

하이브리드 스마트 구조물의 진동 제어

°박동원*, 박용군**, 박노준*, 최승복**

Vibration Control of Hybrid Smart Structures

°Dong-Won Park*, Yong-Kun Park**, No-Jun Park* and Seung-Bok Choi**

ABSTRACT

This paper presents a proof-of-concept investigation on the active vibration control of two hybrid smart structures(HSSs). The first one is consisting of a piezoelectric film (PF) actuator and an electro-rheological fluid (ERF) actuator, and the other is featured by a piezoceramic (PZT) actuator and a shape memory alloy (SMA) actuator. For the PF/ERF hybrid smart structure, both the increment of the damping ratios and the suppression of the tip deflections are evaluated in order to demonstrate control effectiveness of the PF actuator and ERF actuator and the hybrid actuation. For the PZT/SMA hybrid smart structure, the PZT actuator takes account of the high frequency excitation, while the SMA actuator exerts large vibration control force. The experimental results exhibit superior abilities of the hybrid actuation systems to tailor elastodynamic responses of the HSS rather than a single class of actuation system alone.

1. 서론

최근 들어 항공우주, 국방, 자동차, 대량생산 시스템 등의 분야에서 보다 좋은 성능을 가진 구조물에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 이러한 요구를 만족 시키기 위해 전기 유동 유체(electro-rheological fluid; ERF), 압전필름(piezoelectric film; PF), 압전세라믹(piezoceramic; PZT), 형상기억 합금(shape memory alloy; SMA) 등의 지능 재료(smart material)를 이용한 지능 구조물(smart structure)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 위에 언급한 지능 재료들은 재료 고유의 장단점을 가지고 있다. 예를 들면, ERF는 전기장의 변화에 따른 유체의 유동 성질의 변화에 따른 구조물의 물성치의 차이를 이용한 것이므로 공진 주파수를 변화시켜 고유진동수 부근의 진동을 크게 줄일 수 있으나 잔여 진동을 줄이기 힘든 특성이 있다.⁽²⁾ 또한, 압전 재료들은 고주파수의 진동 제어에 유리하나 큰 진폭의 저주파수의 진동에는 취약하다.⁽²⁾ 한편, SMA는 단위 질량에 비하여 매우 큰 힘을 발생시킬 수 있는 장점이 있으나 반응속도가 느려 적용 범위에 많은 한정을 받았다.⁽⁴⁾ 따라서, 위의 지능 재료 한 가지만을 사용한 지능 구조물 보다는 여러 지능 재료를 적절히 사용하는 것이 바람직하다는 것은 매우 당연하며 이러한 하이브리드 지능 구조물에 대한 연구가 앞으로 활발히

이루어질 전망이다.

본 논문에서는 두 가지의 하이브리드 지능 구조물, 즉 PF와 ERF를 사용한 지능 구조물과 PZT와 SMA를 사용한 지능 구조물에 대한 실험결과를 소개함으로써 하이브리드 지능 구조물에 대한 당위성을 알리고 이 분야에 대한 연구의 필요성을 보이려 한다.

2. PF/ERF 하이브리드 지능 구조물

1) 제어기 설계

제어기의 구성을 위해 하이브리드 지능 구조물에 대한 현상학적 모델을 다음과 같이 설정한다. Fig. 1과 같이 빔의 윗 면에 PF이 접합되어 가해지는 전압(V)에 따라 힘 또는 모멘트를 발생시키며, 빔 내부의 ERF는 전기장(E)의 변화에 따라 에너지 감쇠 특성이 변화하므로 다음과 같은 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{W}\} + [C]\{\dot{W}\} + [K]\{W\} = \{f(t)\} + \{F(t, V)\}_{PFA} - \{[\Delta C(E)]\{\dot{W}\} + [\Delta K(E)]\{W\}\}_{ERFA} \quad (1)$$

여기서 [M], [C], [K]는 각각 질량, 감쇠, 강성 행렬이며, {W}와 {f(t)}는 각각 변위벡터와 외력을 나타낸다. 그리고, 식 (1)의 우변 항인 {F(t, V)}_{PFA}와 {[\Delta C(E)]{\dot{W}} + [\Delta K(E)]{W}}_{ERFA}는 각각 PF와 ERF에 의해 발생하는 제어력을 나타낸다.

