

위상차-주파수 다중 파라미터 조절에 의한 초음파 모터 속도 특성

論 文

52P-1-4

A Speed Characteristics of the Ultrasonic Motor by the Multi-Parameters adjustment with Phase difference-Frequency

金 桐 玉* · 姜 園 贊* · 金 成 喆* · 吳 金 坤** · 金 永 炯***

(Dong-Ok Kim · Won-Chan Kang · Sung-Cheol Kim · Geum-Kon Oh · Young-Dong Kim)

Abstract - In this study, we designed and made Ultrasonic motor-digital multi controller(USM-DMC) using FPGA chip, A54SX72A made in Actel Corporation. By the minute, USM-DMC can adjust the frequency, duty ratio, and phase difference parameters of USM by digital input to be each 11bit from PC. Therefore, when we use this controller, it is possible to apply typical three parameters individually as well as multi-parameters simultaneously to control the speed and the torque. What is more, the strongest point is that it can trace frequency based on optimized frequency as compared with the phase difference because we can input optimized resonant frequency while in motoring. And we test the speed of USM with the adjustment of multi-parameters, the phase difference-frequency.

As the result of the test, in the case of the multi-parameters of the phase difference and frequency, the speed characteristic is more linear and stable, and wider in the range of control than the single-parameter of the phase difference or the frequency.

Key Words : Ultrasonic Motor(USM), Multi-Parameters, Digital Multi Controller(DMC)

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, 낮은 속도에서도 고 토크의 특성을 지니고 있으며, 저속용으로 감속 기어 없이 직접구동(direct drive) 방식이 가능하다[1].

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 있어 극소형 액츄에이터로서 그 응용이 기대된다. 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[2].

초음파 모터의 정밀한 위치 제어와 속도 및 토크 제어 방법에는 전압의 진폭 조절, 주파수 조절, 위상차 조절, slip 조절, 듀티비 조절 등 여러 가지 방식이 제안되어 있고 [3-6], 그 밖의 다양한 연구방면에서 많은 논문이 발표되고 있다[7,8].

초음파 모터 제어 방식 중 지금까지는 주파수 조절 방식이 주종을 이루어 왔다. 이 방식은 구동 주파수의 조작에 대한 응답이 부드럽고, 온도나 부하에 따른 공진주파수 변화를 고려하지 않아도 된다는 점과 제어가 설계가 비교적 쉽다는 장점을 지닌다. 하지만 주파수 변화에 대한 속도와 토크 변화가 매우 급격해서 제어 범위가 너무 협소하며 회전 방향을 변경하기 위해서는 별도의 정·역 변환 장치가 필요하다[5].

입력전원의 A, B 두상의 위상차 조절에 의한 방식은 위상차만을 조절함으로써 회전 방향과 회전 속도 모두를 제어할 수 있고, 또한 종래의 PID제어기를 이용한다는 장점을 지닌다. 하지만 위상차 조절 방식은 PID제어기의 비례 계수 결정이 어렵고, 제어기 구성이 비교적 복잡하고, 고정자 표면의 운동 궤적의 변화와 회전자 표면에서 일어나는 진행과 진폭의 맥동이 초음파 모터 회전을 고르지 않게 할 수 있다는 단점이 있다. 또한 열이나 부하에 따라 공진 주파수가 변화하면 주파수 보상이 어렵고, 위상차가 0°인 부근에서 제어 불능 지역이 존재하면서, 과전류가 흐르는 문제가 있다 [9]. 그러나 위상차 0° 부근에서도 과전류가 흐르지 않고 안정된 전류가 흐르는 구동 주파수가 존재함을 실험을 통해서 알 수 있었다. 이는 위상차가 0°인 경우와 그렇지 않은 경우

* 正 會 員 : 朝鮮大 大學院 制御計測工學科 卒業. 工博

** 正 會 員 : 朝鮮大 電氣工學科 教授

*** 正 會 員 : 朝鮮大 情報 · 制御計測工學科 教授

接受日字 : 2002年 7月 20日

最終完了 : 2003年 2月 3日

에 최적의 구동 주파수가 다르다는 것을 의미하고, 이를 달리 표현하면, 위상차에 따라 최적 구동주파수가 서로 다르다는 것이다. 따라서 최대의 효율과 안전한 구동을 위해서는 각각의 위상차에 따라 최적의 구동주파수를 설정해야 한다.

