

리니어 초음파 모터를 이용한 X-Y stage의 마이크로 미터급 위치 구동회로 설계

김정도^{1*} · 홍철호¹ · 김동진¹ · 함유경¹

Design of Micro-meter Position Driver for X-Y Stage Using Linear Ultrasonic Motor

Jeong-Do Kim^{1*}, Chul-ho Hong¹, Dong-Jin Kim¹ and Yu-Kyung Ham¹

요 약 초음파 모터는 전자기식 모터들과는 달리 다양한 특성과 뛰어난 성능을 가진 새로운 형태의 모터이다. 그러나, 초음파 모터는 특히 구동시간에 따라 시스템의 비선형적인 특성과 파라미터의 변화들에 대한 문제를 갖는다. 그러므로 기존의 PID제어기를 사용함으로써 만족스러운 제어기의 성능을 내기가 어렵다. 본 논문에서는 원환형 초음파 모터와 선형 초음파 모터의 정밀 제어를 하기 위해 구동시간에 따른 응답 시간과 변화 등의 특성을 각각 분석하고, 리니어 초음파 모터에 대해서는 μm 정도의 오차를 갖는 스텝 제어기와 PD제어기를 결합한 제어기를 제안한다. 제안된 제어기의 성능은 제어를 하지 않고 구동 시에 측정된 슬립 오차와 제안된 제어기를 사용하여 구동 시 측정된 슬립 오차를 비교하여 평가하였다. 실험 결과 스텝 제어기를 사용한 리니어 초음파 모터의 슬립오차는 $10\mu\text{m}$ 이하로 우수한 성능을 입증하였다.

Abstract The ultrasonic piezo motor is a new type motor that has an excellent performance and many useful features that electromagnetic motors do not have. But, it suffers from severe system non-linearities and parameter variations especially during speed control. Therefore, it is difficult to accomplish satisfactory control performance by using the conventional PID controller. In this paper, to achieve the precise control for linear type ultrasonic motor was analyzed as a function of response time and change with a driving time. Also, we propose controller that combines STEP controller and PD controller that have error of μm about liner type ultrasonic motor.

Key Words : ultrasonic piezo motor, STEP controller, PD controller

1. 서 론

초음파 모터는 기존의 전자기식 모터와는 달리 철심과 코일이 없는 새로운 형태의 모터이다. 초음파 모터는 1973년 H. V. Barth에 의해 처음으로 제안된 이후, 구소련에서 활발한 연구가 시작되어서 일본을 중심으로 본격적으로 연구, 개발이 시작 되었다[1].

1980년 T. Sashida는 처음으로 실용화에 가까운 진동편형 초음파 모터를 제안 하였으며, 1982년에 접촉면에서의 마찰 문제를 해결한 진행파형 초음파 모터를 제시 하였다[2-3]. 그 후로 많은 연구가들에 의해 연구, 개발, 해석이 급속하게 진전되어 왔다. 초음파 모터는 전자기식 모터와는 달리 구조 및 특성에 있어 완전히 다르며,

소음이 없고, 전자파 및 자계에 대한 영향이 없으며, 고속 및 저속 토크 특성을 가지고 있어 감속기어를 사용하지 않고 직접 구동 방식이 가능하며 백래쉬가 없다. 또한, 큰 홀딩토크를 가지고 있어 정지 브레이크로 사용 가능하다[4]. 가장 중요한 특징으로는 응답속도가 매우 빠르며 정밀제어가 가능하다. 그러나 전자기식 모터에 비해 오랜 시간동안 지속적으로 구동하면 특성에 변화를 줄 수 있으며, 구동 방식 또한 복잡한 단점을 가지고 있다.

