

위상차에 의한 초음파 모터의 속도와 토크 특성

김동욱* 고낙용* 최한수* 차인수** 우수용*** 김영동*

*조선대학교 제어계측공학과 **동신대학교 전기전자공학과 ***목포전문대 전기과

Rotation Speed and Torque Characteristics of Ultrasonic Motor
by Phase difference

Dong-Ok Kim* Nack-Yon Ko* Han-Su Choi* In-Su Cha** Su-Yong Woo*** Young-dong Kim*

* Cho-Sun University. **Dong-shin University ***Mok-po Junior College

Abstract

The Ultrasonic motor(USM) has many good characteristics such as high torque at low speed range, large holding torque based upon frictional force, high speed response, flexible free forms, compactness in size, low magnetic noise and silentness in motion. Because of having low speed rotation, USM is good as an actuator of a small size direct drive (DD) manipulator. The actuators for the DD manipulators must have good controllability on the speed and torque from zero to maximum value continuously. New method was developed for speed and torque control by the phase difference control of the two-phase driving signals of the motor. Then rule adjustable compliant and dumped motion was realized on the output shaft of the motor by PD control of the output shaft angle.

1. 서 론

초음파 모터는 압전소자에 의한 초음파 진동을 이용한 마찰 구동형 모터이다. 기존 전자식 모터와는 달리 자기회로 즉 철심과 코일이 없는 단순 구조를 갖는 소형 모터로 그 특성은 고응답성과 저속, 큰 토크를 갖고 있다.^(1,2)

그 뿐만 아니라 자유로운 형상 설계가 가능하고 자장이 있는 특수 환경에 적용 할 수 있기 때문에 그 이용도는 높이 평가받고 있다.⁽³⁾

초음파 모터를 로보트 구동용으로 이용했을 경우 위치제어는 물론 토크 제어도 단순한 알고리즘에 의해서 손쉽게 실현할 수 있고, 감속기어 없이 다이렉트 드라이브 방식을 취할 수 있을 뿐만 아니라 compliance 제어 및 동역학계의 임피던스 제어가 가능하여 동적환경은 물론 접촉 작업용 로보트를 실현하기 위한 actuator 구동용 모터로 각광을 받고 있다.^(4,5)

본 연구에서는 초음파 모터의 2상 전원의 위상차를 조절해서 속도와 토크 특성을 시뮬레이션으로 검토하여 로보트 actuator에 채용했을 경우 점성과 탄성 조절의 가능성을 밝히고자 한다.

2. 초음파 모터의 구조

그림1은 USR-60모델의 원환형 진행파(traveling wave) 초음파 모터의 구조이다. 링 형상의 탄성체(급속)를 모터 고정자로 하고, 그 뒷면에 압전 세라믹 소자를 접착 진동원으로 하며, 표면에 절상의 치(齒)를 만들어 그 위에 역시 링 형의 알미늄 원판(회전자)을 가압 접촉시킨 구조로 고정자와 회전자가 전자식과는 달리 마찰 접촉되어 있다.

압전 세라믹은 그림2와 같이 정 부 고대로 분극 처리해서 A상과 B상 두개의 부분으로 나누어 고정자 뒷면에 접착되어 있다. 각 상은 20° 폭의 압전체 8개가 160°를 점유하고 있다.

A상과 B상 사이에 별도의 10° 폭을 두어 속도 조절용 피드백 센서로 이용하도록 설계되어 있다. 그리고 나머지 30° 분은 그라운드로 이용하고 있어서 입력력 단자는 총 4단자가 된다.

3. 진행파 발생과 동작 원리

세라믹 압전체에 두께방향으로 정현파 전계를 인가하면 압전체의 분극 방향에 따라서 기계적 신장과 수축이 발생하여 이것을 파원으로 해서 각 상에 정상파(standing wave)가 발생하며 실제적으로는 공간적으로 90°로 배치된 A상과 B상에 시간적으로 90°의 위상차를 갖는 2상 정현파 전원을 인가하면 각 상에서 발생한 정상파가 탄성체(고정자) 내부에서 합성 되면서 고정자 표면에 진행파도 나타난다.

진행파가 발생한 고정자 표면의 한 질점의 운동은 타원을 그리는데, 그 회전방향이 진행파의 진행 방향과 반대방향으로 그 위에 놓인 회전자도 진행파의 진행방향과 반대방향으로 회전한다.