본 논문에서는 이상의 초음파 모터 파라미터에 대한 속도 특성을 이론적 근거 제시와 함께 ACTEL사의 A54SX72A라는 FPGA를 사용해 초음파 모터 제어용 디지털 다중 제어기(USM-DMC)를 설계 제작하였고, 초음파 모터 속도 특성을 측정하기 위한 프로그램 설계는 비주얼 C++를 사용하였다. 제작된 디지털 다중 제어기와 속도 제어 프로그램을 이용하여 다중 파라미터 조절 방식 중 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 방식을 실현하였으며, 이의 성능을 시험하기 위하여 무부하 시의 주파수와 위상차 단일 파라미터 조절에 따른 속도 특성을 비교하였다.

시험 제작된 USM-DMC는 PC로부터 각각 11비트의 디지털 입력을 통해 40kHz 근방의 주파수를 기준 클럭의 2048분의 1에 해당하는 분해능으로 실시간으로 조절이 가능함과 동시에, 듀티비와 위상차 파라미터 역시 제어 입력으로 사용이 가능하다. 따라서 본 제어기를 이용해서 초음파 모터의 속도 및 토크 제어를 행할 경우, 주파수, 위상차, 전압, 전압차의 단일 파라미터 입력에 대한 속도 및 토크 특성을 검출할 수 있을 뿐만 아니라 위상차-주파수, 위상차-전압, 주파수-전압, 주파수-위상차-전압 등 둘 이상의 다중 파라미터에 대한 특성 검출이 가능하다. 지금까지 연구결과에 의하면 속도 특성 중 선형성, 회전방향 제어, 제어 범위 등을 고려할 때, 위상차 조절방식이 주파수, 전압 조절 방식보다 우수하다고 알려져 있다[5]. 따라서 여러 가지 다중 파라미터 중에서 위상차-주파수 다중 파라미터와 기존의 주파수와 위상차 단일 파라미터 조절에 의한 속도 특성 비교 실험을 통해 위상차에 따른 최적 주파수가 다르다는 것을 증명하며, 다중 파라미터 조절 방식이 새로운 속도 조절 방식으로서 우수함을 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 탄성체내부에서 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[5].

2.1 위상차 조절 방식

A상과 B상에 따로따로 정현파 전압을 인가하면 각상에 정재파가 발생한다. A상에서 발생한 정재파의 공간적 위상차, B상에서 발생한 공간적 위상은 초음파 모터의 구조상 90°의 위상차를 갖는다. 따라서 A상과 B상에 시간적으로 ϕ 인 정현파 전원을 공급하면 A상과 B상에서 발생하는 기계적 진동과인 정재파는 각각 식 (2-1)과 식 (2-2)과 같다.

$$Y_A = \zeta_A \sin(nx) \sin(\omega_0 t) \quad (2-1)$$

$$Y_B = \zeta_B \sin(nx + \pi/2) \sin(\omega_0 t + \Phi) \\ = \zeta_B \cos(nx) \sin(\omega_0 t + \Phi) \quad (2-2)$$

여기서, $\zeta_A \cdot \zeta_B$ 는 정수, x 는 원주상의 위치, n 은 원주상의 정재파의 개수(=9)이다. A상과 B상의 정재파가 동일 금속 진동체(고정자)내부에서 합성되므로

$$y = \zeta_A \sin(nx) \sin(\omega t) + \zeta_B \cos(nx) \sin(\omega t + \Phi) \quad (2-3)$$

이 된다. 이때 $\zeta_A = \zeta_B \times r$ 즉, 진폭이 $r = \zeta_A / \zeta_B$ 라 놓으면 식 (2-3)은 식 (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 중성면에서 일어나고, 이로부터 T/2 만큼 떨어진 탄성체 표면의 원주 방향의 변위 X와 축 방향의 변위 Y는 각각 식 (2-5)와 식 (2-6)이다.

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

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

이때 $\tan \Theta$ 는 식 (2-7)과 같다.

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{cases} a = \sqrt{\frac{2}{(A+C) - \sqrt{(A-C)^2 + B^2}}} \\ b = \sqrt{\frac{2}{(A-C) - \sqrt{(A-C)^2 + B^2}}} \\ \theta_R = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B}{A-C} \end{cases}$$

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

위상차 조절의 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 조절

초음파 모터는 기계적 공진주파수와 입력 전원의 주파수 인 전력변환장치의 전기적 공진주파수가 일치했을 때 최대 토크가 발생한다. 기계적 공진주파수는 온도와 부하에 따라 변화하며, 온도가 높아지면 속도는 점점 줄어든다. 이는 기계적 공진주파수 즉, 최적의 공진점이 점점 낮은 쪽 주파수 대로 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.

