

홀딩 토크가 강화된 초음파 모터의 파라미터 조절에 따른 무부하 속도 특성

김동옥*, 이화춘*, 송성근*, 박성준*, 유동욱**, 임영철*
 *전남대 전기공학과 **한국전기연구원

No Load Speed Characteristics by adjusting the parameters of USM which holds Strengthened Holding Torque

Dong-Ok Kim*, Hwa-Chun Lee*, Sung-Geun Song*, Sung-Jun Park*, Dong-Wook Yoo*, Young-Cheol Lim**
 *Dept. Electric Eng., Chonnam Univ. **KERI

Abstract - 초음파 모터는 고정자와 회전자를 가압마찰하기 위해서 내부에 원형 판 스프링을 이용하고 있다. 출력 토크를 높이기 위해서 이러한 내부 스프링의 강도를 크게 하면 홀딩 토크 역시 커지게 된다. 이로 인하여 기동 시 많은 전류가 소모되며 일반적인 구동 파라미터에 따른 속도 특성 등 기존의 스프링 강도를 지닌 초음파모터(모델명 : 신성공업사(일) USR60-s1)의 특성과는 전혀 다른 특성을 보인다. 본 논문에서는 스프링이 강화된 새로운 타입의 초음파모터(모델명 : 신성공업사(일) USR60-s3)를 가지고 무부하 시의 속도 특성을 실험하였다. 이를 위해 FPGA를 이용해서 디지털 다중 초음파 모터 제어기를 설계하였고, 2상 입력 전원의 주파수, 위상차, 주파수-위상차 다중 파라미터 등을 조절하면서 무부하 속도 특성을 측정하였다. 그 결과 홀딩토크가 강화된 초음파 모터의 경우 일반적인 기존 초음파 모터와 비교했을 때 전혀 다른 특성을 보이고, 위상차-주파수 다중 파라미터 조절방식이 조절방식임을 보인다.

1. 서 론

산업 현장에서 초음파를 이용한 각종 장치의 소형화 및 경량화에 대한 다양한 시도가 보고되고 있으며, 특히 MEMS나 나노기술에 대한 발전은 초정밀 초소형 초음파 장치의 현실화를 가능하게 했다. 이러한 초음파 응용분야 중 각종 로봇, 가상현실 분야의 역감 장치, 소형 디지털 기기, 시계, 카메라 등 소형 정밀기기의 액츄에이터로서 초정밀 소형화 추세에 요구에 부응하는 초음파모터가 있다.

초음파모터는 종래의 전자식 모터와는 달리 압전소자에 의한 초음파영역의 탄성진동을 마찰을 이용하여 이동체의 기계적 운동으로 변환하는 모터로서 철심과 코일이 없는 단순 구조를 갖는 소형 모터로서 하중 용량이 작고, 낮은 속도에서도 고 토크의 특성을 지니고 있으며, 저속용으로 감속기어 없이 직접구동(direct drive) 방식이 가능한 모터이다[1].

초음파 모터는 제어입력에 대한 응답성이 양호하고, 전원을 차단했을 경우 정지토크가 매우 크다. 초음파 모터는 자석과 코일을 이용한 기존 전자식 모터에 비해 최소 10배 이상의 힘을 낼 수 있고 같은 힘을 내는 기존 모터보다 10분의 1로 소형화 할 수 있어 극소형 액츄에이터로서 그 응용이 기대된다. 또한 운전 시 소음이 거의 없고, 중공 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 제어방법에는 2상 입력 전압의 진폭 조절, 주파수 조절, 위상차 조절과 2상 인버터의 DC 링크 전압의 듀티비 조절 등이 주로 제안되어 왔고, 그 밖에도 다양한 연구가 발표되고 있다[3-4].

초음파 모터는 고정자와 회전자를 가압마찰하기 위해서 내부에 원형 판 스프링을 이용하고 있다. 출력 토크를 높이기 위해서 이러한 내부 스프링의 강도를 크게 하면 홀딩 토크 역시 커지게 된다. 이로 인하여 기동 시 많은 전류가 소모되며 일반적인 구동 파라미터에 따른 속도 특성 등 기존의 스프링 강도를 지닌 초음파모터(모델명 : USR60-s1)와는 전혀 다른 특성을 보인다.

본 논문에서는 스프링이 강화된 새로운 타입의 초음파모터(모델명 : USR60-s3)를 가지고 무부하 시의 속도 특성을 실험하였다. 이를 위해 초음파 모터 파라미터에 대한 속도 특성을 이론적 근거 제시와 함께 FPGA 및 USB 통신방식을 이용해 초음파 모터 제어용 디지털 다중 제어기(USM-DMC)를 설계 제작하였고, 초음파 모터 속도 특성을 측정하기 위한 프로그램 설계는 비주얼 C++를 사용하였다.

