

# 자기계측 기능을 이용한 압전 빔의 잔류진동 제어

남윤수\*, 박종수#, 장후영\*\*

## Residual Vibration Suppression of a Piezoelectric Beam Using a Self-sensing Technology

Yoonsu Nam\*, Jongsoo Park# and Huyeong Jang\*\*

### ABSTRACT

This paper deals with a problem of vibration suppression of a piezoelectric beam using a self-sensing algorithm. Two methods, which are PPF(positive position feedback) and SRF(strain rate feedback), are considered to suppress a residual vibration of a piezoelectric beam developed during the step positioning of a beam end point. A self-sensing algorithm treated here is basically a strain rate estimator of a beam movement and is to be used for the closed loop control. The efficacy of the proposed idea is evaluated through experiments.

**Key Words** : Adaptive filter(적응필터), Piezoelectric beam(압전소자 빔), Residual vibration suppression(잔류진동 억제), Self-sensing(자기계측), Vibration control(진동제어)

### 기호설명

$C_p$  : capacitance of a piezoelectric material  
 $D_3$  : electric displacement (charge/meter)  
 $e_{31} \equiv T_1/E_3$  : piezoelectric constant (stress/electric field)  
 $\epsilon_{33}^s$  : permittivity on 3-axis for a static deformation  
 $\epsilon_1$  : normal strain on 1-axis  
 $E_3$  : electric field on 3-axis(volt/meter)  
 $\phi_i(x)$  : i-th admissible function  
 $q_{tot}$  : total electric charge for the input  
 $q_{mech}$  : electric charge induced by mechanical deformation

$r(t)=[r_1(t) \dots r_n(t)]$  : generalized coordinate vector  
 $T_1$  : normal stress on 1-axis  
 $t$  : thickness of a piezoelectric material

### 1. 서론

압전소자 (piezoelectric material)가 응용된 제품들은 각종 센서에서부터 구조물의 댐핑 증대, 또는 위치/ 힘 결정을 위한 구동장치에 이르기까지

접수일: 2006년 8월 7일; 게재승인일: 2007년 1월 17일

\* 강원대학교 기계-메카트로닉스공학부

# 교신저자: 강원대학교 대학원 기계-메카트로닉스공학부

E-mail fkrndy@dreamwiz.com Tel. (033) 253-0840

\*\* 강원대학교 대학원 기계-메카트로닉스공학부

매우 다양하다.<sup>1-5</sup> 압전소자의 특성인 소형/ 미소변위/ 고 응답 성질 등을 적극 활용하여, 최근에는 자기정보 저장 드라이브 (HDD), 정밀 광학기기, 생체 의학 (biomedical) 분야의 마이크로 액츄에이션 장치로서 그 응용이 점차 확대되고 있다.<sup>6-9</sup> 또한, 셀 어레이(cell array) 구조의 티슈형 압전소자를 이용하여 인체 피부조직의 상태나 접촉 대상의 느낌(feeling)을 추정하는 감성 센서 개발에도 그 응용 연구사례가 보고되고 있다.<sup>10-11</sup>

본 연구에서 제안된 기술은 압전소자의 자기계측(self-sensing) 기능을 이용하여, 유연한 압전 빔(flexible piezoelectric beam)의 잔류진동이나 서보 오차를 감쇄시킬 수 있는 서보 메커니즘 구현에 응용될 것이다. 이러한 기술이 실제로 실현되기 위하여는 압전소자의 구동(actuation)과 동시에 그 압전소자가 기계적으로 어떻게 응답하고 있는가를, 외부 센서의 사용 없이 자기계측(self-sensing) 기능으로 정확하게 추정할 수 있는 가에 대한 해결책이 제시되어야 한다. 압전소자는 전기-자기장을 매체로 하여 기계-전기 에너지가 상호 변환되는 재료이다. 따라서, 압전소자에 외부 전압을 인가시키면, 압전소자는 기계적 변형을 하게 된다. 이와 같이 생성된 압전소자의 기계적 변형에 의하여, 압전소자 내부에는 유도 전하(induced charge)가 발생되며, 이 전하의 흐름으로 인하여 압전소자 양단에는 유도전압이 생성된다. 기계적 변형에 의하여 유도된 전하나 그 시간 변화량(전류)를 계측할 수 있다면, 이 신호들을 이용하여 압전 구조물의 기계적 변형이나 그 시간 변화율에 관한 정보를 추정할 수 있게 될 것이다. 압전소자의 이러한 기계-전기적 메커니즘을 이용한 것이 자기계측(self sensing)의 원리이다.<sup>12-15</sup>

