

PWM 구동방식을 이용한 초음파 모터의 힘/토크제어

최 병 현* · 최 혁 렬**
(1999년 12월 9일 접수)

Force/Torque Control of Ultrasonic Motor with PWM Driving Method

Byunghyun Choi and Hyoukryeol Choi

Key Words: Ultrasonic motor(초음파모터), Piezo-electric material(압전소자), Pwm drive(폭변조 구동), Force/torque control(힘/토크 제어)

Abstract

Ultrasonic motors(USM) has been emerging as one of new type actuators, which possess many advantages such as high torque, low weight, compact size and no magnetic field generation. In spite of these features, there are several problems to be solved, which are temperature rise in case of long term operation, non-linearity, and hysteresis. Among these, hysteresis causes the most serious problem in force/torque control applications. To cope with this problem, in this paper we propose a new PWM driving method which can be applied to force/torque control of USM. To verify the proposed method, an experimental setup was built and several experiments were performed.

1. 서 론

초음파 모터는 기존의 전자기 모터와 달리 회전자와 고정자간의 마찰력에 의하여 구동되는 새로운 형태의 액츄에이터를 말한다. 기존의 전자기 모터는 구동시 주변기기에 대하여 모터잡음을 발생시키는 반면, 초음파 모터는 마찰력에 의하여 구동이 되므로 이와 같은 문제점을 전혀 발생시키지 않으며 특히 저속, 고폭, 작은 크기 등 많은 장점을 가지고 있다.

이와 같은 특성을 갖는 초음파 모터는 Barth에 의하여 초기 모델이 개발되었으며,⁽¹⁾ 개발 당시의 모델은 썸머 형태를 갖는 2개의 압전소자를 진동시켜 회전자를 직접 구동시키는 형태를 하고 있었다. 하지만, 이 모델은 마찰열로 인하여 수명이 짧고, 접촉점에서 마찰손실이 크다는 단점으로

인하여 제품화에는 실패하였다.

한편 Sashida는 압전소자의 표면이 타원 궤적을 그리며 운동하는 진행파(travelling wave) 구동 방식의 초음파 모터를 개발하였다.⁽²⁾ Sashida가 제안한 초음파 모터는 위상차를 갖는 두 개의 사인파를 모터 구동을 위한 입력신호로 하고, 고정자를 탄성체로 구성하여 회전자와 고정자간의 마찰력이 급격히 증가하는 것을 방지할 수 있었으며, 이로 인하여 Barth의 초기모델의 단점이었던 마찰열을 대폭 줄일 수 있었다. 이후 진행파 구동 방식의 초음파 모터에 대한 연구가 상당수 진행되어 여러 종류의 초음파 모터가 상용화되었으나, 압전소자의 비선형 특성으로 인한 히스테리시스와 마찰열에 의한 고온 등의 문제가 여전히 남아있다.

Hagood IV와 McFarland는 모드 에너지법을 이용한 초음파 모터의 수학적 모델을 제시하여 이후 초음파 모터의 설계를 위한 해석도구를 마련하였다.⁽³⁾ 이들은 시뮬레이션을 통해 On-Off에 의한 모터의 과도응답을 해석하였으며, 모터의 성능을 부하토크와 압전소자의 높이의 함수로 표현하고자 하였다.

* 회원, 성균관대학교 기계공학과 대학원
E-mail : bhchoi@mecha.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7481 FAX : (031)290-5849
** 회원, 성균관대학교 기계공학부

Senjyu 등은 실험을 통하여 초음파 모터의 효율을 개선시키는 방법을 제시하였으며,⁽⁴⁾ 실험으로부터 초음파 모터의 입력신호가 $\pm\pi/2\text{rad}$ 의 위상차를 가질 때 최대효율을 얻을 수 있음을 보였다. 또한 장시간 운전으로 인하여 발생하는 마찰열로 압전소자의 공진주파수가 변화하게 되면 모터의 성능이 저하되는 것을 지적하면서, PI제어기와 주파수 제어기를 이용하여 이를 보상하는 초음파 모터의 속도제어기를 제시하였다. 이들은 추후 연구에서 슬라이딩 모드 제어기법을 적용한 위치제어기를 제시하기도 하였다.⁽⁵⁾

Izuno 등은 고급제어 기법이 다양한 실험에 적용하기 어렵다는 것을 지적하며, 가변계인을 이용한 구동 주파수 제어 루프와 전압제어 루프를 포함하는 초음파 모터의 속도 제어기법을 제안하였다.⁽⁶⁾ 이들은 제안된 제어기를 이용하여 초음파 모터의 속도 추종 성능과 부하토크에 대한 속도 추종 성능을 개선할 수 있음을 실험적으로 증명해 보였다.

