

# 압전 초음파 모터의 성능분석과 신경망 제어기 설계

## Design of Neural Controller and Performance analysis for Piezoelectric Ultrasonic Motor

유은재\*, 김정도\*\*, 홍철호\*\*\*, 김동진\*\*\*\*, 정영창\*\*\*\*\*

(Eun-Jae Yu, Jeung-Do Kim, Chul-Ho Hong, Dong-Jin Kim)

**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, we analyzed response time & change with a driving time, and proposed PD controller combined with neural network. The backpropagation algorithm is used to train a given trajectory. The effectiveness of the used method is confirmed by experiments. The effectiveness of the used method is confirmed by experiments using the ultrasonic motor made in Korea.

**Key Words** : Ultrasonic piezo motor, backpropagation, controller, Neural Network

### 1. 서론

초음파 모터는 전자기식 모터와는 달리 철심과 코일이 없는 새로운 형태의 모터이다. 초음파 모터는 1973년 H.V.Barth에 의해 처음으로 제안된 이후 구소련에서 활발한 연구가 시작되어 일본을 중심으로 본격적으로 연구, 개발이 시작 되었다.[2] 1980년 T.Sashida는 처음으로 실용화에 가까운 진동평형 초음파 모터를 제안 하였고 1982년에 접촉면에서의 마찰 문제를 해결한 진행파형 초음파 모터를 제시 하였다.[1][3] 초음파 모터는 일반적인 모터와 그 구조와 특성에 있어 완전히 다른 구조를 가지고 있는데, 무소음이며 전자파 및 자계에 대한 영향이 없고, 저속/고토크 특성을 가지고 있어 감속기어를 사용하지 않는 직접 구동방식이 가능하며, 백래쉬가 없다. 또한, 자체 홀딩토크를 갖고 있어 정지 브레이크로 사용가능하며, 구조가 단순하여 소형, 경량화 구현이 가능하다. 특징으로는 응답속도가 빠르며 정밀제어가 가능하다는 것이다. 그러나 일반적인 모터에 비해 연속 구동 시 특성에 심각한 문제가 발생할 수 있어 1분 이상 연속 구동을 가급적 하지 말아야 하며, 구동 방식이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 원환형의 초음파 모터를 구동하기 위해서는 수십 KHz에서 동작하는 100Vp-p 이상의 진폭을 가지는 두개의 사인파 입력이 사용되어야 하는데, 두 입력의 위상이 90도 일 때 가장 큰 토크를 발생시킨다. 본 연구에서는 주파수 구동 방식을 사용한다. 초음파 모터의 속도를 제어하기 위해서는 디지털 신호에 비례한 선형적이거나 안정된 주파수를 얻어야 하는 것이 중요하다. 하지만 초음파 모터 자체는 구동시간에 따라 동작 특성이 변화하고, 모터의 온도가 상승함에 따라 마찰계의 특성이 변화하여 모터의

전달 특성이 변하는 문제를 가진다. 따라서 많은 연구자들은 기존의 PID 제어 방법을 벗어나 적응제어 방법, 퍼지 제어 방법 및 신경망 제어 방법 등 다양한 제어 방법을 제시하고 있다. 하지만, 초음파 모터의 성능분석이 이루어지지 않은 상태에서 모터의 속도 및 위치 제어가 이루어지기 때문에 실제 상용화된 제어기를 만드는 데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 충분한 성능 분석을 하고, 제어기 설계의 방법을 제안한다. 제안된 방법은 특성이 변하더라도 일반화 특성에 의해 적용이 가능한 신경망 제어기이다[6]. 신경망 제어기를 사용할 경우에, 적은 특성 변화는 전 처리 학습 데이터에 의해 강인성이 보장되며, 많은 특성 변화가 존재할 때 간단한 재학습에 쉽게 새로운 제어 목적에 적용 할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 원환형 초음파 모터 PUMR40을 이용하여, 성능 분석을 위해 테스트용 회로를 설계하였고, 이를 신경망 제어기를 적용시켰다.

### 2. 초음파 모터의 구동 원리

압전체와 탄성체로 구성된 고정자(stator)와 이동자(rotor)로 구성되어 있는 초음파 모터는 압전체에 교류 전압을 인가하면 기계적 진동이 발생된다. 세라믹 압전체에서 발생한 진동이 고정자에 전달되면 고정자 표면의 질점들이 타원궤적을 그리며 운동하고 고정자에 접촉하는 이동자는 타원운동에 의한 마찰력으로 회전한다.[4] 초음파 모터의 동작원리는 그림 1에 있다.