전력변환장치의 전기적 공진주파수는 변화된 모터의 기계적 공진주파수를 찾아내어 추종해야지만 효율적인 구동과 안정된 운전점을 찾게 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.

$$L_{usm} = \frac{m}{F^2} \tag{2-11}$$

$$C_{usm} = \frac{F^2}{K} \tag{2-12}$$

여기서, m 은 고정자 세라믹-금속의 질량, F 는 force factor, K 는 고정자 세라믹-금속간의 스프링 상수이다. 이상의 기계적 상수들을 가지고 모터의 기계적 공진주파수 f_{usm} 을 나타내면 식 (2-13)과 같다.

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

초음파모터에 직접 인가되는 전원 전압의 주파수 f_s 는 식 (2-14)와 같다.

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{di}L_i}} + \Delta f \tag{2-14}$$

여기서, C_{di} 는 초음파 모터 압전 세라믹의 블록킹 커패시턴스, L_i 는 외부 인덕터, Δf 는 모터의 제어에 필요한 가변 주파수이다.

2.3 위상차에 따른 최적 주파수

위상차에 따른 최적 구동 주파수를 이론식으로 구하기는 어렵다. 따라서 수차례 실험을 실시한 후, 그 결과를 이용해 실험식을 구한 다음 위상차 변화에 따른 최적 주파수를 계산하여 입력하는 방식을 사용한다. 각각의 위상차에 따른 최적의 주파수를 구하기 위해 먼저 -90° 에서 0° , 0° 에서 90° 까지 15° 간격으로 위상차를 고정시킨 후, 각각의 위상차에 따른 주파수 속도 곡선을 측정하였다. 그 실험치 중에서 각각의 위상차 값에 따른 최대 속도 주파수를 구한 다음 이를 이용해 식 (2-15)와 같은 실험 곡선식을 구하였다.

$$f_{usm} = a + b\phi + c\phi^2 \tag{2-15}$$

$$\phi \geq 0 \text{ 인 경우, } \begin{cases} a = 40.48 \\ b = -0.01257 \\ c = 6.5558e-005 \end{cases}$$

$$\phi < 0 \text{ 인 경우, } \begin{cases} a = 40.28 \\ b = 0.00833 \\ c = 2.6418e-005 \end{cases}$$

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, $\phi \geq 0$ 인 경우에는 표준 편차(standard error)가 약 0.0313이고, 상관 계수(correlation coefficient)가 약 0.9934이었다. $\phi < 0$ 인 경우의 표준 편차는 약 0.0311이고, 상관계수는 약 0.9915이었다.

3. 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기

3.1 하드웨어

그림 3-1은 초음파 모터 디지털 다중 제어기의 전체 구성도이다. 설계 제작한 초음파 모터 다중 제어기는 실시간 처리와 제어기 부피 감소를 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 입력하게 된다.

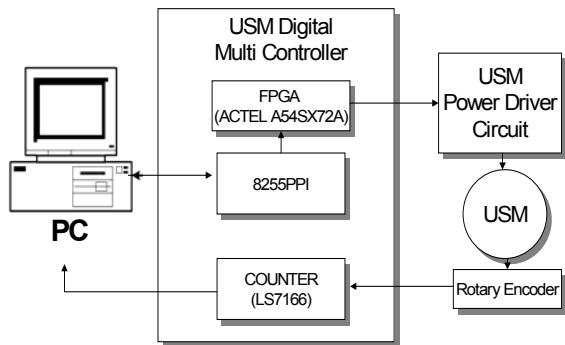


그림 3.1 초음파 모터 디지털 다중 제어기 구성도

Fig. 3.1 Block diagram of USM-DMC

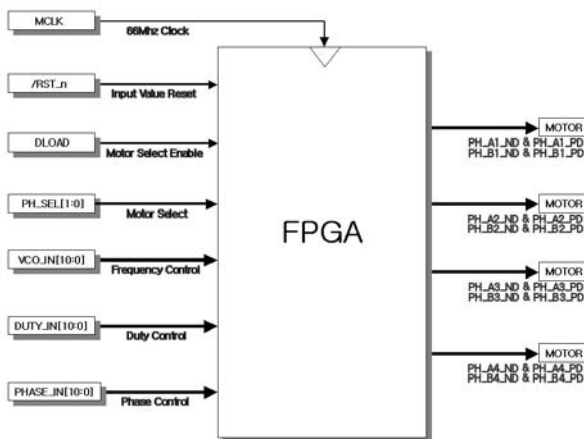


그림 3.2 설계한 FPGA의 입출력 신호 블럭도

Fig. 3.2 Input/Output signal block diagram of the FPGA designed

그림 3-2는 설계한 FPGA의 입출력 신호 블럭도이고, 여기서 MCLK는 기준 마스터 클록을 의미한다. MCLK의 선택에 따라서 다양한 주파수 출력이 가능하며 본 실험에서는

66Mhz를 사용하였다. VCO_IN 값이 똑같은 2047(0x7FF) 경우, MCLK가 81.96Mhz일 때는 40.039kHz이고, 66Mhz일 때는 32.242kHz가 된다. 초음파 모터는 제조 회사가 같더라도 그 크기에 따라 구동 주파수가 다양하다. 따라서 USM-DMC의 기준 마스터 클록을 적절하게 선택하게 되면, 별다른 회로 수정 없이 다양한 종류의 초음파 모터에 바로 이용할 수 있다.