이와 같이 초음파 모터에 관한 연구는 대부분 속도 혹은 위치 제어에 관한 것이지만, 이를 로봇 분야와 같이 물체와 접촉 혹은 상호작용하는 분야에 있어서는 힘/토크 제어가 불가피하게 된다. 그러나 초음파 모터에 대한 힘/토크 제어는 그 연구 결과가 상당히 미비하며 이는 압전소자의 비선형특성과 초음파 모터의 구조로부터 발생하는 히스테리시스 때문으로 생각할 수 있다.

초음파 모터의 힘/토크 제어에 관한 연구로는 Nishihori 등이 제안한 PWM 구동방식을 들 수 있다.⁽⁷⁾ 이들은 PWM의 한 주기 내에 정전과 역전 모드를 조합하여 초음파 모터의 토크제어를 구현하였으며, 이를 응용하여 로봇 그리퍼(gripper)에 적용하였다.⁽⁸⁾ 또한, Kaneko 등은 Nishihori의 구동방식의 단점으로 빠른 모드 전환으로 인하여 모터 수명이 단축되는 것을 지적하면서 Nishihori의 방법을 개선한 2자유도 PWM 구동방식을 제안하기도 하였다.⁽⁹⁾

Noma 등은 초음파 모터를 역촉감제시 기구의 구동부로 사용하였으나,⁽¹⁰⁾ 이들이 사용한 토크제어방법은 알려져 있지 않다.

한편 국내에서는 Cha 등이 퍼지 제어기를 적용한 초음파 모터를 로봇 액추에이터로 사용하기

하였으나,⁽¹¹⁾ 이들이 선택한 제어 방식은 토크제어가 아닌 속도 제어방식이였다.

최병현과 최혁렬은 사용자의 손에 역감을 제시하는 역촉감 제시기구를 개발하면서 액추에이터로 초음파 모터를 사용하여 PWM 구동에 의한 힘/토크 제어를 구현하였다.⁽¹²⁾ 이 시스템은 동력 전달 매체로 텐던을 사용함으로써, 동력전달 중 발생한 손실에 의하여 만족할 만한 결과를 얻지 못했다. 이들은 추후 동력전달의 문제점을 개선한 직접 구동방식의 역촉감제시기구에 초음파 모터를 액추에이터로 사용하여 초음파 모터의 힘/토크 제어의 가능성을 제시하였다.⁽¹³⁾

본 논문에서는 초음파 모터의 힘/토크 제어를 위한 새로운 방식의 PWM 구동방법을 제시한다. 제안된 방법은 Tomovic 등이 제안한 사버네틱 액추에이터가 갖추어야 할 네 가지 조건을 만족하며,⁽¹⁴⁾ 동시에 초음파 모터가 지닌 비선형성을 어느 정도 극복할 수 있었다. 이후 2장에서는 초음파 모터의 구조와 구동원리에 대하여 서술하였으며, 3장에서는 기존에 제안된 PWM 제어방식에 대하여 설명하였다. 또한 4장에서는 제안된 구동방식에 대하여 설명하고 5장에서 실험을 통하여 제안된 구동방식의 타당성을 보일 것이다.

2. 기존 연구

초음파 모터는 크게 췌기 진동자 구동형(wedge type)과 진행파 구동형(travelling wave type)으로 구분된다. 췌기 진동자 구동형은 췌기 형태의 진동자를 이용하여 디스크를 회전시키는 형태이며, 진행파 구동형은 각 진동자를 순차적으로 진동시켜 회전자를 회전시키는 형태를 취하게 된다. 이 장에서는 초음파 모터의 구성과 구동원리에 대하여 간단하게 기술한다.

2.1 초음파 모터의 구동원리⁽²⁾

Fig. 1은 초음파 모터의 구성을 보인 것으로 전자기 구동방식 모터와 마찬가지로 회전자와 고정자를 가지고 있으나, 초음파 모터의 경우 고정자는 압전소자(piezo-electric material)로 구성되어 있으며 회전자는 탄성체(elastic body)로 되어 스프링의 역할을 하며, 전원을 공급하지 않으면 회전

