초음파 모터의 전압 및 위상차 제어 특성

신 덕° 김동옥 고낙용 최한수 김영동
조선대학교 제어계측공학과

Characteristics of Ultrasonic Motor using Voltage Control and Phase Difference Control

Duk Shin° Dong-Ok Kim Nak-Yong Ko Han-Soo Choi Young-Dong Kim
Dept. of Control & Instrumentation Eng. Cho-Sun University

abstract

The ultrasonic motor(USM) has good characteristics such as compact size, silent motion, low speed, high torque and high speed response. The USM is driven by 2-phase AC electricity. The control parameters of USM are voltage, phase difference, frequency of input power, etc.

In this paper, we propose voltage difference control. And we designed USM controller to adjust voltage and phase using pLSI(programmable Large Scale Integration). Voltage difference control has many advantages that are lower current, lower power than phase difference control. Especially there is nearly zero ampere at the zero point of speed and torque. we can apply this voltage difference control to the compliance control of DD manipulator.

1. 서 론

최근 진행파형 초음파 모터는 그 구조가 간단하고 저속이면서도 고토오크의 특성을 지니고 있으므로 DD(Direct Drive) 구동 액츄에이터로 각광을 받고 있다. 초음파 모터는 탄성체에 접착된 압전 세라믹에 고주파 전계를 가하여 진행파인 초음파 진동을 일으켜 이 진동 에너지를 가압 접촉된 회전자의 회전 운동으로 바꾸어 주는 모터이다. 이러한 초음파 모터의 제어 파라미터는 입력 전압의 진폭, 주파수, 위상차, 회전자의 접촉 압력등이 있다.[1]

본 연구에서는 입력 전압의 진폭과 위상을 조절 하기 위해 전압 및 위상 제어기(USM-VPC : Ultrasonic Motor -Voltage & Phase Controller)를 개발하였다. 위상차 제어는 입력 전압의 위상차를 조절하는 것으로 지금까지 많은 연구가 되어 왔다.[2]-[5] 전압 동시 제어는 초음파 모터의 입력 전압의 진폭을 조절하는 것으로 A상 B상의 전압을 동시에 제어하는 방식이다. 우리는 한 상의 전압을 고정시키고 나머지 한 상의 전압을 조절하는 전압차 제어 방식을 새롭게 제안한다. 입력 전압의 진폭은 PC에서 가변 전압 데이터를 받아 제어기의 듀티비(duty rate)를 조정하여 가변시켰다. 전압 동시 제어와 전압차 제어 그리고 위상차 제어를 사용하여 초음파 모터의 속도 특성을 실험하고 비교 분석하였다.

2. 초음파 모터의 구조와 특성

2.1 초음파 모터의 구조

모드 회전형 초음파 모터는 그림 1과 같이 링 형상의 금속 탄성체를 모터 고정자로, 링(ring)형의 알루미늄 원판을 회전자로 하고, 고정자 뒷면에 압전 세라믹 소자를 접착 진동원으로 한다. 고정자 표면에 절상의 치를 만들고 그 위에 역시 회전자를 금속 원판 스프링과 고무를 사용, 가압 접촉시킨 구조로 고정자와 회전자는 가압, 마찰 접촉되어 있다.[3]

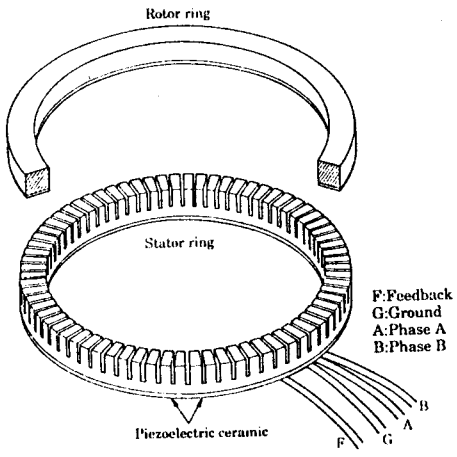

그림 1. 진행파형 초음파 모터의 구조
Fig. 1 Structure of the Travelling-wave USM

실험에 사용한 USR-60의 경우, 고정자 표면은 72개의 치가 있으며 압전체의 신장과 수축이 전달되어 고정자에는 휨진동이 발생한다. 이 휨진동에 의해 고정자 표면의 한 질점은 타원운동을 하게 되고 이 타원운동으로 회전자는 회전 구동력을 얻게 된다.