원환형의 초음파 모터를 구동하기 위해서는 수십 kHz에서 동작하는 100Vp-p 이상의 진폭을 가지는 두개의 사인파 입력이 사용되어야 하는데, 두 입력의 위상이 90도일 때 가장 큰 토크를 발생시킨다. 본 연구에서는 주파수 구동 방식을 사용한다. 초음파 모터의 속도를 제어하기 위해서 디지털 신호에 비례한 선형적이며 안정된 주파수를 얻어야 하는 것이 중요하다. 그러나 초음파 모터는 구동 시간에 따라 동작 특성이 변화하고,

이 논문은 2004년도 호서대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

¹호서대학교 전기정보통신공학부

*교신저자: 김정도(jdkim@office.hoseo.ac.kr)

모터의 온도가 상승함에 따라 마찰제의 특성이 변화하여 모터의 전달 특성이 변화하는 문제를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구자들이 기존의 PID 제어 방법을 벗어나 적응제어 방법, 퍼지 제어 방법 및 신경망 제어 방법 등 다양한 제어 방법을 제시하고 있다. 하지만, 대다수의 경우 초음파 모터에 대한 충분한 성능분석이 이루어지지 않은 상태에서 모터의 속도 및 위치 제어가 이루어지기 때문에 실제 상용화된 제어를 만드는데 어려움이 존재한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 성능분석을 한 후, 초음파 모터에 맞는 제어를 설계하고 설계된 제어를 제안한다. 특히, 리니어 초음파 모터의 경우 초 저속에서 초기 기동 시간이 매우 느리며, 속도 특성이 여러 단계로 구분되어 지기 때문에 적응제어를 사용하기 어렵다. 따라서 μm 급 스텝 위치 제어를 제안하여 μm 의 오차 범위를 갖는 위치 제어를 설계하고자 한다.

본 연구에서는 원환형 초음파 모터(PUMR40)와 리니어 초음파 모터(XY-STAGE)를 이용하여, 초음파 모터의 성능분석이 가능한 테스트용 회로를 설계하였으며, 리니어 초음파 모터를 위해 μm 급 스텝 위치 제어를 설계하여 μm 급 제어기의 성능을 분석하였다.

2. 초음파 모터의 구동원리와 성능분석

2.1. 초음파 모터의 구동원리

초음파 모터의 구동 방법과 운동 형태, 그리고 구동자의 형상에 관계없이, 모든 초음파 모터에 적용되는 기본적인 작동원리는 초음파 범위의 고주파수에 해당하는 반복적인 운동을 통하여 구동자에 발생하는 미소 변형을 일정한 방향의 기계적인 운동으로 확대·전환시켜 준다는 것이다. 초음파 모터는 외형상 압전체와 탄성체로 구성된 고정자와 이동자 구성되어 있으며, 압전체에 교류 전압을 인가하면 기계적 진동이 여진된다. 세라믹 압전체에서 발생한 진동이 고정자에 전달되면

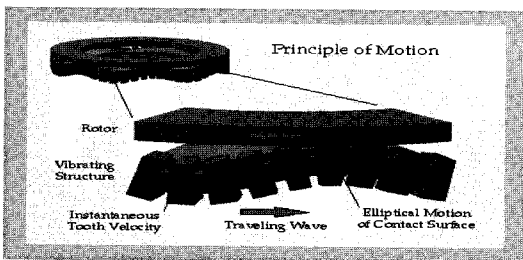


그림 1. 진행파형 초음파 모터의 동작 원리

고정자 표면의 질점들이 타원궤적을 그리며 운동하고 고정자에 접촉하는 이동자는 타원운동에 의한 마찰력으로 회전한다[5]. 그림 1은 초음파 모터의 동작원리를 보여주고 있다.

2.2 초음파 모터의 성능분석

2.2.1 원환형 초음파 모터

성능분석을 위해 (주)피에조 테크놀로지에서 생산된 원환형 모터인 PUMR40을 사용 하였다. 이 모터의 사양은 홀딩토크(2 kg.cm), 최대 토크(2 kg.cm), 구동주파수(35~45 kHz) 최대 속도 120 rpm이며 저속에서 토크가 크며, 기동, 정지 등의 제어 특성이 좋으며. 또한 토크가 크므로 기어 등에 의한 토크 확대 장치가 필요 없으며 정밀한 위치 제어가 가능하다.

그림 2는 구동주파수에 대한 회전 속도에 대한 변화 그래프이며, 초음파 모터는 구동 주파수의 변화에 따라서, 그 속도가 크게 변하게 된다. 그림 3과 그림 4는 주파수를 일정하게 하고, 무 부하 시 연속 구동을 시킬 경우, 시간에 따라서 속도가 감소하는 특성을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 초음파 진동에 의해서 스테이터의 온도가 상승하여 초음파 모터의 기계적인 공진 주파수가 낮아져서 스테이터의 진폭이 작게 되므로 초음파 모터의 회전 속도가 떨어지게 되는 것이다. 원래 초음파 모터는 연속구동을 하는 모터는 아니며, 연속구동을 할 경우 스테이터의 온도가 상승하고 압전체의 마찰력 때문에 세라믹의 특성이 변하게 되어 동작 주파수대가 변하는 특성을 갖게 된다.