유연 구조물(flexible structure)의 잔류 진동 억제를 위한 제어 기법으로 잘 알려진 방법은 PPF(positive position feedback)와 SRF(strain rate feedback) 기법이 있다.<sup>16,17</sup> 두 방법 모두 유연 구조물의 댐핑을 증가시키는 것으로서, PPF 는 구조물의 변위를 그리고 SRF 는 구조물 변위의 시간 변화율을 각각 피드백하게 된다. 본 논문에서는 칸티레버 방식으로 고정된 양방향 구동 압전 빔(piezoelectric bimorph beam)의 잔류진동 제어를 위하여, PPF 및 SRF 기법을 적용하고, 양자 간의 성능을 비교하였다. 더 나아가 자기계측 이론을 적용한 유연 구조물의 진동 억제에 대한 실험을 수행하였

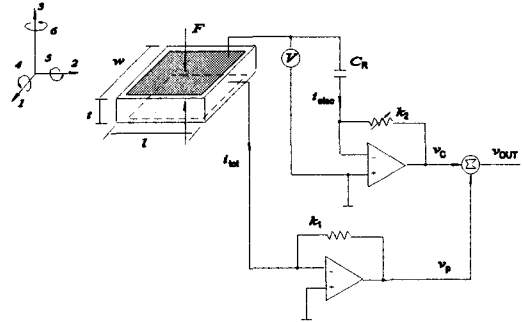


Fig. 1 Electric circuit of a strain rate self-sensing

고, 그 효용성에 관하여 논의하였다.

## 2. 자기계측의 원리

Fig. 1 에 도시된 압전소자에 대하여, 기계-전기적 변화 메커니즘을 수식으로 표현하면 아래의 식(1)과 같다.<sup>18</sup> 여기서, 예시된 압전 소자는 3 축 방향으로 전위를 인가하면, 1 축 방향으로 기계적 변형을 한다고 가정한다.

$$D_3 = \epsilon_{33}^S E_3 + e_{31} \epsilon_1 \quad (1)$$

$$v = E_3 t = \frac{t}{\epsilon_{33}^S} (D_3 - e_{31} \epsilon_1)$$

식 (1)을 압전소자의 전극 면적,  $A$  를 사용하여 다시 쓰면 아래의 식 (2)와 같다.

$$v = \frac{t}{A \epsilon_{33}^S} (A D_3 - A e_{31} \epsilon_1) = \frac{1}{C_p} (q_{tot} - q_{mech}) \quad (2)$$

또한, 식 (2)를 시간 미분하면, 다음과 같은 전류 관계식이 된다.

$$i_{tot} = \frac{dq_{tot}}{dt} = i_{elec} + i_{mech} = C_p \frac{dv}{dt} + i_{mech} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 압전소자의 자기계측을 위한 기본 관계식이다. 즉, 식 (2)를 이용하여  $q_{mech}$  을 센싱하게 되면, 압전소자의 스트레인을, 식 (3)의  $i_{mech}$  을 센싱하게 되면 압전소자의 스트레인 시간 변화율을 각각 추정할 수 있게 된다. Fig. 1 의 전기회로는 식 (3)에 기초한 회로이다. 여기서, 기준 커패시터  $C_R$  은 식 (3)에서 feed-through 전류인  $i_{elec}$