Fig. 2는 PF에 대한 뉴로 슬라이딩 모드 제어기의 3개의 층을 갖는 신경망을 도시한 것이다. 신경망을 이용한 학습은 PF에 대한 보다 알맞은 제어입력을 도출하기 위해서 이용되었다.

본 연구에서 요구 변위와 속도는 모두 0으로

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 명지전문대학 기계설계과

+ 삼성중공업

** 인하대학교 기계공학과

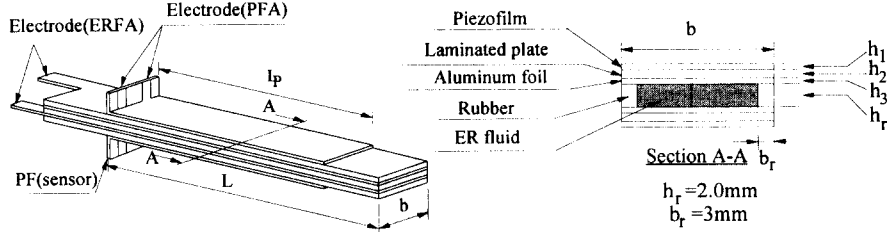


Fig. 1 Schematic diagram of the PF/ERF HSS

설정되었고, 신경망 학습 변수 δ_1^k 는 다음과 같다.

$$\delta_1^k = S_1 + \dot{S}_1 \quad (2)$$

여기서, 슬라이딩 평면은 $S_1 = 50e_1 + e_2$ 로 선택되었으며 $e_1 = x_1 - x_{1d}$, $e_2 = x_2 - x_{2d}$ 이다. 상태변수 x_1 과 x_{2d} 는 각각 선단의 변형량과 변형속도의 실제값과 요구값을 나타낸다.

오차 역전달 학습 알고리즘으로부터 증분 Δw_{pi}^j 와 Δw_{lj}^k 는 다음과 같이 주어진다.

(i) 입력층과 중간층 사이

$$\Delta w_{pi}^j = \eta \delta_1^k w_{lj}^k O_p^j (1 - O_p^j) X_i, \quad O_p^j = f_j(\text{net}_p^j) \quad (p = 1, 2, \dots, 5) \quad (3)$$

(ii) 중간층과 출력층 사이

$$\Delta w_{lj}^k = \eta \delta_1^k O_p^j, \quad O_l^k = f_k(\text{net}_l^k) \quad (4)$$

위에서, X_i 는 변위 $x_1(t)$ 와 과거변위 $x_1(t-1)$ 로 선정된 중간층에 대한 입력을 나타낸다. η 는 학습률을 나타내며, $f_j(\cdot)$ 와 $f_k(\cdot)$ 는 각각 중간층과 출력층의 함수를 나타낸다. net_p^j 와 net_l^k 는 각각 중간층과 출력층에 대한 입력이며, O_p^j 와 O_l^k 는 각각 중간층과 출력층에 대한 출력이다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 PF에 대한 제어입력 V 는 다음과 같이 정의된다.

$$V = V_N + V_S = O_l^k + K_1 S_1 \quad (5)$$

본 연구에서 입력 전압 V 는 PF의 허용 최대 전압을 고려하여 $15kV$ 의 상한을 갖게 하였으며, 제어 게인 K_1 는 슬라이딩 평면의 계수와 사용된 빔의 성능을 감안하여 80으로 선택되었다.

일반적으로 ERF는 전도성의 입자와 절연성의

용매, 그리고 약간의 첨가제로 이루어진다. ERF는 전기장의 변화에 대해 빠르게 가역적인 유변학적 성질의 변화를 나타낸다. 이러한 성질로 인하여 ERF를 이용한 현가장치, 엔진 마운트, 서보 밸브, 클러치/브레이크 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서 ERF의 전기장의 변화에 따른 강성과 댐핑 등의 동탄성 특성 변화를 이용하여 유연 구조물의 진동 제어를 위한 분포형 작동기로 사용된다.