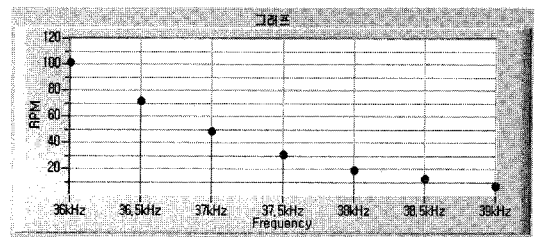


그림 2. 구동주파수와 회전 속도와의 관계

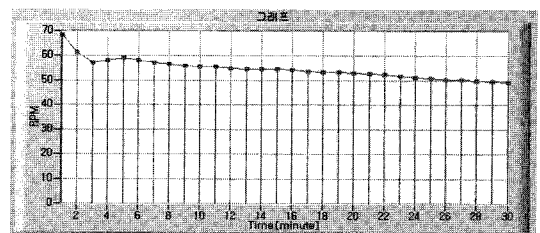


그림 3. 36.5 kHz에서의 시간에 따른 속도 변화율

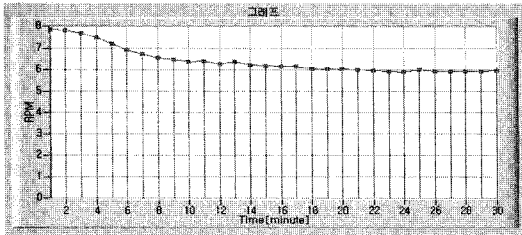


그림 4. 39 kHz에서의 시간에 따른 속도 변화율

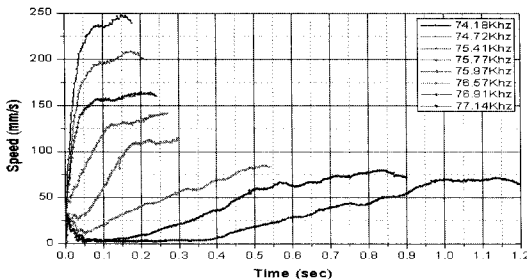


그림 5. 리니어 초음파 모터의 속도 특성

2.2.2 리니어 초음파 모터

실험에 사용된 리니어 초음파 모터의 토크는 최대 10N에서 평균 8N정도이며, 이동 거리는 45 mm이며 선형 스케일 분해능은 0.1 μm , 동작가능 주파수 범위는 74.18 kHz~77.14 kHz의 특성을 가지는 모터이다. 그림 5는 선형 초음파 모터의 구동 주파수를 변화 시켰을 경우 선형 초음파 모터의 속도 변화특성을 보여준다.

그림 6은 제어를 하지 않은 상태에서 30 mm를 이동시킨 후, 정지시켰을 때 발생하는 Slip현상에 대한 특성을 나타낸다. 구동주파수가 높을수록(고속) Slip현상이 증가하며, 반대로 구동주파수가 낮을수록(저속) Slip현상이 급격하게 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 낮은 구동주파수에서 리니어 초음파 모터를 구동 하게 되면, 초기 기동시간이 느린 것을 확인 할 수 있다. 실제 제어기 설계 시에는 이러한 부분에 대해서 충분히 검토가 이루어진 후에 제어기를 설계하여야 한다.

