

FPGA를 이용한 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기 개발

김동옥*, 김영동*, 오금곤**, 정국영#, 정찬주##, 류재민##
 조선대 제어계측공학과*, 조선대 전기공학과**, 동강대 컴퓨터정보과#, 동강대 정보통신과##

The Development of Ultrasonic Motor-Digital Multi Controller using FPGA

Dong-Ok Kim*, Young-Dong Kim*, Geum-Kon Oh**, Gook-Young Jung#, Chan-Ju Jung, Jae-Min Ryu
 *Con.&Ins. Eng., Chosun Univ., **Elec. Eng., Chosun Univ., #Com.&Inf. Eng. Dongkang Coll., ##Inf.&Comm. Dongkang Coll.

Abstract - In contrast to conventional electro-magnetic motor, USM(Ultrasonic Motor), as piezo-electric ceramic applying ultrasonic mechanical vibration and as frictional-movement type motor, get rotational torque by elastic friction between stator and rotator. The USM, which is small motor without iron cores and coil as a simple structure, has little load weight, has character of high torque at low speed, and can apply a direct drive type without deceleration gear as low speed type. A response of USM from control input is satisfactory, and also generates much torque in low speed driving, and holding torque is much without supplying power.

In this study, I designed and made Ultrasonic motor-digital multi controller(USM-DMC) using FPGA chip, A54SX72A made in Actel Corporation. By the minute, USM-DMC can control frequency, duty ratio, and phase difference of USM by 11bit digital input from PC. Therefore, when we use this controller, we can apply to typical parameter, frequency, phase difference, and voltage parameter, to control as well as we can do mixing control like phase-frequency, phase-voltage, frequency-voltage, frequency-phase-voltage. What is more, the strongest point is that it can trace frequency based on optimized frequency because we can input optimized resonant frequency while in motoring.

어 특성을 이론적 근거 제시와 함께 ACTEL사의 A54SX72A라는 FPGA를 사용해 초음파 모터 제어용 디지털 다중 제어기(USM-DMC)를 설계 제작하였다. USM-DMC는 PC로부터 각각 11비트의 디지털 입력을 통해 40kHz 근방의 주파수를 비롯해서, 듀티비와 위상차 패러미터도 역시 실시간으로 제어가 가능하다. 따라서 본 제어기를 이용했을 경우, 초음파 모터의 대표적인 제어 패러미터인 주파수, 위상차, 전압을 각각 이용할 수 있을 뿐만 아니라 위상차-주파수, 위상차-전압, 주파수-전압, 주파수-위상차-전압 등 둘 이상의 다중 제어가 가능하다. 지금까지 연구결과에 의하면 속도 특성 중 선형성, 회전방향 등을 고려할 때 위상차 제어가 주파수, 전압 제어보다 우수하다고 알려져 있다^[6]. 따라서 다중 제어 중 위상차-주파수 다중 제어와 위상차 제어와의 속도 특성 비교 실험을 통해 USM-DMC의 성능에 대한 검증과 다중 제어의 앞으로의 새로운 제어방식으로의 가능성을 검토한다.

2. 초음파모터의 제어

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 합성되면서 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.

1. 서 론

초음파 모터(ultrasonic motor, USM)는 종래의 전자식 모터와는 달리 압전 소자를 사용하여 초음파 기계 진동을 이용한 마찰 구동형 모터로서 고정자와 회전자 간의 탄성 마찰력에 의해 회전 토크를 얻고 있다. 철심과 코일이 없는 단순 구조를 갖는 소형 모터로서 하중 용량이 작고, 저속 고평토크의 특성을 지니고 있으며, 저속용으로 감속기어 없이 직접구동(direct drive) 방식이 가능하다.

초음파 모터는 제어입력에 대한 응답성이 양호하고, 저속 운전 시에도 큰 토크를 발생하며 전원을 차단했을 경우 정지 토크가 매우 크다. 이는 자석과 코일을 이용한 기존 전자식 모터에 비해 최소 10배 이상의 힘을 낼 수 있다. 이를 다시 말하자면, 같은 크기의 힘을 낼 수 있는 모터 제작 시에 크기를 최소 10분의 1 이하로 소형화할 수 있다. 또한 운전 시 소음이 거의 없고, 중공(中空)구조형이나 리니어형 등 다양한 형상 설계가 가능하며, 자력이 매우 강한 특수 환경에서도 외란의 영향을 받지 않는 등 그 활용도는 매우 높게 평가받고 있다^[1-2].

