

## 이단 압전 구동기를 가진 이중 구동기의 진동 및 정밀위치제어

이용권\* · 조원익\* · 양현석\*\* · 박영필\*\*

### Vibration and precision position control of dual actuators with parallel type piezoactuator

Yong-Gwon Lee, Won-Ik Cho, Hyun-Suk Yang, Young-Pil Park

**Key Words:** Dual Actuator, Voice Coil Motor, Piezoceramic, Parallel Type Actuator, Positive Position Feedback, Self-Sensing Actuator, PID Control, Digital Signal Processor

#### Abstract

A new positioning mechanism with parallel type actuator using piezoelectric material and with dual type actuators using voice coil motor (VCM) and piezoactuator is proposed for optical disk drive or near-field recording type drive, and high speed position and vibration control are investigated. Parallel type bimorph piezoactuator is used as a fine motion actuator with self-sensing technique, which allows a piezoelectric material to concurrently sense and actuate in a closed loop frame work, and positive position feedback control algorithm is adopted to further control residual vibration. For positioning control of VCM, PID control algorithm is adopted.

#### 1. 서 론

현재 사용되는 광디스크는 월등한 기록용량과 기록보존성(반영구적 보존)을 기반으로 멀티미디어 기기로서 각광받고 있지만, 데이터를 기록하는 속도가 하드디스크의 액세스 시간에 비해 10~15배 느리기 때문에 현재로써는 컴퓨터의 외부 기억장치로서 자기디스크를 전면 대체하기는 어렵다. 이러한 주된 이유는 광디스크의 정보 검출부의 구조적인 문제로, 현재 사용되고 있는 락·피니언 방식은 전달 효율은 좋으나 부품수가 많고 고속에서 소음과 진동이 크므로 고속 이송에 한계가 있다. 이를 개선하여 고속 이송이 가능한 이송기구를 구현하기 위해서는 구조적 변경

뿐만 아니라 이송부의 경량화, 작동력의 증가가 효과적이지만, 이는 제어 시작시와 종료시의 진동을 야기할 수 있다. 이러한 진동은 소음을 발생시키고, 정착시간을 증가시키며 정확도를 떨어뜨리므로, 잔류진동을 억제할 수 있는 고속, 고성능의 소형 작동기가 개발되어야 하며, 그러한 작동기로서 압전체는 좋은 특성을 가진다.

최근에 유연한 구조물의 진동을 제어하는 구동기로 많이 사용되고 있는 압전체는 세라믹물질의 역압전효과에 의하여 전기적 신호를 직접 기계적인 힘 또는 운동으로 바꾸어 주고, 그 반대로 압전효과에 의하여 기계적인 에너지를 전기에너지로 변환시키는 전기-기계적 결합(electro-mechanical coupling)특성이 우수하므로 진동제어나 위치제어를 위한 센서 및 구동기로 적합한 물질이다. 또한 질량과 부피가 작고 다양한 모양으로 만들 수 있으며, 충분한 대역폭(3kHz~5kHz)을 갖고 있기 때문에 광픽업 이송기구의 미동구동기로서 매우 적합하다.

본 연구에서는 광디스크에 일반적으로 사용되

\* 연세대학교 기계공학과 대학원, CISD

\*\* 연세대학교 기계공학과, CISD

는 랙·피니언 방식 이송기구의 단점인 낮은 접근시간을 개선하는 방법으로, 조동구동기로는 VCM을 미동구동기로는 이단 압전구동기를 사용한 고속이송기구를 제안한다. VCM의 위치제어에는 PID제어방법을 사용하였으며, 압전체는 자기측정·자기구동(Self-Sensing Actuator)방식으로 구동과 동시에 잔류진동에 의한 특정 공진주파수를 효과적으로 제진할 수 있는 PPF제어방법을 사용하였다.

## 2. 계의 모델링

본 연구에서 제안한 이중 구동기의 형태는 Fig. 1에서처럼 압전체 두 개를 평행으로 제작하고, 그 끝에 첨단질량을 부착시켜 VCM에 붙인 구조로 제작하였다.