지금 A상과 B상에 각각 정현파 전압을 인가하면 각상에 다음과 같은 정상파가 발생한다.

$$Y_A = 2A \sin(2\pi x/\lambda + \pi/4) \cos(\omega t + \theta_A) \quad (1)$$

$$Y_B = 2A \sin(2\pi x/\lambda + \pi/4) \cos(\omega t + \theta_B) \quad (2)$$

A상에서 발생한 정상파의 공간적 위상 $\pi/4$ 와 B상에서 발생한 정상파의 공간적 위상 $\pi/4$ 는 초음파 모터의 구조상 90°의 위상차를 갖는다. 그리고 A, B상에 공급하는 전원의 시간적 위상차가 90°이기 때문에 $\theta_A = 0$, $\theta_B = \pi/2$, $\theta_A = -\pi/2$, $\theta_B = 0$ 으로 놓을 수 있으므로 (1), (2)식은 다음과 같이 된다.

$$Y_A = 2A \sin(2\pi x/\lambda) \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$Y_B = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$Y_0 = Y_A + Y_B = 2A \cos(2\pi x/\lambda - \omega t) = \xi_0 \cos(nx - \omega t) \quad (5)$$

단, ξ_0 : 정수(=2A), n: 원주상의 정상파수(2π/λ=9)

(5)식은 탄성체의 중성면의 종방향(축방향)의 변위를 나타내고 있다.

그리고 중성면이 탄성체의 두께 T의 중앙에 있다고 한다면, 이곳으로 부터 T/2만큼 떨어진 표면의 횡방향(원주방향) 변위는 다음 식으로 표시 된다.

$$X_0 = \xi_0 n (T/2) \sin(nx - \omega t) \quad (6)$$

(5)식과 (6)식으로부터

$$\frac{X_0^2}{n^2 (T/2)^2} + Y^2 = \xi_0^2 (\sin^2(nx - \omega t) + \cos^2(nx - \omega t)) = \xi_0^2 \quad (7)$$

이 성립된다. 이 식에서 표면상의 질점이 타원운동을 하고 있음을 알 수 있다

이와같은 치 표면의 타원 운동을 일으키는 기계적 휨진동(bending wave)은 치면에 접촉되어 있는 회전자에 마찰력으로 작용하여 회전력을 발생 시킨다.

지금 A,B 두 상간의 압전소자에 인가한 2상 정현파 전압의 위상차 ϕ 를 임의의 값으로 하면 (5)식과 (6)식은 각각 다음과 같이 일반화된다.

$$Y_0 = Y_A + Y_B$$

$$= \xi_0 \sin(nx) \sin(\omega t) + \xi_0 \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \quad (8)$$

$$X_0 = \xi_0 n (T/2) \sin(nx) \sin(\omega t) + \xi_0 n (T/2) \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \quad (9)$$

여기서 ϕ 를 -90° 에서 $+90^\circ$ 까지 연속적으로 변화 시키면 고정자 탄성체에서 발생하는 휨진동은 ϕ 가 -90° 일 때는 (3),(4)식과 같은 진행파가 되고, ϕ 를 점점 증가 시키면 진행파 성분이 줄어들고 정상파가 대신 증가된다. ϕ 가 0° 가 되면 (1), (2)식과 같은 정상파만 남고, 다시 ϕ 를 $+90^\circ$ 방향으로 증가 시키기만 반대방향의 진행파가 증가된다. 따라서 회전자의 회전 방향도 반대로 된다. ϕ 가 $+90^\circ$ 에 이르면 모터의 회전 방향은 완전히 반전되어 진행파만에 의해서 회전한다.

4. 시뮬레이션

4-1. 진행파와 타원 궤적

초음파대의 공진주파수 전원 전압을 압전체에 인가하면 고정자 표면의 질점 운동은 기계적 휨진동을 이룬다. 이 진동의 궤적은 (8), (9)식의 ϕ 를 변화 시키면 얻을 수 있다. ϕ 는 2상 전원 전압의 위상차와 같다.

그 시뮬레이션 결과 그림3은 위상차에 의한 진행파이고, 그림4는 위상차에 의한 타원 궤적이다.

질점의 궤적이 타원이 됨을 알 수 있으며 위상차가 $+90^\circ$ 일때 가장 원에 가까움을 알 수 있다. 0° 에서는 직선운동을 하고 있다. $\phi < 0^\circ$ 부분에서는 그림4와 같이 역방향의 타원이 됨을 알 수 있다.

