

고속/고정밀 위치 제어를 위한 이중 구동기를 이용한 회전 이송기구의 진동 제어

이용권*, 조원익*, 양현석**, 박영필**

Vibration Control of the Rotation Position Mechanism with Dual Actuator for High Precision Control

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

ABSTRACT

In this paper, a novel dual-type positioning mechanism using a voice coil motor(VCM) and a piezoelectric actuator is proposed for optical disk drive or near-field recording type drive. The VCM is used for a coarse motion actuator and the piezoelectric actuator, "S" configuration deflection motion when voltage applied, is used for a fine motion actuator with self-sensing technique, which allows it to sense and actuate simultaneously in a closed loop frame work.

When the VCM rotates and stops, a position feedback control algorithm is adopted to further control residu vibration. The performance of the control scheme is confirmed through simulations and experiments.

Key Words : Dual Actuator(이중 구동기), Voice Coil Motor(VCM), Piezoceramic(압전 세라믹), Optical Disk Driver(광디스크 드라이버), Positive Position Feedback(PPF), Self-Sensing Actuator(SSA)

1. 서론

현재 사용되는 광디스크는 월등한 기록용량과 기록보존성(반영구적 보존)을 기반으로 멀티미디어 기기로서 각광받고 있지만, 데이터를 기록하는 속도가 하드디스크의 액세스 시간에 비해 10~15 배 느리기 때문에 현재로써는 컴퓨터의 외부기억 장치로서 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 뿐 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 개발되어 져야 하며, 그러한 작동기로서 압전체는 좋은 특성을 가진다.

최근에 유연한 구조물의 진동을 제어하는 구동

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과
정보저장기기연구센터

은 특성을 가진다.

최근에 유연한 구조물의 진동을 제어하는 구동기로 많이 사용되고 있는 압전체는 전기-기계적 결합(electro-mechanical coupling)특성이 우수하므로 진동제어나 위치제어를 위한 센서 및 구동기로 적합한 물질이다. Dosch와 Inman은 압전체를 이용하여 외팔보의 진동을 억제하기도 하였다.^[1] Kaiji Sato는 압전 소자를 이용하여 능동 평행 스프링의 형태를 제안하여 정밀위치제어가 가능함을 보였다.^[3]

본 연구에서는 광디스크에 일반적으로 사용되는 랙·피니언 방식 이송기구의 단점인 늦은 접근 시간을 개선하는 방법으로, 조동구동기로는 VCM을 미동구동기로는 이단 압전구동기를 사용한 고속이송기구를 제안한다. 본 논문에서는 VCM은 위치제어가 가능하다고 보고, 압전체를 이용한 미동 구동기에 대해서만 자기측정·자기구동(Self-Sensing Actuator)방식으로 구동과 동시에 잔류진동에 의한 특정 공진주파수를 효과적으로 제진할 수 있는 PPF제어방법을 사용하였다.^[1]

2. 계의 모델링

2.1 전체 플랜트의 구동 메카니즘

본 연구에서 제안한 이중 구동기의 형태는 Fig. 1에서처럼 압전체 두 개를 평행으로 제작하고, 그 끝에 끝단질량을 부착시켜 VCM에 붙인 구조로 제작하였다. 이것은 조동구동기로는 VCM을 미동구동기로는 이단 압전구동기를 사용한 고속이송기구의 형태를 취한다.^[3] 압전체는 두 개를 평행하게 부착하였는데 이는 단일 외팔보 형태의 압전체를 사용할 때에 비해 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, 상대적으로 강성이 커져 고속 회전시 발생하는 잔류진동에 의한 피로 파괴를 줄일 수 있다. 실제, 강체의 경우처럼 강성이 아주 커지면 트래킹 목적으로는 사용할 수 없다. 그래서 트래킹하려는 스트로크 만큼의 강성이 필요하다. 둘째, 이중 평행 압전체에 'S' 형태의 굽힘을 유발하여 외팔보 형태의 굽힘에 비해 곡률 반경이 커져서 끝단 질량부가 병진운동을 일으킬 수 있다. 셋째, 광디스크에서는 크게 픽업부가 리니어 구동방식과 회전 암방식이 있는데, 회전 암 방식에서 미리부

분이 순수 병진만이 존재하고 회전이 없으므로 분리 레이저 광원을 사용할 경우, 회전암에 잔류 진동이 있거나 트래킹 시에도 광경로에 영향을 주지 않는다. 네째, 2차 공진점의 위치가 높아진다.