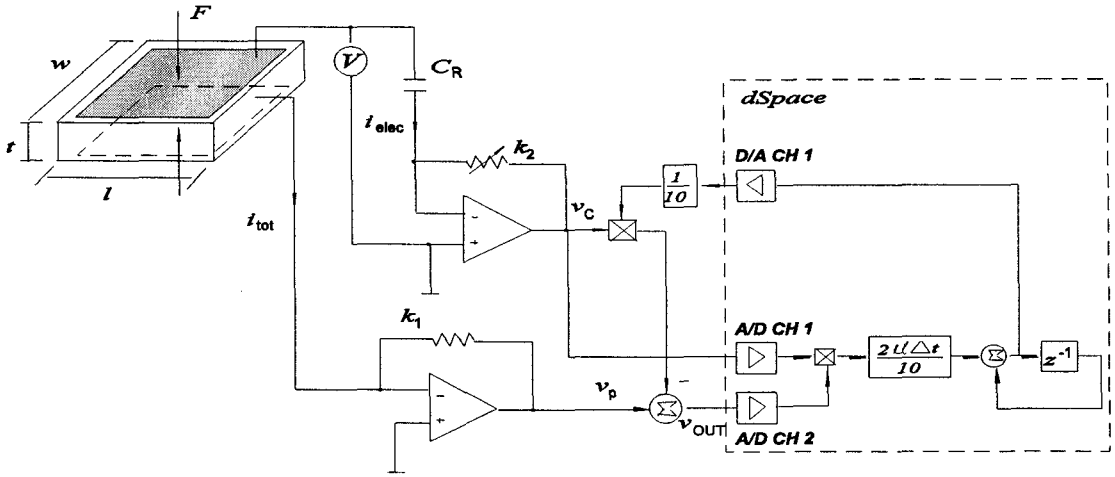


Fig. 2 Electric circuit of a strain rate self-sensing using an adaptive filter

을 상쇄시킬 목적으로 사용된다. 압전소자에 공급된 전체 전류 값  $i_{tot}$  과  $C_R$  에 의하여 feed-through 되는 전류 값( $i_{elec}$ )은 OP AMP 에 의하여 전압 정보인  $v_p$  및  $v_c$  로 각각 변환되고, 이 두 값의 차는 다음의 관계식이 된다.

$$v_{out} = v_p - v_c = (-k_1 i_{tot}) - \left( -k_2 C_R \frac{dv}{dt} \right) \quad (4)$$

$$= -k_1 i_{mech} + \frac{dv}{dt} (k_2 C_R - k_1 C_p)$$

Fig. 1 의 회로에서 가변 저항 값인  $k_2$  를 조절하면, 식 (4)의 마지막 항에서 괄호 안의 양을 0 으로 만들 수 있고, 결국  $i_{mech}$  을 센싱할 수 있게 된다. 만약, 압전소자의 등가 커패시턴스인  $C_R$  값이 상수인 경우에는 위의 방법은 완벽하게 작동된다. 그러나, 일반적인 압전소자의  $C_p$  값은 작동환경에 따라 그 값이 변화하므로 위의 방법은 실제적으로 그 기능을 발휘하지 못하게 된다.

위와 같은 문제를 해결하기 위하여 제안된 방식이 1995 년 Clark<sup>18</sup> 와 Viperman<sup>19</sup> 에 의한 적응 필터를 이용한 자기계측 방법이다. Fig. 2 는 이 방식에 관한 블록선도이다. 이 회로에서 자기계측 신호 출력,  $v_{out}$  은 다음 식으로 결정된다.

$$v_{out} = v_p - \frac{v_c V_{DSP}}{10} = -k_1 i_{tot} + \frac{k_2}{10} i_c V_{DSP}$$

$$= -k_1 \left\{ i_{mech} + \left( C_p - \frac{k_2}{10k_1} C_R V_{DSP} \right) \frac{dv}{dt} \right\} \quad (5)$$

식 (4)에서와 동일하게, 위 식에서  $V_{DSP}$  를 조절하면, 식 (5)의 마지막 항을 0 으로 할 수 있고, 자기계측 회로 출력은 결국 스트레인 시간 변화율에 비례한 신호가 된다. Fig. 2 의 점선 부분에 해당하는 적응 필터는  $v_{out}$  의 크기를 최소화시키는 방향으로  $V_{DSP}$  를 자동적으로 조절하게 된다. 그러나,  $V_{DSP}$  의 값이  $i_{mech}$  값 변화에 따라 민감하게 변한다는 것과 압전소자의 히스테리시스 현상에 의한 위상 지연으로 이 방법도 완벽하게 작동하지 않는 것으로 밝혀 졌다. 이는 위상 지연을 계산하여 보상함으로써 상당 부분 개선할 수 있다.<sup>20</sup>

### 3. 유연 압전 빔의 해석적 운동모델

본 논문에서 실험을 위하여 사용된 압전 빔은 두 개의 PZT 소자를 얇은 판(Phosphor Bronze)에 입혀서, 양방향 운동이 가능하도록 설계되었으며, 일본 FUJI Ceramics 사 제품이다. 이 압전 빔에 대한 특성치들은 Table 1 에 정리되었다. Fig. 3 에 도시된 압전 빔의 운동은 Euler-Bernoulli 빔 이론을 이용하여 표현 가능하다.