초음파 모터의 정밀한 위치제어와 속도 및 토크 제어방법에는 전압의 진폭 제어, 주파수 제어, 위상차 제어, slip 제어, 듀티비 제어 등 여러 가지 방식이 제안되어 있고, 그 밖의 다양한 연구방면에서 많은 논문이 발표되고 있다^[3-6].

본 논문에서는 이상의 초음파 모터 패러미터에 대한 제

2.1 위상차 제어

A상과 B상에 따로따로 정현파 전압을 인가하면 각상에 정재파가 발생한다. A상에서 발생한 정재파의 공간적 위상파, B상에서 발생한 공간적 위상은 초음파 모터의 구조상 90°의 위상차를 갖는다. 그리고 A상과 B상에 시간적으로 φ인 정현파 전원을 공급하면 A상과 B상에서 발생하는 기계적 진동파인 정재파는 각각 식(2-1)과 식(2-2)로 쓸 수 있다.

$$Y_A = \zeta_A \sin(nx) \sin(\omega_0 t) \tag{2-1}$$

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

여기서, ζ_A, ζ_B는 정수, x는 원주상의 위치, n은 원주상의 정재파의 개수(=9)이다.

A상과 B상의 정재파가 동일 금속 진동체(고정자)내부에서 합성되므로

$$y = \zeta_A \sin(nx) \sin(\omega t) + \zeta_B \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \tag{2-3}$$

이 된다. 이때 ζ_A = ζ_B × r 즉, 진폭이 r = ζ_A / ζ_B 라

놓으면 식(2-3)은 (2-4)와 같이 표현된다.

$$y = \zeta_A \{ \sin(nx) \sin(\omega t) + r \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \} \quad (2-4)$$

이 진행파에 의한 기계적 진동은 탄성체의 두께 T의 중앙인 중성면의 것이고, 이로부터 T/2 만큼 떨어진 탄성체 표면의 원주 방향의 변위 X와 축방향의 변위 Y는 각각 식 (2-5)와 식 (2-6)이다.

$$X = x - \frac{T}{2} \sin \theta \approx x - \frac{T}{2} \tan \theta \quad (\because \theta \approx 0, \sin \theta \approx \tan \theta = \theta) \quad (2-5)$$

$$Y = y + \frac{T}{2} \cos \theta \approx y + \frac{T}{2} \quad (\because \cos \theta \approx 1) \quad (2-6)$$

이때 $\tan \theta$ 는

$$\tan \theta = \frac{\partial y}{\partial x} = n \zeta_A \{ \cos(nx) \sin(\omega t) - r \sin(nx) \sin(\omega t + \phi) \} \quad (2-7)$$

과 같다.

식(2-4)와 식 (2-7)을 식 (2-6)과 식 (2-5)에 대입하면 식 (2-8)과 식 (2-9)가 된다.

$$X = x - \frac{nT\zeta_A}{2} \{ \cos(nx) \sin(\omega t) - r \sin(nx) \sin(\omega t + \phi) \} \quad (2-8)$$

$$Y = \frac{T}{2} + \zeta_A \{ \sin(nx) \sin(\omega t) + r \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \} \quad (2-9)$$

식 (2-8)과 식 (2-9)를 이용해서 고정자 표면에 발생하는 타원 방정식을 구하면 다음 식 (2-10)과 같다.

$$A(X-x)^2 + B(X-x)(Y-\frac{T}{2}) + C(Y-\frac{T}{2})^2 = 1 \quad (2-10)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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 (2-10)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 제어

초음파 모터는 기계적 공진주파수와 입력 전원의 주파수인 인버터의 전기적 공진주파수가 일치했을 때 최대 토크가 발생한다. 기계적 공진주파수는 온도와 부하에 따라 변

화하며, 온도가 높아지면 속도는 점점 줄어든다. 이는 기계적 공진주파수 즉, 최적의 공진점이 점점 낮은 쪽 주파수대로 이동함을 보여준다. 일반적으로 전기적 공진주파수, 즉 입력 전원의 주파수를 기계적 공진주파수와 일치시키기 위해서는 높은 주파수에서 낮은 주파수로 감소시키면서 조절한다. 그렇지만 최적의 공진점을 지나쳐서 점점 더 주파수를 감소시키면, 모터의 속도는 급격히 감소하다가 정지하게 된다.