리니어 초음파 모터가 가지고 있는 Slip 오차는 그림

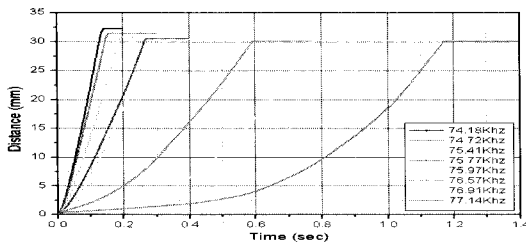


그림 6. 리니어 초음파 모터의 슬립 특성

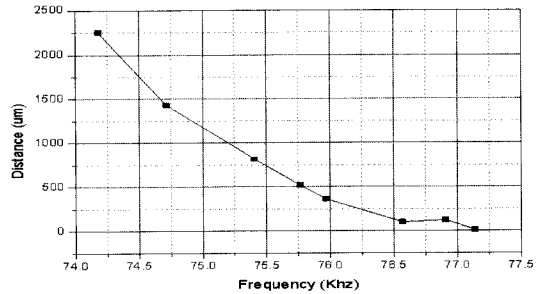


그림 7. 리니어 모터의 슬립 오차 특성

7에 나타내었다. 리니어 초음파 모터를 나노미터 정도의 높은 위치 정밀도를 갖는 제어기를 설계하기 위해서는 위에서 언급된 문제들을 해결 할 수 있는 방법이 포함된 제어기가 설계 되어야 한다.

3. 리니어 초음파 모터를 위한 제어기 설계

3.1 시스템 구성

본 논문에서는 초음파 모터의 성능분석 및 리니어 초음파 모터의 위치 제어를 위한 스텝 제어기를 제안하였다. 그림 8은 초음파 모터를 제어하기 위한 전체 시스템에 대한 제어시스템의 구성을 나타내었다. 초음파 모터 제어를 위한 주 제어기로 Intel Pentium 4 CPU 2.53 GHz를 사용하였고, Pentium 4 CPU는 초음파 모터 구동을 위해 알고리즘을 처리하는 역할을 담당한다. 초음파 모터 구동 드라이버와의 인터페이스는 PLX9054 PCI 카드를 사용하여 구성하였다.

구동부는 속도를 제어하는 주파수를 신호를 담당하게 된다. 이를 위해 PCI 카드와 구동부 사이에 마이컴을 두어 SPI 인터페이스를 통해 속도에 대한 신호를 보내게 된다. 초음파 모터의 위치 검출을 위해 엔코더에서 나오는 신호를 4배해 하여 Counter를 통해 처리 하였으며 일정 샘플링 주기를 만들기 위해 PC의 부정확한 타이머를 이용하지 않는 대신 외부 클럭을 이용하여 정확한 샘플링 주기를 만들어 사용 하였다.

그림 9에서와 같이 1차 측에 구동부에 해당되는 디지털 신호를 넣어주면 2차 측에서는 전압이 증폭신호를 얻을 수 있게 되며, 이런 방식으로 펄스 트랜스 2개를 사용하게 되면 구동 출력파형을 얻게 된다. 이러한 방식으로 위상을 90도 고정시킨 후에 공진 주파수를 변조시키면서 초음파 모터를 구동시키게 된다.