VCO_IN은 VCO 조정용 카운터 분할 입력으로 11비트를 사용하며 기준 클록을 최대 2047까지 나눌 수 있으며, 기준 마스터 클록이 66Mhz일 때 분해능은 1비트당 최대 16Hz까지 조절이 가능하다. 예를 들어 기준 마스터 클록이 66Mhz일 때 VCO_IN값이 2047(0x7FF)이면 출력 주파수는 32.242kHz가 되고 2046(0x7FE)이면 32.258kHz가 된다. 또한 VCO_IN이 1(0x001)이면 66Mhz가 되고, 0(0x000)이면 0이 된다.

PHASE_IN은 A·B상의 위상차 제어 입력 값이며 11비트를 사용한다. 이론상으로 1비트당 최대 0.176°까지의 분해능을 지니지만 PHASE_IN은 VCO_IN 값에 따라 그 제어 범위가 달라진다. 예를 들어 초음파 모터 구동 주파수가 40kHz가 되기 위해서는 VCO_IN 값은 1650(0x672)이 되어야 한다. 이 때, PHASE_IN의 제어범위는 0~1650(0x672)이 되며 분해능은 360°을 1650으로 나눈 0.22°가 된다. 단, PHASE_IN은 1650(0x672)을 초과하지 않아야 한다. 즉, 입력이 0(0x000)이면 위상차 0°가 되고 최대 입력 1650(0x672)이면 위상차 360°가 된다. 1650(0x672)을 초과하면 오버플로가 발생해서 정확하지 않은 값이 출력된다.

DUTY_IN은 듀티비 조정용 분할 입력으로 역시 11bit로 설계하였다. VCO_IN값에 따라 그 크기가 결정되며, DUTY_IN 입력이 VCO_IN 값과 같으면 듀티비의 최대값 100%가 된다. 예를 들어보면 VCO_IN 값이 1650(0x672)이면 50%의 듀티비를 갖는 구형파를 출력하기 위해서는 DUTY_IN은 825(0x339)가 되어야 하고, 25%의 듀티비를 갖는 구형파를 출력하기 위해서는 412(0x19c)가 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 모터 당 A상 정(+)·부(-)의 신호, B상 정(+)·부(-)의 신호 총 4개의 신호선이 필요하다. 한 상의 정(+)과 부(-) 파형의 위상은 180°차이가 난다. VCO_IN과 DUTY_IN 입력에 따라 동시에 두 상의 주파수와 듀티비가 변한다. 그렇지만 PHASE_IN 입력에 따라 B상에만 위상쉬프트가 생겨 A상과 B상 사이에는 입력에 따른 위상차가 생기게 된다.

전압차를 발생시키기 위해서는 두 개의 채널을 이용해야 하며, 1번 모터 A상과 2번 모터 B상을 각각 초음파 모터의 A상과 B상에 각각 연결해서 사용이 가능하다. 이에 따라 A상의 듀티비는 1번 채널에서 B상의 듀티비는 2번 채널에서 각각 따로 듀티비 입력이 가능해져 A상과 B상의 전압차를 조절할 수 있다.

3.2 소프트웨어

초음파 모터 속도 측정 실험을 위한 프로그래밍 언어는 VISUAL C++을 사용하였고, 채널 1과 채널 2를 두어 두 개의 초음파 모터를 각각 따로 동시에 제어할 수 있게 구성하였다. 각 파라미터의 증감을 자동 및 수동 모드로 선택할 수 있도록 하였으며, 업/다운 선택 모드를 두어 일정한 크기로 증가 또는 감소할 수 있도록 설계하였다. 이때 증감 간격을 임의의 값으로 설정할 수 있도록 해서 버튼 클릭 시에 각 파라미터의 변화 간격을 조절할 수 있도록 설계하였다. 위상차, 주파수, 전압 파라미터 모두 0(0x000)에서 2047(0x7ff)까지 가변 시킬 수 있다. 대화 상자 오른쪽에 있는 시작과 끝은 자동 모드에서 사용하는 항으로 임의의 시작점과 끝점을 설정하게 되면 설정된 구간에서의 속도 변화 특성을 검출할 수 있게 설계하였다. 예를 들면, VCO_IN이 2047인 경우에 위상차 입력 PHASE_IN을 시작 0으로 하고 끝을 2047로 설정한 후, 자동 모드를 선택하면 -180°에서 0°을 거쳐 180°까지 설정한 간격만큼 변화 폭을 지니면서 변화한다. 하지만 -90°에서 90° 사이 구간의 특성을 실험하기 위해서는 VCO_IN이 2047일 경우, 시작을 512로 설정하고 끝을 1536으로 해야 된다.