Table 1 Characteristic data of the piezoelectric beam

| Symbol            | Description                                     | Value                  | Unit            |
|-------------------|---|------------------------|-----------------|
| $L_b$             | Clamped length of piezoelectric beam            | 95                     | mm              |
| $L_t$             | Total length of piezoelectric beam              | 100                    | mm              |
| $h_p$             | Thickness of piezoelectric beam                 | 0.27                   | mm              |
| $h_s$             | Thickness of elastic beam(shim)                 | 0.1                    | mm              |
| $h_c$             | Thickness of electric plate material            | 0.013                  | mm              |
| $b$               | Width of beam                                   | 13.01                  | mm              |
| $\rho_p$          | Density of piezoelectric material               | $7.65 \times 10^3$     | $\text{kg/m}^3$ |
| $\rho_s$          | Density of shim material                        | $8.78 \times 10^3$     | $\text{kg/m}^3$ |
| $\rho_c$          | Density of electric plate material              | $5.07 \times 10^3$     | $\text{kg/m}^3$ |
| $E_p$             | Young's modulus of piezoelectric material       | $6.20 \times 10^{10}$  | $\text{N/m}^2$  |
| $E_s$             | Young's modulus of shim material                | $1.10 \times 10^{11}$  | $\text{N/m}^2$  |
| $E_c$             | Young's modulus of electric plate material      | 0                      | $\text{N/m}^2$  |
| $d_{31}$          | Piezoelectric constant                          | $-240 \times 10^{-12}$ | $\text{m/V}$    |
| $\epsilon_{33}^T$ | Relative permittivity of piezoelectric material | 2130                   | $\text{F/m}$    |
| $C_p$             | Total capacitance of piezoelectric material     | 126.8                  | nF              |

이 그림의 좌표를 기준 할 때, x-방향으로 만 굽힘 스트레스(bending stress)가 작용하므로 이 빔의 변위는 아래의 식으로 표현된다.

$$y(x, t) \cong \sum_{i=1}^n \phi_i(x) r_i(t) \tag{6}$$

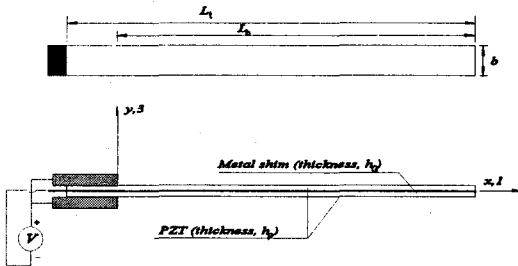


Fig.3 Schematics of a cantilevered piezoelectric beam

식 (6)의 한정모드 방법(assumed mode method) 과 Hamilton's principle 을 결합하면, 칸티레버 압전 빔의 운동을 지배하는 방정식을 아래와 같이 유도할 수 있다.<sup>20</sup>

$$M_S \ddot{r} + C_D \dot{r} + K_S r = \Theta v$$

$$q = \Theta^T r + C_p v \tag{7}$$

위 식에서,  $M_S$ ,  $C_D$ ,  $K_S$  는 질량, 댐핑, 그리고 스프링 매트릭스를 나타내며,  $\Theta$  는 압전소자의 전기-기계 상호변환 매트릭스이다. (7) 식의 두 번째 식은 식 (2)와 유사하다. 즉, 완벽한 자기계측 조건이라면,  $C_p v$  항을 등가 커패시터  $C_R$  을 사용하여 제거시킬 수 있으므로 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$q_{mech} = \Theta^T r, \quad i_{mech} = \Theta^T \dot{r} \tag{8}$$

Fig. 4 는 압전 빔의 구동전압,  $v$  에 대한 자기계측 회로 출력,  $v_{out}$  의 주파수 응답이다. 절선(dashed line)은 식 (7)과 (8)에 의한 해석적 주파수 응답이며, 절-점선(dash-dot line)은 적응필터에 의한 결과