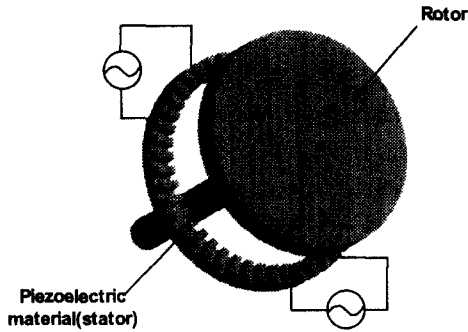


Fig. 1 The structure of ultrasonic motor

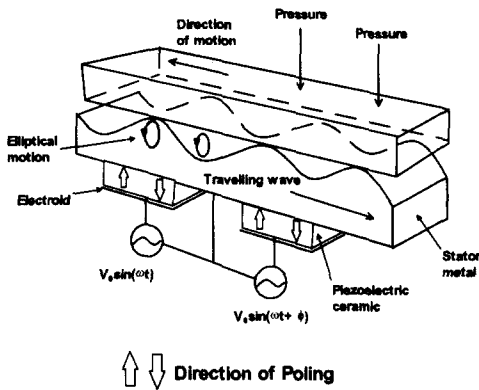


Fig 2 The principle of ultrasonic motor drive

자와 고정자는 스프링 힘에 의하여 서로 밀착하게 된다.

이와 같은 형태의 초음파 모터는 진행파를 가하여 모터를 구동시키게 되며, 진행파는 위상차를 갖는 두 개의 사인파 형태의 신호를 가하여 열게 된다. 이 때, 압전소자는 사인파의 주기에 따라 인장/압축의 변형을 일으키게 된다.

Fig. 2는 초음파 모터에 사인파 형태의 전압이 가해진 경우 압전소자의 거동을 도시한 것으로, 위상차 ϕ 에 따라 압전소자의 거동이 결정된다. 특히 위상차 ϕ 가 작아질수록 압전소자의 궤적이 그리는 타원의 폭이 작아지고, 위상차가 전혀 없게 되면 압전소자는 제자리에서 위아래로 진동을 하게 된다. 이 때, 초음파모터는 외력에 대하여 전혀 저항을 하지 않는 자유상태(free state)가 되며, 이 상태를 흔히 무 토크상태라고 한다.

또한 전원차단시 회전자와 고정자 사이의 마찰

력에 의하여 브레이크와 같은 동작을 하게 되며, 이와 같은 특성을 자결(self-locking) 구조라고 한다.

2.2 초음파 모터의 특성

이상과 같이 알아본 초음파 모터는 그 구동방식 자체가 기존의 전자기 모터와 달리 마찰력에 의하여 구동되므로 주변기기에 대하여 전자기 잡음을 발생시키지 않는다는 장점을 가지고 있다. 또한, 저속에서 고토르크를 낼 수 있으며, 크기가 작고 컴팩트하다는 점 이외에도, 특별히 전원을 공급하지 않더라도 마찰력에 의하여 큰 정지토크를 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 압전소자를 사용하기 때문에 모터 운전시 히스테리시스에 의한 비선형성을 나타내고, 마찰력에 의하여 모터에 열이 발생하며 마모에 의하여 모터의 수명이 짧은 단점을 가지고 있다. 그러나 이와 같은 단점은 다양한 제어기법과 구동조건에 의하여 어느 정도 극복되고 있는 단계이다.

위상차 ϕ 를 이용한 진행파구현 방식은 초음파 모터의 위치, 혹은 속도 제어에 적합한 형태를 제공하였으며, 이로 인하여 많은 연구자들이 초음파 모터의 위치·속도 제어에 관심을 가지게 되었다.

한편, Tomovic과 McGhee는 인간 근육의 해석을 바탕으로 인간과 결합하는 로봇의 액추에이터가 갖추어야 할 네 가지 상태를 제시하였다.⁽¹⁴⁾ 이를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 자유상태(free state)
- (2) 증가상태(increase state)
- (3) 감소상태(decrease state)
- (4) 정지상태(lock state)

여기서 증가와 감소상태는 각각 액추에이터에 가해진 부하의 반대방향 혹은 동일한 방향으로 힘 또는 동력을 발생시키는 것을 의미하며, 일반적인 DC 모터만으로도 구현이 가능하다. 반면, 자유상태는 외력에 대하여 저항하지 않는 것을 의미하고 정지상태는 브레이크와 같은 역할을 하는 것을 말한다.

따라서, 일반적인 액추에이터에 위의 기능을 모두 갖추도록 하기 위해서는 클러치와 브레이크 등이 필요하게 된다. 반면, 초음파 모터는 그 구동방식에 따라 위의 사이버네틱 액추에이터에

요구되는 네 가지 상태를 만족시킬 수 있다.