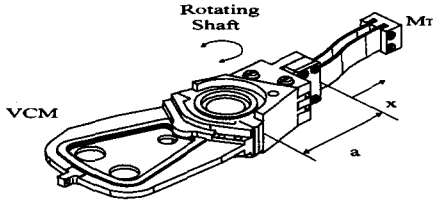


Fig. 1 Rotating positioning mechanism

여기서,  $a(23.10 \text{ mm})$ 와  $m$ 은 각각 허브의 길이와 압전체의 단위길이당 질량이고,  $l_T(22 \text{ mm})$ 와  $M_T(0.39 \text{ g})$ 는 압전체의 길이 및 첨단질량이며,  $w(x, t)$ 는 상대 회전 좌표축에 대한 보의 횡방향 변위이다.

### 2.1 첨단질량을 가진 유연한 보의 모델링

압전체를 사용한 미동구동기의 이송 메커니즘은 Fig. 2와 같이 압전체를 두 개의 부분으로 나누어 각각 다른 전극의 전압을 걸어주면 인장, 압축이 압전체에 교번되어 나타나므로 압전체 전체가 'S'자 형태로 변형을 일으킨다. 이것은 압전체 끝단의 미러부분에 순수한 병진운동만을 일으켜 끝단이 회전하는 것(tilting)을 방지할 수 있다.

또한, 압전체를 굽힘강성계수가  $EI$ 이고, 슬라이딩 경계조건, 첨단질량  $M_T$ 를 가진 유연한 구

조의 Euler-Bernoulli보로 가정하여 모델링하였다.

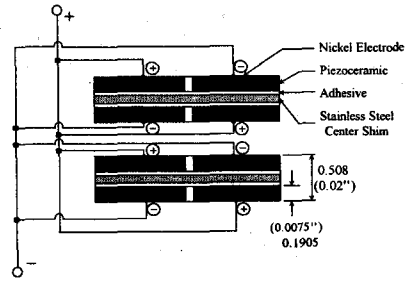


Fig. 2 Structure of parallel Piezoactuator

원심력, 외팔보의  $x$ 축 방향 및 회전방향 변위와 회전시 발생하는 코리올리(coriolis)영향을 무시할 수 있다고 가정하면, 유연한 외팔보의 횡방향 진동에 대한 운동방정식과 경계조건은 Hamilton의 원리에 식(1)과 같이 유도될 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + [m + M_T \delta(x - l_T)] \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = -[m + M_T \delta(x - l_T)](x + a) \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial t^2} + M_0(t) \left\{ -\delta'(x - 0) + \delta' \left( x - \frac{9}{19} l \right) - \delta' \left( x - \frac{10}{19} l \right) + \delta'(x - l) \right\} \quad (1)$$

여기서,  $M_0$ 는 압전체에 가하는 전압에 비례하여 발생하는 모멘트이고, 슬라이딩 경계조건은 식(2)와 같다.

$$w(x, t)|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \\ EI(l) \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^3} \Big|_{x=l} - M_T \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \Big|_{x=l} = 0 \quad (2)$$

유연한 보의 변위  $w(x, t)$ 는 Galerkin의 모드 합성법을 적용하여 식(3)과 같이  $n$ 개의 모드 성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) q_j(t) \quad (3)$$

여기서  $\phi_j(x)$ 는 경계조건을 만족하는  $j$ 번째

모드에 대한 형상함수이고,  $q_j(t)$ 는 일반화된 좌표이다. 운동방정식을 변수분리하고, 고유함수의 성질을 이용하면, 다음의 식(4)를 얻을 수 있다.

