의 요소들이 공진에 영향을 미치기 때문에 위 방법으로는 정확한 값을 구하지 못한다.

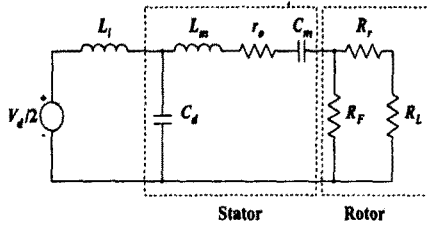


그림 2.2 초음파 모터의 구동원리

표.1 초음파 모터의 파라미터

$A$	force factor
$K$	고정자 세라믹-금속간의 스프링 상수
$m$	고정자 세라믹-금속의 질량
$C_d$	압전세라믹의 dielectric 특성에 의한 블록킹 캐패시턴스
$L_m$	고정자 절감 효과에 의한 등가 인덕턴스
$C_m$	고정자 스프링 효과에 의한 등가 캐패시턴스
$r_0$	고정자 기계적 손실에 의한 등가 저항
$R_F$	고정자-회전자간의 마찰손에 의한 등가 저항
$R_r$	회전자 기계적 손실에 의한 등가 저항
$R_L$	등가 부하
$L_i$	외부 직렬 공진 인덕턴스
$f_m$	모터의 기계적 공진주파수
$f_0$	직렬 인덕터에 의한 공진주파수
$V_d$	인버터 DC link 전압

### 2.3 초음파 모터의 구동시스템

진행과정 초음파 모터의 구동회로는 그림 2.3와 같다. 전원부와 센서 출력부, 피드백 회로 등으로 구성된다. 전원부는 4상 스위칭 회로의 푸시풀 방식에 의해 전력을 증폭시키고 승압 변압기를 사용하고 모터와 직렬로 연결된 인덕터와 초음파 모터 내부의 기생 캐패시턴스에 의해서 공진을 발생시켜 2상 정현파 전원을 모터에 전달이 된다. 센서 출력부는 센서 출력 단자의 신호를 검출하여 정류한 후 피드백 회로부로 보낸다. 피드백 회로부는 위상차를 검출하여 최적의 여진 주파수를 검출하고 진동전압을 검출하여 회전수를 조절하게 된다.

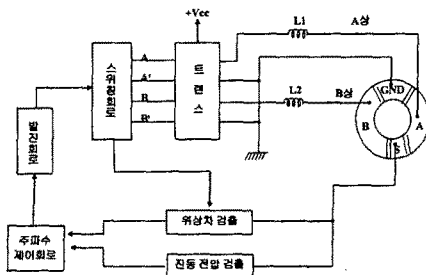


그림 2.3 초음파 모터의 구동시스템

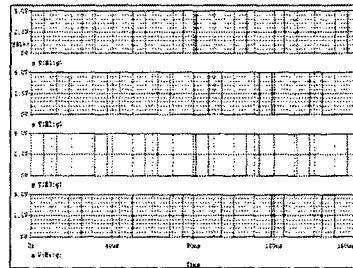
초음파 모터의 공진주파수가 2상 인버터의 구동주파수에 가까울수록 정현파가 된다. 즉, 모터의 속도가 빠를수록 주파수는 낮아지고 전압의 파형은 정현파에 가까워진다. 주파수를 낮게 하면 회전수가 빨라지는데 이는 입력 임피던스가 작아지고 큰 전류가 흘러 압전진동자의 변위가 커지므로 회전자에 전해지는 힘이 커지기 때문이다.

여기서, 초음파 모터 구동을 위해 2상 공진형 인버터를 사용하였다. 발진회로는 디지털IC를 사용하여 저항값을 변화시켜 주파수를 가변하게 하였고 Binary Up/Down counter와 Analog Multiplexers를 사용하여 A-, B-, B-의 2상 게이트 펄스 신호를 만들었다. 출력단은 허용정격전압 100[V], 정격전류 28[A], 상승시간 18[ns], turn-on 시간 18[ns], turn-off 시간 90[ns]인 Power MOSFET(IRF540)을 사용하여 2상 인버터를 구성하여 승압 변압기에 연결하여 모터와 직렬로 연결된 인덕터와 초음파 모터 내부의 기생 캐패시턴스에 의해서 공진을 발생시켜 2상 정현파 전원을 모터에 전달되도록 구성하였다.