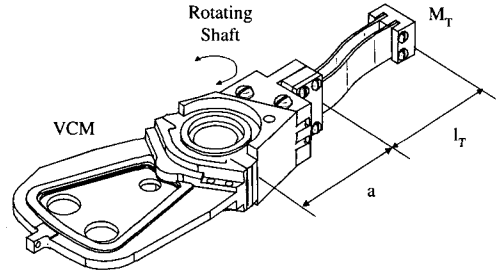


Fig. 1 Rotating mechanism for positioning control

Fig. 1 에서 피에조의 길이 $a(23.10 \text{ mm})$ 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 끝단질량이며, $w(x, t)$ 는 상대 회전 좌표축에 대한 보의 횡방향 변위이다

2.2 끝단질량을 가진 유연한 보의 모델링

미동 구동기는 실험에 의해 'S'의 형태로 변형하는 것을 확인하였으며(Fig. 11), 미동 구동기를 끝단질량을 가진 유연한 보에 대해 슬라이딩 경계 조건을 적용하여 모드해석을 행하면 Fig. 2와 같이 시뮬레이션 해볼 수 있다. 시뮬레이션 결과 1차 공진모드는 469 Hz에서, 2차는 7.5 kHz에서 나타났다.

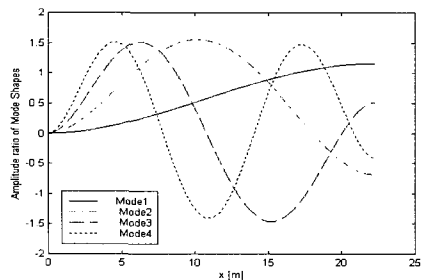


Fig. 2 Mode shapes of piezoactuator with tip mass

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 제어에 관계되는 많은 바람직한 성질을 가진다.^{[1],[2]}

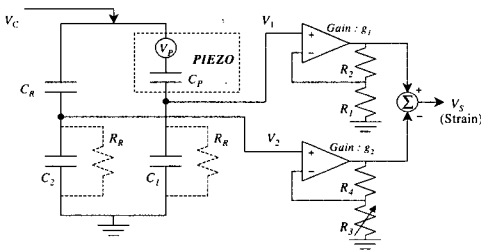


Fig. 3 Self-Sensing Actuator(SSA) bridge circuit

이러한 SSA의 핵심은 Fig. 3에서와 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 브릿지회로의 계인은 동적신호분석기(HP3562A)를 이용하여 압전체의 1차 고유진동수 근방에서 SSA브릿지회로로 측정된 변형률 신호와 LDV(Laser Doppler Vibrometer)로 측정된 위치신호와의 위상차가 없도록 조정하였다. 위상차가 없도록 조정하는 이유는 SSA 브릿지 회로를 통해 계측된 변위와 실제 LDV를 측정된 변위가 서로 같도록하여 조정하면, SSA 브릿지 회로를 이용한 변위신호를 사용해도 실제 측정되는 것과 같은 효과를 갖음을 증명하기 위해서 이다.

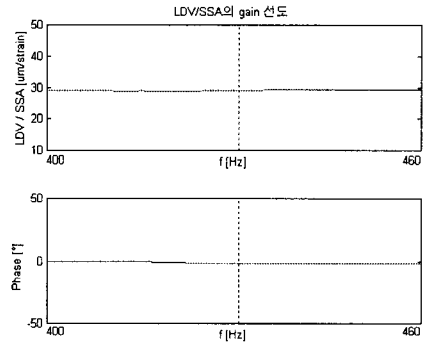


Fig. 4 Voltage ratio and phase for SSA

Fig. 4에서 점선은 430Hz의 1차 공진점을 나타낸 것이고 이러한 방법으로 계인이 조정된 SSA회로의 출력전압과 LDV의 출력전압사이의 전압비와 위상차를 나타내었다. 그 결과 1차 공진 부근인 430 Hz 근방에서 위상차와 전압비가 거의 변화가 없음을 보여주고 있다.

