

# 초음파 모터의 위상차 조절에 의한 점탄성 제어

(Elasticity and Viscosity Control of an Ultrasonic Motor by a Phase Difference Control)

우수용\* · 이권현\*\* · 오금곤\*\*\* · 정현상\*\*\*\* · 김영동\*\*\*\*\*

(Soo-yung Woo · Kwon-Hyun Lee · Geum-Kon Oh · Hun-Sang Chung · Young-Dong Kim)

## 요 약

초음파 모터는 저속, 고토오크, 빠른 응답, 큰 정지 토오크등 여러 가지 장점을 지니고 있어서 자동화 설비 분야뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 그 용도에 많은 기대를 모으고 있다. 따라서 최근들어 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 많은 논문 및 응용 분야에 대한 발표가 이루어지고 있다. 초음파 모터의 제어 파라미터는 2상 전원 전압의 진폭, 주파수, 위상차와 정역의 시비율, 고정자와 회전자간의 압력등이 있다. 본 논문에서는 위상차 조절을 사용하여 점성계수와 탄성계수에 따른 초음파 모터의 토크변화를 고찰하고 이에 따른 과도응답을 검토함으로써 힘 피드백없이 각도 검출만으로 동력학적인 점탄성 제어를 실현하였다. 따라서 초음파 모터가 유연성을 요구하는 자동화 설비용 소형 액츄에이터로 이용될 수 있음을 확인하였다.

## Abstract

An ultrasonic motor(USM) has good characteristics such as compact size, silent motion, high speed response, low speed and high torque. The USM is driven by 2-phase AC electricity. The control parameters of USM are voltage, phase, and frequency of input powers, etc. In this paper, the fine elasticity and viscosity control with no force feedback can be implemented by a phase difference parameter. Experiment results show the change of torque with regard to elasticity and viscosity. Therefore the USM can be used as a micro-actuator in the automation field of the installation.

## 1. 서 론

시스템 자동화 설비에 있어서 모터 동력 장치는 많은 조건이 요구된다. 특히 인간의 작업을 대신할 로봇 팔의 액츄에이터는 소형이면서 고토오크의 성능을 지녀야 한다. 또한 인간의 운동 메카니즘을 재현하기 위해서는 액츄에이터 자체가 능동적으로 점

성과 탄성을 발생하고 이를 적절히 조절하여 유연성

\*정회원 : 목포전문대 전기과 교수

\*\*정회원 : 동신대 전기전자공학과 교수

\*\*\*정회원 : 조선대 전기공학과 부교수

\*\*\*\*정회원 : 조선대 전기공학과 교수

\*\*\*\*\*정회원 : 조선대 제어계측공학과 교수

접수일자 : 1997. 6.23

있는 힘을 발생시켜야 한다. 소형 매니플레이터에 액츄에이터를 채용하는 경우, 종래의 액츄에이터는 높은 토크-중량비를 갖고 있는 것이 거의 없기 때문에 높은 토크와 소형 경량구조의 쌍방을 충족시키는 일은 곤란한 문제이다. 최근에 이를 다소 충족시킬 수 있는 초음파 모터가 개발되어 많은 연구가 진행되고 있다.[1]~[5].

본 연구에서는 컴퓨터로부터 가변 위상 데이터를 받아 초음파 모터의 2상 입력 전원의 위상차를 조절하여 점성과 탄성을 임의로 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이러한 위상제어 시스템을 이용하여 위상차에 따른 점탄성 변화를 실측하였으며 그 결과를 이용하여 작업환경이나 대상에 따라 점성계수 및 탄성계수를 임의로 조절함으로써 어떠한 힘 센서나 기계적인 스프링 또는 댐퍼없이 유연한 동작을 실현할 수 있었다.