2.2 초음파 모터의 특징

기존의 전자식 모터와는 달리 자기회로 즉 철심과 코일이 없는 단순 구조를 갖는 소형 모터로서 고응답성, 저속, 고토오크의 특성을 갖고 있다. 그 뿐만 아니라 그 동작 원리상 자유로운 형상 설계가 가능하고 자장이 강한 특수 환경에서도 적용할 수 있기 때문에 그 이용도는 높이 평가받고 있다. 또한, 무게가 가벼우며 크기가 작고 동작 소음이 작은 특성을 지닌 초음파 모터를 로봇 팔의 액츄에이터로서 사용하면 인간의 팔과 같이 기계적 소음 없이 유연한 동작을 발생시킬 수 있다. 그리고 기존의 위치제어는 물론 동시에 토오크제어를 단순한 알고리즘에 의해 손쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한 감속기어 없이 다이렉트 드라이브(DD) 방식을 취할 수 있을 뿐만 아니라 컴플라이언스 제어 및 동역학계의 임피이던스 제어가 가능하기 때문에 동적 환경은 물론 접촉 작업용 로보트를 실현하기 위한 액츄에이터 구동용 모터로서 각광을 받고 있다. 그러나 현재의 초음파 모터는 기존의 전자식 모터에 비해 효율이 낮고 수명이 짧은 성능상의 문제점을 안고 있고, 또 아직 제품화가 초기 단계여서 가격이 높은 점등 실용화를 위해서는 해결해야 할 과제가 많다.

3. 초음파 모터의 제어 방법

초음파 모터의 접착진동원인 세라믹 압전체에 두께 방향으로 정현파 전계를 인가하면 압전체의 분극 방향에 따라서 기계적인 신장과 수축이 발생한다. 이것을 파원으로 해서 각 상에 정상파(standing wave)가 발생한다. 이 두 정상파가 탄성체(고정자) 내부에서 합성되면서 고정자 표면에 진행파(traveling wave)로 나타난다.

3.1 전압 동시 제어

초음파 모터의 A상에 발생하는 정상파와 B상에 발생하는 정상파는 각각 다음과 같다.

$$\zeta_A = \zeta_a \sin(nx)\sin(\omega_0 t) \tag{1}$$

$$\zeta_B = \zeta_b \sin(nx+\pi/2)\sin(\omega_0 t+\phi) = \zeta_b \cos(nx)\sin(\omega_0 t+\phi) \tag{2}$$

A상 B상 전압 동시 제어는 A상과 B상의 진폭을 동시에 조절하는 것이므로 그 진폭은 $\zeta_0 = \zeta_a = \zeta_b$ 이다. A상 B상의 정상파가 금속 탄성체인 고정자 내부에서 합성되므로 수식 (3)이 된다.

$$\zeta = \zeta_A + \zeta_B = \zeta_0[\sin(nx)\sin(\omega_0 t) + \cos(nx)\sin(\omega_0 t+\phi)] \tag{3}$$

수식 (3)에서 모터가 정회전을 한다면, ϕ는 90° 로 고정시킨다.

$$\zeta = \zeta_0[\sin(nx)\sin(\omega_0 t) + \cos(nx)\cos(\omega_0 t)] = \zeta_0 \cos(nx-\omega_0 t) \tag{4}$$

탄성체의 두께 T의 중앙면을 따라 수식 (4)의 진행파가 흐르므로 그로부터 T/2 만큼 떨어진 탄성체 표면에 기계적인 진동이 나타난다. 따라서 탄성체의 중앙면을 x축으로 놓으면 원주 방향의 질점의 변위 X와 축 방향의 변위 Y는 각각 수식 (5)와 수식 (6)과 같다.

$$X = \frac{T}{2}\frac{\partial \zeta}{\partial x} \tag{5}$$

$$Y = \frac{T}{2} + \zeta = \frac{T}{2} + \zeta_0 \cos(nx-\omega_0 t) \tag{6}$$

수식 (5)와 수식 (6)의 양변을 제곱하여 두 수식을 더하면 수식 (7)과 같은 타원의 방정식이 된다.

$$\frac{X^2}{\left(\frac{T}{2}n\zeta_0\right)^2} + \frac{\left(Y-\frac{T}{2}\right)^2}{\zeta_0^2} = 1 \tag{7}$$