Fig. 3(a)는 전기장의 증가에 따른 제안된 지능 구조물의 주파수 응답 특성을 나타낸다. 이러한 응답 특성으로부터 각 주파수에 대해 가장 낮은 진

폭을 갖도록 전기장을 선택하면 Fig. 3(b)와 같이 주파수에 대한 함수로 표현된다.

2) 실험결과 및 고찰

Fig. 1과 같이 시편은 두개의 glass/epoxy 복합재료판과 고무, 알루미늄 포일(foil), acrylic, ERF, 그리고 두개의 PF로 이루어졌다. Fig. 1에서 L 과 L_p 는 각각 시편과 PF의 길이를 b 와 b_p 은 각각 시편과 실리콘 고무의 너비를 나타낸다. h_1, h_2, h_3, h_4 는 각각 PF와 복합재료판, 알루미늄 포일, 그리고 고무의 두께를 나타낸다. 윗 면의 PF는 작동기로 사용되었으며, 아래면의 PF는 센서로 사용되었다. ERF에 가해지는 전압과 PF에 가해지는 전압이 서로 영향받지 않도록 하기 위해서 두 전극간이 충분히 절연되어야 한다. 실험에 사용된 치수와 재료특성은 Table 1에 나타나있다. 실험에 사용된

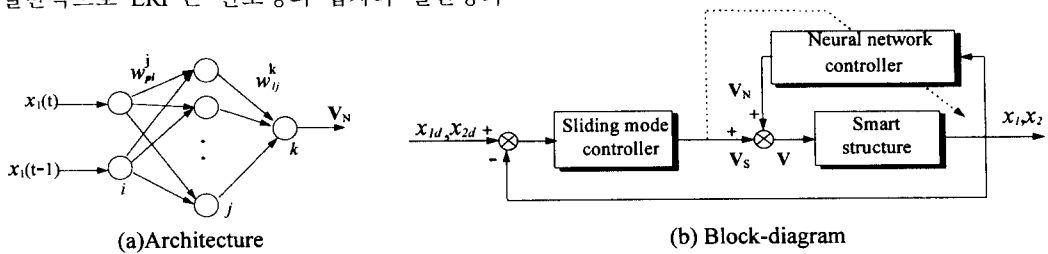


Fig. 2 Neuro-sliding mode controller for the PF actuator

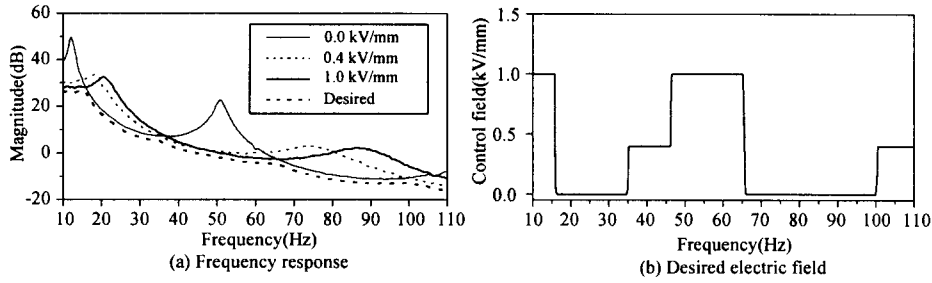


Fig. 3 Active control strategy for the ERF actuator

ERF 입자 중량비는 55%이며 부피비는 44.9%이다.

Fig. 4는 제안된 하이브리드 지능 구조물의 과도진동 응답 특성을 나타낸다. 개루프일 경우 0.018 이던 감쇠비가 PF 작동기 사용 시 0.035, ERF 작동기 사용 시 0.109, 두 가지 모두 사용할 때 0.157로 증가한다. 이 경우 ERF 작동기에 가해진 전기장은 1.0 kV/mm 로 결정되었으며 과도진동 상태에서의 진동 감쇠 능력은 ERF 작동기에 의해 지배된다. Fig. 5는 제 1 차 고유진동수 인 12 Hz 로 가진될 때의 강제진동 응답이다. 개루프 일 때 3.9 mm 이던 선단 진폭이 2.1 mm , 0.37 mm , 0.17 mm