## 2. 초음파 모터의 구동 원리

세라믹 압전체는 전계를 가하면 분극 방향에 따라서 기계적인 신장과 수축이 전계와 직각 방향으로 일어난다는 것은 잘 알려져 있다. 공시 초음파 모터의 고정자(탄성체) 밑면의 한 상에 부착된 4쌍의 분극 압전체에 약 40(KHz)의 정현파 전압을 인가하면 원주상의 치 표면에 기계적 정재파(standing wave) 진동이 발생한다. 실제로는 A, B 두 상이 공간적으로 90°로 배치되어 있는 곳에 시간적 위상차가 90°인 고주파 전원을 동시에 공급했을 때, 각 상에서 발생한 정재파 진동은 단일 탄성체 내부에서 합성되면서 진행파(travelling wave)로 나타난다. 이 굴곡 진행파 진동에 의해 고정자 표면의 한 질점은 그림 1과 같은 타원 운동을 하고 이 질점 운동은 가압접촉된 회전자에 마찰회전력으로 나타난다. 즉, 압전 세라믹에 의해 물리적 진동이 일어 나고 이때 발생하는 탄성 응력이 모터의 구동력이 된다. 타원 궤적의 회전 방향은 진행파의 진행과 반대 방향이고 그 위에 놓인 회전자도 진행파의 진행 방향과 반대 방향으로 회전한다. 여기서 두 상의 전원의 위상을 바꿔서 진행파 방향을 바꿔주면 정역 운전이 가능하다.

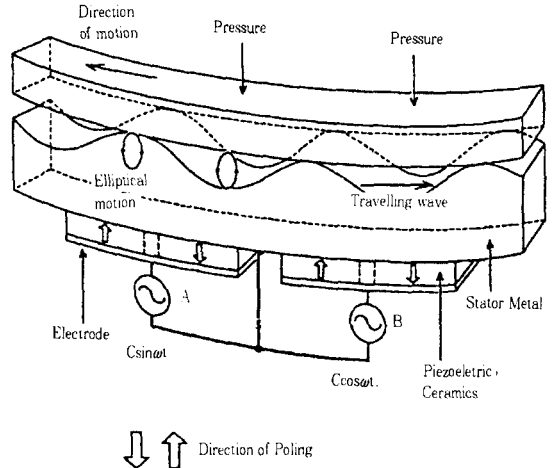


그림 1. 진행파형 초음파 모터의 동작원리  
Fig. 1. Principle of the travelling-wave Ultrasonic Motor

## 3. 위상차 제어 이론

초음파 모터의 제어 원리를 이론적으로 살펴보면 고정자 A상과 B상에 각각 정현파 전원을 인가했을 때 압전소자에 의해서 금속 탄성체에서 발생하는 기계적 진동파인 A상의 정재파  $y_A$ 는

$$y_A = \zeta_a \sin(nx) \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

으로 표현된다. 또 A상과 공간적으로 90° 관계인 B 상에 시간적으로  $\phi$ 인 정현파 전원을 공급하면 B 상에서 발생하는 정재파  $y_B$ 는

$$y_B = \zeta_b \sin(nx + \pi/2) \sin(\omega_0 t + \phi) = \zeta_b \cos(nx) \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (2)$$

단,  $\zeta_a, \zeta_b$ : 진폭,  $x$ : 원주상의 위치,  $n$ : 원주상의 정재파의 갯수(=9)

가 된다. A상과 B상의 정재파가 동일 금속 진동체에서 합성이 되므로 진행파  $y$ 가 발생한다.

$$y = \zeta_a \sin(nx) \sin(\omega t) + \zeta_b \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

이 진행파에 의한 기계적 진동은 탄성체의 두께  $T$ 의 중앙인 중성면을 지나고 그로부터  $T/2$  떨어진 탄성체 표면의 한 질점의 원주 방향의 변위  $X$ 와 축 방향의 변위  $Y$ 는 각각 식 (4)와 식 (5)와 같다.

$$X = x - \frac{T}{2} \sin\theta = x - \frac{T}{2} \tan\theta \quad (4)$$

$$Y = y + \frac{T}{2} \cos\theta \approx y + \frac{T}{2} \quad (5)$$

$$(\theta \approx 0, \cos\theta \approx 1, \sin\theta \approx \tan\theta = \theta)$$

이때  $\tan\theta$ 는  $\theta$ 가 0에 가까운 값이므로 식 (6)과 같다.

$$\tan\theta = \frac{\partial y}{\partial x}, \quad (r = \zeta_b / \zeta_a) \quad (6)$$

$$= n\zeta_a \{ \cos(nx) \sin(\omega t) - r \sin(nx) \sin(\omega t + \phi) \}$$

또한  $\phi$ 는 A상과 B상의 위상차 파라미터가 된다.