3. PWM 구동

앞서 언급한 초음파 모터의 특성을 만족시키고자 Nishihori 등은 PWM 구동방식을 적용한 토크 제어 방법을 제안하였다. 이들은 초음파 모터의 정전과 역전을 PWM의 한 주기 내에 조합하여 별도의 센서가 없이도 개루프 토크 제어가 가능하도록 하였다. 또한 빠른 속도로 정전과 역전을 반복하기 때문에 회전자와 고정자간의 마찰력이 줄어들어 결과적으로 회전자와 고정자 사이의 미끄러짐을 유지하게 된다. 이와 같은 상황에서 초음파 모터는 작은 외력에 대해서도 쉽게 움직이게 된다. 즉, 이들이 제안한 방법은 초음파 모터에 대하여 유연모드(compliant mode)와 강성모드(stiff mode)를 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 정전과 역전의 빠른 전환으로 인하여 초음파 모터의 수명을 단축시킨다는 단점을

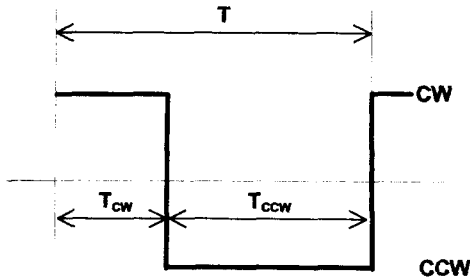


Fig. 3 single period of Nishihori's PWM method

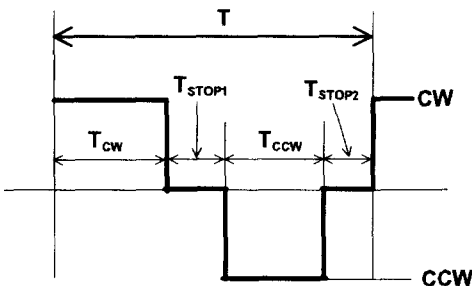


Fig. 4 single period of Kaneko's PWM method

가지고 있다.

한편 Kaneko 등은 Nishihori 등이 제안한 PWM 제어 방법의 단점을 지적하고 이를 개선한 2자유도 PWM 제어방법을 제시하였다. 이들이 제시한 방법은 정전과 역전 사이에 정지상태를 삽입하여 급격한 상태전환이 일어나는 것을 방지하였다.

Fig. 4는 이들이 제시한 PWM 구동형태를 보여주는 것으로 T_{cw} , T_{ccw} , 그리고 $T_{stop}(i=1,2)$ 는 각각 정전, 역전, 그리고 정지모드를 의미한다. 이들이 제안한 방법 역시 여타의 센서가 필요없는 개루프 토크제어 방법을 제공할 수 있으며, 특히 이들은 자신들이 제시한 PWM 구동방법을 이용하여 초음파 모터의 토크맵을 만들고 이를 이용하여 개루프 토크제어가 가능하다는 것을 보였다.

4. PWM/PS

본 논문에서는 기존의 PWM구동방법과는 다른 새로운 PWM 구동방법을 제시하고, 이를 PWM/PS (PWM with phase selector)라고 명명하였다. 제안된 PWM/PS 구동방법은 초음파 모터의 특성을 살리기 위하여 시스템의 상태에 따라 적절히 위상을 선택하도록 위상선택기를 도입하였으며, 압전소자의 히스테리시스의 영향을 제거하기 위한 방법으로 PWM 한 주기의 마지막에 자유상태(free state)를 추가하였다.

그러나, 초음파 모터의 효율은 위상차에 따라 좌우되므로 가급적 최대의 효율을 얻을 수 있도록 위상차를 선택하는 것이 유리하며, 이를 만족하는 위상차는 $\pm\pi/2$ rad이다. 또한 기존의 PWM 구동방법만으로도 무토크 상태를 제외한 나머지 사이버네틱 액추에이터의 조건을 만족시킬 수 있다. 하지만 무토크 상태를 만족시키기 위해서는 구동신호의 위상차가 없어야만 하며, 결국 위상선택기로부터 무토크 상태를 만족시킬 수 있는 출력을 얻어야만 한다. 이상을 고려하면 위상선택기의 출력은 $-\pi/2$, 0 , $+\pi/2$ rad가 되며, 위상선택기는 다음과 같은 알고리즘으로 동작을 하게 된다. 여기서, 듀티비(duty ratio)는 제어기의 기준 입력과 모터의 출력으로부터 얻어지는 것으로 오