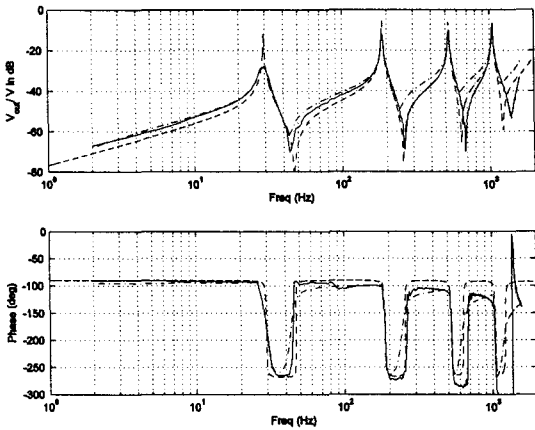


Fig. 4 Analytic and experimental frequency response of self-sensing mechanism

를 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이, 이 자기계측 방법은 완벽하게 작동하지 않는다. 특히, 반공진 (anti-resonant) 주파수 대역에서 해석적 주파수 응답과는 많은 오차를 보이고 있다. 이 편차의 주된 원인은 압전소자의 히스테리시스 현상으로 인한 입력신호간의 위상지연에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 4 에서 실선으로 표시된 응답은 위상지연 효과를 보정한 자기계측 회로를 사용하여 얻은 실험적 주파수 응답이다. 적응필터를 사용한 자기계측 방법 보다 반공진 주파수 대역에서 오차의 크기를 상당부분 감소시키고 있음을 볼 수 있다. 일반적으로, 유연 구조물의 진동문제에 있어서 1 차 공진 모드의 기여는 매우 크다. 따라서, 다음 장에 기술하는 잔류 진동 억제 시에는 1 차 공진 모드의 진동억제만을 다루기로 한다.

#### 4. 유연 압전 빔의 잔류진동 억제

유연 빔의 잔류 진동을 억제시키기 위하여, 잘 알려진 두 가지 제어기법, 즉 PPF(positive position feedback)와 SRF(strain rate feedback) 기법이 적용되었다. Fig. 5 에 두 시스템에 대한 제어 구조가 압전 빔 그리고 그 끝 단의 변위를 계측하는 레이저 변위 측정계와 함께 그려져 있다. SRF 구조에서 스트레인 시간 변화율 정보를 얻기 위하여, 이 신호와 서로 비례관계에 있는 레이저 변위 측정계 출력신호의 1 회 미분 값이 입력되고 있음을 볼