식 (3)과 식 (6)을 식 (4)와 식 (5)에 각각 대입하여 정리하면 식 (7)과 식 (8)이 된다.

$$\cos(nx) \sin(\omega t) - r \sin(nx) \sin(\omega t + \phi) = \frac{2(X-x)}{-nT\zeta_a} \quad (7)$$

$$\sin(nx) \sin(\omega t) + r \cos(nx) \sin(\omega t + \phi) = \frac{Y - \frac{T}{2}}{\zeta_a} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)은  $\sin(\omega t)$ ,  $\sin(\omega t + \phi)$ 에 대한 1차 연립 방정식이므로  $\sin(\omega t)$ 를 구하면 식 (9)가 되며

$$\sin(\omega t) = \frac{1}{\zeta_a} \left\{ \left( Y - \frac{T}{2} \right) \sin(nx) - \frac{2(X-x)}{nT} \cos(nx) \right\} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입 하기 위해  $\sin(\omega t + \phi)$ 를 전개하여  $\sin(\omega t)$ 항으로 정리하면 식 (8)은 식 (10)과 같이 된다.

$$\sin(\omega t)P - \frac{Y - \frac{T}{2}}{\zeta_a} = Q\sqrt{1 - \sin^2(\omega t)} \quad (10)$$

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

식 (10)의 양변을 제곱하여 정리하면 식 (11)이 된다.

$$\begin{aligned} & \sin^2(\omega t)(P^2 + Q^2) \\ & + \left( \frac{Y - \frac{T}{2}}{\zeta_a} \right)^2 - \frac{2P \sin(\omega t) \left( Y - \frac{T}{2} \right)}{\zeta_a} = Q^2 \quad (11) \end{aligned}$$

위의 식 (11)에 식 (9)를 대입하여

$$X-x, \quad Y - \frac{T}{2}, \quad (X-x)(Y - \frac{T}{2}) \text{ 항별로 정리하면}$$

(12)가 된다.

$$A(X-x)^2 + B(X-x)(Y - \frac{T}{2}) + C(Y - \frac{T}{2})^2 = 1 \quad (12)$$

$$\left[ \begin{aligned} A &= \left( \frac{2\cos(nx)}{nT\zeta_a Q} \right)^2 (P^2 + Q^2) \\ B &= \frac{1}{nT\zeta_a^2 Q^2} \cos(nx) \{ P - \sin(nx) \cdot (P^2 + Q^2) \} \\ C &= \left\{ \frac{P \sin(nx) - 1}{\zeta_a Q} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sin(nx)}{\zeta_a} \right\}^2 \end{aligned} \right]$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{(A+C - \sqrt{(A-C)^2 + B^2})}}$$

$$b = \sqrt{\frac{2}{(A-C + \sqrt{(A-C)^2 + B^2})}}$$

$$\theta_R = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B}{A-C}$$

위의 식 (12)는 중심이  $(x, \frac{T}{2})$  이고, 장축 a, 단축 b, 회전각  $\theta_R$ 가 있는 타원을 나타낸다.