3.2 선형 초음파 모터를 위한 μm 급 스텝 위치제어기

초음파 모터의 성능분석을 통하여 구동 주파수에 대

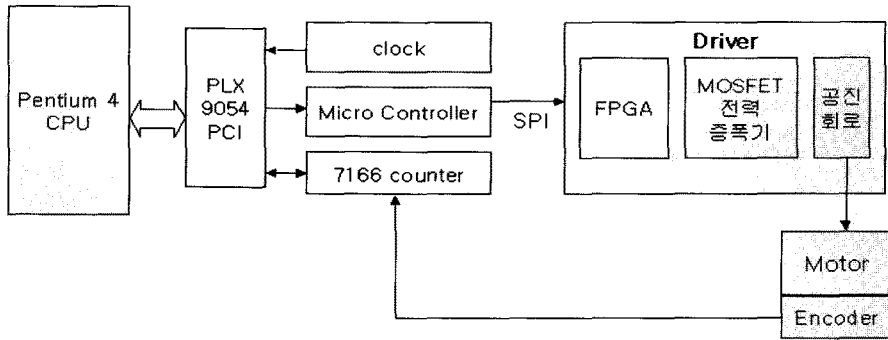


그림 8. 초음파 모터 제어시스템의 구성

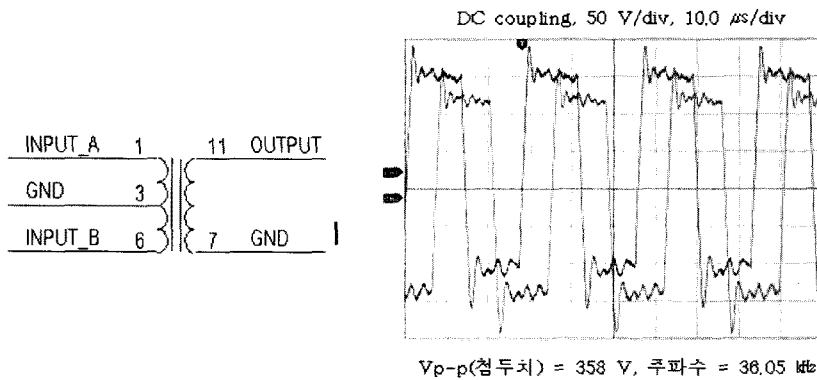


그림 9. 초음파 모터의 구동 출력 파형

한 속도 응답 특성이 3단계로 구분되어 지며, 높은 주파수에서는 기동 시간이 너무 늦다는 것을 성능분석을 통해 파악하였으며, 일반적으로 초음파 모터를 대상으로 마이크로 미터의 오차범위를 갖는 정밀제어를 하기 위해서는 PID제어기만 사용해서는 이를 구현하기가 힘들다. PID 제어기를 사용할 경우 구동 주파수에 따른 특성변화로 인해서 정상적으로 성능을 내기가 힘들기 때문이다. 또한 신경망에 대한 제어를 검토해 보았으나 낮은 속도에서의 초기 기동시간이 너무 느려 신경망 제어를 적용하기가 힘들다. 따라서 본 논문에서는 리니어 초음파 모터를 이용해서 마이크로 미터 오차 범위를 갖는 위치 제어를 설계하여 제안한다.

본 논문에서 설계된 선형 초음파 모터의 위치 제어기는 두개의 제어기로, PD 제어기와 Step 제어기로 구성되며 그림 10에 구성도를 나타내었다. 설계된 제어기의 동작은 스테이지의 최종 목표 위치에 도달할 때 오차를 최소화시키기 위해서 목표 위치의 부근까지 PD 제어기를 사용하여 제어를 한다. 그리고 목표 위치의 근접한 부근에 도달하였을 때 Step 제어기를 사용하여 최종 목표 지점까지 이동하여 정밀한 위치 제어를 하고자 한다.

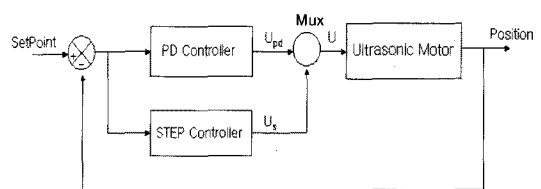


그림 10. 마이크로 미터급 스텝 위치 제어기의 구성도

즉 목표하는 위치의 근접할 때 까지는 PD 제어기를 사용하고, 목표 위치의 근접하는 부분에서부터는 Step 제어기를 사용하는 두개의 제어기의 혼용 방법이다.

제안한 제어기의 동작과정은 다음과 같다.

$$U = \begin{cases} U_{pd}[n], d < \text{offset} \\ U_s[n], d \geq \text{offset} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 d 는 현재의 위치이고 offset 은 최종목표 근접 설정치(보정구간)이다.

우선 PD 제어기에 대한 출력 U_{pd} 는 다음과 같이 정의 된다.

$$U_{pd}[n] = K_p \cdot e[n] + K_d(e[n] - e[n-1]) \quad (2)$$

여기서, K_p 는 비례계수이며, K_d 는 미분 계수를 의미한다.

보정구간에서 진입 여부는 아래와 같이 표현된다.

$$J_{pd}[n] = \begin{cases} \text{activation, } U_{pd}[n] \geq \text{SetPoint} - \text{offset} \\ \in \text{activation, } U_{pd}[n] < \text{SetPoint} - \text{offset} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 SetPoint는 최종 목표 값이 되며, offset은 보정구간에 대한 설정 값이 된다. 위와 같이 PD제어기가 보정구간에 진입하여 비활성화 상태가 되어 스텝 제어기로 전환이 이루어지며 스텝 제어기의 동작은 다음과 같이 표현되어 진다.

$$U_s[k] = \begin{cases} U_{pd}[n], & k = \text{Even number} \\ 0, & k = \text{Even number} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, k 는 카운터에 해당되는 값이며, 반복적인 스텝 보정을 함으로써 동작을 하게 된다. 제안한 제어기를 설계하여 구현한 결과 10 μm 이하의 오차 범위를 갖는 위치 제어기를 구현 할 수 있었다.