3.2 A상 B상 전압차제어

수식 (3)에서 A상과 B상의 전압의 진폭이 다르다면,

$$\zeta = \zeta_a \sin(nx)\sin(\omega_0 t) + \zeta_b \cos(nx)\cos(\omega_0 t) \tag{8}$$

수식 (8)이 된다.
먼저, ζ_a 를 최대치로 고정한다면, ζ_a는 ζ_b보다 크거나 같다. 따라서, 수식 (8)은 수식 (9)와 같이 된다.

$$\zeta = \zeta_b \cos(nx-\omega_0 t) + (\zeta_a - \zeta_b)\sin(nx)\sin(\omega_0 t) \tag{9}$$

마찬가지로 ζ_b를 최대치로 고정한다면 ζ_b는 ζ_a보다 크거나 같고, 수식 (10)으로 나타낸다.

$$\zeta = \zeta_a \cos(nx-\omega_0 t) + (\zeta_b - \zeta_a)\cos(nx)\cos(\omega_0 t) \tag{10}$$

여기서, $A\cos(nx-\omega_0 t)$는 진행파 성분이고
$B\sin(nx)\sin(\omega_0 t)$는 정상파 성분이다.
진행파 성분에 의해 회전자는 회전 구동력을 얻고, 정상파 성분에 의해 고정자는 상하 진동을 하게된다.

3.3 위상차 제어

수식 (1) (2)에서 진폭이 ζ_0 이고 위상이 시간적으로 ϕ 인 정현파 전원을 공급하면 A 상과 B 상의 정상파가 동일 금속 진동체에서 합성이 되므로 진행파 ζ 가 발생한다.

$$\zeta = \zeta_A + \zeta_B = \zeta_0[\sin(nx)\sin(\omega_0 t) + \cos(nx)\sin(\omega_0 t+\phi)] \tag{11}$$

이 진행파에 의한 기계적 진동은 탄성체의 두께 T 의 중앙인 중성면의 것이고 그로부터 T/2 인 탄성체 표면의 원주 방향의 변위 X 와 축방향의 변위 Y 는 각각 수식 (12)와 수식 (13)과 같다.

$$X = \frac{T}{2}\zeta_0\sqrt{1-\cos\phi\sin 2nx}\ \sin(\omega t+\beta) \qquad (12)$$

$$Y = \zeta_0\sqrt{1+\cos\phi\sin 2nx}\ \sin(\omega t+\alpha) \qquad (13)$$

여기서,

$$\left.\begin{aligned}
\sin\alpha &= \sin\phi\cos nx/\sqrt{1+\cos\phi\sin 2nx}\\
\cos\alpha &= \sin nx+\cos\phi\cos nx/\sqrt{1+\cos\phi\sin 2nx}\\
\sin\beta &= \sin\phi\sin nx/\sqrt{1-\cos\phi\sin 2nx}\\
\cos\beta &= -\cos nx+\cos\phi\sin nx/\sqrt{1-\cos\phi\sin 2nx}
\end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

수식 (14)를 수식 (13)에 대입하여 타원의 방정식을 구하면 수식 (15)가 된다.

$$\frac{Y^2}{\zeta_0^2(1+\cos\phi\sin 2nx)}+\frac{X^2}{\frac{T^2}{2}n^2\zeta_0^2(1-\cos\phi\sin 2nx)} = \frac{\sin^2\phi}{1-\cos^2\phi\sin^2 2nx}+\frac{2(1-\cos^2 2nx\phi\sin^2 2nx-\sin^2\phi)XY}{\frac{T}{2}\zeta_0^2(1-\cos^2\phi\sin^2 2nx)} \qquad (15)$$

이 수식으로부터 위상차가 ϕ일 때 고정자 표면에는 경사진 타원 운동을 일으키고 있음을 알 수 있다.[3]

4.실험 및 고찰

4.1 실험

초음파 모터의 출력축을 무부하 상태에서 A상 B상 동시 제어와 A상 B상 전압차 제어 그리고 위상차 제어를 사용하여 속도 측정을 하였다. 초음파 모터의 속도 측정 시스템은 그림 2와 같다. 속도 센서로는 1회전당 1000펄스의 분해능을 가진 광전식 로타리 엔코더를 사용했다. 속도 측정 전에 먼저 주파수를 최적 구동 주파수로 설정했다. 전압 동시 제어와 전압차 제어는 정회전시 위상차를 90° 로 하고, 역회전시에는 위상차를 -90° 로 전환하여 실험하였다. 초음파 모터의 속도 변화는 전압 동시 제어와 전압차 제어시 PC로부터 프로그램상의 가변 전압 데이터(0V ~ 140 V)를 받고 위상차 제어시에는 가변 위상 데이터(-90° ~ +90°)를 받아 전압 및 위상 컨트롤러(USM-PVC)를 이용하여 조절하였다. 그림 6의 실험에서는 구동 주파수를 39.9kHz로 고정한 후 전압 동시 제어, 전압차 제어, 위상차 제어를 순차적으로 하였다.