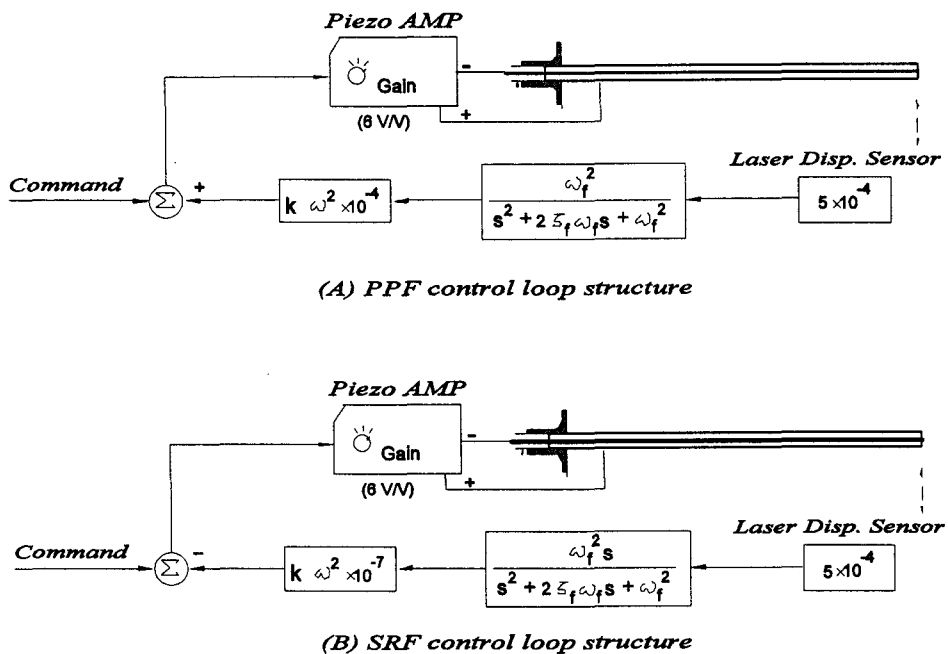


Fig. 5 Closed loop structure of a PPF and SRF control

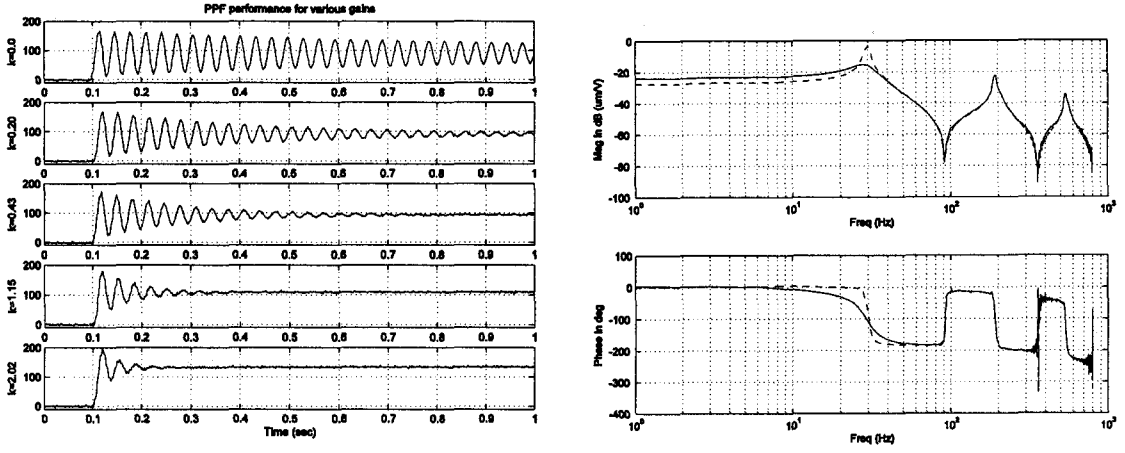


Fig. 6 PPF closed loop time domain responses for various gains and frequency responses

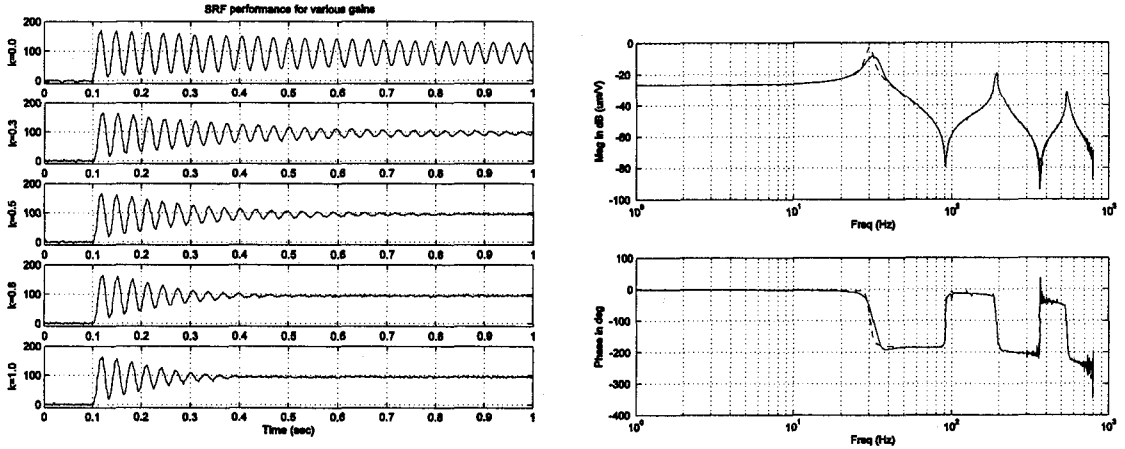


Fig. 7 SRF closed loop time domain responses for various gains and frequency responses

수 있다. 두 시스템 모두 3 개의 설계인자, 즉  $k$ ,  $\omega_f$  그리고  $\zeta_f$  를 갖고 있으며, 아래에 정리된 두 단계를 거쳐 이들의 값들이 설정된다.<sup>16</sup>

(1) 단계 1: 필터 다이내믹스( $\omega_f, \zeta_f$ ) 결정

PPF 필터는, Fanson 과 Caughey 의 연구에 따라, 전체 페루프의 목표 댐핑( $\zeta_p$ ) 값이 정해지면 다음

식(9)로 결정된다.

$$\zeta_f = \sqrt{\frac{(1.02\zeta_p^2)^2}{(1.02\zeta_p^2)^2 + 0.16}}, \quad \omega_f = \frac{\omega}{1.02\sqrt{1-\zeta_f^2}} \quad (9)$$