그 밖에도 현재의 주파수, 듀티비, 위상차 크기를 표시해주는 별도의 항을 두어 파라미터 초기값 입력 시에 정확한 입력이 가능하고, 구동 시 현재의 파라미터 크기와 변화를 쉽게 파악할 수 있게 설계하였다.

채널 1의 하단부에 있는 타이머 On/Off는 속도 및 토크 특성 데이터를 파일로 저장하기 위해서 사용하는 체크 박스로서 샘플링 타임 설정 항과 함께 사용하며, 이 때 샘플링 타임에 대한 조절이 가능하여 데이터의 정밀도와 크기를 조절할 수 있다. 오른쪽 TimerOff 버튼은 타이머 동작을 Off시키는 버튼으로서 데이터 저장은 종료된다. 채널 2의 하단부에는 STOP_MOTOR라는 체크 박스를 만들어 강제적으로 모터를 정지시키기 위해서 사용하며 이 버튼을 체크하면 DUTY_IN값이 0이 되어 초음파 모터가 정지할 수 있도록 설계하였다. 제어 상자 하단부에는 로터리 엔코더 출력을 이용하여 속도 곡선 그래프를 나타내어 속도의 변화를 눈으로 관찰하면서 입력 변수를 수동 조작할 수 있게 설계하였다. 자동 모드에서 주파수를 증감할 때, 듀티비와 위상차 크기 값은 Duty증가 Duty감소, Pha증가, Pha감소 버튼을 사용하면 주파수 변동 중에도 듀티비와 위상차 크기를 조절할 수 있게 설계하였다.

4. 실험 및 고찰

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

실험 방법은 먼저 초음파 모터 디지털 다중 조절 하드웨어를 구축하고, Visual C++를 이용하여 프로그램을 설계한

다. 시스템 구축이 끝난 후 먼저 기존의 무부하시의 위상차와 주파수 조절에 따른 속도 특성을 측정한다. 그리고 위상차 조절에 의한 초음파 모터 구동 시 주파수를 변화시켜 위상차-주파수 다중 파라미터 조절을 행한다.

4.1 시스템 구성

초음파 모터 디지털 다중 파라미터 조절 시스템 구성은 다음과 같이 하였다.

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

4.2 위상차 조절 시의 속도 특성

그림 4-1은 위상차 조절에 의한 무부하시 속도 특성 곡선이다. 초음파 모터의 속도 변화는 앞 장에서 설계한 디지털 다중 제어기를 이용하여 PC의 프로그램 상에서 위상데이터를 입력받아 위상차 ϕ 를 -90°에서 0°를 거쳐 다시 +90° 미세한 간격으로 조절하면서 속도를 변화시켰다. 측정 시 주파수는 40.5157kHz였다. 초음파 모터의 정격 전류인 2A이하로 전류를 제한하기 위해 전원공급기의 전류 최대값을 2A로 설정했다.

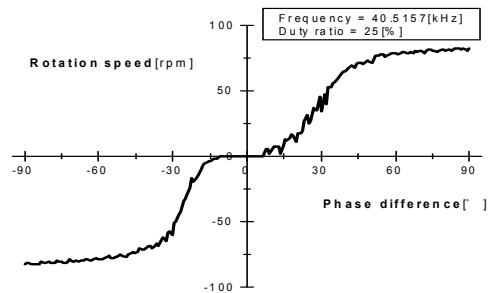


그림 4.1 위상차 - 속도 그래프

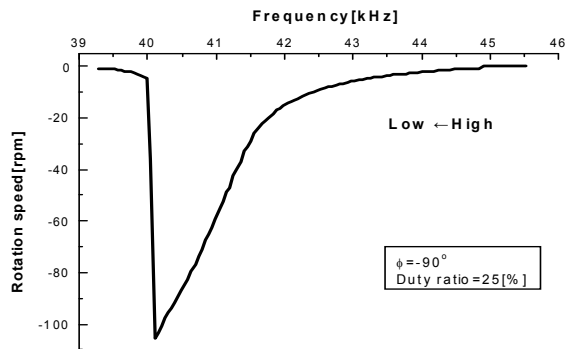
Fig. 4.1 Phase difference- velocity graph