위상차 변화에 의해서 정역 회전은 물론 속도 조절을 할 수 있으며 토오크도 변화시킬 수 있음을 보여 주고 있다.

전원 전압을 인가 하지 않았을 때는 정지 마찰이며, 이때 고정자와 회전자의 접촉면이 최대로 되는 것은 당연하다. 따라서 정지 토오크가 최대가 되므로 전원을 차단했을 때는 브레이크 작용이 있다.

위상차를 갖는 전원 전압을 인가하면 동마찰 상태가 되면서 치면의 질점은 그림4와 같이 운동을 개시 기동 토오크를 발생한다. 이때 원주방향의 진행파 속도는 구동 주파수의 주기와 같은 속도로 정현파적으로 변화 하지만 회전자는 따라가지 못하고 슬립을 발생시킨다. 따라서 기동 토오크는 동마찰에 의해서 발생한다.

위상차를 0° 으로 하면 그림4와 같이 치면은 회전자를 좌우방향으로 경사지게 힘을 가하고 있으므로 평균한 기동력은 0이 된다. 이 때의 토오크를 동적 유지 토오크라 할 수 있다. 그 값은 무전원의 정지 토오크에 비해서 매우 적다.

동마찰력은 접촉 면적과 접촉면의 수직항력의 대소에 의해서 변화하고, 슬립 속도에 따르는 변화는 없다.

수직항력은 회전자 구조상 고무와 스프링의 탄성력에 의해서 압력을 받고 회전자 표면에도 탄성을 갖는 고분자 플라스틱이 코팅되어 있기 때문에 고정자 치면의 종방향(축방향)의 변위에 비례한다.

4-2. 회전속도와 토오크 특성

그림5는 이상의 고찰을 기초로해서 2상 정현파 전압의 위상차에 대한 회전자 속도와 토오크 특성을 시뮬레이션에 의해서 구한 것이다. 여기에서는 치의 종방향의 변위에 비례해서 기동 토오크가 변화하고 단위 시간당의 원주방향의 변위에 비례해서 회전 속도가 변화 하고 있다.

5. 고 찰

무부하시 위상차가 0° 에서 토오크는 정확히 0에 접근하지만 속도는 다소 차이를 보이고 있다. 실제적으로 모터에서는 위상차가 없을 때는 비선형성의 마찰이 강하여 회전 속도가 0에 이를 것으로 예측된다.

위상차의 변화에 따라서 토오크와 속도가 다소 진동을 보이고 있지만 부하시는 부하의 관성력에 흡수되리라 생각된다.

위상차에 따라서 토오크와 속도가 거의 비례하기 때문에 전원 전압의 위상차 조절에 의해서 토오크와 속도를 동시에 조절할 수 있어, 제어 알고리즘이 간단해지고, 제어회로 구성이 쉽다는 장점을 알 수 있다. 그리고 중요한 점은 초음파 모터 축의 각도와 각속도를 감지, 계산해서 위상차 제어를 실현하면 모터 축이 기계적 탄성과 점성을 갖게할 수 있고, 그 제어도 가능하다고 본다.

6. 결 론

초음파 모터의 2상 정현파 전압의 위상차를 조절해서 진행파 발생의 원리를 시뮬레이션에 의해서 밝혔고, 아울러서 위상차를 변수로한 속도 및 토오크 특성을 밝혔다. 또 속도와 토오크 특성을 동시에 위상차 조절에 의해서 제어하면 기계적 탄성과 점성 축, 컴플라이언스 특성이 모터 축에서 능동적으로 발생될 수 있음을 예측할 수 있었다.

본 연구에서 검토한 초음파 모터의 컴플라이언스 특성은 로보트의 actuator 구동에 직접 이용할 경우 동적 작업 환경에서는 물론 접촉작업 로봇에서 중요시 하는 컴플라이언스 특성을 얻을 수 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

- 1) T. Hatsuzawa, K. Toyoda and Y. Tanimura : Speed Control Characteristics and Digital Servo-System of Circular Traveling Wave Motor, Rev. Sci.Instrum.,57-11,2886/2890, 1986.
- 2) 見城尙志, 指田年生 : 超音波モータの入門, 總合出版社, 1991.
- 3) 秋山勇治 : 屈曲波振動形超音波モータの各種速度制御方式の検討, 電氣學會研究會資料, RM-89-11,25/33, 1989.
- 4) 西畑, 大熊 : ロボット用超音波モータの速度制御, 日本機械學會東海支部第39期講演會, 189/190, 1990.
- 5) 加藤厚生, 伊藤宏司, 伊藤正美 : 位相差制御による超音波モータのコンプライアンス動作, 計測自動制御學會論文集, 27-11, 1290/1295, 1991.