위상차 제어는 식 (6)의 위상차 파라미터  $\phi$ 를 변시켜 식 (12) 타원의 장축, 단축, 그리고 회전각을 변화시키므로 초음파 모터의 속도와 토크를 제어하게 된다. 초음파 모터의 위상차에 의한 진행파의 3차원 시뮬레이션은 그림 2와 같고, 그림 3은 위상 변화에 따른 속도와 토크 특성을 나타낸 것이다.[6]

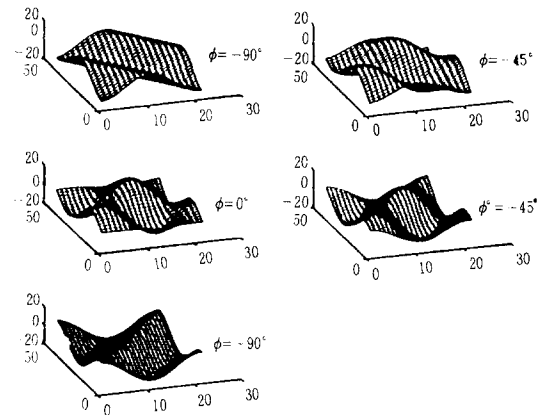


그림 2. 위상차 변화에 따른 3차원 진행파  
Fig. 2. 3 demention travelling wave with varing phase difference

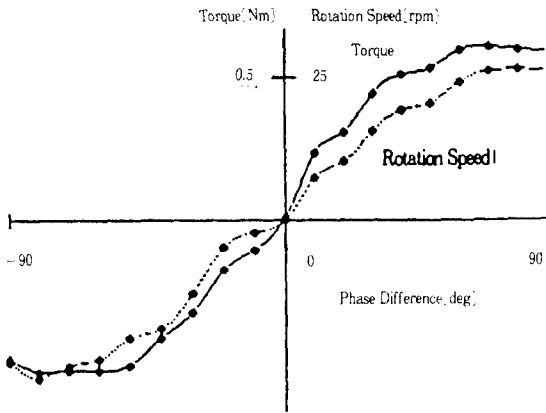
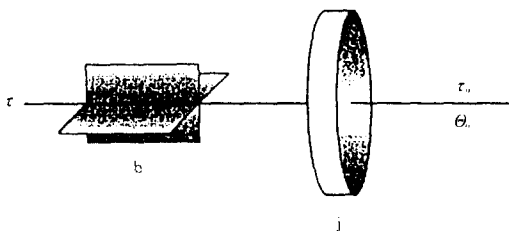


그림 3. 위상변화에 따른 속도와 토크 특성  
Fig. 3. Speed and Torque characteristics with varying phase difference

#### 4. 초음파 모터의 점탄성 제어

초음파 모터의 점탄성 제어는 출력 축의 각도 변화량에 따라서 2상 구동 전원의 위상차를 조절하는 것에 의해서 실현하였다. 그 이유는 초음파 모터의 출력 토크가 고정자 표면에서 발생하는 타원케적의 변화에 의존하고, 또 그 타원 케적은 2상 정현파의 위상차에 비례하여 변화되기 때문이다. 초음파 모터를 동역학적 모델로 표시하면 그림 4와 같다.



- $\tau_0$ : 모터 출력 토크
- $b$ : 내부 점성
- $j$ : 내부 관성
- $\tau$ : 모터 발생 토크
- $\theta_0$ : 출력각 각도
- $\theta$ : 목표 각도

그림 4. 초음파 모터의 동역학적 모델  
Fig. 4. Dynamic model of Ultrasonic Motor

그림 4에서 초음파 모터의 출력 토크  $\tau_0$ 를 수식으로 표현하면

$$\tau_0 = \tau - b\dot{\theta}_0 - j\ddot{\theta}_0 \quad (13)$$

이 된다.

여기서  $\tau_0$ 가 점탄성 특성을 가지려면 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\tau_0 = K(\theta_d - \theta_0) - B'\dot{\theta}_0 \quad (14)$$

여기서 내부 관성 능률은 매우 소량이기 때문에 무시할 수 있고 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 내부 토크  $\tau$ 를 구하면 식 (15)가 된다.

$$\begin{aligned} \tau &= K(\theta_d - \theta_0) - (B' - b)\dot{\theta}_0 \\ &= K(\theta_d - \theta_0) - B\dot{\theta}_0 \end{aligned} \quad (15)$$

단,  $B'$ : 외부점성계수,  $B$ : 등가점성계수

본 논문의 점탄성 제어는 능동적 제어방식으로 식 (15)의 탄성계수  $K$ 와 등가점성계수  $B$ 를 작업대상이나 환경에 따라 임의로 제어할 수 있다.