로 PF 작동기, ERF 작동기, 두 가지를 복합적으로 사용함에 따라 차차 감소하였다. 예상된 바와 같이 PF와 ERF 작동기를 동시에 사용하는 것이 가장 성능이 우수하다. Fig. 6은 PF와 ERF 작동기 모두를 사용하였을 경우의 HSS의 전달함수를 나타낸다. 랜덤가진의 경우에는 ERF에 대하여 Fig. 3(b)와 같이 적절한 제어입력을 찾기 힘들지만 출력에서 지배적인 주파수를 FFT 분석을 통해 구해 이에 해당하는 제어입력을 가하였다. 이 경우에는 1.0 kV/mm 의 전기장이 가해졌다. Fig. 7을 통하여

Table 1 Dimensional and material properties of the proposed hybrid smart structure

Composite laminated plate (glass/epoxy)					Aluminum foil				
Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length	Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length
32Gpa	0.6mm	1850kg/m ³	25.0mm	260.0mm	70GPa	0.018mm	2700kg/m ³	25.0mm	260.0mm
Piezoelectric film					Electro-rheological fluid				
Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length	Base liquid	Particle	Volume fraction	Particle concentration	
2Gpa	0.052mm	1780kg/m ³	25.0mm	175.0mm	Silicone oil	Starch	44.9 %	55 %	