4. 실험결과

본 논문에서는 제안된 리니어 초음파 모터의 위치 제어기의 최종 목표 위치를 30 mm로 하고 보정구간은 2.5 mm로 설정하였다. 즉, 목표 위치에서 2.5 mm전까지는 PD 제어기를 사용하여 제어를 하고, 그 이상 위치에 도달했을 때 스텝 제어기를 사용하여 목표 위치에 정지 시킨다. 그리고 제안된 제어기의 성능을 확인하기 위해서 2장에서 실험했던 무 제어시 측정된 리니어 초음파 모터의 Slip 특성 및 오차와 비교하여 제어기의 성능을 평가하였다.

리니어 초음파 모터는 저속구간에서의 초기 기동 시

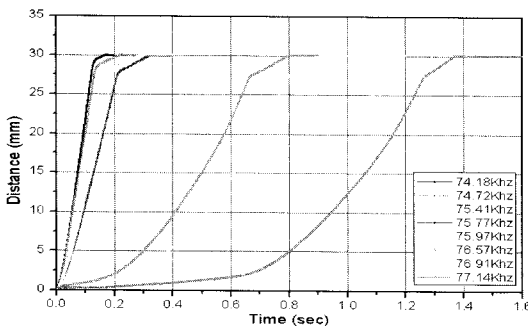


그림 11. 제안된 제어기 사용 위치 응답

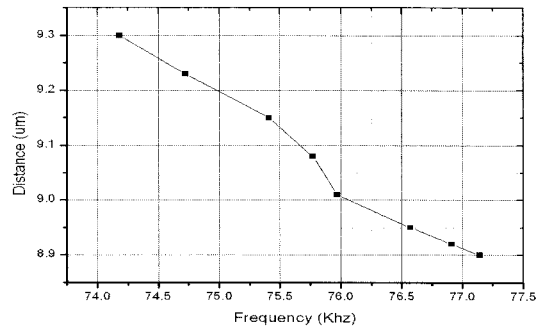


그림 12. 제안된 제어기를 사용 슬립 오차

간이 너무 느려 일반 제어기의 적용이 사실 힘들다. 그림 11은 제안한 스텝위치 제어기를 사용하여 구동 주파수에 따라 목표 위치에 접근하는 것을 보여주고 있다. 그림 11을 보면 27.5 mm를 기준으로 다른 기틀기를 가진다. 이 구간이 스텝제어기를 사용한 구간이다. 그림 12는 제안된 제어기를 사용하여 얻은 위치 응답의 슬립 오차를 나타낸다. 구동 주파수 74.18 kHz일 경우에 발생한 Slip오차는 9.3 μm 이며, 77.14 kHz의 구동 주파수를 인가해 주었을 때 Slip오차는 8.9 μm 발생하였다.

실험 결과를 통해 각각의 구동 주파수별 위치 응답에 대한 Slip 오차는 10 μm 이내로 스텝 제어기의 성능이 우수함을 입증하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 초음파 모터의 성능분석을 통해 초음파 모터를 정밀하게 제어 할 수 있는 마이크로 스텝 위치 제어기를 설계하여 실험 결과를 통해서 해당 제어기의 성능을 확인하였다. 초음파 모터의 성능분석을 위해 토크와 회전 속도와의 관계, 구동 주파수와 회전 속도와의 관계, 고정 주파수에서의 시간에 따른 속도 변화율에 대한 상태를 실험 하였으며, 해당 실험을 통해서 초음파 모터가 부하가 증가함에 따라서 회전수가 감소하는 특성을 보이는 것을 확인하였다. 연속 구동 중에 스테이터의 온도 상승으로 인해 압전 세라믹의 특성이 변화 되어 모터 특성이 변화 되었으며, 온도 상승으로 인해 초음파 모터의 기계적인 공진 주파수가 낮아져서 스테이터의 진폭이 작게 되어 초음파 모터의 회전 속도가 떨어지게 됨을 확인 하였다. 이러한 사실을 통해 실제 주파수 제어를 통해서 초음파 모터를 구동 시킬 경우 동작 주파수 범위가 작아서 부하 또는 온도에 따라 특성이 변하는 특성이 생겨 상황에 따라서 최적 구동 주파수를 유지하기가 사실상 불가능하다는 것을 확인 하였으며, 이러한 문제를 해결하기 위해선 특성 변화가