위 식에서  $\omega$  는 유연 구조물의 1 차 고유 진동수이다. 한편, SRF 제어구조에 있어서 전체 페루프

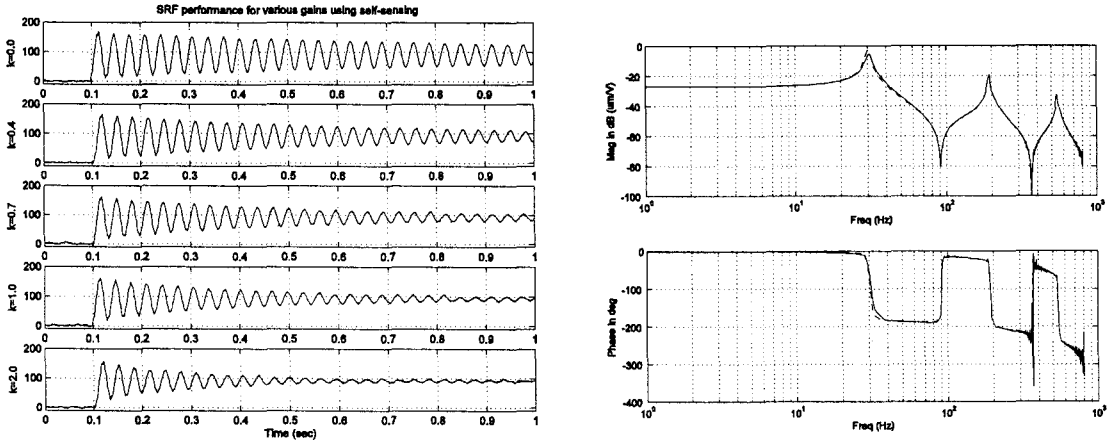


Fig. 8 SRF closed loop time domain responses for various gains and frequency responses in case of using a strain rate self-sensing mechanism

시스템의 댐핑을 증대시키기 위하여는 필터의 고유 진동수,  $\omega_f$  는 구조물의 고유 진동수,  $\omega$  보다는 커야 한다는 사실은 Fig. 5 의 SRF 제어 구조를 살펴볼 때, 자명한 사실이다. 많은 수치 시뮬레이션 후에 아래의 식과 같이 필터를 선정할 때, 비교적 좋은 잔류진동 억제 특성을 나타내었다.

$$\zeta_f = 0.2, \quad \omega_f = 1.2\omega \quad (10)$$

(2) 단계 2: 피드백 게인 k 의 결정:

두 시스템에 대한 각각의 피드백 게인, k 는 각 페루프 시스템의 위상여유가  $45^\circ$  이상이 되도록 선정되었다. 위와 같이 설계된 페루프 시스템에 대한 시간영역 및 주파수 영역에서의 실험 결과가 Fig. 6 과 Fig. 7 에 정리되었다. 각 그림에서 왼 쪽은 계단 파형 명령신호에 대하여, 피드백 게인 k 의 변화에 따른 시간 응답을 표시하며, 오른 쪽은  $k=2.02$  일 때의 PPF, 또한  $k=1.0$  일 때의 SRF 페루프 구조에 대한 주파수 응답을 나타낸다.

이 그림에서 절선(dashed line)으로 표시된 응답은 개루프 주파수 응답이다. 여기서, 출력신호는 유연 압전 빔 끝 단의 변위이며, 단위는  $\mu\text{m}$  이다. 두 시스템에 관한 실험적 응답을 비교할 때, SRF 제어 구조보다는 PPF 제어 구조의 성능이 훨씬 우수함을 확인할 수 있다. 식 (9)와 (10)에서와 같이 구조물의 1 차 공진 모드에만 맞추어 PPF 및 SRF 필터를 설계하였기 때문에, Fig. 6 과 Fig. 7 에 도시

된 두 시스템에 대한 페루프 주파수 응답에 있어서, 2 차 이상의 공진 모드들은 전혀 감쇄되지 않고 있음을 볼 수 있다. 만약 고차 공진모드의 감쇄를 원한다면, 고차 모드에 튜닝된 필터를 Fig. 5 의 구조에 덧붙이면 된다.

Fig. 5 의 SRF 구조에서 미분기를 제외한 나머지 구조는 그대로 이용하면서, 피드백 시키는 량을 제 2 장에서 설명된 스트레인 시간 변화율을 추정하는 자기계측 회로 출력으로 사용한 실험결과가 Fig. 8 에 정리 되었다.  $k=2.0$  보다 큰 피드백 게인을 적용하면, 자기 계측 회로의 노이즈 증폭 효과에 의하여 시스템 응답 특성은 더 이상 개선되지 않았다. 레이저 변위 측정계를 사용하는 Fig. 7 의 SRF 실험 결과와 비교할 때, Fig. 8 의 자기계측 회로 출력을 이용한 잔류 진동 억제 특성이 더 우수하지는 않지만,  $k=0.0$  인 개루프 자유 진동과 비교할 때 많은 향상이 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문은 자기계측 기능을 이용하여, 압전 유연 빔의 잔류진동 억제 문제를 다루고 있다. 이를 위하여, 압전소자의 기계적 변형을 추정할 수 있는 자기계측 회로와 실험적 연구 결과에 대한 소개를 하였다. 압전 유연 구조물의 잔류 진동 억제를 위하여, 두 가지 피드백 제어 구조, 즉 PPF 와 SRF 제어 기법을 적용해 보고 그 성능을 비교하