3.2 PPF 제어기

본 연구에서 사용된 압전체의 경우 압전체의 대역폭에서 별 영향력이 없는곳에 2차공진점이 나타나기 때문에 1차 공진점만을 고려한 1번째 피딩을 선택하여 Fig. 5과 같이 모델링하였다.

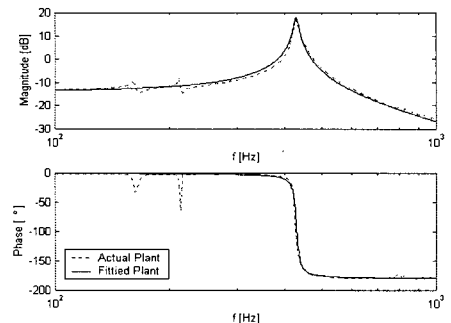


Fig. 5 Frequency response & modeling for plant

압전체는 식(1)과 같이 1자유도 2차 미분방정식으로 나타낼 수 있으며, 이를 Laplace 변환을 이용하여 전달함수 형태로 나타낸 것이 식(2)이다.

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega\dot{\eta} + \omega^2\eta = g\omega^2\xi \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (2)$$

여기서, η 는 구조물의 모달 좌표계이고, ζ 와 ω 는 구조물의 점성감쇠계수와 구조물의 고유진동수를 나타낸다. g 는 계인이며, ξ 는 PPF 제어기의 출력을 나타낸다. 압전체 끝단의 제진 방법으로 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 측정하여 이러한 진동을 억제하는 방법이며, 감쇠를 증가시키고자 하는 주파수 영역을 확실하게 제어할 수 있어, 특정한 고유진동모드만을 선택하여 제어할 수 있다. PPF 제어기의 운동방정식은 플랜트의 운동방정식과 비슷한 형태로 식(3)과 같이 주어진다. 식(4)은 식(3)를 Laplace 변환을 이용하여 전달함수 형태로 전환한 것이다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta_f\omega_f\dot{\xi} + \omega_f^2\xi = \omega_f^2\eta \quad (3)$$

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2} \quad (4)$$

여기서, g_f 와 ζ_f 는 각각 PPF 제어기의 계인과 점성감쇠계수를 나타낸다. 위 식의 형태를 살펴보면, 저주파 통과 필터와 같은 형태로 됨을 알 수 있다. 제어기의 고유진동수 ω_f 를 압전체의 1차 공진 주파수 ω 에 맞추고 감쇠 ζ_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.^[5]

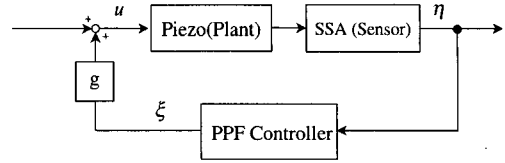


Fig. 6 Block diagram of PPF controller

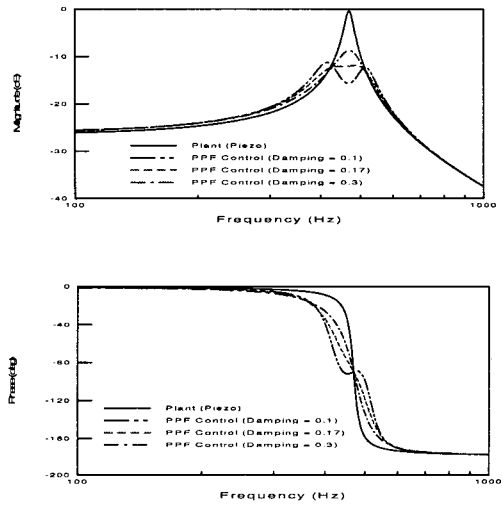


Fig. 7 Frequency responses of piezo for variable ζ_f

Table 1 Dynamics of plant

Resonant Frequency (ω_{np})	469	Hz
Damping Coefficient (ζ_p)	0.025	
DC gain(g)	0.2	

Fig. 6은 PPF 제어기와 SSA 회로를 적용한 시스템의 블록다이어그램을 표현한 것이다. Fig. 6에 나타낸 대로 Table 1의 수치를 이용하여 압전 구동기의 PPF 제어를 시뮬레이션하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻는다.

