

위상차 변화에 따른 초음파 모터의 주파수-속도 특성

김동옥*, 정국영**, 오금곤***, 김영동*

*조선대 정보제어계측공학부, **동강대 컴퓨터정보과, ***조선대 전기공학과

The Frequency-Speed Characteristics of Ultrasonic Motor by the Change of Phase difference

D.O. Kim*, G.Y. Jung**, G.K. Oh***, and Y.D. Kim*

*Division Information of Control & Instrument Engineering, Chosun Univ.

**Field of Computer Science, Dongkang College.

***Dept of Electrical Engineering, Chosun Univ.

ABSTRACT

To control the position, velocity and torque of the ultrasonic motor, a great variety of method are proposed such as the amplitude, phase difference, frequency and so on. In the case of phase difference method, it has some advantages; it can control the direction and velocity of rotation only adjusting the phase difference and it has wide control-band. During the USM driving on adjusting phase difference, its characteristic was transformed by the change of resonance-frequency of stator, which means that the resonance frequency is different according to the phase difference. Consequently, we need to set up the most suitable driving frequency according to each phase difference.

토크 제어를 위해서 초음파 모터 2상에 인가되는 정현파 전압의 진폭 조절, 주파수 조절, 위상차 조절, 두 상의 전압차 조절 등 여러 가지 방식이 제안되어지고 있다 [3-6]

지금까지 초음파 모터 서보 응용에서 제어 변수인 2상 고주파 전압, 위상차 및 주파수 조절 방식 중 제어 범위와 선형성, 회전 방향 변경 등을 고려했을 경우 위상차 조절 방식이 보다 효과적이다^[7]. 초음파 모터의 운전 중 발생하는 특성 변화는 고정자의 고유 주파수, 즉 기계적 공진 주파수의 변화에 기인하며, 특히 초음파 모터 위상차 조절 방식을 서보 응용에 이용할 때에 이는 제어 특성을 나쁘게 하는 큰 요인이 된다. 이러한 기계적 공진 주파수의 변화 요인은 주로 초음파 모터 특유의 온도 상승과 부하의 변화 등으로만 알려져 왔으나 그 밖의 다른 요인은 고려되지 않았다.

1. 서 론

초음파 모터(ultrasonic motor, USM)는 초음파 타원 진동을 하는 진동체 위에 회전자나 슬라이더를 가압 접촉시켜 둘 사이의 접촉점에 생기는 마찰력을 이용하는 모터로서 접촉점의 진동체 움직임에 의해서 회전자의 회전방향이나 슬라이더의 이동 방향이 결정된다. 종래의 전자식 모터와는 달리 전자유도를 이용하지 않고 압전 소자의 초음파 기계 진동을 이용한 마찰 구동형 모터로서 철심과 코일이 없는 단순 구조를 지니며 이로 인해 하중 용량이 작다. 또한 저속 회전에서도 고토크를 발생하기 때문에 감속기어 없이 직접구동(direct drive) 방식이 가능하다^[1,2].

본 논문에서는 앞서 언급한 2상 고주파 전압, 위상차, 주파수의 3가지 제어 변수의 PC에 의한 조절이 가능한 디지털 다중 제어기(USM-DMC)를 설계 제작하였다. 그리고 초음파 모터 고정자의 기계적 고유 주파수의 변화 요소 중 위상차 변화에 따른 공진 주파수의 변화에 대해서 주파수-속도 실험을 하고 그 원인에 대해서 고찰한다. 그 결과를 토대로 위상차에 따른 최적주파수를 구하는 실험식을 유추한다.

지금까지 초음파 모터의 연구는 구동 메커니즘에 대한 연구, 초음파 모터를 이용한 제어 응용의 일부로 위치 결정 제어나 속도 제어에 관한 연구가 보고된 바 있으며, 이러한 초음파 모터의 정밀한 위치제어와 속도 및

2. 초음파모터의 제어 변수

초음파 모터의 구동원인 세라믹 압전체에 두께 방향으로 정현파 전계를 인가하면 압전체의 분극 방향에 따라서 기계적인 신장과 수축이 발생한다. 이것이 금속 탄성체(고정자) 표면에 정재파(standing wave)로 나타난다. 각 상에 의한 정재파가 탄성체(고정자) 내부에서 합성되

면서 고정자 표면에는 진행파(travelling wave)로 나타난다. 이 때 고정자 표면의 한 질점의 운동은 타원 운동을 하는데, 이 타원의 크기 및 모양 그리고 회전 방향을 조절함으로써 초음파 모터의 속도 및 토크를 제어 할 수 있다.