심한 초음파 모터에 맞는 제어기 설계가 필요해 진다. 선형 초음파 모터에 대해서는 신경망의 적용을 검토해 보았으나 낮은 속도에서의 초기 기동시간이 너무 느려 적용하지 못하였으며 대신 마이크로 미터급 스텝 제어기를 설계하여 원하는 결과를 얻었다. 선형 초음파 모터를 이용해서 초정밀 위치제어인 나노 제어를 하기 위해서는 좀더 다양한 실험이 이루어져야 하며 하드웨어 및 제어기의 성능을 개선시킬 필요성이 있다. 본 연구의 결과는 초음파 모터를 이용하여 정밀 제어를 필요로 하는 산업체 전반에 응용될 것으로 기대하며, 초음파 모터를 이용한 제어에 작은 보탬이 되었음 한다.

참고문헌

[1] Barth, H. V, "Ultrasonic driven Motor", IBM Tech, Disclosure Bull, Vol. 16, No. 7, pp. 2263, 1973.
 [2] T. Sashida, T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", Oxford, Clarendon Press, 1993.
 [3] T. Sashida, "Motor device utilizing ultrasonic oscillation : 29 claims and 22 Drawings", U.S Patent, pp. 4,

pp. 868, pp. 446, 1985.
 [4] Y. Ohnishi, H. Sugimoto, and M. Yani, "Ultrasonic linear motor using torsional flexural traveling wave", in Proc. 2nd IPEC, Tokyo, Vol. 2. pp. 894, 1990.
 [5] 한상보의 1명, "Operating Principle and the States of the Art of Ultrasonic Motor", 소음 진동 학술대회 논문집, pp. 1327-1332.
 [6] T. Senjyu, S. Yokoda, "Speed control of ultrasonic motors by adaptive control with a simplified mathematical model", IEE Proc-Electr., Power Appl., Vol. 145, No. 3, May, 1998.
 [7] J. Q. Hang, F. L. Lewis, "Neural-Network Predictive Control for Nonlinear dynamic systems with Time-Delay", IEEE Trans, Neural Networks, Vol. 14, No. 2, pp. 377-389, March, 2003.
 [8] Nakamura, K., et al., "Ieee Transactions on Ultrasonics", Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 38, pp. 188-193, 1991.
 [9] Nakamura, et al., "Transactions of the Institute of Electrical Engineers", od Japan, Vol. 111-C, pp. 462-469, 1991.

김 정 도(Jeong-Do Kim)

[정회원]



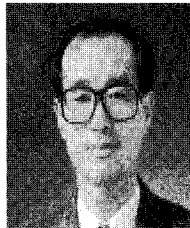
- 1990년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1995년 3월~2004년 2월 : 삼척대학교 컴퓨터응용제어공학과 교수
- 2004년 3월~현재 : 호서대학교 전기 정보통신공학부 교수

<관심분야>

센서 응용 및 로보틱스, 시스템 제어

홍 철 호(Chul-ho Hong)

[정회원]



- 1981년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1989년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1983년 3월~1989년 2월 : 인덕대학 전자과 교수
- 1989년 3월~현재 : 호서대학교 전기 정보통신공학부 교수

<관심분야>

로보틱스, 시스템 제어

김 동 진(Dong-Jin Kim)

[정회원]



- 2000년 8월 : 호서대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 1월~2004년 6월 : (주)제니스 테크 기술연구소 선임연구원
- 2001년 3월~현재 : 호서대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야>
센서응용 및 로보틱스

함 유 경(Yu-Kyung Ham)

[정회원]



- 2003년 2월 : 삼척대학교 컴퓨터응용 제어공학과 (공학석사)
- 2002년 10월~2004년 3월 : (주)화동인 터네셔널 연구소 연구원
- 2004년 5월~현재 : (주)맥사이언스 연구소 연구원
- 2004년 5월~현재 : 호서대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야>
센서응용 및 로보틱스