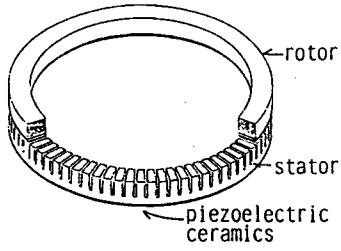


Fig. 1 Schematic structure of USM

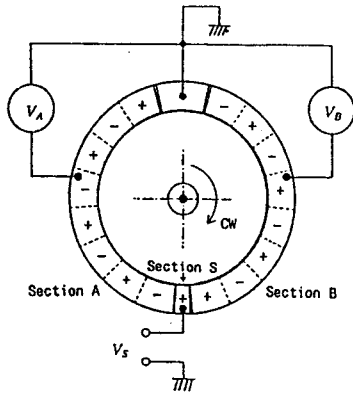


Fig. 2 Piezoelectric Ceramic arrangement of USM

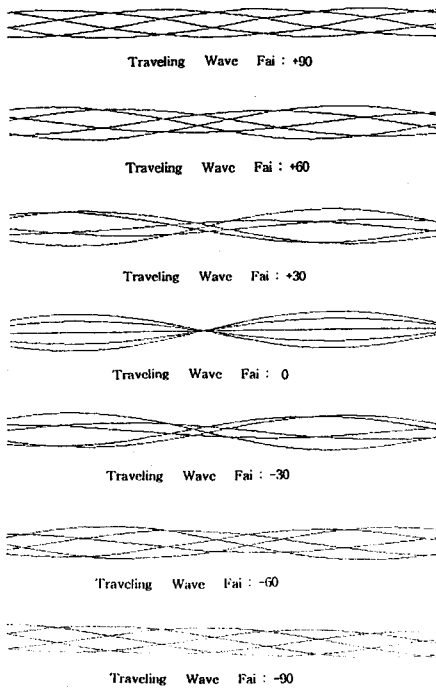


Fig. 3 Traveling wave with phase difference

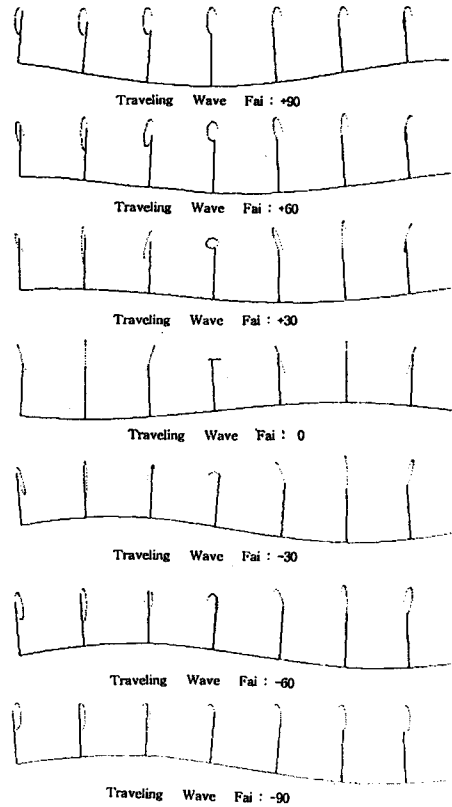


Fig. 4 Oval trajectory with phase difference

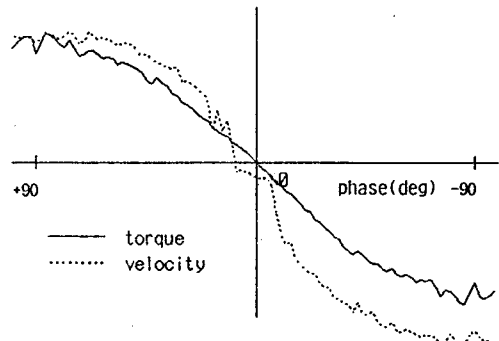


Fig. 5 Speed and Torque Characteristics with phase difference