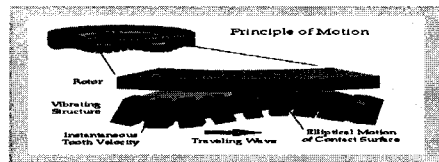


그림 1. 진행파형 초음파 모터의 동작 원리

#### 2.1 초음파 모터의 구동과 특성 분석

특성분석을 위해 (주)피에조 테크놀리지에서 생산된 원환형

#### 저자 소개

- \* 유은재 : 호서대학교 전기정보통신공학부 석사과정
- \*\* 김정도 : 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수·공학
- \*\*\* 홍철호 : 호서대학교 전기정보통신공학부 교수
- \*\*\*\* 김동진 : 호서대학교 전기정보통신공학부 박사과정
- \*\*\*\*\* 정영창 : 호서대학교 전기정보통신공학부 교수·공학

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

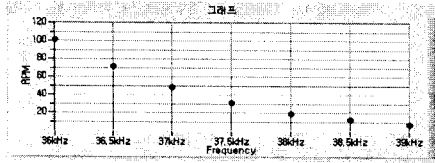


그림 2. 구동주파수와 회전 속도와 관계

그림 2에서와 같이 초음파 모터는 구동 주파수의 변화에 따라서 그 속도가 크게 변화 한다. 이것은 구동 중에 스테이터의 온도 상승과 부하에 따라 압전 세라믹의 특성이 변하기 때문에 초음파 모터의 기계적인 공진 주파수의 변화에 의해 이러한 현상이 나타난다. 그림 3과 같이 무부하 상태일 경우 주파수를 일정하게 하고 연속 구동을 할 경우 시간에 따라서 속도가 감소되는 것을 알 수 있다. 초음파 모터는 연속구동을 하는 모터는 아니다. 연속구동을 할 경우 스테이터의 온도가 상승하고 압전체의 마찰력 때문에 세라믹의 특성이 변화하게 되어 동작 주파수대가 변하는 특성을 갖게 된다. 이 결과로부터 초음파 모터를 연속 구동할 경우 마찰계의 마모 뿐만 아니라 속도 특성도 많은 변화가 생김을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 시스템에 대한 제어기 설계시 이 문제를 해결 할 수 있는 방법이 포함되어야 정밀제어가 가능하게 된다.

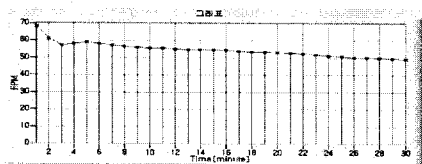


그림 3. 36.5 kHz 에서의 시간에 따른 속도 변화율

## 2.2 반응시간 및 기본 위치 정밀도 분석

본 연구에서는 위치 정밀도의 가능성을 파악하기 위해 제일 먼저 (주)피에조 테크놀로지에서 생산되는 모터를 가지고 응답시간을 알아보았다. 그림 4는 PUMR40 모터를 가지고 응답시간을 측정 한 것으로 80,000pulse의 엔코더(4채배 시킨 상태)가 사용되었으며, 샘플링시간을 0.1ms로 하였으며, 엔코더 펄스수의 부족으로 생기는 현상들을 데이터 smoothing하는 방법을 이용하여 그린 그림이다. 결과로부터 얻은 초음파 모터의 응답시간은 다음과 같다.

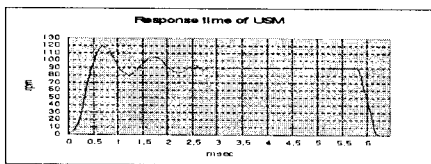


그림 4. 초음파 모터의 응답시간 측정(무 제어시)

결과로부터 얻은 초음파 모터의 응답시간은 다음과 같다.① 상승시간 = 0.25msec, 10%에 도달 하는 시간 = 0.18msec, 90%에

도달 하는 시간 = 0.43msec ② 정착시간 = 2.5~3msec ③ 하강시간(Falling Time) = 0.27msec, 90%에 도달하는 시간 = 5.82msec, 10%에 도달하는 시간 = 6.05msec 이것으로부터 약간의 감소만 가지면 오차가 생기지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉 가·감속 시간을 최소 0.3msec 정도까지로 할 수 있다는 것을 의미한다.