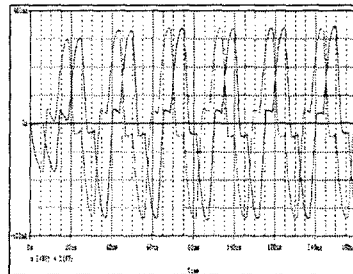
### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

#### 3.1 시뮬레이션

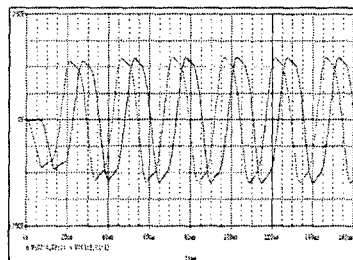
그림3.1은 MOSFET의 게이트단의 입력전압과 인버터의 출력전압과 전류파형을 나타낸다.



(a) MOSFET 게이트 입력전압파형



(b) 인버터 출력전압파형

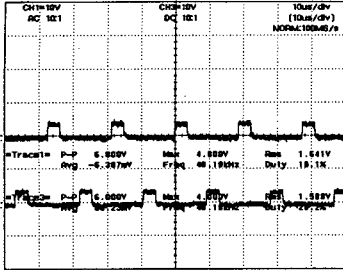


(c) 인버터 출력전류파형

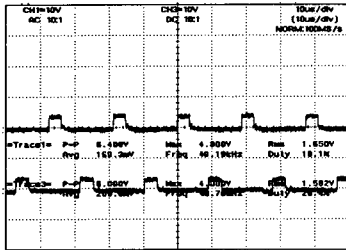
그림3.1 시뮬레이션 결과 파형

### 3.2 실험결과

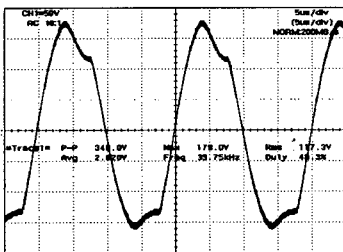
그림3.2(a),(b)는 MOSFET 게이트단의 입력 펄스 파형이며, 이 입력 펄스에 의해 구동회로의 출력 전압 파형이 그림3.2(c),(d)와 같이 발생한다. 그림3.3은 160[rpm]에서의 A상과 B상을 비교한 실험파형이다.



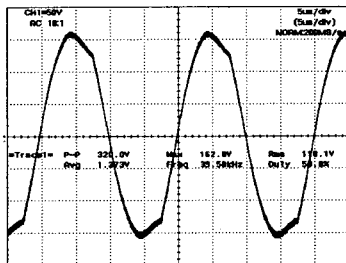
(a) MOSFET 게이트 입력전압 파형(A상, A-상)



(b) MOSFET 게이트 입력전압 파형(B상, B-상)



(c) 구동회로 출력 전압 파형 (A상)



(d) 구동회로 출력전압 파형 (B상)

그림 3.2 실험파형(220[rpm],39.5[kHz])

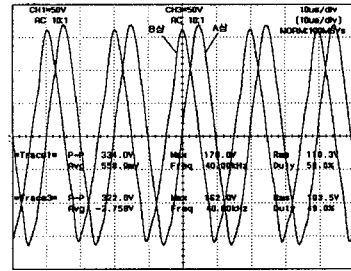


그림 3.3 A상과 B상의 출력전압 파형 비교 (160[rpm], 40.0[kHz])

### 4. 결 론

본 논문은 진행파형 초음파 모터의 구동특성을 연구 대상으로 하였다. 초음파 모터의 구동을 위해 2상 공진형 인버터를 제작하여 시뮬레이션과 실험결과를 비교하였다. 실험결과 인가전압에 대해서 2상의 90° 위상차를 지니며 공진주파수 39.5[kHz]에서 220[rpm]의 정속 제어가 가능함을 알 수 있었다. 초음파 모터는 현재 국내에서 기술의 중요성은 인식되고 있으나 본격적인 연구 개발은 이루어지지 않은 실정이며, 초음파 모터의 역사가 10년 이내의 일천한 역사를 가지고 있다. 재료면과 해석방법, 설계방법 등이 아직 해결과제이지만 기존의 전동기에 비해 많은 장점들을 가지고 있으므로 향후 산업용 로봇의 관절, 손 및 서보제어장치 뿐만 아니라 사무기기, 주택편의 시설, 고장자동제어장치 등 산업 전반에 크게 기여할 것으로 판단된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] T. Sashida, T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", Clarendon Press. Oxford. 1993
- [2] S.Ueha, Y.Tomikawa, "Ultrasonic Motors: theory and applications", Clarendon Press. Oxford. 1993
- [3] Y. Izuno, et al., "High Performance and High Precision Ultrasonic Motor-Actuated Positioning Controller", 1994
- [4] T. Senjyu et al., "Adjustable Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control", IEEE. 1995
- [5] F. Lin, L. Kuo, "Driving Circuit for Ultrasonic Motor Servo Drive with Variable Structure Adaptive Model-following Control", IEE Pro.-Electric. Power App l., 1997