$$M_B \ddot{q}(t) + K_B q(t) = f_m \ddot{\theta}(t) + f_p M_o(t) \quad (4)$$

여기서, 각 항은 다음 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} M_{Bij} &= \int_0^l \phi_i(x) \{m + M_T \delta(x-l)\} \phi_j(x) dx \\ &= \delta_{ij} + M_T \phi_i(l) \phi_j(l) \\ K_{Bij} &= \int_0^l \phi_i(x) EI \phi_j''''(x) dx = \delta_{ij} \omega_j^2 \\ f_{mi} &= \int_0^l \phi_i(x) (m + M_{tip} \delta(x-l)) (x+a) dx \\ &= \frac{2l\sqrt{ml}}{\lambda_j^2} + \frac{2a\sigma_j\sqrt{ml}}{\lambda_j^2} + M_{tip}(l+a)\phi_i(l) \\ f_{pi} &= \int_0^l \phi_i(x) \left\{ -\delta'(x-0) + \delta' \left( x - \frac{9}{19} l \right) \right. \\ &\quad \left. - \delta' \left( x - \frac{10}{19} l \right) + \delta'(x-l) \right\} dx \\ &= -\phi_i' \left( \frac{9}{19} l \right) + \phi_i' \left( \frac{10}{19} l \right) - \phi_i'(l) \end{aligned} \quad (5)$$

## 2.2 첨단질량을 가진 유연한 보의 모드형상

주어진 시스템에 대하여 모드해석을 행하면, 시스템의 동적인 거동을 예측할 수 있고, 실제 시스템에서 야기될 수 있는 문제점들을 미리 방지할 수 있다. Fig. 3은 첨단질량을 가진 유연한 보에 대해 슬라이딩 경계조건을 적용하여 모드해석을 행한 결과이며, 관심있는 몇 개의 저차모드만을 관찰하였다. 실험결과 1차공진모드는 427 Hz에서, 2차는 7.5 kHz에서 나타났다.

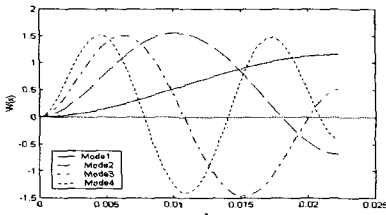


Fig. 3 Mode shape of piezoactuator with tip mass

## 2.3 구동부 회전체의 모델링

VCM(voice coil motor)과 E-Block, 그리고 압전체를 고정하는 허브부분을 강체로 생각하여 식(6)과 같이 구동부의 운동방정식을 유도한다.

$$J\ddot{\theta} = T_b + K_v V_v(t), \quad K_v = K_i K_t \quad (6)$$

여기서,  $K_t$ 는 VCM의 토크상수이고,  $K_i$ 는 전류앰프의 게인이다.  $T_b$ 는 유연한 구조 즉, 압전체의 관성으로 인한 역토크이다.

## 3. PPF 제어를 이용한 압전체의 진동제어

### 3.1 SSA 브릿지 회로

압전체를 사용하여 센서 및 구동기로 동시에 사용할 수 있는 자기측정, 자기구동 (Self-Sensing Actuator) 방식은 유연한 구조물의 진동제어 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 즉, 센서와 구동기가 실제로 한 곳에 위치하여 따로 떨어진 압전체 센서와 구동기로는 얻을 수 없는 Collocated control에 관계되는 많은 바람직한 성질을 가진다.

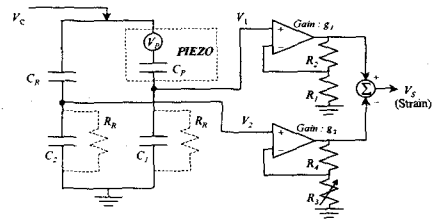


Fig. 4 Strain Sensing Bridge Circuit

이러한 SSA의 핵심은 Fig. 4에서와 같은 전기적 브릿지 회로(Electric Bridge Circuit)이다. 압전체가 SSA로써 사용될 때 2개의 전압들, 즉 압전 효과에 의한 센서 전압과 역압전 효과에 의한 구동 전압은 압전체에서 혼합되므로 직접 센서 전압을 측정하는 것은 불가능하다. 그러므로, 4개의 구성요소 중 하나를 압전체로 사용하여 브릿지 회로를 구성하고, 이 브릿지 회로를 잘 맞추면 구조물의 스트레인을 나타내는 센서 전압을 뽑아낼 수 있다.