## 3. 성능 평가 테스트를 위한 실험 장치 구성

본 연구에서는 초음파 모터의 특성 실험 및 신경제어기를 실험하기 위해 주 제어기는 Intel Pentium 4 CPU 2.53GHz를 이용하였으며, PUMR40의 구동드라이버와 PC에서의 인터페이스를 위해 PCI 인터페이스인 PLX9054PCI 사용하였으며, 구동드라이버와 PLX9054 사이의 인터페이스 회로는 직접 제작 하였다. 이에 대한 구성도와 제어 블록도를 그림 4에 나타내었다.

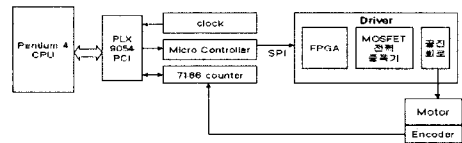


그림 5. 초음파 모터 제어시스템 구성

제어시스템의 구성에 대한 동작 상태를 살펴보면 Pentium 4 CPU에서는 신경망에 대한 알고리즘을 처리하며, 외부 하드웨어에 대한 인터페이스를 위해 PLX9054PCI 카드가 사용되어지며, PUMR40 구동부는 속도를 제어하는 주파수를 신호를 담당하게 된다. 이를 위해 PCI 와 구동부 사이에 마이컴을 두어 SPI 인터페이스를 통해 속도에 대한 신호를 보내게 된다. 초음파 모터의 위치 검출을 위해 엔코더에서 나오는 신호를 4채배 하여 Counter를 통해 처리 하였으며 일정 샘플링 주기를 만들기 위해 PC의 부정확한 타이머를 사용하지 않는 대신 외부 클럭을 이용하여 정확한 샘플링 주기를 만들어 사용 하였다.

## 4. 신경망 제어기와 궤적 제어

일반적으로 오차를 최소화 시키기 위해서는 BP 알고리즘의 벨타학습이 주로 사용 되고 있으며, 본 연구에서는 모멘텀 BP 알고리즘을 적용 하였다.

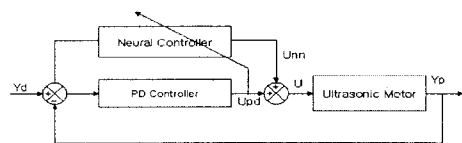


그림 6. 신경망 제어기의 구조

모멘텀 BP 알고리즘을 적용하기 위해 우선 연결 강도 V, W를 임의의 작은 값으로 초기화 한 후, 입력 패턴 X는 Yd 와 Yd' 로 선정 하였다. 은닉층의 입력 가중합 NETz 구한후 시그모이드 함수를 활성화 함수로 사용하여 출력 Z를 나타내면 다음과 같이 정의 된다.

$$NET_z \neq T_z = XV^T$$

$$Z = f(\neq T_z) = 1/2 + 1/(1 + e^{-NET_z})$$

출력층의 최종 출력 y(Unn)를 구하면 다음과 같이 정의 된다

$$NET_Y = ZWt$$

$$y = f(NET_Y) = 1/2 + 1/(1 + e^{-NET_Y})$$

출력  $U_{pd}$ 를 사용하여 제곱오차 E를  $E = \frac{1}{2} \sum U_{pd}^2$  이며, 여기서  $U_{pd}$ 는  $U_{pd} = K_p(Y_d - Y_p) + K_d(Y_d - Y_p)$  이다.

출력층의 오차신호  $\delta_Y$ , 은닉층에 오차 신호  $\delta_Z$  다음과 같이 정의 된다.

$$\delta_Y = U_{pd} \times Y(1 - Y)$$

$$\delta_Z = Z(1 - Z) \sum_{j=1}^4 \delta_Y \times W_j'$$

은닉층과 출력층간의 연결 강도 변화량  $\Delta W$ 와 다음 학습 단계에서 사용될 연결 강도  $W_{k+1}$  입력층과 은닉층간의 연결 강도 변화량  $\Delta V$  다음 학습단계에서 사용될 연결강도  $V_{k+1}$  을 구한다.

$$\Delta W_k = \alpha \delta_Y Z + \beta \Delta W_{k-1}$$

$$W_{k+1} = W_k + \Delta W_k$$

신경망 제어기에 의해 발생 되는 제어 입력 U는 다음과 같이 정의 된다.

$$U = U_{pd} + U_{nn}$$

### 5. 실험결과

제안된 제어 시스템에서는 샘플링 주기는 5ms, 샘플링 개수는 200개, 목표값으로는 위치에 대한 궤적을 주었으며, 신경망 제어기에서 사용된 파라메타 값은  $K_p=80$ ,  $K_d=10$ , 신경망의 학습률은 9, 모멘텀 상수는 0.1, 입력층은 2개 은닉층은 4개 출력층은 1개를 갖는 시스템이다

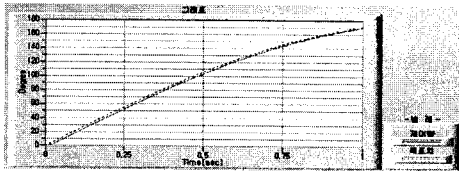


그림 7. PD 제어기를 이용한 위치 궤적

정확한 파라메타 값을 주지 않았을 경우 PD제어기는 일정한 오차를 가지게 된다.