Fig. 7에서 압전소자의 1차 공진점이 PPF제어에 의해 소멸되었음을 볼 수 있다.

4. 실험 및 결과

본 연구에서 제작하여 사용한 이중 구동기는 Fig. 8과 같다.

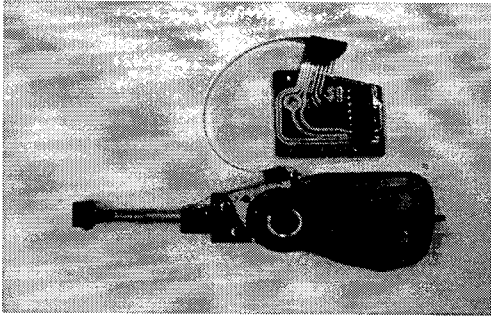


Fig. 8 The dual actuator used in experimental

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

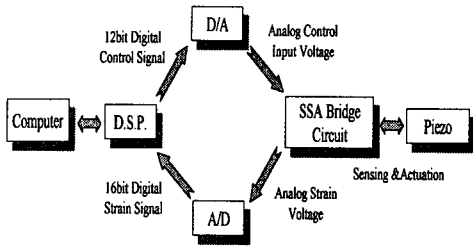
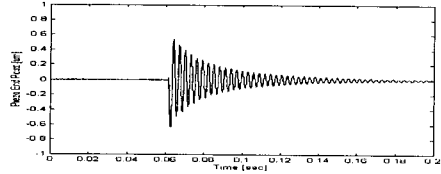


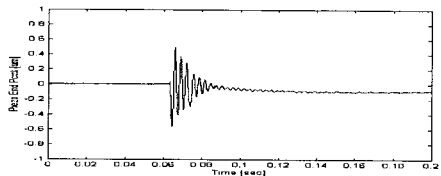
Fig. 9 Schematic diagram of piezo control

Fig. 9은 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 입력하게 되는 것이다.



(a) PPF 제어전



(b) PPF 제어후

Fig. 10 Vibration control of piezoactuator using DSP

Fig. 10는 위에서 설계된 PPF제어기를 사용해서 DSP를 수행하여 얻은 결과이다. 여기서 입력은 임팩트를 가했으며, 그 결과 제어를 행한 것이 아닌 것 보다 약 4배정도 빠르게 안정화되는 것을 볼 수 있다.

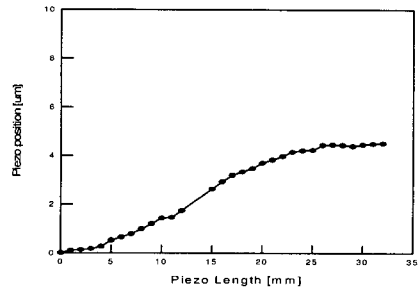


Fig. 11 The deflection shape of piezoactuator

제작한 압전구동기의 한쪽을 고정시킨 후 12V의 전압을 가할 때, 압전체의 1mm 간격으로 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 사용하여 변위를 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

이 실험 결과로 압전 소자에 인장-압축을 교번하

여 가하면 예상한대로 'S'자 형태의 변형을 일으키고 끝단의 질량부(렌즈 부분)는 평행이동을 하였다.

5. 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 머리부분에 순수한 병진 운동을 일으켜 끝단이 회전운동(tilting)을 줄이는 메커니즘을 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. 본 구조물은 분리 레이저 광원을 사용할 경우에 순수 병진만이 존재하므로 회전압의 잔류진동이 있거나 트래킹시에도 끝단질량(머리부분)의 평행 이동으로 광경로에 영향을 주지 않는 구조이다.

여기서는 압전소자를 이용한 광디스크의 구동기로써의 가능성과 타당성을 평가하였지만, 향후 포커싱 메커니즘을 부가하고, 이중 구동기에 적합한 제어 알고리즘을 개발하면 차세대 정보저장기의 이중구동기로써 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 연구는 (1998)년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 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. 안승홍, 조원익, 양현석, 박영필, "이단 압전 구동기를 이용한 Pick-up의 정밀 제어," 한국정밀공학회, 추계학술대회논문집, pp. 106-109, 1999.
5. 박형욱, "광픽업 이송용 이중구동 압전스텝압 위치제어," 연세 대학교, 박사학위 논문, 1998.