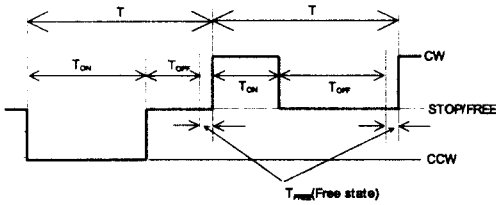


Fig. 5 Several periods of proposed PWM drive method

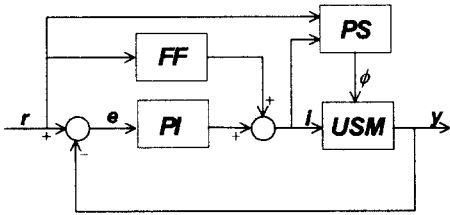


Fig. 6 The control block diagram of proposed PWM method

차에 따라 음(-)의 값을 가질 수 있으며, 만일 오차가 음의 값을 갖게 되면 이를 양의 값으로 만들어 주어야 한다.

```

IF |reference torque| ≈ 0 THEN
    SET phase difference TO 0 rad.
ELSE IF duty ratio < 0 THEN
    SET duty ratio TO -1 × duty ratio
    SET phase shift TO -π/2rad.
ELSE IF duty ratio > 0 THEN
    SET phase shift TO +π/2 rad.
END
    
```

초음파 모터의 단점은 힘/토크를 증가시킨 후 다시 감소시키고자 하는 경우(혹은 그 반대), 회전자와 고정자간의 마찰력이 췌기의 역할을 하게 되어 히스테리시스를 발생시키는 것으로 알려져 있으며, 이 현상을 췌기효과(wedge effect)라고 한다.

초음파 모터의 힘/토크제어에 있어서는 이와 같은 히스테리시스에 의하여 만족할 만한 응답을 얻기 어렵다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 PWM 한 주기의 마지막에 자유상태(free state)를 추가하는 방법을 제안한다. 추가된 자유상태

는 기존연구에서 설명한 바와 같이 압전소자를 제자리에서 진동시키게 되므로, 회전자와 고정자간의 마찰력을 제거하게 되고, 그 결과 마찰력에 의한 히스테리시스의 영향을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 5은 제안된 PWM 구동방법의 예를 보인 것이다.

여기서 T_{ON} 과 T_{OFF} 는 각각 전원이 공급되는 기간과 차단기간을 의미하며, T_{FREE} 는 위상차가 없이 전원이 공급되어 초음파 모터가 무토크 상태 즉, 자유상태에 있는 기간을 의미한다. 여기서 한 주기에 대한 동작시간(T_{ON})의 비를 듀티비, i 라고 다음과 같이 정의한다.

$$i = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF} + T_{FREE}} \times 100\% \quad (1)$$

한편, T_{FREE} 는 초음파 모터의 췌기효과를 제거하기 위하여 추가된 자유상태 유지기간으로 이 기간동안 초음파 모터는 외력에 대하여 전혀 저항하지 않는 자유상태가 된다. 따라서 이 기간이 길어지면 초음파 모터의 무토크 상태가 길어지게 되어 초음파 모터의 실제 출력토크가 감소하게 되는 결과를 초래하게 되므로 가급적 짧은 것이 좋다. 본 연구에서는 자유상태의 듀티비는 1%로 설정하였다.

이상과 같은 PWM/PS 구동방법을 적용한 제어기의 블록도를 Fig. 6에 보였다. PWM/PS는 비례적분 제어기(PI)를 기본으로 설계가 되었으며, 제어기의 기준입력(r)은 초음파 모터의 지령토크(command torque)이다. 또한, 개루프에 앞섬 보상기(FF: feed forward controller)를 추가하여 외란의 영향을 줄이고자 하였으며, 비례 적분제어기의 출력과 앞섬 보상기의 출력으로부터 초음파 모터(USM)를 구동시키기 위한 듀티비(duty ratio), i 를 얻게 된다.

기존의 제어기와 구별되는 것은 위상선택기(PS: phase selector)를 추가하여 기준입력과 선형 제어기의 출력으로부터 초음파 모터에 입력되는 두 사인과 사이의 위상차를 결정하게 된다.

제안된 PWM/PS 구동방법은 기존의 구동방법에 비하여 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 우선 PWM 한 주기내에 정전 또는 역전의 한가지 상태와 정지 상태만을 포함하므로 급격한 상태전환이 발생하지 않게 되며, 결국 초음파 모터의 수명을 연장시킬 수 있다. 또한 Kaneko 등의 방