SSA 브리지회로의 게인은 동적신호분석기 (HP3562A)를 이용하여 압전체의 1차 고유진동수 근방에서 SSA브리지회로로 측정된 변형률 신호와 LDV(Laser Doppler Vibrometer)로 측정된 위치 신호와의 위상차가 없도록 조정하였다.

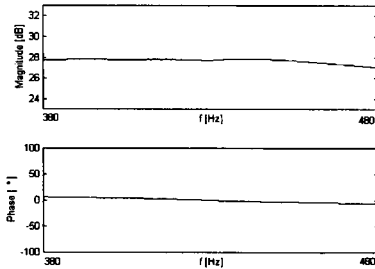


Fig .5 Phase and Voltage Ratio for SSA Bridge Circuit

Fig .5에는 이러한 방법으로 게인이 조정된 SSA회로의 출력전압과 LDV의 출력전압사이의 전압비와 위상차를 나타내었다. 그 결과 1차 공진 부근인 430 Hz 근방에서 위상차와 전압비거의 변화가 없음을 보여주고 있다.

### 3.2 PPF 제어기

압전체 끝단의 제진방법으로 PPF(Positive Position Feedback)방법을 사용하였는데, 이는 위치신호를 측정하여 진동을 억제하는 방법이다.

외부 가진력의 진동수가 구조물의 고유진동수와 같아지는 경우에는 적은 힘으로도 구조물이 손상될 수 있는데, PPF 제어는 일반 변위를 계측하여 이러한 진동을 억제하는 방법이며, 감쇠를 증가시키고자 하는 주파수 영역을 확실하게 제어할 수 있어, 특정한 고유진동모드만을 선택하여 제어할 수 있다.

본 연구에서 사용된 압전체의 경우 압전체의 대역폭에서 별 영향력이 없는곳에 2차공진점이 나타나기 때문에 1차공진점만을 고려한 1번째 피팅을 선택하여 Fig .6과 같이 모델링하였다.

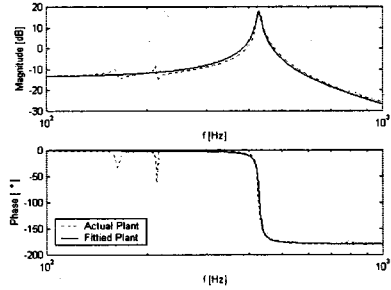


Fig .6 Frequency response & modeling of plant

압전체는 식(7)과 같이 1자유도 2차 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\eta} + 2\zeta_p \omega_{np} \dot{\eta} + \omega_{np}^2 \eta = g_p \omega_{np}^2 \xi \quad (7)$$

여기서,  $\eta$ 는 구조물의 모달좌표계이고,  $\zeta_p$ 와  $\omega_{np}$ 는 구조물의 점성감쇠계수와 구조물의 고유진동수를 나타낸다.  $g_p$ 는 게인이며,  $\xi$ 는 PPF 제어기의 출력을 나타낸다. PPF 제어기의 운동방정식은 플랜트의 운동방정식과 비슷한 형태로 식(8)과 같이 주어진다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta_f \omega_f \dot{\xi} + \omega_f^2 \xi = g_f \omega_f^2 \eta \quad (8)$$

여기서,  $g_f$ 와  $\zeta_f$ 는 각각 PPF 제어기의 게인과 점성감쇠계수를 나타낸다. 위 식의 형태를 살펴보면, 저주파 통과 필터와 같은 형태로 됨을 알 수 있다. 제어기의 고유진동수  $\omega_f$ 를 압전체의 1차 공진 주파수  $\omega_{np}$ 로 맞추고 감쇠  $\zeta_f$ 를 알맞게 맞추면 압전체의 진동을 효과적으로 억제할 수 있다.

저주파통과필터는 코너주파수에서 위상이 90도 바뀌므로, 구조물의 감쇠에 의한 영향이 변위와의 90도 위상차로 나타나는 것을 고려한다면 코너주파수를 제어하고자하는 구조물의 고유진동수에 일치시킬 경우에 감쇠가 인위적으로 증가된 효과를 얻을 수 있다.