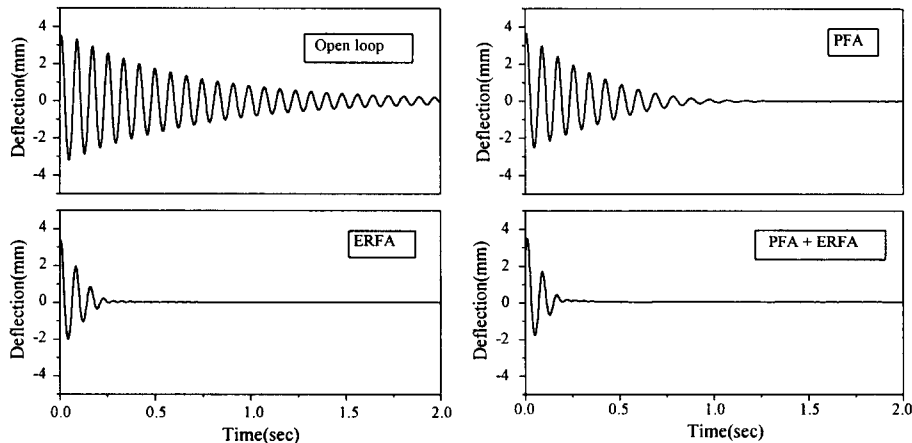


Fig. 4 Transient vibration responses for the PF/ERF HSS

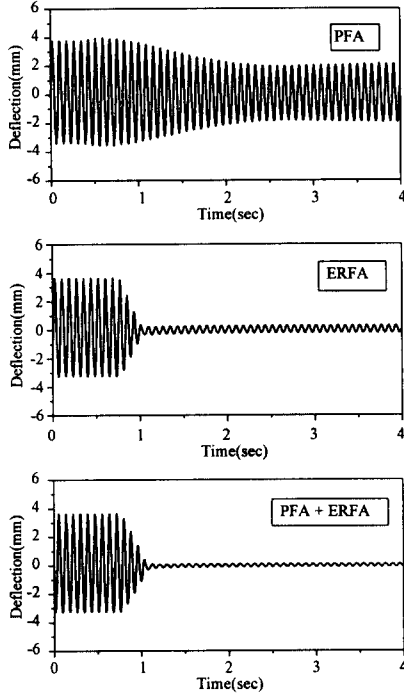


Fig. 5 Forced vibration responses for the PF/ERF HSS

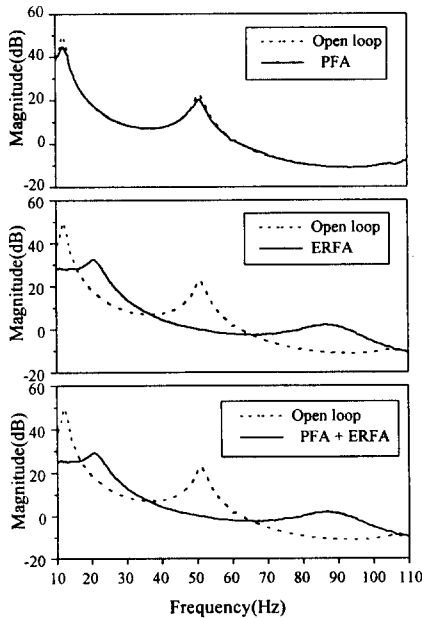


Fig. 6 Random vibration responses for the PF/ERF HSS

수 개의 진동모드가 동시에 제어될 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서, HSS를 이용하여 제어 spillover 문제를 해결할 수 있음을 알 수 있다.

3. PZT/SMA 하이브리드 지능 구조물

1) 제어기 설계

본 연구에서 고려된 SMA와 PZT 작동기가 장착된 유연 구조물 시스템은 Fig. 8에 나타난 바와 같다. 그림에서 보듯이 길이가 L 이고 선단질량을 가진 유연 구조물의 진동을 제어하기 위하여 2개의 SMA 작동기를 보의 중립축에 대하여 고정단으로부터 L_1 의 위치에 대칭으로 설치하였으며, 고정단쪽에 2개의 PZT를 부착하였다. 이와 같이 제어된 구조물의 동적 지배 방정식은 다음과 같이 상태공간 시스템으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\omega_1^2 x_1(t) - 2\zeta_1 \omega_1 x_2(t) + b u(t) + d f_0(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$x(t_0) = x_0$$

여기서 $[x_1(t), x_2(t)]^T = [q_1(t), \dot{q}_1(t)]^T$, $u(t)$ 는 SMA 작동기의 경우 $i(t)$, 압전 세라믹 작동기의 경우 $V(t)$ 를 각각 나타낸다. b 는 SMA 작동기의 대해

$$-\left(\hat{k}_1 / \int_0^L \Phi_1^2(x) \rho A dx\right) \cdot \left(\int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_1(x)}{\partial x^2} dx\right)$$

$$\text{를, PZT의 경우 } -\left(c / \int_0^L \Phi_1^2(x) \rho A dx\right) \cdot \left(\int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_1(x)}{\partial x^2} dx\right) \text{를 각각 나타낸다. 또한 } d = 1 / \int_0^L \Phi_1^2(x) \rho A dx \text{를, } x_0 \text{는 초기시간 } t_0 \text{에서의 초기조건을 나타낸다}$$

본 시스템은 SMA 작동기와 PZT 작동기가 각각 독립적인 제어 입력으로 작동하므로 다음과 같은 단일 슬라이딩 서피스를 설계할 수 있다.

$$s(x(t)) = c x_1(t) + x_2(t), \quad c > 0 \quad (7)$$

여기서 c 는 슬라이딩 서피스 계수를 나타낸다. 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하도록 불연속 제어기 $u(t)$ 를 다음과 같이 설계할 수 있다.⁽⁶⁾

$$u(t) = -(1/b) [-\omega_1^2 x_1(t) + (c - 2\zeta_1 \omega_1) x_2(t) + k \operatorname{sgn}(s)],$$

$$k > d |f_0(t)| \quad (8)$$

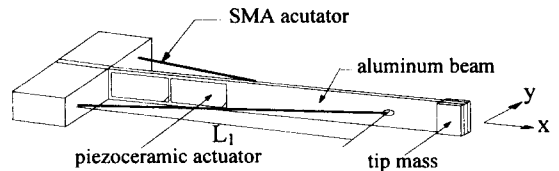


Fig. 7 A hybrid smart structure with SMA and PZT actuators

불연속 제어기의 채터링 현상으로 인한 역진동 현상을 방지하기 위해 다음과 같이 포화함수를 사용한 제어기를 사용한다.