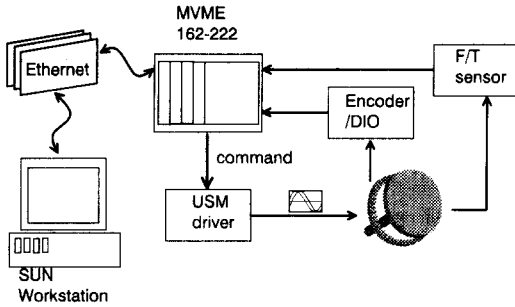


Fig. 7 Schematic diagram of USM drive system

Table 1 The specifications of ultrasonic motor

Driving freq.	Driving Voltage	Max. Torque	Holding Torque	Weight
50kHz	150Vrms	0.1 Nm	0.1Nm	20g

법을 이용하여 사이버네틱 액추에이터의 특징중 하나인 자유상태를 구현하기 위해서는 한 주기내에 정전과 역전을 같은 비율로 포함해야 하지만, PWM/PS의 경우는 위상선택기를 이용하여 입력 신호의 위상차를 제거함으로써 초음파 모터가 가지고 있는 무토크 상태를 그대로 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

5. 실험

5.1 실험장치

Fig. 7은 본 연구에 사용된 실험장치의 구성을 보인 것이며, 사용된 초음파 모터의 제원은 표 1에 나타난 것과 같다. 개발환경으로 SUN 워크스테이션이 사용되었으며, Motorola의 68040 CPU를 탑재한 VME 시스템(MVEM162-222)을 이용하여 모터를 제어하였다. PWM 구동은 소프트웨어를 이용하여 반송주파수 100Hz로 동작하도록 구현하였으며, 실제 모터를 구동시키기 위한 모터구동용 드라이버(USM driver)는 VME 버스시스템을 기반으로 자체 제작하였다. 모터제어의 결과로 얻어진 출력은 힘/토크 센서(JR3)를 이용하여 측정을 하였으며, 모터의 변위는 20bit 카운터보드를 이용하여 DIO 보드(digital input/output board)를 통하여 얻어진다

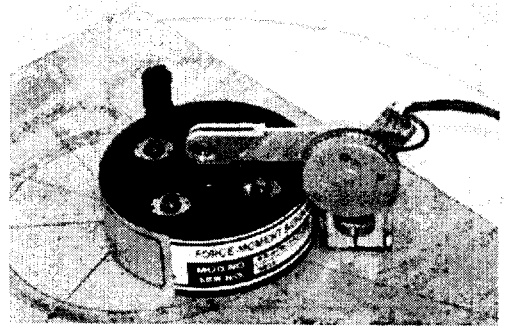


Fig. 8 Experimental setup

Table 2 Specification of Force/Torque sensor

Weight	Max F _x	Max F _y	Max F _z
180g	100N	100N	200N
Resolution	Max M _x	Max M _y	Max M _z
16 bit	5.0Nm	5.0Nm	5.0Nm

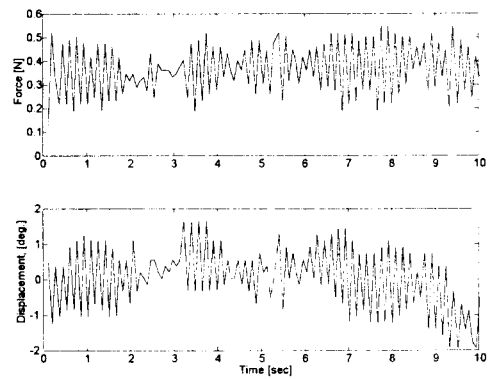


Fig. 9 The response of Kaneko's method:
 $T_{CW}=70\%$, $T_{CCW}=20\%$, $T_{STOP1}=5\%$,
 $T_{STOP2}=5\%$

Fig. 8은 초음파 모터와 링크로 구성된 실험장치의 사진을 보여주고 있다. 이와 같이 실험장치를 구성한 이유는 실제 토크를 측정하기 위하여 실험을 수행하고자 하였지만, 초음파모터와 기준 센서를 체결할 경우 여러 가지 문제점이 발생하여 모터에 링크를 부착하여 실험을 수행하게 되었다.