속도 특성 실험은 2상 입력 전원의 주파수, 위상차, 위상차-최적주파수 등을 조절하면서 측정하였다. 일반적인 기존 초음파 모터의 특성과 비교했을 때 전혀 다른 특성을 지녔음을 보이고, 위상차-주파수 멀티파라미터 조절방식이 새로운 조절방식으로서의 가능성을 평가한다.

2. 초음파 모터의 제어시스템

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[3].

2.1 위상차 조절

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 발생하는 기계적 진동파인 정재파는 각각 식 (2-1)과 식 (2-2)로 쓸 수 있다.

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

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

$$= \zeta_B \cos(nx) \sin(\omega_0 t + \phi)$$

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

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

와 같은 형태가 되며 위상차 ϕ 가 0°일 때는 정재파, 90°일때는 진행파가 되며 그 사이는 굴곡진행파가 된다. 진행파 발생 시 고정자 표면의 한 질점은 타원운동을 하게 된다. 위상차 조절의 원리는 식 (2-3)의 진행파 방정식의 2상 입력 전압의 위상차 파라미터 ϕ 를 가변시켜 타원의 장축, 단축, 그리고 회전 방향과 타원의 기울기를 바꾸어 초음파 모터의 속도와 토크를 제어하는 것이다.

2.2 주파수 조절

기계적 상수들을 가지고 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. L_{usm} 은 고정자 질량 효과에 의한 등가 인덕터, C_{usm} 은 고정자 스프링 효과에 의한 커패시터이다.

초음파모터에 직접 인가되는 전원의 주파수 f_s 는 식 (2-5)과 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 블로킹 커패시턴스, L_i 는 외부 인덕터, Δf 는 모터의 제어에 필요한 가변 주파수이다.

3. 초음파 모터의 파라미터 조절에 의한 무부하 속도 실험

3.1 디지털 다중 제어 시스템

앞장의 이론적 고찰에 근거해서 초음파 모터 제어기를 설계·제작하였다. 그림 1은 초음파 모터 디지털 제어 시스템의 전체 구성도이다. 설계 제작한 초음파 모터 다중 제어기는 실시간 처리와 제어기 부피 감소를 위하여 FPGA를 사용하였고, 최대 8대의 초음파 모터를 제어할 수 있게 설계하였으며, 컴퓨터와 통신은 USB 인터페이스방식을 사용하였다. FPGA는 컴퓨터에서 디지털 제어 신호를 입력받아 스위칭 신호인 구형파를 발생하고, 이를 이용해서 2단 트랜지스터 스위칭 증폭회로와 펄스 트랜스로 구성된 초음파 모터 전압 변환 회로를 거쳐 초음파 모터 입력 전원을 발생시킨다. 회전 속도 및 위치 검출을 위해서 로터리 엔코더를 사용하였고, FPGA 내부에 로터리 엔코더 카운터회로를 내장해서 제어기 성능 증가 및 부피를 감소시켰다.

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.

표 1에 본 실험에서 사용한 홀딩토크가 강화된 새로운 타입의 초음파 모터 USR60-s3와 일반적인 기존의 초음파 모터 USR60-s1의 스펙을 비교하였다.

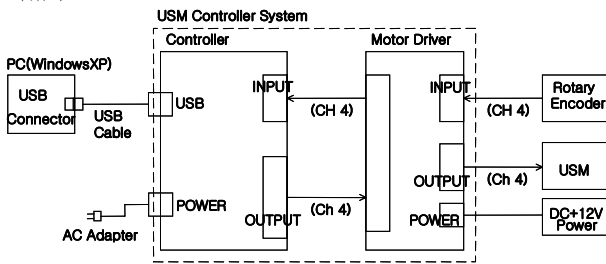


Fig. 1 Composition of USM-DMC

〈표 1〉 Specification of TUSM

| 항목 | 형태 | USR60-s1 | USR60-s3 |
|--------|----|--------------------|------------------|
| 구동주파수 | | 40kHz | 40kHz |
| 구동전압 | | 100Vrms | 130Vrms |
| 정격토크 | | 0.32N·m(3.2Kgf·cm) | 0.5N·m(5Kgf·cm) |
| 정격출력 | | 3.0W | 5.0W |
| 정격속도 | | 90rpm | 100rpm |
| 최대토크 | | 0.64N·m(6.4Kgf·cm) | 1.0N·m(10Kgf·cm) |
| 홀딩토크 | | 0.64N·m(6.4Kgf·cm) | 1.0N·m(10Kgf·cm) |
| 응답특성 | | Under 1 msec | Under 1 msec |
| 구동온도범위 | | -10℃ ~ +50℃ | -10℃ ~ +55℃ |
| 중량 | | 240g | 260g |

3.2 무부하 속도 실험

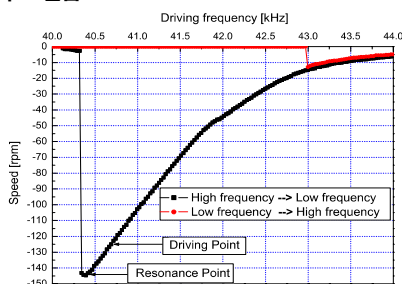


Fig. 2 The speed characteristic of frequency adjusting

그림 2는 주파수에 따른 초음파모터의 속도 특성이다. 기존의 일반적인 초음파 모터와 그 특성이 비슷하였다. 사각형의 곡선은 높은 주파수에서 낮은 주파수로 조절할 경우의 특성이고, 원형의 곡선은 낮은 주파수에서 높은 주파수로 조절할 때의 특성 그래프이다.