초음파 모터는 위상차가 -90°에서 0°구간에서는 CCW방향으로 회전하고, 0°에서 +90°사이의 구간에서는 CW방향으로 회전하며 비교적 선형 특성을 보였다. 먼저 위상차가 -90°와 90°일 때 속도는 최대가 되고, 약 1.2A의 전류가 흘렀다. 차츰 위상차를 줄여 가면 속도는 거의 선형으로 줄어든다. 최대의 속도가 발생하는 주파수를 설정하면 위상차가 0°일 때 2A이상의 과전류가 흐르는 경향이 있다. -90°에서 90°까지 연속으로 조절했을 때 0°가 되면 전원 공급기가 전류 제한을 발생해 전원 공급이 차단되는 경우가 많았다. 그래서 주파수를 0°에서 최대한 안정하게 동작하는 값

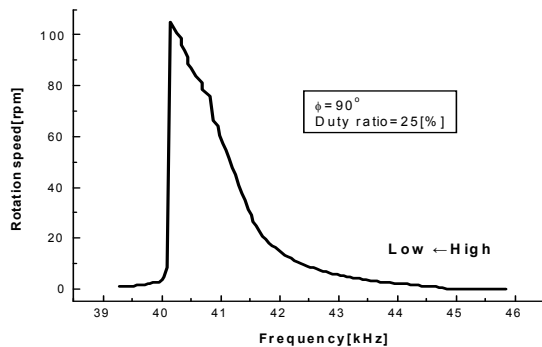
40.5157kHz를 입력한 후 측정하였다. 최대 속도는 약 75rpm 정도로 비교적 작았다. $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 범위에서 제어 불능 지역이 존재하였으며 $\pm 60^{\circ}$ 이상에서 포화상태가 되어 속도 변화가 거의 없었다.

4.3 주파수 조절 시의 속도 특성

초음파 모터의 주파수-속도 특성은 설계한 디지털 다중 제어기를 이용하여 프로그램으로부터 주파수 데이터 VCO_IN을 입력받아 주파수를 미세한 간격으로 조절하면서 속도 변화를 측정한다.



(a) $\phi = -90^{\circ}$

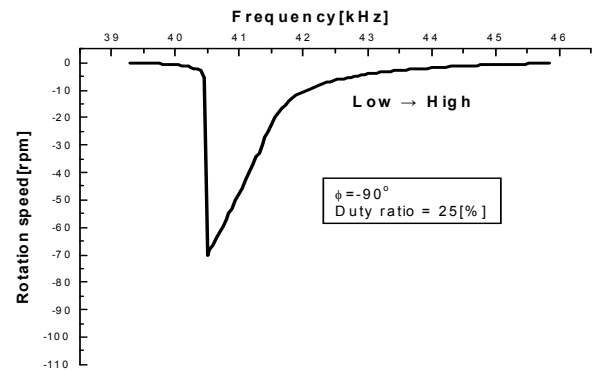


(b) $\phi = 90^{\circ}$

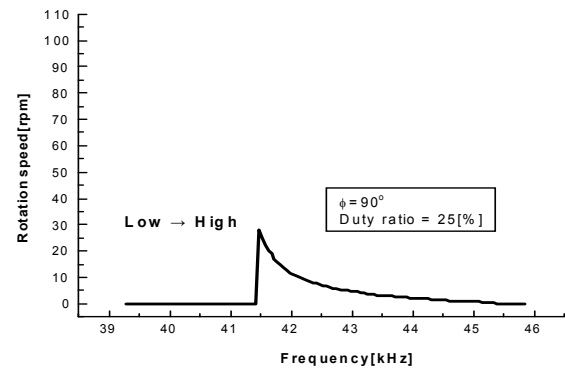
그림 4.2 주파수-속도 그래프(high→low)

Fig. 4.2 Frequency-velocity graph(high→low)

그림 4-2의 (a), (b)는 높은 주파수에서 낮은 주파수로 조절했을 때의 주파수-속도 그래프이며 각각 위상차가 -90° 와 90° 인 그래프이다. 그림 4-2의 (a), (b) 모두 45kHz와 44.5kHz 사이에서 구동을 시작하였으며, 42kHz까지는 20rpm이하로 천천히 회전하다가, 40kHz까지는 100rpm 이상까지 급격히 속도가 증가하였다가 기계적 고유 진동주파수가 넘어서면 최대 속도에서 급격히 속도가 떨어져 거의 0에 가까운 특성을 보였다.



(a) $\phi = -90^{\circ}$



(b) $\phi = 90^{\circ}$

그림 4.3 주파수-속도 그래프(low→high)

Fig. 4.3 Frequency-velocity graph(low→high).