2.1 위상차 조절 방식

A상과 B상에 따로따로 정현파 전압을 인가하면 각상에 정재파가 발생한다. A상에서 발생한 정재파의 공간적 위상과, B상에서 발생한 공간적 위상은 초음파 모터의 구조상 90°의 위상차를 갖는다. 그리고 A상과 B상에 시간적으로 ϕ 인 정현파 전원을 공급하면 A상과 B상에서 각각 발생하는 기계적 진동파인 정재파는 고정자(금속 진동체) 내부에서 합성이 되면서 식 (2-1)과 같은 진행파가 된다.

$$y = \zeta_A \sin(nx) \sin(\omega t) + \zeta_B \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \quad (2-1)$$

여기서, ζ_A, ζ_B 는 진폭, x 는 원주상의 위치, n 은 원주상의 정재파의 개수(=9)이다. 이때 $\zeta_B = \zeta_A \times r$ 즉, 진폭이 $r = \zeta_B / \zeta_A$ 라 놓으면 식 (2-1)은 식 (2-2)와 같이 표현된다.

$$y = \zeta_A \{ \sin(nx) \sin(\omega t) + r \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \} \quad (2-2)$$

이 진행파에 의한 기계적 진동은 탄성체의 두께 T의 중앙인 중성면의 것이고, 이로부터 T/2 만큼 떨어진 탄성체 표면의 원주 방향의 변위 X와 축방향의 변위 Y를 이용해서 고정자 표면에 발생하는 타원의 방정식을 구하면 식 (2-3)과 같다.

$$A(X-x)^2 + B(X-x)(Y-\frac{T}{2}) + C(Y-\frac{T}{2})^2 = 1 \quad (2-3)$$

$$P = \sin(nx) + r \cos(nx) \cos \phi$$

$$Q = -r \cos(nx) \sin \phi$$

$$A = \left(\frac{2 \cos(nx)}{nT} \right)^2 (P^2 + Q^2) \left(\frac{1}{\zeta_A^2 Q^2} \right)$$

$$B = \frac{P}{nT} \cos(nx) \{ 1 - \sin(nx) \cdot (P^2 + Q^2) \} \left(\frac{1}{\zeta_A^2 Q^2} \right)$$

$$C = (P \sin(nx) - 1)^2 + \sin^2(nx) Q^2 \left(\frac{1}{\zeta_A^2 Q^2} \right)$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{(A+C) - \sqrt{(A-C)^2 + B^2}}}$$

$$b = \sqrt{\frac{2}{(A-C) - \sqrt{(A-C)^2 + B^2}}}$$

$$\theta_R = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B}{A-C}$$

위 식(2-10)은 중심 $(x, \frac{T}{2})$, 장축 a , 단축 b 그리고 회전 θ_R 가 있는 타원을 나타낸다.

위상차 제어의 원리는 2상 입력 전압의 위상차를 조절하여 식 (2-3)의 타원 방정식의 위상차 파라미터 ϕ 를 가변시켜 타원의 장축, 단축, 그리고 회전 방향과 타원의 기울기를 바꾸어 초음파 모터의 속도와 토크를 제어하는 것이다.

2.2 주파수 조절 방식

초음파 모터는 기계적 공진주파수와 입력 전원의 주파수인 인버터의 전기적 공진주파수가 일치했을 때 최대 토크가 발생한다. 인버터의 전기적 공진주파수는 변화된 모터의 기계적 공진주파수를 찾아내어 추종해야지만 효율적인 구동과 안정된 운전점을 찾게 된다.

모터의 기계적 공진주파수를 나타내기 위해서 모터의 기계적 상수, 즉 고정자 질량 효과에 의한 등가 인덕터 L_{usm} 과 고정자 스프링 효과에 의한 커패시터 C_{usm} 를 이용해서 모터의 기계적 공진주파수 f_{usm} 을 나타내면 식 (2-4)와 같다.

$$f_{usm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{usm} L_{usm}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2-4)$$

여기서, m 은 고정자 세라믹-금속의 질량, K 는 고정자 세라믹-금속간의 스프링 상수이다.