$$u(t) = -(1/b)[- \omega_1^2 x_1(t) + (c - 2\zeta_1 \omega_1) \dot{x}_2(t) + k \text{sat}(s)],$$

$$k > d |f_0(t)| \quad (9)$$

2) 실험결과 및 고찰

직류 전동기에 편심되어 부착된 자석을 회전시켜 유연 구조물의 선단을 가진시키는 방법을 사용하였다. 가진은 최대변위 $\pm 15 \text{ mm}$, 주파수는 4.14 Hz 가 되게 조절하였다. 실험에 사용된 알루미늄 빔과 SMA, PZT 작동기의 크기 및 기계적 특성치들은 Table 2에 나타내었다. 제어기는 IBM PC 486에 의해 구현되었고, 샘플링 속도는 1000 Hz 로 설정하였다. 또한, 슬라이딩 서피스의 최적계수 결정법을 이용하여 $k = 0.7$ 일 때의 최적 c 값을 6.9 로 결정하였다.

Fig. 8은 최대진폭 15 mm , 가진주파수 4.14 Hz 로 가진하였을 때의 SMA를 이용하여 강제진동 제어를 수행한 실험결과이다. 그림으로부터 약 2.5 초 후에 제진이 거의 완료되며 SMA가 큰 변위의 진동제어에 매우 효과적임을 알 수 있다. 그러나,

Table 2. Mechanical properties of the aluminum beam, SMA and PZT actuator

Aluminum beam	
Young's modulus	70 GPa
density	2890 kg / m ³
thickness	1.18 mm
width	23 mm
length	400 mm
tip mass	12.3 g
SMA actuator	
Young's modulus	42 GPa
density	2340 kg / m ³
diameter	0.76 mm
length	370 mm
transition temperature	36 °C
prestrain	5 %
PZT actuator	
Young's modulus	70 GPa
density	2890 kg / m ³
thickness	400 mm
width	400 mm
length	400 mm
piezoelectric strain constant	$300 \times 10^{-12} \text{ m / V}$

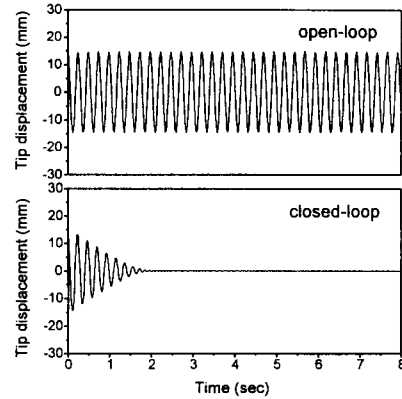


Fig. 8 Control response of the forced vibration using SMA for low frequency and large tip deflection

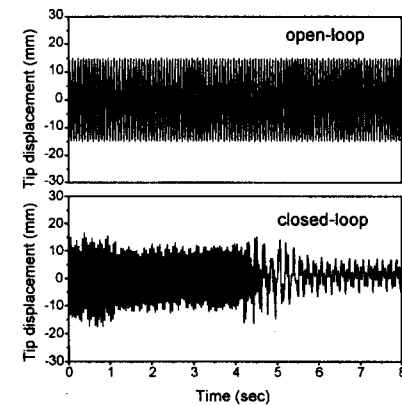


Fig. 9 Control response of the forced vibration using SMA for high frequency and large tip deflection

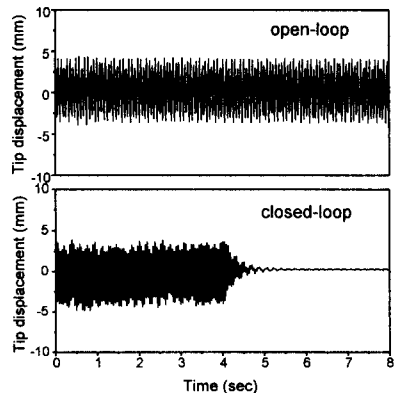


Fig. 10 Control responses of the forced vibration using PZT for high frequency and small tip deflection

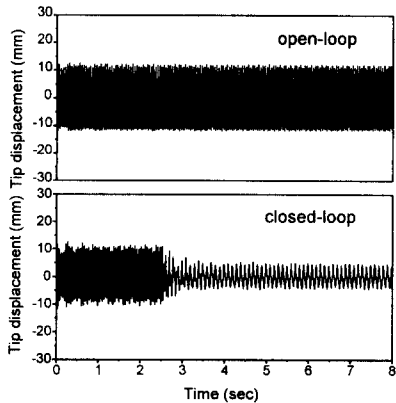


Fig. 11 Control responses of the forced vibration using PZT for high frequency and large tip deflection