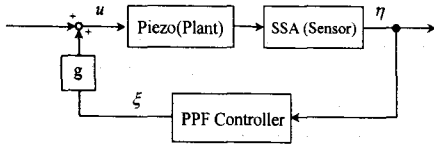


Fig. 7 PPF Controller Block Diagram

Fig. 7은 PPF 제어기와 SSA 회로를 적용한 시스템의 블록다이어그램을 표현한 것이다.

#### 4. PID제어기를 이용한 VCM의 위치제어

VCM의 위치제어에는 PID 제어기를 사용하였는데, PID 제어기의 설계에서는 세 개의 매개변수가 조정되어야 하므로, 근계적과 Bode설계기법은 대개 직접 사용되지 않는다. 또한, 간단한 안정성 분석에 기초하는 Ziegler-Nichols 기법은 특정한 페루프 거동을 달성하도록 PID 제어기를 설계하지는 못한다. 이에 반해 해석적 기법은 정상상태 오차와 성능 범위가 주어지면, PID 매개변수를 결정하기 위하여 개발되어질 수 있다. PID 제어 시스템의 루프 이득은 식(9)와 같이 주어진다.

$$\left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) G(s) \quad (9)$$

해석적인 방법은 주어진 정상상태오차 명세로부터  $K_i$ 를 찾고, 오버슈트나 정착시간과 같은 시간 영역 명세로부터 요구되는 페루프 감쇠비와 고유주파수를 결정한다.  $\omega = \omega_{gc}$ 일 때, 보상된 시스템은 1의 이득을 갖고,  $K_i$ 가 현재 알려져 있다는 것을 기억하면, 다음 식(10)으로부터  $K_p$ ,  $K_d$ 을 구할 수 있다.

$$\left( K_p + j\omega_{gc} K_d + \frac{K_i}{j\omega_{gc}} \right) G(j\omega_{gc}) = 1 e^{j\theta(\omega_{gc})} \quad (10)$$

#### 5. 실험 및 결과

본 연구에서는 압전체에 대한 PPF 제어나 VCM에 대한 PID 제어를 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 구현하였다.

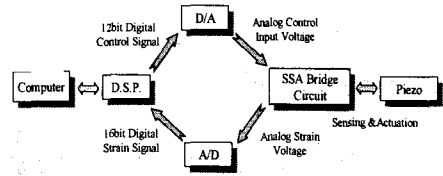
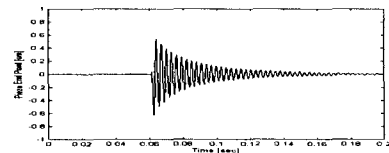


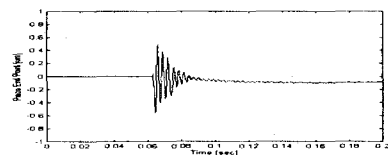
Fig. 8 Schematic diagram of piezo control

Fig. 8은 압전체 제어의 개략도이다. 압전체의 제어에는 SSA 브릿지 회로가 사용된다. 이미 설계된 PPF 제어기를 디지털 방식으로 구현하여, Matlab의 Simulink를 통해 DSP에 로딩하고, DSP에서 계산된 디지털 제어 입력을 자체적으로 D/A로 내보내 주면, D/A에서는 그에 해당하는 전압을 SSA 브릿지 회로에 보내주고, SSA 브릿지 회로 내에서 그 전압으로 압전체를 구동한다.

동시에 SSA 브릿지 회로는 압전체의 스트레인 신호를 내보내는데, 이 아날로그 전압 신호는 A/D에서 디지털 신호로 바뀌어 다시 DSP로 입력되게 되는 것이다.