그리고 초음파모터에 직접 인가되는 전원 전압의 주파수 f_s 는 식 (2-5)와 같다.

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_d L_i}} + \Delta f \quad (2-5)$$

여기서, C_d 는 초음파 모터 압전 세라믹의 블록킹 커패시턴스, L_i 는 외부 인덕터, Δf 는 모터의 제어에 필요한 가변 주파수이다.

3. 실험 및 고찰

3.1 시스템 구성

초음파 모터 디지털 제어 시스템 구성은 다음과 같다.

- 초음파 모터 : USR-60S (日本新生工業社)
- 로터리엔코더 : 광전식, 1000P/R(FUKOKU社)
- 엔코더 어댑터 : LS7166 24bit Counter
- PC : 펜티엄 III 450 under Windows 98
- 디지털 다중 제어기(FPGA사용, 자체 개발)
- 전원 : Tektronix PS2521G
- 소프트웨어 : VISUAL C++
- 파형 측정 : 500MHz 오실로스코프(Lecroy 93542)

3.2 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기

USM-DMC는 PC로부터 각각 11비트의 디지털 입력을 통해 3가지 제어 변수를 조절할 수 있으며, 이 중 주파수는 기준 마스터 클록이 66MHz일 때 1비트당 최대 16Hz까지 세밀하게 조절할 수 있고, 위상차는 1비트당 최대 0.176° 까지 조절할 수 있는 분해능을 지닌다. 듀티비는 분해능에 큰 의미가 없으므로 주로 25%에서 운전시키지만 그 크기 역시 PC로부터 11비트의 디지털 제어 입력에 따라 실시간으로 조절이 가능하게 설계하였다. 또한 본 제어기를 이용했을 경우, 모든 제어변수 입력을 디지털화 하였기 때문에 위상차-주파수, 위상차-전압, 주파수-전압, 주파수-위상차-전압 등 둘 이상의 다중 제어가 가능하다.

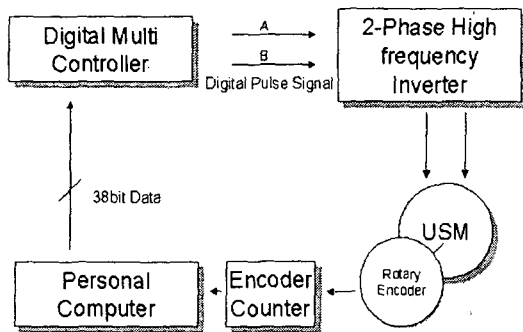


그림 1. 초음파 모터 디지털 다중 제어 시스템 블록도
Fig. 1 Block diagram of USM digital Multi control system

그림 1은 초음파 모터 디지털 다중 제어 시스템의 블록도이다. 설계 제작한 초음파 모터 다중 제어기는 실시간 처리를 위하여 FPGA를 사용하였고, 최대 4대의 초음파 모터를 제어할 수 있게 설계하였으며, 컴퓨터와는 통신은 ISA방식을 사용하였다. FPGA는 컴퓨터에서 8255 PPI를 거쳐 디지털 제어 신호를 입력받아 A상과 B상에 각각 입력될 구형파를 발생시키고, 이 구형파는 2단 트랜지스터 스위칭 증폭회로와 펄스 트랜스로 구성된 초음파 모터 전압 변환 회로를 거쳐 초음파 모터 입력 전원이 된다. 초음파 모터 동작 시, 회전 속도 및 위치 검출을 위해서 로터리 엔코더를 사용하였고, LS7166 24비트 다중 카운터 칩을 이용해서 카운터해서 4체배 후 이를 컴퓨터에 입력한다.

3.3 주파수-속도 특성 실험

본 실험은 앞 절에서 설계했던 FPGA를 이용한 USM-DMC를 이용하여, 기존 제어기에서는 구현이 어려웠던 실시간 주파수 가변을 통해서 초음파 모터의 속도를 측정한다. 먼저 온도 변화에 따른 영향을 최소화하기 위해 위상차 0° 에서 일정 시간 예열하였다. 그 다음 위상차를 -90° 로 설정한 후, 주파수를 42kHz에서 39.5kHz로 프로그램에 의해서 자동으로 가변시키면서 초음파 모터의 속도를 로터리 엔코더와 엔코더 카운터인

LS7166을 통해서 측정하였다. 이러한 과정을 -90° 에서 -15° 까지 15° 간격으로 조절하면서 측정한 주파수-속도 그래프는 그림 2와 같다.