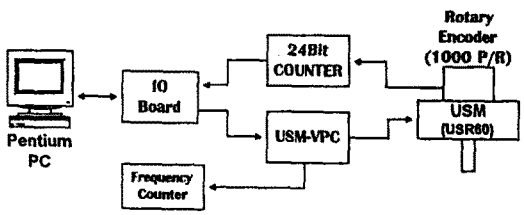

그림 2. 초음파 모터의 속도 측정 시스템
Fig. 2 Speed instrumentation system

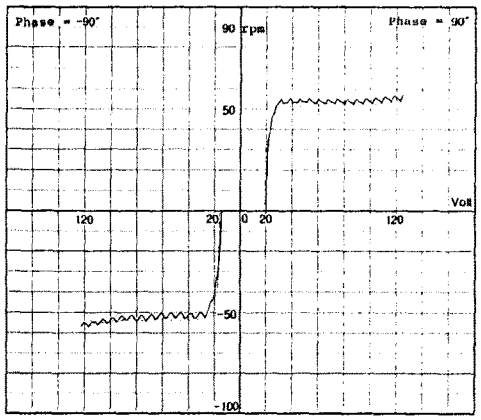

그림 3. 전압 동시 제어에 의한 특성 곡선
Fig. 3 Characteristic curve of voltage control.

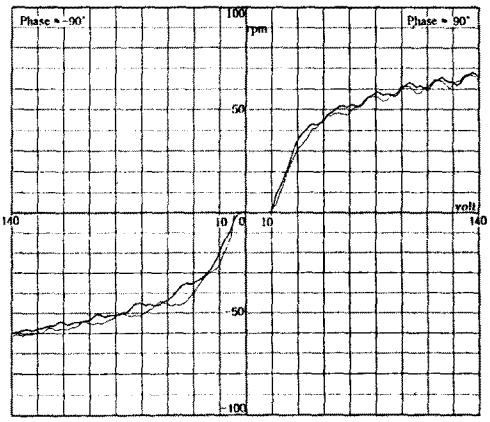

그림 4. 전압차 제어에 의한 특성 곡선
Fig. 4 Characteristic curve of voltage difference control

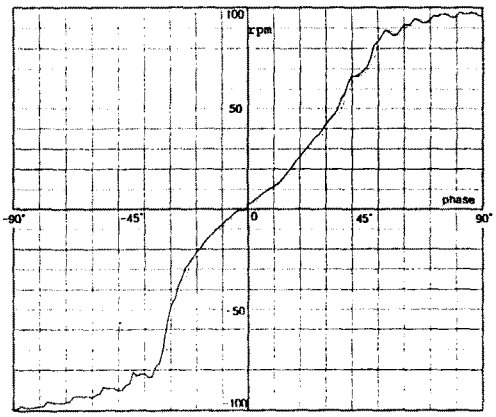

그림 5. 위상차 제어에 의한 특성 곡선
Fig. 5 Characteristic curve of phase difference control

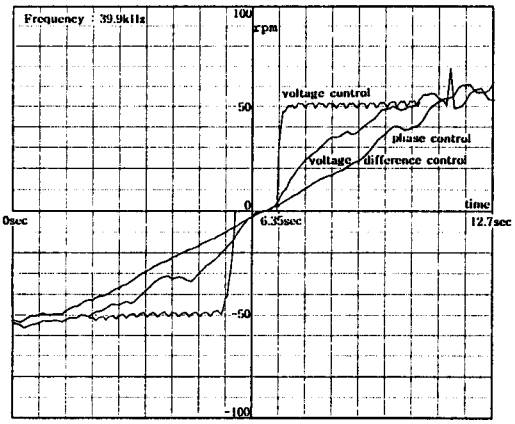

그림 6. 전압, 전압차, 위상차 제어의 특성 비교
Fig. 6 Comparison of voltage, voltage difference, phase difference control characteristic curve