인버터의 전기적 공진주파수는 변화된 모터의 기계적 공진주파수를 찾아내어 추종해야지만 효율적인 구동과 안정된 운전점을 갖게 된다.

모터의 기계적 공진주파수를 나타내기 위해서 모터의 기계적 상수들은 다음과 같다. L_{usm} 은 고정자 질량 효과에 의한 등가 인덕터, C_{usm} 은 고정자 스프링 효과에 의한 커패시터이다.

$$L_{usm} = \frac{m}{F^2} \quad (2-11)$$

$$C_{usm} = \frac{F^2}{K} \quad (2-12)$$

여기서, m은 고정자 세라믹-금속의 질량, F는 force factor, K는 고정자 세라믹-금속간의 스프링 상수이다.

이상의 기계적 상수들을 가지고 모터의 기계적 공진주파수 f_{usm} 을 나타내면 식 (2-13)과 같다.

$$f_{usm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{usm} L_{usm}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2-13)$$

초음파모터에 직접 인가되는 전원 전압의 주파수 f_s 는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_d L_i}} + \Delta f \quad (2-14)$$

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

3. 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기

그림 3-1은 초음파 모터 디지털 다중 제어 시스템의 전체 구성도이다. 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 4채널 후 이를 컴퓨터에 입력하게 된다.

그림 3-2의 MCLK는 기준 마스터 클럭을 의미하고, MCLK의 선택에 따라서 주파수 출력을 다양하게 할 수 있으며 본 실험에서는 66Mhz를 사용하였다. VCO_IN 값이 똑같은 0x7FF 경우, MCLK가 81.96Mhz일 때는 40.020kHz이고, 66Mhz일 때는 32.227kHz가 된다.

VCO_IN은 VCO 조정용 카운터 분할 입력으로 11비트를 사용하며 기준 클럭을 최대 2048까지 나눌 수 있으며, 기준 마스터 클럭이 66Mhz일 때 분해능은 1비트당 최대 15.7Hz까지 조절이 가능하다. 예를 들어 기준 마스터 클럭

이 66Mhz일 때 VCO_IN값이 0x7FF이면 출력 주파수는 32.227kHz가 되고 0x7FE이면 32.242kHz가 된다.

PHASE_IN은 A상 B상의 위상차 제어입력으로 11비트를 사용하며 이론상으로 1비트당 최대 0.176°까지의 분해능을 지닌다. 하지만 PHASE_IN은 VCO_IN 값에 따라 그 제어 범위가 달라진다. 예를 들어 초음파 모터 구동 주파수가 40kHz일 때, VCO_IN은 0x672이고, PHASE_IN의 제어범위는 0~0x672가 되며 분해능은 360°을 1650으로 나눈 0.22°가 된다. 이 때 PHASE_IN은 0x672를 초과해선 안된다. 즉, 입력이 0x000이면 위상차 0°가 되고 최대 입력 0x672이면 위상차 360°가 된다. 0x672를 초과하면 오버플로로 우가 발생해서 정확하지 않은 값이 출력된다.

DUTY_IN은 듀티비 조정용 분할 입력으로 역시 11bit로 설계하였다. VCO_IN값과의 비율에 의해서 결정되며, 예를 들어 VCO_IN 값이 0x672이면 50%의 듀티비를 갖는 구형파를 출력하기 위해서는 DUTY_IN은 0x336이 되어야 하고, 25%의 듀티비를 갖는 구형파를 출력하기 위해서는 0x168이 입력되어야 한다. 단, 0x672가 100%의 듀티비이기 때문에 DUTY_IN은 VCO_IN값을 초과해서는 안된다.