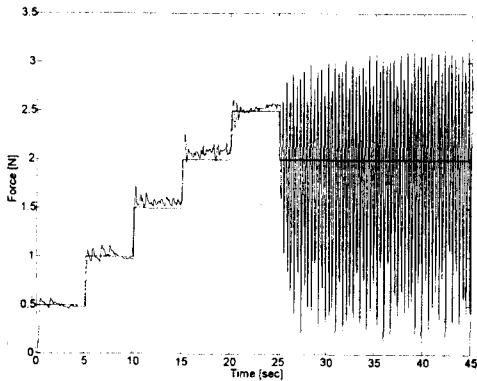


Fig. 10 Force response of PWM/PS without free state

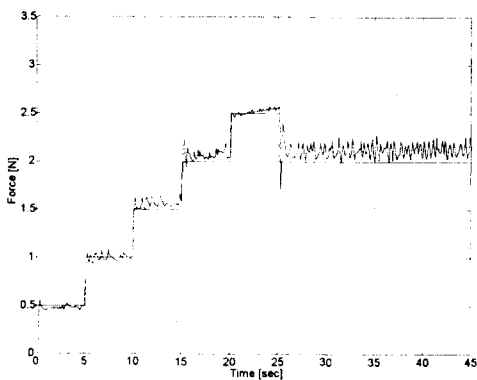


Fig. 11 Force response of PWM/PS with free state

5.2 실험 및 결과

이 장에서는 제안된 구동방법을 사용하여 초음파 모터의 힘/토크 제어를 수행한 결과를 보이고자 한다. 실험 조건으로는 반송주파수 100Hz의 소프트웨어 PWM을 이용하였으며, 초음파 모터의 제어입력은 매 10 m sec마다 계산이 된다. 또한, 그 때의 응답 역시 10 m sec마다 샘플링하였다.

Fig. 9는 Kaneko의 PWM구동방법을 이용하여 실험을 수행한 결과를 보인 것이다. 이때, $T_{CW}=70\%$, $T_{CCW}=20\%$, $T_{STOP1}=5\%$, $T_{STOP2}=5\%$ 로 설정하였다.

주어진 조건에 의하여 얻어진 힘 응답은 PWM 구동시 한 주기 내에 정전과 역전을 모두 포함하

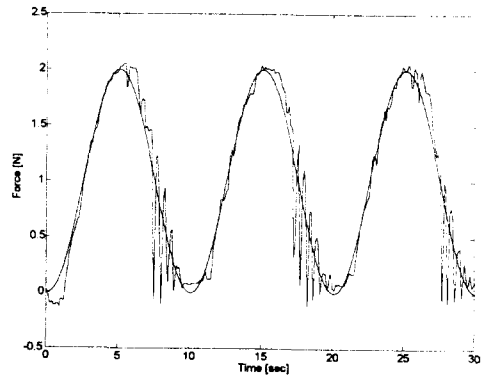


Fig. 12 Force response of USM for sinusoidal input controlled by PWM/PS without free state

기 때문에 약간의 흔들림을 수반하지만 평균 0.4N을 유지하는 것을 알 수 있다. 그러나, 초음파 모터의 변위의 경우는 토크출력을 얻기 위하여 포함된 정전과 역전의 영향으로 인하여 약 $\pm 1^\circ$ 정도로 상당히 변화가 심하게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 Kaneko의 PWM 구동방법은 정전과 역전을 한 주기 내에 포함시킴으로써 일정한 힘/토크는 얻을 수 있으나, 어느 정도의 진동을 수반하게 되며, 그 결과 초음파 모터의 변위 응답이 상당히 불안정하다고 말할 수 있다.

Fig. 10는 자유상태를 포함하지 않는 경우의 PWM/PS 구동시 초음파 모터의 응답을 보인 것으로 힘이 증가하는 경우 매우 만족할 만한 응답을 얻을 수 있으나, 2.5N으로부터 다시 감소하는 경우 전혀 제어가 되는 않는 것을 알 수 있다. 이는 회전자와 고정자간의 마찰력에 의한 히스테리시스 영향으로 생각이 된다.

Fig. 11은 자유상태를 포함하는 경우를 보인 것이다. Fig. 10의 결과와는 다르게 아주 만족스러운 응답을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 PWM/PS 구동방법은 초음파모터의 히스테리시스현상을 제거할 수 있다고 말할 수 있다.

한편, Fig. 12과 13는 기준입력을 주기 10 sec, 진폭 1N의 사인파 형태로 하여 각각 자유상태를 제외한 경우와 포함한 경우의 제안된 구동방법을 적용한 경우를 보인 것이다.

Fig. 12의 경우 기준입력이 최대값인 2N을 지

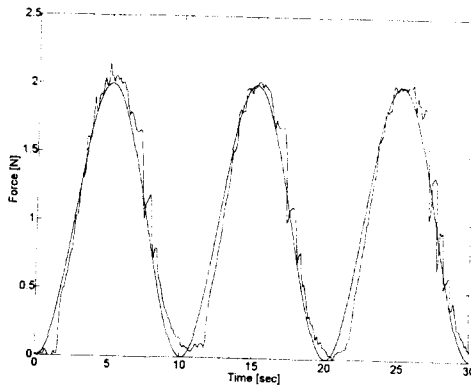


Fig. 13 Force response of USM for sinusoidal input controlled by PWM/PS with free state

나면서부터 응답이 불안정해지는 것을 알 수 있으며, 1N부터 0N이 되는 구간에서는 더욱 불안정해지는 것을 알 수 있으며, 이 역시 히스테리시스의 영향으로 생각되며, 계단 입력의 경우보다는 약간 좋은 응답을 보이는 것은 기준입력이 연속적으로 변함으로써 히스테리시스 현상의 주원인이 되는 쉐기효과가 줄어들었기 때문으로 생각이 된다.