그림 3은 4개의 40.6154, 41.3275, 41.5094, and 41.8782 kHz로 주파수를 고정된 후 각 주파수 하에서의 위상차에 따른 속도특성을 보이고 있다. 4개의 주파수는 각각 -90°, -45°, 30° 그리고 12°일 때 적합한 구동주파수이다. 구동주파수가 낮을 경우는 최대속도는 정격속도를 유지하였으나

데드밴드가 넓게 나오고, 기동 전류도 더 커지는 경향이 있었다. 구동 주파수가 높은 경우는 최대 속도가 45 rpm으로 이하로 매우 낮았으며, 위상차에 따른 속도 변화가 거의 없었으나 데드밴드는 줄어들고 안정된 전류가 흐르는 경향이 있었다.

이처럼 위상차 조절 방식에서는 설정된 구동 주파수에 따라 특성이 전혀 다르게 나타나므로 구동주파수를 어떤 값으로 설정할 것인가가 최대의 관건이 된다. 각 위상차에 따른 최적의 주파수를 찾기 위해서 10도 간격으로 위상차를 고정 시킨 후 최적의 구동주파수를 구했다. 구해진 위상차-최적 구동주파수와의 관계식을 곡선의 적합법(Fitting)을 이용해서 구했으며, 상관계수가 0.98 이상으로 매우 높게 나타났다.

그림 4는 위상차-최적 구동주파수 관계식을 이용해서 위상차와 주파수를 동시에 조절했을 때의 초음파 모터의 무부하 속도 특성이다. 그래프에 나타나 있는 바와 같이 선형성이 매우 높게 나타났으며, 주파수가 낮은 경우에 발생하는 넓은 데드밴드 문제와 주파수가 높은 경우에 발생하는 최대 속도의 저하 문제가 해결되었다. 그 밖에도 위상차 0°에서 발생하는 과전류 문제와 소음 문제가 해결되었다.

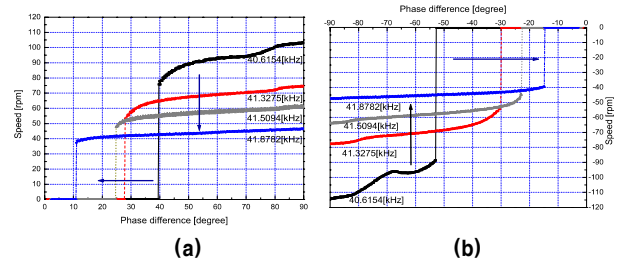


Fig. 3 Speed response by adjusting the phase difference under a fixed driving frequency (a) phase difference 0° ~ 90° (b) phase difference 0° ~ -90°

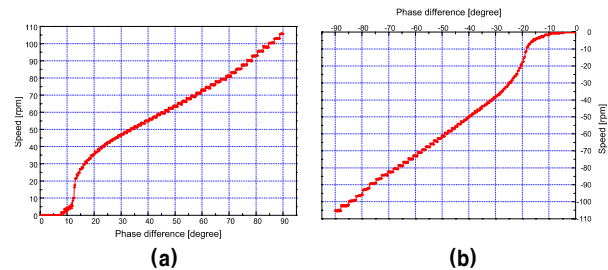


Fig. 4 The speed response according to suitable driving frequency by a rational function (USR60-s3) (a) phase difference 0° ~ 90° (b) phase difference 0° ~ -90°

4. 결 론

본 연구에서는 초음파 모터 구동용 디지털 다중 제어기(USM-DMC)를 설계 제작하고, 무부하시의 위상차 단일 파라미터 조절에 따른 속도 특성과 위상차-최적 주파수 조절 시의 속도 특성을 비교하였다.

위상차-최적 주파수에서는 파라미터 조절에 따른 선형성의 증가와 함께 최대 속도의 저하, 데드 밴드, 포화영역 등의 문제를 해결할 수 있어 제어 범위의 증가도 가져왔다. 또한 위상차 조절 방식에서 발생하는 위상차가 0° 인 지점에서 4A이상의 과전류가 흐르는 문제점은 위상차 0°에 적합한 주파수 입력이 이루어져 1.6A 이하가 되는 안정한 전류가 발생하였다. 이는 과전류로 인한 발열 특성을 개선할 수 있음을 의미한다.

따라서 본 논문에서 제안한 각각의 위상차에 따른 최적 구동 주파수를 설정하게 되면, 초음파 모터의 속도 선형성 향상, 제어 범위 증가, 과전류 저하 등 위상차 조절 방식보다 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. 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.