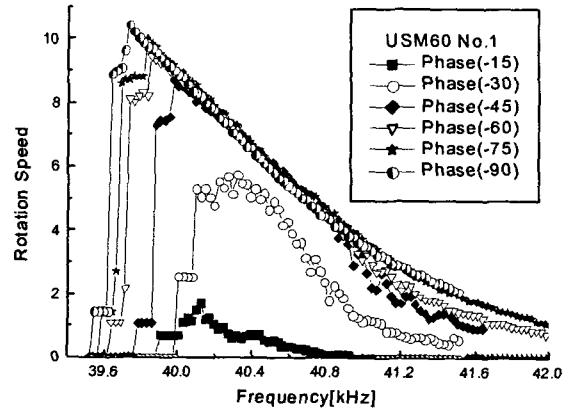


그림 2. 위상차에 변화에 따른 주파수-속도 특성 ($\phi < 0$)
Fig. 2 The Frequency-Speed Characteristic by the change of Phase difference ($\phi < 0$)

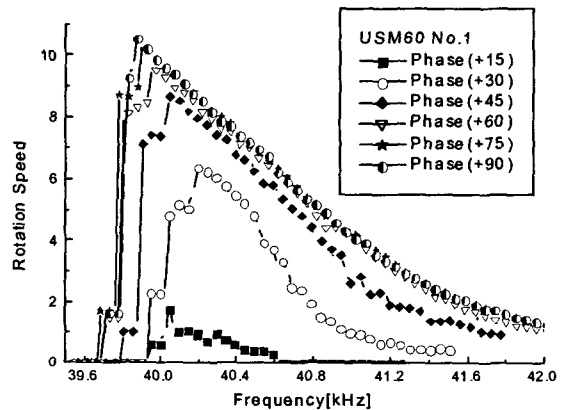


그림 3. 위상차에 변화에 따른 주파수-속도 특성 ($\phi \ge 0$)
Fig. 3 The Frequency-Speed Characteristic by the change of Phase difference ($\phi \ge 0$)

그림 3은 그림 2에서 측정한 방법과 동일한 방법으로 위상차가 양수일 때 즉, 90° 에서 15° 까지 15° 간격으로 측정한 주파수-속도 그래프이다.

실제로 위상차에 따른 최적 공진 주파수를 이론식으로부터 구하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 여러 실험을 실시한 후, 그 결과를 이용해서 실험식을 구한 다음 위상차 변화에 따른 최적 주파수를 계산하여 입력하는 방식을 사용한다.

그림 2와 그림 3을 통해서 각각의 위상차 크기에 따라 최적의 공진주파수가 서로 다르다는 것을 알 수 있고 이를 이용해서 각각의 위상차에 따른 최적의 주파수를 구한다. 이를 통해서 그림 4와 그림 5에 나타낸 그래프와 같은 실험식 (2-6)을 구할 수 있다. 위상차에 따른 최적 주파수 점을 모두 통과하는 보간 다항식을 구하는

것은 차수만 높아지므로 곡선의 적합(curve fitting) 중 2차 곡선의 적합(quadratic fitting)방식을 이용하였다. 여기서 사용한 프로그램은 CurveExpert1.3(2)이고, $\phi < 0$ 인 경우의 표준 편차(standard error)는 약 0.0311이고, 상관 계수(correlation coefficient)는 약 0.9915이었다. $\phi \geq 0$ 인 경우에는 표준 편차가 약 0.0313이고, 상관 계수가 약 0.9934이었다.

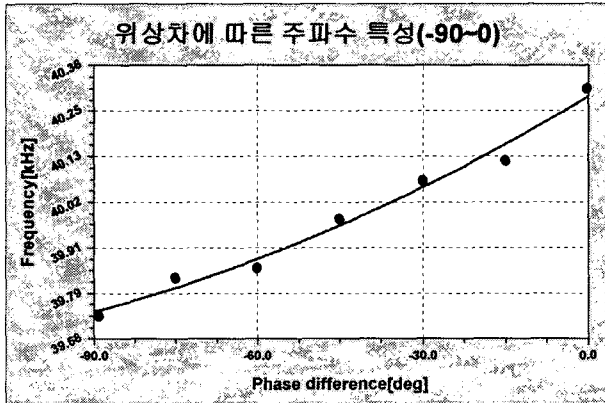


그림 4. 위상차와 최적 공진주파수와의 관계($\phi < 0$)
Fig 4. The relationship of phase difference and the optimum resonance-frequency($\phi < 0$)