4.2 고찰

그림 3 은 전압 동시 제어에 따른 속도 특성이다. 수식 7 에서와 같이 진폭 ζ는 타원의 크기만을 조절하고 그 모양은 바뀌지 않는다. 따라서 그 특성이 그림과 같이 40V이상에서는 거의 일정하다가 20V ~ 40V사이에서 급격히 변하여 큰 폭의 데드밴드가 생긴다. 이 데드 밴드에서는 전압과 전류가 0이어서 홀딩 토오크가 매우 크다. 그림 4는 전압차 제어의 특성곡선이다. 전압차 제어는 전압 동시 제어와는 달리 진행파이외에도 정상파 성분이 남아 있다. 전압차가 적으면 진행파의 영향이 정상파의 영향보다 커지고, 전압차가 크면 진행파의 영향보다 정상파의 영향이 커진다. 데드 밴드에서는 그 폭이 줄어들고, 전류값이 0A에 가깝게 줄어든다. 따라서 발열이 적어진다. 그리고 위상차 제어와 마찬가지로 정상파에 의해 홀딩 토오크가 줄어든다. 그림 5는 위상차 제어의 특성 곡선이다. 위상차 제어는 정역제어가 가능하고 속도와 토오크 특성이 위상차 제어에 의해 선형적으로 증가한다. 하지만 위상차가 0에 가까울수록 전류값이 매우 커진다. 그림 6은 세 제어 방법을 비교 한 것이다. 전압차 제어에 의한 특성 곡선은 위상차 제어에 의한 특성 곡선과 전압 동시 제어 특성 곡선의 중간 단계임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 그동안 많이 연구되어왔던 주파수 제어나 위상차 제어에 비하여 상대적으로 미흡했던 전압 동시 제어에 대하여 이론적, 실험적 고찰을 하였다. 그리고 전압 동시 제어를 응용한 새로운 전압차 제어를 제시하였다. 이를 위해서 pLSI를 이용하여 2상 입력 전원의 진폭과 위상을 조절 할 수 있는 제어기와 프로그램을 개발하였다. 전압 동시 제어는 데드 밴드의 폭이 넓고 타원의 모양이 아닌 타원의 크기만을 조절하므로 그 효율이나 응용에 있어 위상차 제어에 뒤진다. 하지만 데드 밴드의 홀딩 토오크가 크므로 이 점을 이용하여 위치제어가 가능함을 확인했다. 위상차 제어는 데드 밴드가 없지만 위상차가 적어질수록 효율이 떨어지고 과전류가 흐르는 문제가 있다. 본 논문에서 새롭게 제시한 전압차 제어는 위상차 제어의 과전류 문제점을 해결하였고. 전압 동시 제어의 데드 밴드의 폭을 줄였다. 따라서 초음파 모터의 수명과 효율면에 있어서 더 유용함을 확인하였다. 본 실험을 통해서 각속도와 각변위에 따른 전압차 제어를 행하면 위상차 제어와 같이 능동적 컴플라이언스제어가 가능함을 예측한다.

참 고 문 헌

[1] T. Sashida, T. Kenjo, : An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford, Clarendon Press, 1993

[2]김영동 외, "위상차에 의한 초음파 모터의 속도와 토오크 특성," 1994년도 전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp. 328-330, 1994. 7.

[3] 김동욱, "초음파 모터 위상차 제어에 의한 매니퓰레이터의 컴플라이언스 제어", 조선대학교 석사학위논문,1995

[4]김동욱, 고낙용, 최한수, 김영동 외,"초음파 모터의 위상차 조절에 의한 매니퓰레이터의 점탄성 제어," '95 대한전기학회 춘계 전력전자연구회 논문집, pp. 88-91, 1995

[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フラ イアンス動作," 計測自動制御學會論文集, vol. 27, No 11, pp.1290-1295, 1991

[6]T. hatsuzawa, K. Toyoda and Y. tanimura, "Speed Control Characteristics and Digital Servo-System of Circular Traveling Wave Motor," Rev. Sci. Instrum, vol. 57, No 11, pp. 2886-2890, 1986

[7]秋山勇治, "屈曲波振動形超音波モータ各種速度制御方式の檢討, 電氣學會研究會資料, RM-89-11, pp. 25-33, 1989

[8]A. Kato, K. Ito, and M. Ito, "Adjustable Complient Motion of Ultrasonic Motor", Jowurnal of Robotics and Mechatronics Vol. 5, No. 5, 1993.