그림 4-3의 (a), (b)는 낮은 주파수에서 높은 주파수로 조절했을 때의 주파수-속도 그래프로서 각각 -90° 와 90° 일 때 측정된 결과 그래프이다. 그림 4-3의 (a)는 위상차가 -90° 인 경우로서 40.50kHz에서 최대 속도 70rpm로 회전하기 시작했으며 점점 감속하다가 정지한다. 이와는 달리 그림 4-3의 (b)는 위상차가 90° 인 경우로서 41.4kHz에서 최대 속도 30rpm으로 회전하기 시작했으며 점점 감속하다가 정지한다.

4.4 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 시의 속도 특성

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

그림 4-4는 위상차-주파수 다중 파라미터 조절에 의한 무부하시 속도 특성 곡선이다. 초음파 모터의 다중 파라미터 조절은 PC 프로그램 상에서 위상차 데이터를 -90° 에서 0° 를 거쳐 90° 까지 연속적으로 미세하게 변화를 줌과 동시에, 식 (2-15)에 의해 계산되어진 최적 주파수를 입력하였

다. 이 때의 듀티비는 25%였고, 주파수 변화 폭은 위상차가 양수인 경우에는 약 40.5kHz에서 39.9kHz이었고, 위상차가 음수인 경우 40.3kHz에서 39.7kHz 이었다. 제어 불능 지역은 -8° 에서 11° 까지 존재하였고, 최대 속도는 약 $\pm 105\text{rpm}$ 으로 단일 주파수로 고정된 위상차 제어의 경우보다 30rpm 정도 상승하였다.

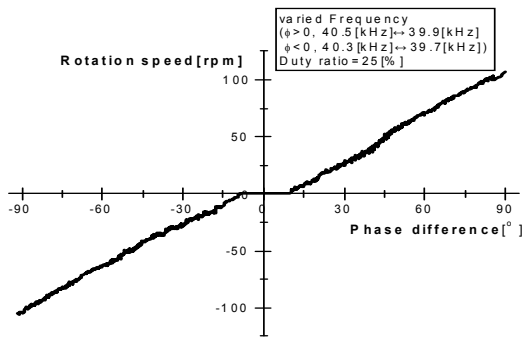


그림 4.4 위상차-주파수 다중 파라미터 입력에 따른 속도 곡선

Fig. 4.4 Velocity graph of the multi-Parameters adjustment with phase difference-frequency

4.5 고찰

그림 4-1에서 보는 바와 같이 위상차 조절에 의한 속도 특성은 위상차가 0° 인 부근에서 제어 불능 지역이 존재하였고, 2A 이상의 과전류가 발생하였으며, 위상차 $\pm 60^{\circ}$ 에서 포화 상태가 되기 시작해서 속도 변화가 거의 없었다. 위상차 10° 에서 30° 사이에서 초음파 모터의 회전이 고르지 않았다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 고정자 표면의 운동 궤적의 변화와 회전자 표면에서 일어나는 진행과 진폭의 맥동이 원인으로 사료된다.

그림 4-2 (a)의 주파수-속도 특성에서 40.03kHz에서 최대 속도를 보였으나, 이 보다 낮은 주파수인 39.8kHz 대역에서 모터의 속도가 급격히 떨어지는 불안정한 상태를 보였다. 따라서 최대 속도를 보이는 공진 주파수인 40.03kHz는 운전점으로는 적합치 않음을 알 수 있었다. 그러므로 이 최대 공진점을 피하고, 40.5kHz 근처에서 운전점을 정하는 것이 합리적이다. 그리고 그림 4-2와 그림 4-3의 특성에서 보인 바와 같이, 구동 주파수는 높은 주파수에서 낮은 주파수로 이동하며 조정하는 과정에서 최적의 구동 주파수를 찾아 주는 것이 제어 범위와 최대 속도를 고려했을 때 효율적이다. 이는 고정자 표면의 기울기 및 회전자와 고정자의 접촉부 마모율 등의 차이가 원인인 것으로 사료된다.

이상의 속도 실험에 의하여 나타난 위상차, 주파수 단일 파라미터 조절 방식과 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 방식과를 비교해보면 위상차-주파수 다중 파라미터 조절에 따른 속도 특성은 위상차 조절에서의 속도 특성과 유사하지만 최대 속도의 증가와 함께 포화영역이 현저하게 줄고 속

도 리플이 줄어서 선형화가 뚜렷해짐을 확인할 수 있었다. 위상차 조절에서는 속도가 0인 지점 즉, 위상차가 줄어들수록 과전류가 흐르는 문제점이 나타났으나, 위상차 0° 에 적당한 주파수 입력이 이루어져 1.6A 이하의 비교적 안정한 전류가 발생함을 알 수 있었고, 따라서 위상차 조절 시 위상차가 0° 부근의 과전류 문제를 해결할 수 있었다. 또한 위상차 조절 방식에서는 60° 근처에서 거의 포화상태를 일으켜 속도 변화가 거의 없었지만, 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 방식에 의한 속도 곡선은 포화 상태가 없고 또한 위상차 조절에 따른 속도 특성과는 달리 속도의 맥동이 거의 없이 회전이 고른 특성을 보였다.