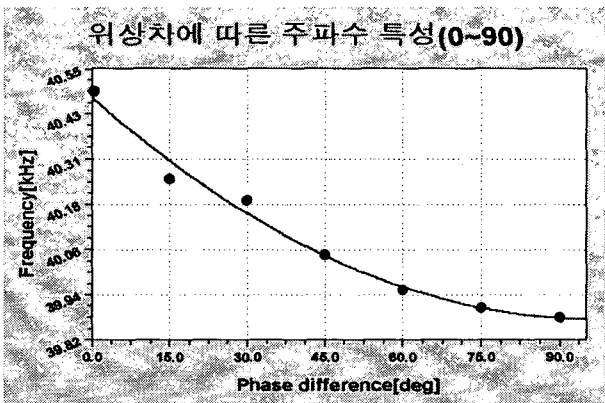


그림 5. 위상차와 최적 공진주파수와의 관계($\phi \geq 0$)
Fig. 5 The relationship of phase difference and the optimum resonance-frequency($\phi \geq 0$)

$$f_{usm} = a + b\phi + c\phi^2 \quad (2-6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi < 0 \text{ 인 경우,} \\ \phi \geq 0 \text{ 인 경우,} \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = 40.28 \\ b = 0.00833 \\ c = 2.6418e-005 \\ a = 40.48 \\ b = -0.01257 \\ c = 6.5558e-005 \end{array}$$

3.4 고찰

이상의 실험을 통해서 각각의 위상차에 따라 최적 주파수가 미세하지만 서로 약간씩 다르다는 것을 알 수 있다. 그 원인으로서는 위상차 0° 부근에서는 초음파 모터의 진동원인 압전세라믹에 의해 정재파가 발생하고, 위상차가 $\pm 90^\circ$ 부근으로 커질수록 정재파 성분과 진행파 성분이 합성된 굴곡 진행파가 발생하며, $\pm 90^\circ$ 에서는 진행파가 발생하기 때문으로 사료된다. 즉, 금속 탄성체인 고정자의 기계적 공진주파수는 그 진동원인 압전세라믹에서 발생하는 기계적 진동의 진폭과 주파수의 영향을 받고, 압전세라믹에서 발생하는 기계적 진동은 위상차의 영향을 받기 때문에 각각의 위상차에 따라 최적 공진주파수가 서로 달라진다는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기(USM-DMC)를 설계 제작하여 위상차에 따른 주파수-속도 특성을 실험하고 그 결과를 이용하여 위상차와 최적 공진주파수와의 관계를 밝혔다. 각각의 위상차 값에 따른 최적 공진주파수를 2차 곡선의 적합법을 이용해 식(2-6)와 같은 실험 곡선식을 구하였다.

이 실험식을 이용하게 되면 위상차 조절 방식을 통한 초음파 모터의 속도 및 위치 제어를 실시할 경우 보다 효율적이고 안정적인 운전이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Sashida, T., Kenjo, T., : An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford, Clarendon Press, 1993.
- [2] Ueha S., and Tomikawa Y.: Ultrasonic Motors Theory and Applications, No. 29 in Monographs in Electrical and Electronics Eng., Oxford Science Publications, 1993.
- [3] Y. Izuno, M Nakaoka, "Ultrasonic Motor-Actuated Direct Drive Positioning Servo Control System Using Improved Fuzzy-Reasoning Controller", T. IEE Japan, Vol. 115-D, No. 11, 1995.
- [4] T. Hatuszawa, 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.
- [5] T. Senjyu, H. Miyazato, S. Yokoda, K. Uezato "Speed Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network" IEEE Trans. On Power Electronics. Vol. 13, No.3 , 1998
- [6] JS. W. Chung, K. T. Chau "Servo Speed Control of traveling-wave Ultrasonic Motors Using Pulse Width Modulation", Electric Power Components and system, 29, 707-722, 2001.
- [7] D. O. Kim, W. C. Kang, S. C. Kim, G. K. Oh, Y. D. Kim, "A Speed Characteristics of the Ultrasonic Motor by the Multi-Parameters adjustment with Phase difference-Frequency", trans. KIEE. Vol. 52, No 1, 2003.