여 보았다. PPF 제어 구조가 잔류진동 억제에 훨씬 효과적 이라는 것이 실험을 통하여 입증되었다. 한편, 스트레인 시간 변화율을 추정하는 자기계측 회로 출력을 사용한 SRF 제어기법의 결과는 만족스럽지 않지만, 그 효용성에 대한 확신을 얻을 수 있었다. 잔류진동 억제에 있어서, PPF 제어 구조의 적용이 SRF 보다 훨씬 더 우수하므로, 스트레인 시간 변화율보다는 스트레인 그 자체를 추정하는 자기계측 회로를 개발하여 적용하는 것이 다음 단계의 연구 과제이다.

### 후 기

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 지원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00063)

### 참고문헌

1. Fatikow, S., Santa, K., Zllner, J., Zllner, R. and Haag, A., "Flexible piezoelectric micromanipulation robots for a microassembly desktop station," ICAR '97, pp. 241-246, 1997.
2. Hurlbut, B. and Regelbrugge, M., "Development of a self-sensing multiplayer piezoelectric actuator for structural damping application," Fourth International Conference on Adaptive Structure, pp. 29-41, 1993.
3. Lee, C., O'Sullivan, T. and Chiang, W., "Piezoelectric strain rate sensor and actuator design for active vibration control," Proceedings 32nd AIAA SDM, AIAA-91-1064, pp. 2197-2207, 1991.
4. Chang, T. and Sun, X., "Analysis and control monolithic piezoelectric nano-actuator," 2000 ACC, pp. 3086-3090, 2000.
5. Okugawa, M. and Sasaki, M., "Robust motion control of a flexible micro-actuator using LQG/ LTR design method," Trans. of JSME Series C, Vol. 63, No. 616, pp. 194-199, 1997.
6. Suzuki, T., Usui, T., Sasaki, M., Fuzisawa, F., Yoshida, T. and Hirai, H., "Comparison of robust track following control systems for a dual stage HDD," Adv. Info. Storage Systems, Vol. 10, pp. 101-118, 1999.
7. Soeno, Y., Ichikawa, S., Tsuna, T., Sato, T. and Sato, I., "Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drives," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 983-987, 1999.
8. Ding, J., Tomizuka, M. and Numasato, H., "Design and robustness analysis of dual stage servo system," 2000 ACC, pp. 2605-2609, 2000.
9. Blackwood, G., Miller, D. and Jacques, R., "The MIT multipoint alignment testbed: Technology development of optical interferometry," SPIE Conf. On active and adaptive optical systems, pp. 1542-34, 1991.
10. Jiang, Z. and Chonan, S., "Study on development prostatic palpation probe and measurement of body softness," Proc. of 3-rd IWAM, pp. 218-223, 1999.
11. Kosawada, T. and Hamaguchi, R., "A method to direct dynamic characteristics of small biological soft tissues and its application to human prostate tissue," Trans. JSME Series C, Vol. 61, No. 591, pp. 4410-4416, 1995.
12. Furutani, K., Urushibata, M. and Mhori, N., "Displacement control of piezoelectric element by feedback induced charge," Nanotechnology, Vol. 9, No. 2, pp. 93-98, 1998.
13. Dosch, J., Inman, D. and Garcia, E., "A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control," J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 3, pp. 166-183, 1992.
14. Anderson, E., Hagoood, N. and Goodliffe, J., "Self-sensing piezoelectric actuation: Analysis and application to collocated structures," 33-rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics, and Materials conf., AIAA-92-2465, pp. 2141-2155, 1992.
15. Johns, L., Garcia, E. and Waites, H., "Self-sensing control as applied to PZT stack actuator used as a micropositioner," J. of SPIE, Vol. 2190, pp.228-237, 1994.
16. Fanson, J. and Caughey, T., "Positive position feedback control for large space structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 717-724, 1990.
17. Song, G. and Kotejoshyer, B., "Vibration reduction of flexible structures during slew operations," International Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 7, No.2, pp105-109, 2002.
18. Clark, R., Saunders, W. and Gibbs, G., "Adaptive



structures dynamics and control,” John Wiley & Sons, pp. 150-197, 1998.

19. Clark, R., Viperman, J. and Cole, D., “Adaptive piezoelectric sensoriauator,” US Patent 5578761, 1996.
20. Nam, Y., Yoon, J. and Sasaki, M., “Strain rate self sensing of a piezoelectric material with the phase delay compensation,” JSME International Journal Series C, Vol. 45, No. 3, pp. 722-729, 2002.