그리고 위상차 조절 시에는 속도가 0~약 $\pm 75\text{rpm}$ 정도 되었지만 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 시에는 0~105rpm이 되어 속도 범위가 커졌다.

5. 결론

본 연구에서는 새롭게 제안하는 다중 파라미터 조절 방식 중 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 방식을 이용하여 초음파 모터의 무부하 속도 특성을 실험·고찰하였다. 이를 위하여 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기 (USM-DMC)를 설계 제작하고, 무부하시의 주파수와 위상차 단일 파라미터 조절에 따른 속도 특성과 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 시의 속도 특성을 비교하였다.

속도 실험에 의하여 나타난 위상차-주파수 다중 파라미터 조절 특성을 정리하면 최대 속도의 증가와 함께 포화영역이 현저하게 줄고, 속도 리플이 줄어들어 선형성이 뚜렷해졌다. 위상차 조절에서는 속도가 0인 지점에서 2A이상의 과전류가 흐르는 문제점이 나타났으나, 위상차 0° 에 적당한 주파수 입력이 이루어져 1.6A 이하가 되어 정격 전류 이하의 안정한 전류가 발생하였다. 이는 과전류로 인한 발열 특성을 개선할 수 있음을 의미한다. 포화 영역, 속도 리플과 제어 불능 지역을 좁힘으로서 제어 범위가 증가하였다.

이상의 결과로 초음파 모터에 입력되는 전원 전압의 A·B 두 상의 각 위상차 별로 최적의 주파수가 다르다는 것을 위상차-주파수 다중 파라미터 조절의 속도 응답 결과를 통해 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 각각의 위상차에 따른 최적 구동 주파수를 설정하게 되면, 초음파 모터가 보다 선형성, 제어 범위, 과전류 문제 등에서 보다 안정되고 효율적으로 동작함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [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] 김 영동, 오금곤, "초음파 모터의 위상차 제어" 조명·전기설비학회지, 66-74, 1996
- [6] T. senjyu, H. Miyazato, S. Yokoda, and K. Uezato, "Speed Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, no. 3, pp. 381-387, 1998.
- [7] Y. G. Kim and J. S. Kim "Fabrication of the Windmill thpe Ultrasonic Motor and Its Characteristics of Torque and Bidirectional Revolution" Proc. of the KIEE, Vol. 50C, No. 3, pp. 105-109, MAR, 2001
- [8] E. J. Lee and Y. S. Kim, "A Simplified Digital Frequency/Phase/Voltage Controller for the Traveling Wave Type Ultrasonic Motor Drive System" The Transactions of the KIPE vol.4, no.3, pp.285-293, 1999
- [9] 古家伸一, "屈曲進行波形 超音波モータの駆動特性と制御に關る研究", 工學博士學位論文, 神戸大學, 1996



김 성 철 (金 成 喆)

1971년 10월 19일생. 1993년 조선대학교 공대 제어계측공학과 졸업(학사). 1995년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2002 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학박)
Tel : 062-230-7766
Fax : 062-224-1987

E-mail : ksc1019@shinbiro.com



오 금 곤 (吳 金 坤)

1946년 1월 17일생. 1968년 조선대학교 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동신대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기전자공학부 졸업(공학박). 현재 조선대학교 전기공학과 교수
Tel : 062-230-7033
Fax : 062-230-7032

E-mail : gkoh@mail.chosun.ac.kr



김 영 동 (金 永 炯)

1944년 11월 28일생. 1968년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 명지대학교 대학원 졸업(석사). 1993년 일본 에지 공업대학교 객원 연구원. 현재 조선대학교 전자정보공과대학 정보제어계측공학과 교수
Tel : 062-230-7032

Fax : 062-230-7032

E-mail : ydkim@mail.chosun.ac.kr

저 자 소 개



김 동 옥 (金 桐 玉)

1971년 5월 1일생. 1994년 조선대학교 공대 제어계측공학과 졸업(학사). 1996년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 동 학과 졸업(공학박)
Tel : 062-230-7764
Fax : 062-230-7032
E-mail : dongok7@netian.com



강 원 찬 (姜 園 贊)

1970년 12월 23일생. 1993년 조선대학교 공대 제어계측공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정
Tel : 062-230-7764
Fax : 062-230-7032

E-mail : kwc89@shinbiro.com