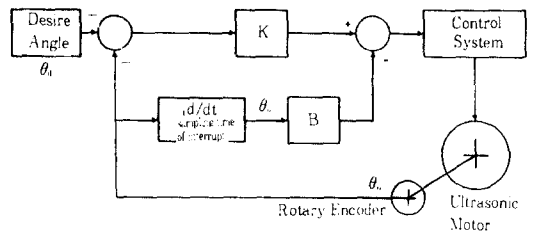


그림 5. 초음파 모터의 점탄성 제어계  
Fig. 5. Elastic and viscous control system of Ultrasonic Motor

탄성은 각변위에 비례하고 점성은 각속도에 비례하므로 각변위에 따른 위상차와 각속도에 따른 위상차를 얼마만큼 설정하느냐에 따라서 탄성 및 점성계수를 임의로 설정할 수 있기 때문에 점탄성 제어는 그림 5와 같이 간결한 PD제어계로 구성할 수 있다. 그림 6은 본 점탄성 제어 시스템 블록도이다.

초음파 모터 출력축에 부착된 로터리 엔코더에서 출력 각도  $\theta_0$ 를 검출하여 엔코더 카운터를 거쳐 컴퓨터에 입력되면 작업환경에 맞게 기 설정된  $K$ 값과  $B$ 값에 의하여 실시간 계산된 가변 위상 데이터가 PPI 보드를 거쳐 초음파 모터 구동 컨트롤러에 입력된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 내부 토크와 거의 선형적인 관계를 가지는 위상차를 초음파 모터의

제어신호로 입력하면 초음파 모터는 점탄성 특성을 가지는 출력을 생성하게 된다. 또한 각도의 변위만을 피드백 신호로 사용하여 토오크를 제어함으로써 점탄성 특성을 만들어 낼 수 있기 때문에 기존의 힘 제한 제어에 비해서 시스템을 간단히 구성할 수 있을 뿐 아니라 응답이 빠른 잇점이 있다.[7]~[8]

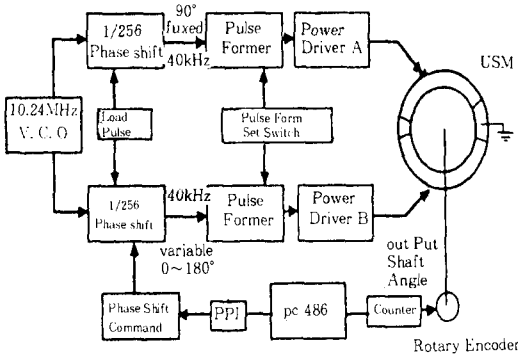


그림 6. 점탄성 제어 시스템의 블록도  
Fig. 6. Block diagram of elasticity and viscosity control system

## 5. 실험 및 고찰

### 5.1 탄성 측정

탄성 특성 측정은 토오크 듀서의 한 축을 고정시키고 나머지 한 축은 측정용 초음파 모터에 접속한다. 구동축은 초음파 모터, 위상차 컨트롤러, PPI 보드, 컴퓨터 순으로 접속하고, 측정축은 토오크듀