(a) PPF 제어전



(b) PPF 제어후

Fig. 9 Vibration control of piezoactuator using DSP

Fig. 9는 위에서 설계된 PPF제어기를 사용해서 DSP를 수행하여 얻은 결과이다. 여기서 입력은 임팩트를 가했으며, 그 결과 제어를 행한 것이 안한 것 보다 약 4배정도 빠르게 안정화되는 것을 볼 수 있다.

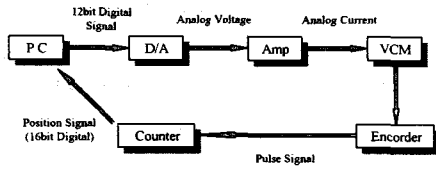


Fig .10 Schematic diagram of VCM control

Fig .10은 VCM 제어의 개략도이다. VCM은 VCM 전류앰프로 연결되어 있으며, 앰프는 다시 D/A를 거쳐 DSP와 연결되어 있다. VCM의 회전축상에는 엔코더가 연결되어 있어서 VCM의 회전각도에 대한 신호를 내보내고, 카운터를 거쳐 DSP로 들어간다. DSP에서 D/A로 디지털 제어입력 신호를 보내면, D/A에서 디지털 신호에 해당하는 아날로그 신호로 변환하여 전류 앰프로 보낸다. 전류앰프에서는 들어온 전압 신호에 게인을 곱하여 전류신호를 내보내고, 이 전류에 의해 VCM이 구동된다.

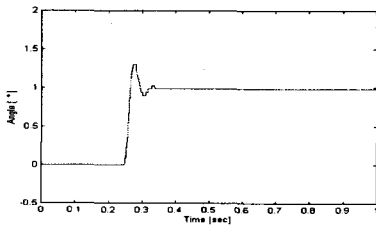


Fig .11 Position control of VCM using DSP

Fig .11은 PID제어기를 사용해서 DSP를 수행하여 얻은 결과이다.

## 6. 결론

광디스크의 랙 피니언 방식의 단점인 늦은 접근시간을 개선시킨 VCM과 끝단의 순수 병진운동만을 유도시킨 이단 평행 압전체를 사용하여 고속 위치 및 진동제어 실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 압전체 전체가 'S'자 형태로 움직이도록 하여서 압전체 끝단인 미러부분에 순수한 병진운동만을 일으켜 끝단이 회전운동(tilting)을 줄이는 메

커니즘을 제안하였다.

2. VCM에는 PID 제어를 사용하였고, 압전체는 자기구동과 자기측정을 동시에 할 수 있는 SSA 방식으로 구동을 하면서 PPF 제어 방법을 사용하여 특정 주파수의 감쇠를 효과적으로 행할 수 있었다.

3. 이중 구동기를 구성하여 고속 위치 제어와 진동제어를 할 수 있었다.

향후 지속적인 연구를 통하여 차세대 정보저장 기기의 이중구동기로써 사용할수있다는 가능성을 확인하였다.

## 후기

이 연구는 (1998)년 한국학술진흥재단의 학술 연구비에 의하여 지원되었음 (과제번호: 1998-018-E00108)

## 참고문헌

- (1) J. Dosch, D Inman and E. Garcia, "A Self Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control", J. of Intell. Mater. and Struc. Vol. 3, pp. 166-185, 1992
- (2) K. Oshima, T. Takigami and Y. Hayakawa, "Robust Vibration Control of a Cantilever Beam Using Self-Sensing Actuator", JSME International J. Series C, Vol. 40, No. 4, pp.681-687, 1997
- (3) Kaiji Sato, Akira Shimokohbe, Yukio Chida and Shin-ichi Wada, "An Active Parallel Leaf Spring Mechanism", JSPE, pp. 115-120, 1992
- (4) Bahram Shahian and Micheael Hassul, Control system design using matlab, Prentice-Hall, 1995
- (5) 안승홍, 조원익, 양현석, 박영필, "이단 압전 구동기를 이용한 Pick-up의 정밀 제어", 한국정밀 공학회, 추계학술대회논문집, pp106-109, 1999
- (6) 박형욱, "광픽업 이송용 이중구동 압전스윙암의 위치제어", Yonsei University, 1998