Fig. 9 에서 SMA 작동기는 고주파수의 가진에 대한 진동제어 능력이 부족함을 알 수 있다. Fig. 10 은 PZT 작동기에 SMC 를 적용하여 최대변위 $\pm 4 \text{ mm}$, 주파수 15 Hz 로 가진하였을 때의 진동제어에 대한 실험결과이다. PZT 는 비교적 작은 변위의 고주파 가진에 대하여 매우 효율적임을 알 수 있다. 반면에 진폭이 큰 경우에는 Fig. 11 에서 알 수 있듯이 진동제어가 잘 이루어지지 않는다. Fig. 12 는 최대변위 $\pm 10 \text{ mm}$, 주파수 15 Hz 로 가진하였을 때의 SMA 와 PZT 작동기를 모두 사용하여 강제진동 제어를 수행한 결과이다. 이 그림으로부터 PZT /SMA 하이브리드 지능 구조물의 진동 감쇠 성능이 매우 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 두 종류의 하이브리드 지능 구조물을 제안하였다. 그 중 하나는 압전필름(PF)과 전기유동유체(ERF)를 사용한 것이고 다른 하나는 압전세라믹(PZT)과 형상기억합금(SMA)을 사용한 것이다. PF/ERF 하이브리드 지능 구조물은 ERF 의 전기장에 따른 유변학적 성질 변화에 의한 구조물의 동탄성 특성의 변화와 PF 에서 발생하는 굽힘 모멘트를 이용하여 진동제어를 수행하였다. PZT/SMA 지능 구조물 역시 PZT 에서 작용하는 굽힘 모멘트와 SMA 로 부터 발생하는 힘을 이용한다. 위의 두 가지 하이브리드 지능 구조물은 모두 넓은 주파수 영역에서 비교적 큰 진폭의 진동제어에 우수한 성능을 나타내었다. 이상에서 살펴본 바와 같이 두 가지 이상의 지능 재료를 사용한 하이브리드 지능 구조물이 단일 작동기를 사용한 지

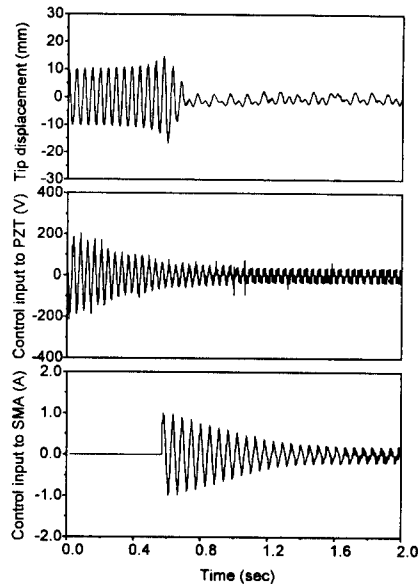


Fig. 12 Control responses of the forced vibration using SMA/PZT hybrid actuation

능 구조물에 비하여 우월한 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

REFERENCES

- (1) Bailey, T., and Hubbard, J. E., Jr., "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *AIAA J. Guidance Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611, 1985.
- (2) Choi, S. B., "Alleviation of Chattering in Flexible Beam Control via Piezofilm Actuator and Sensor," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 564-567, 1995.
- (3) Choi, S. B., Park, Y. K., and Kim, J. D., "Vibration Characteristics of Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, No. 9, pp. 757-768, 1993.
- (4) Baz, A., Iman, K., and McCoy, J., "Active Vibration Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 140, No. 3, pp. 437-456, 1990.
- (5) Gandhi, M. V., and Thompson, B. S., *Smart materials and Structures*, Chapman & Hall, London, 1992.
- (6) Choi, S. B. and D. W. Park, "Moving Sliding Surfaces for Fast Tracking Control of Second-Order Dynamical Systems," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 116, No. 1, pp. 154-158, 1994.