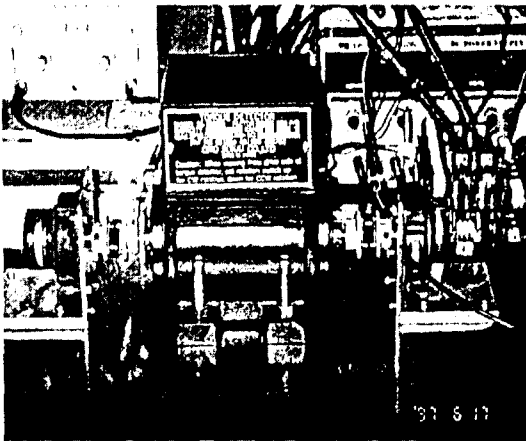


그림 7. 점탄성 특성 측정 시스템  
Fig. 7. Experimental system

서, 토오크 듀서 앰프, A/D 보드, 컴퓨터 순으로 접속한다. 그림 7은 점탄성 측정 시스템 사진이다. 측정전에 초음파 모터의 구동 주파수를 최적 구동 주파수(40[kHz])로 조정한다. 측정시에는 우선 등가 점성계수를 0으로 설정하고, 탄성계수를 임의로 결정한다. 본 실험에서는 탄성계수를 0.5[Nm/rad], 2.5[Nm/rad], 3.33[Nm/rad]으로 변화를 주면서 탄성특성을 관측하였다. 여기서 탄성계수는 변화된 각도에 따라서 자유롭게 설정할 수 있다. 다음으로 목표 각도  $\theta_0$ 의 값을 변화시키면서 이 때 발생한 토오크를 컴퓨터를 통해 기록한다. 그림 8은 목표각도와 현재 각도와의 차이( $\theta_0 - \theta$ )에 따른 출력 탄성 토오크를 측정된 결과이다. 탄성계수의 변화에 따라서 곡선의 기울기 변화는 본 제어 시스템으로 제어된 초음파 모터가 능동적으로 스프링과 같은 탄성을 발생하고 있음을 증명한다. 히스테리시스 특성을 보이는 것은 초음파 모터 고정자의 치 표면이 한쪽 방향으로 약간 기울어져있어서 정회전시와 역회전시에 토오크의 차이점과 다소의 계측오차를 포함하고 있다고 본다.

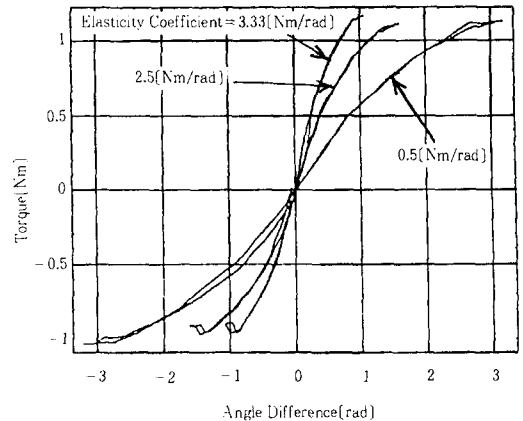


그림 8. 탄성 특성 곡선  
Fig. 8. Characteristic Curves of elasticity

### 5.2 점성 측정

점성 특성 측정시에 각속도는 엔코더를 통해 들어온 데이터를 4체배한 후, 제어 소프트웨어를 통해 각 변위를 미분해서 산출한다. 초음파 모터의 점성 토오크 측정은 최적 구동주파수로 조정하는 등의 측

정전의 일련의 조작은 탄성 측정시와 같다. 측정시에는 탄성계수를 0으로 설정하고, 점성계수를 임의로 정한다. 측정용 초음파 모터를 회전시키는데 속도가 구동용 초음파 모터의 최고 회전속도(약 120 [rpm])를 넘을 때까지 천천히 상승시킨 후 다시 이 속도로부터 천천히 속도를 떨어뜨려 정지시킨다. 또 역회전시도 이와 동일한 방법으로 측정한다. 이때 발생한 토크를 GP-IB 인터페이스 카드를 통해 컴퓨터에서 기록한다.

그림 9는 모터 출력축의 각속도에 대한 점성 토크를 측정한 결과이다. 그래프 상의 0.15[Nms/rad] 곡선은 소프트웨어로 증가점성계수 B가 0인 경우로 측정용 모터의 내부점성계수가 0.15[Nms/rad]임을 알 수 있다.