PH_SEL은 구동하고자 하는 초음파 모터를 선택할 때 사용하는 선택 신호이다. PH_SEL은 2비트로 구성되며 최대 4대의 초음파 모터를 구동할 수 있게 설계하였다. PH_SEL가 (00)₂이면 1번 모터, (01)₂이면 2번 모터, (10)₂이면 3번 모터, (11)₂이면 4번 모터를 선택한다.

FPGA 출력은 총 16개이고, 1개의 모터당 A상 정(+).부(-)의 신호, B상 정(+).부(-)의 신호 총 4개의 신호선이 필요하다. 정(+)과 부(-) 파형의 위상은 180°차이가 난다. VCO_IN과 DUTY_IN 입력에 따라 동시에 두 상의 주파수와 듀티비는 변한다. 그렇지만 PHASE_IN 입력에 따라 B상에만 위상쉬프트가 생겨 A상과 B상 사이에는 입력에 따른 위상차가 생기게 된다.

전압차 제어를 하기 위해서는 채널 1의 A상과 채널 2의 B상을 이용해서 각각 초음파 모터의 A상과 B상에 각각 연결해서 사용이 가능하다. 이에 따라 A상과 B상 각각 따로 듀티비 제어가 가능해져 전압차 제어가 가능하다.

4. 실험 및 고찰

본 연구의 실험은 앞 장에서 설계했던 FPGA를 이용한 USM-DMC를 이용하여, 기존 제어기에서는 구현이 어려웠던 실시간 위상차-주파수 다중 제어를 실현한 후 초음파 모터의 속도를 측정한다. 시작한 USM-DMC와 제안하는 위상차-주파수 다중 제어의 성능을 평가하기 위해서 기존의 위상차 제어 실험 결과와 비교 검토한다.

실험 방법은 먼저 초음파 모터 디지털 다중 제어 하드웨어를 구축하고, Visual C++를 이용하여 프로그램을 설계한다. 시스템 구축이 끝난 후 먼저 기존의 무부하시의 위상차 속도 특성을 측정한다. 그리고 위상차 제어에 의한 초음파 모터 구동 시 주파수를 변화시켜 위상차-주파수 다중 제어를 행한다.

그림 4-1은 실험을 위해서 설계한 디지털 다중 제어 프로그램의 대화 상자이다. 하단부에는 엔코더 출력에 의한 속도곡선을 두어서 속도 곡선을 보면서 입력 변수를 제어할 수 있게 설계하였다. 주파수, 위상차, 전압 패러미터 모두 수동 조작 및 자동으로 업/다운이 가능하게 설계하였다.

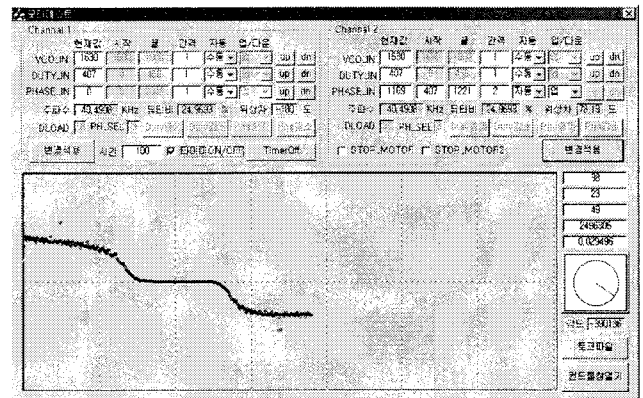


그림 4-1. 초음파 모터 속도 및 토크 측정 프로그램
Fig 4-1. The program of USM's velocity and torque

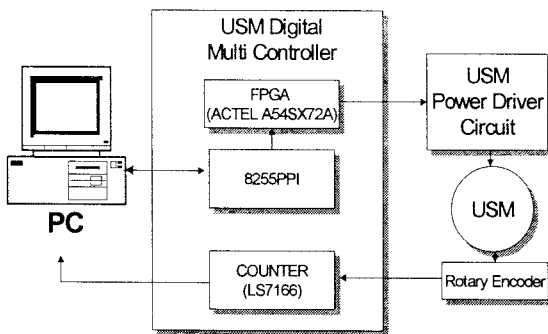


그림 3-1. 초음파 모터 디지털 다중 제어 시스템 구성도
Fig. 3-1. Block diagram of USM digital Multi control system