Fig. 13의 경우는 자유상태가 추가된 PWM/PS 구동 방법으로 제어된 결과를 보여주는 것으로 Fig. 12의 경우보다 상당히 개선된 응답을 보여주고 있으며, 이는 추가된 자유상태에 의하여 히스테리시스의 영향이 줄어들었기 때문으로 해석할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 새로운 형태의 액추에이터로 마찰력에 의하여 구동되는 초음파 모터의 힘/토크 제어를 위한 새로운 방식의 PWM 구동방법을 제시하였다. 제시된 방법은 위상 선택기로부터 초음파 모터 구동을 위한 위상차를 선택하여 초음파 모터를 구동시켰다. 또한 PWM 구동시 한 주기의 마지막에 자유상태를 추가하여 회전자와 고정자간의 마찰력에 의하여 발생하는 히스테리시스 현상을 극복하고자 하였다. 실험을 통하여 제안된 구동방법의 실효성을 보였다.

후기

본 논문은 한국과학재단 핵심연구(과제번호: 971-1001-008-2)의 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Barth, H. V. 1973, "Ultrasonic driven Motor," *IBM Tech. Disclosure Bull.*, Vol. 16, No. 7, p. 2263.
- (2) Sashida, T. and Kenjo, T., 1993, "An Introduction to Ultrasonic Motors," Oxford science publications.
- (3) Hagood, N. W. IV and McFarland, A. J., 1995, "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor," *IEEE trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 42, No. 2, pp. 210~224.
- (4) Senjyu, T., Yokoda, S. and Uezato, K., 1997, "A Study on High Efficiency Drive of Ultrasonic Motors," *Procs. of inter. conf. on Power Electronics & Drive System*, pp. 365~370.
- (5) Senjyu, T., Yokoda, S. and Uezato, K., 1997, "Position Control of Ultrasonic Motors using Slide Mode Control," *IPEMC '97*, pp. 388~393.
- (6) Izuno, Y., Izumi, T., Yasutsune, H., Hiraki, E. and Nakaoka, M., 1998, "Speed Tracking Servo Control System Incorporating Traveling-Wave-Type Ultrasonic Motor and Feasible Evaluation," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, No. 1, pp. 126~132.
- (7) Nishihori, K., Ohkuma, S., Eryu, Y. and Sugimoto, T., 1991, "Velocity Control of Ultrasonic Motors for Robot Arms by Pulse Width Modulation," *Trans. on Japan Society of Mechanical Eng.*, Vol. 57, No. 6, pp. 166~170.
- (8) Nishihori, K., Kondo, S., Obata, H. and Ouma, S., 1998, "PWM Driving Characteristics of Robot hand With Fingers using Vibration-Type Ultrasonic Motors," *Trans. on Japan Society of Mechanical*

- Eng., pp. 1355~1360.
- (9) Kaneko, M., Siharara, T. and Tsuji, T., 1995, "Active Control of Self-locking Characteristic of Ultrasonic Motor," *IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2928~2929.
- (10) Noma, H., Miyasato, T., Kitamura, Y. and Kishino, F., 1996, "Haptic and Visual Feedback for Manipulation aid in a virtual Environment," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 58, pp. 469~476.
- (11) Cha, I., Park, H. and Back, H., 1996, "The Characteristics of Compensation on Temperature of Ultrasonic Motor with Robot Actuator by Fuzzy Controller," *IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 752~758.
- (12) 최병현, 이규훈, 최혁렬, 1998, "초음파 모터를 이용한 장력 구동방식의 장착형 역촉감 제시 기구의 개발," *로보틱스 제어계측 자동화 종합학술대회 논문집*, pp. 216~219.
- (13) 최병현, 최혁렬, 1998, "초음파 모터를 이용한 직접구동방식의 장착형 힘 제시기구의 개발," *한국자동 제어 학술회의 논문집*, pp. 1702~1706.
- (14) Tomovic, R. and McGhee, R. B., 1966, "A Finite State Approach to the Synthesis of Bioengineering Control Systems," *IEEE trans. on Human Factor in Electronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 65~69.