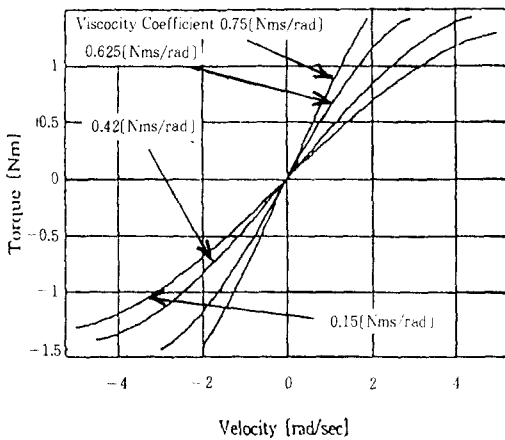


그림 9. 점성 특성 곡선  
Fig. 9. Characteristic Curves of viscosity

탄성 특성 곡선과 같이 점성 특성 곡선도 설정 점성 값이 커짐에 따라서 곡선의 기울기가 커지고 각각의 특성 곡선은 각속도에 따라서 거의 선형특성을 보이고 있다.

### 5.3 과도 응답 특성

그림 10은 외부점성계수를 0[Nms/rad]으로 고정시키고 탄성계수를 a는 5.0 [Nm/rad], b는 3.0 [Nm/rad], c는 1.0[Nm/rad]으로 설정한 경우이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 탄성계수를 크게 하면 진동수파수가 그에 따라서 높아짐을 알 수 있다.

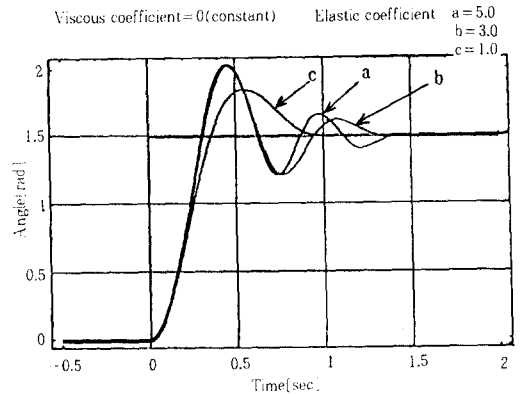


그림 10. 과도 응답 특성 (점성계수 일정)  
Fig. 10. Unit-step responses  
(Elastic coefficient is constant)

최초 목표각에 이르는 시간은 0.3[sec]로 응답이 빠름을 알 수 있다. 그림 11은 탄성계수를 1.8[Nm/rad]로 고정시키고 외부점성계수를 변화시켰을 때의 과도 응답 특성 곡선이다.

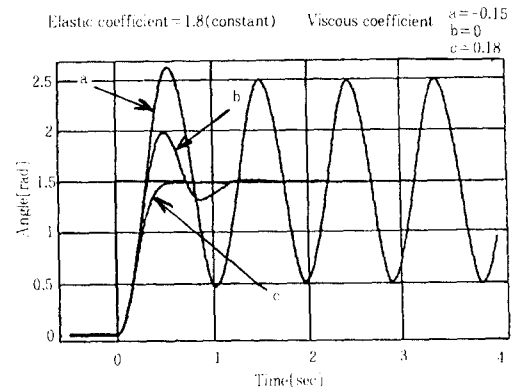


그림 11. 과도 응답 특성 (탄성계수 일정)  
Fig. 11. Unit-step responses  
(Elastic coefficient is constant)

a는 초음파 모터 자체가 갖고 있는 점성을 상쇄시켜 증가점성계수가 0인 경우이다. 극히 안정된 자유진동을 일으키고 있다. b는 외부점성계수를 0[Nms/rad]으로 한 경우로, 동일한 탄성계수에서 두 번의 탄성진동을 하고 c는 0.18[Nms/rad]인 경우로 진동없이 목표각에 이르고 있다.

최초 목표각에 이르는 시간은 다소 다르나 0.5 [sec]미만의 응답특성을 보였다.

이상 과도응답 특성에서 점탄성 계수를 자유로히

조절하여 제어계의 안정성을 여러 가지로 설정할 수 있음을 알 수 있었다.