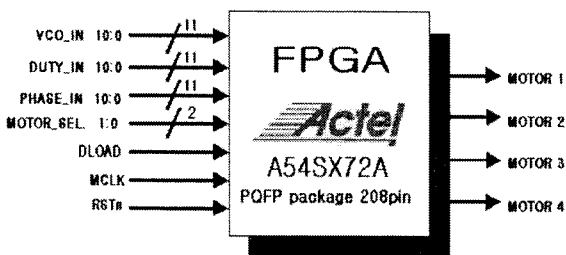


그림 3-2. 설계한 FPGA의 입출력 신호 블록도
Fig 3-2. Input/Output signal Block diagram of the FPGA designed

4-1. 시스템 구성

초음파 모터 디지털 다중 제어 시스템 구성은 다음과 같이 하였다.

- 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)

4-2. 위상차제어 시의 속도 특성

그림 4-2는 위상차 제어에 의한 무부하시 속도 특성 곡선이다. 초음파 모터의 속도 변화는 앞 장에서 설계한 디지털 다중 제어기를 이용하여 PC의 프로그램 상에서 위상 데이터를 입력받아 위상차 ϕ 를 -90° 에서 0° 를 거쳐 다시 $+90^\circ$ 미세한 간격으로 조절하면서 속도를 변화시켰다. 측정 시 주파수는 40.5157KHz였다. 위상차가 0° 에서 $+90^\circ$ 사이의 구간에서는 CW방향으로 모터는 회전하고 비교적 선형 특성을 보였다. 먼저 위상차가 90° 일 때 속도는 CW방향으로 최대이다. 이때 약 1.2A의 전류가 흘렀다. 그리고 나서 차츰 위상차를 줄여가면 속도는 거의 선형으로 줄어든다. 위상차가 0° 일 때 2A이상의 과전류가 흐르며, 정격 전류인 2A이하로 전류를 제한하기 위해 전원공급기의 전류 최대값을 2A로 설정했다. 따라서 -90° 에서 90° 까지 연

속으로 조절했을 때 0°가 되면 전원 공급기가 전류 제한을 발생해 전원공급이 중단되기 쉬웠다. 그래서 주파수를 0°에서 최대한 안정하게 동작하는 값을 입력한 후 측정하였다. 최대 속도는 약 75rpm 정도 되었다. 0°근처에서 약간의 데드 밴드가 존재하였으며 ±60°부근에서 포화상태가 되어 속도 변화가 거의 없었다.

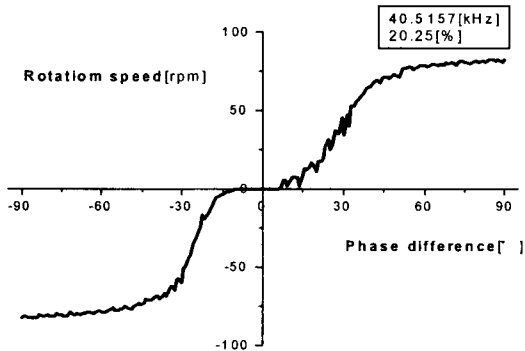


그림 4-2. 위상차 - 속도 그래프
Fig. 4-2. Phase difference- Velocity graph

4-3. 위상차-주파수 다중 제어 시의 속도 특성

실제작한 USM-DMC의 성능 평가를 위해, USM-DMC가 둘 이상의 패러미터가 동시에 입력이 가능하다는 특성을 이용하여 위상차-주파수 다중 제어를 통한 속도 특성을 측정하였다.