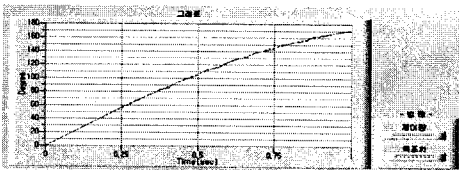


그림 8. 신경망을 15회 학습시킨 위치 궤적

15회 학습한 결과 오차가 점점 줄어드는 모습을 볼 수 있다.

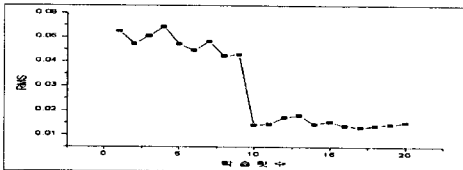


그림 9. 신경망을 통해 학습 시킨 RMS 오차

신경망학습을 통한 학습 횟수는 16회정도가 가장 적절한 것으로 보인다. 그림 9에서 보이는 것처럼 일정 학습 횟수가 지나

면 에러가 줄어들지 않는 것을 볼 수가 있다.

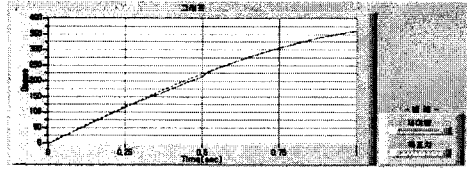


그림 10. 다른 패턴을 학습한 신경망의 가중치가 적용된 상태에서의 위치 궤적

새로운 궤적에 대해서 이전에 학습된 가중치를 적용하면 그림 10과 같이 목표위치에 빠르게 도달한다.

### 6. 결론

본 연구에서는 초음파 모터의 성분분석으로 초음파 모터의 부하가 증가함에 따라서 회전수가 감소하는 수하 특성을 보이며, 연속 구동 중에 스테이터의 온도 상승으로 인해 압전 세라믹의 특성이 변화 되어 모터 특성이 변화 되는 것을 확인 하였다. 주파수 제어를 통해 초음파 모터를 구동 시킬 경우 동작 주파수 범위가 작아서 부하 또는 온도에 따라 특성이 변화 되기 때문에 상황에 따라서 최적 구동 주파수를 유지하기가 힘든 상황을 해결하기 위해 본 연구에서는 신경망 제어기를 구성하여 구동 상황에 따라 학습을 통해 오차를 개선해 나가는 과정 통해서 제어기의 성능을 확인 할 수 있었으며, 실험결과에서 나타낸 것처럼 여러 차례 학습을 통해 입력 궤적에 대한 오차를 줄이면서 추종해 가는 것을 볼 수가 있었다. 그러나 어느 정도 학습이 진행이 되면 더 이상 에러가 줄어들지는 않았다. 또한 초음파 모터에 기존에 학습된 가중치를 새로운 입력 궤적에 대해서 적용하였을 경우 빠르게 입력 궤적을 따라 가는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 구동 상황에 따라 특성이 변화는 초음파 모터를 효과적으로 제어 할 수 있음을 확인 하였다. 본 연구에서 제안한 신경망 제어 시스템이 초음파 모터에 가장 적합하게 활용 될 수 있을 것이라 사료 된다.

### 참 고 문 헌

- [1] T. Sashida, T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors" Oxford, Clarendon Press, 1993
- [2] Barth, H. V. 1973, "Ultrasonic driven Motor," IBM Tech. Disclosure Bull, Vol. 16, No. 7, p.2263
- [3] T. Sashida, 1985, Motor device utilizing ultrasonic oscillation; 29 claims and 22 Drawings. U.S Patent, 4, 868, 446
- [4] 한상보외 1명, "Operating Principle and the States of the Art of Ultrasonic Motor", 소음진동학술대회 논문집 pp,1327 ~ 1332
- [5] 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
- [6] 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.