## 6. 결론

초음파 모터를 자동화 설비용 소형 액츄에이터로 응용하기 위한 기초 연구의 일환으로 2상 정현파 입력신호의 위상차 제어이론을 밝혔고 힘 피드백 없이 각도 검출만으로 PD제어계를 구성하여 동역학적인 점탄성 제어를 실현하였다. 탄성계수가 큰 경우(3.33[Nm/rad])에서는 작은 각도 변화(1[rad])에도 큰 탄성력(1.20[Nm])을 발생했다. 점성은 탄성특성과 같이 양호한 선형성을 나타냈고, 점성계수가 큰 경우(0.75[Nms/rad])에는 작은 각속도(2.00[rad/sec])에도 큰 점성력(1.38[Nm])이 발생했다.

목표각도를 일정히 유지하고 출력축을 외부에서 인위적으로 회전시키면 스프링과 같은 탄성력이 발생 목표각에 도달하고 목표각을 수정하면 각도 편차에 비례하는 회전 토크를 발생 새로운 목표각으로 이동한다. 그리고 발생한 탄성과 점성은 촉감을 통해서도 충분히 느껴졌다. 따라서 초음파 모터를 사용하여 위상차 조절에 의하여 점탄성 제어를 행할 경우 안정된 유연성을 갖는 자동화 설비용 소형 액츄에이터로 이용할 수 있음을 확인하였다.

이 논문은 1994년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참고 문헌

- [1] H. V. Barth, Ultrasonic Driven Motor IBM Technical Disclosure Bulletin, vol. 16, pp.2263, 1973.
- [2] T. Hatsuzawa, K. Toyoda and Y. Tanimura, "Speed Control Characteristics and Digital Servo System of Circular Traveling Wave Motor," Rev. Sci. Instrum, vol. 57, pp.2886~2890, 1986.
- [3] T. Sashida, T. Kenjo : An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford, Clarendon Press, 1993.
- [4] 秋山勇治, "屈曲波振動形超音波モータ各種速度制御方式の検討, 電氣學會研究會資料, RM-89-11, 1989.
- [5] 김영동, 오금곤, "전압차 제어에 의한 초음파 모터의 속도와 토크 특성", 한국조명·전기설비학회

지, vol. 10, No. 6, 1996.

- [6] 김영동, 오금곤, "초음파 모터의 위상차 제어", 한국조명·전기설비학회지, vol. 10, No. 1, 1996.
- [7] N. Hogan, "Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control," Proc. of IEEE int. Conf. Robotics and Information Vol.2, pp.1047~1054, 1987.
- [8] A. Kato, K. Ito, and M. Ito, "Adjustable Compliant Motion of Ultrasonic Motor," Journal of Robotics and Mechatronics Vol. 5, No. 5, 1993.

## ◇ 著 者 紹 介 ◇



우 수 몽(禹秀容)

1944년 7월 11일생. 1971년 전남대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1983년 조선대학교 산업대학원 졸업(석사). 1994년 8월 조선대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



이 권 현(李權鉉)

1950년 4월 24일생. 1985년 5월 서독 Dusiburg대학교 대학원 박사. 1985년 9월~1986년 5월 현대 중전기(주) 기술연구소 책임 연구원. 1986년 6월~1987년 2월 삼성전기(주) 종합기술연구소 연구 부장. 1990년 6월~1991년 9월 서독 Aschen대학교 통신기기연구소 객원교수. 1994년 7월~1994년 8월 일본 Musashi공업대 전기기기연구소 객원교수. 1987년 3월~현재 동신대학교 전기전자공학과 교수.



정 헌 상(鄭憲相)

1939년 8월 31일생. 1964년 조선대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1968년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 숭실대학교 대학원 전기공학과 (박사). 1982년~1983년 미국 San Diego state Univ. 객원교수 1992년~1993년 조선대학교 학생처장. 1996.2~1996.8 미국 Univ. of Delaware 객원교수.

오 금 곤(吳金坤) : 조명전기설비학회지 Vol.11, No.1, p.74 참조.

김 영 동(金永炯) : 조명전기설비학회지 Vol.11, No.1, p.74 참조.