그림 4-3은 위상차-주파수 다중 제어에 의한 무부하시 속도 특성 곡선이다. 초음파 모터의 다중제어는 PC 프로그램 상에서 위상차 데이터를 -90°에서 0°를 거쳐 90°까지 연속적으로 미세하게 변화를 줌과 동시에, 주파수를 -90°에서 -60°구간까지 점점 증가시켰다가, -60°~0°~60° 범위에서는 주파수를 거의 변화시키지 않았다. 다시 60°에서 90° 범위에서는 주파수를 점차로 감소시켰다. 이 때의 듀티비는 25%였고, 주파수 변화 폭은 40.9kHz에서 30.9kHz이었다. 데드 밴드는 -8°에서 11°까지 존재하였고, 최대 속도는 약 105rpm이 되었다.

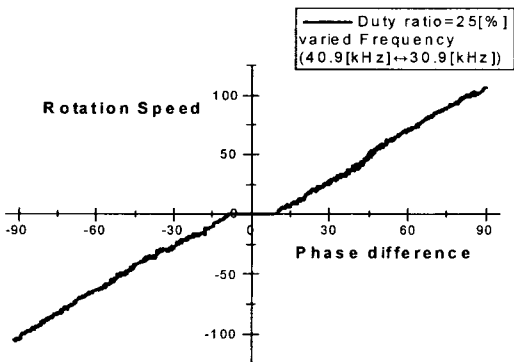


그림 4-3. 위상차+주파수 다중제어 속도 곡선
Fig 4-3 . Velocity graph of multi-control(phase difference+frequency)

4-4. 고 찰

이상의 속도 실험에 의하여 나타난 위상차-주파수 다중 제어 특성은 위상차 제어에서의 속도 특성과 유사하지만 최대 속도의 증가와 함께 포화영역이 현저하게 줄어서 선형화가 뚜렷해짐을 확인할 수 있었다. 위상차 제어에서는

속도가 0인 지점 즉, 위상차가 줄어들수록 과전류가 흐르는 문제점이 나타났으나, 위상차 0°에 적당한 주파수 입력이 이루어져 1.6A의 비교적 안정한 전류가 발생함을 알 수 있었고, 따라서 위상차 제어 시 위상차가 0°부근의 과전류 문제를 해결할 수 있었다. 또한 위상차 제어에서는 60°근처에서 거의 포화상태를 일으켜 속도 변화가 거의 없었지만, 위상차-주파수 제어 시 속도 곡선은 포화 상태 없이 거의 직선으로 나타난다. 그리고 위상차 제어 시에는 속도가 0~약 ±75rpm정도 되었지만 위상차-주파수 제어 시에는 0~105rpm이 되어 속도 범위도 커지을 알 수 있었다.

본 위상차-주파수 다중 제어 방식을 통해 새롭게 알 수 있는 사실은 각각의 위상차에 적합한 최적 주파수가 비록 미세하지만 서로 약간씩 다르다는 것을 알 수 있다. 따라서 위상차에 따른 최적 구동 주파수를 입력해주면 초음파 모터가 위상차 0°부근에서도 안정되게 동작함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 연구가 활발한 초음파 모터에 대한 새로운 제어 방식인 다중 제어 방식을 도입하여 위상차-주파수 다중 제어를 실현하였다. 이를 위하여 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기(USM-DMC)를 설계 제작하고, 무부하시의 위상차 제어에 따른 속도 특성과 위상차-주파수 다중 제어시의 속도 특성을 비교하였다. 그 결과, 새로 제안한 위상차-주파수 다중 제어를 이용하면 위상차 제어 시보다 선형성이 우수하고, 0°에서 과전류가 흐르는 단점을 극복할 수 있었고, 속도 범위가 넓어졌다.

이상의 결과를 토대로 본 연구에서 시작한 USM-DMC의 많은 장점을 알리고, 제안한 위상차-주파수 다중 제어가 새로운 제어 방식이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

(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 Engineering, Oxford Science Publications, 1993
- [3] A. Kato, K. Ito, and M. Ito, "Adjustable Compliant Motion of Ultrasonic Motor," Journal of Robotics and Mechatronics Vol. 5, No. 5, 1993.
- [4] 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
- [5] 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検討," 電氣學會研究會資料, RM-89-11, pp. 25-33, 1989
- [6] 김 영동, 오금곤 : "초음파 모터의 위상차 제어" 조명·전기설비학회지, 66-74, 1996