

전기유동유체와 압전필름 액츄에이터를 이용한 지능구조물의 진동제어

오박용군*, 최승복**

(Vibration Control of Intelligent Structures via ER Fluids and Piezoelectric Film Actuators)

(Yong-Kun Park and Seung-Bok Choi)

1. 서론

로봇 및 구조물의 고속운전과 에너지 절약을 위한 구조의 경량화, 그리고 피할 수 없는 대형 우주 유연 구조물의 경량화 추세에 따른 진동과 소음을 감소 및 제어 하기 위해, 현존하는 금속이나 복합재료 구조물에 연속 또는 분포형의 액츄에이터 및 센서를 접합 혹은 삽입한 후 마이크로 프로세서와 연계하여 구조물 자체가 예측하기 힘든 외란 및 내란에 대해 유효 적절히 대처할 수 있는 지능구조물에 대한 연구가 활발히 진행 중이다⁽¹⁾. 현재 이러한 구조물을 형성하는 매체로서는 압전재료 (piezoelectric materials), 형상기억합금 (shape memory alloy), 전기유동 (electro-rheological: ER) 유체 등이 있다. 잘 알려진 바와 같이 압전재료는 압전효과인 극전화 현상에 의해 센싱과 액츄에이팅을 동시에 수행하는 능력을 가졌으며 구조물과 접착되어 전압공급에 따른 굽힘 모멘트 발생으로 진동을 제어한다. 형상기억합금은 특정한 형상을 기억했다가 적절한 열의 공급에 의해 기억된 본래의 형상을 다시 찾을 수 있는 복원 능력을 지니고 있다. 이런 형상복귀력과 특정한 구속 조건으로부터 발생하는 구속력을 이용하여 구조물의 모드 (mode) 형태를 변화 시켜서 진동제어를 수행하는 액츄에이터로 사용된다. 그리고 ER 유체는 전장부하에 의한 순간적이고 가역적인 상변화를 특징으로 하여 ER 유체를 함유한 구조물 자체의 감쇠 및 강성을 전장부하에 의해 구조물의 공진점을 회피함으로써 진동제어를 수행한다.

이들 각각 매체의 독특한 특성을 연계한 지능구조물에 대한 연구는 지난 몇년간 꾸준한 관심과 연구가 이루어졌다. Hubbard⁽²⁾와 Choi⁽³⁾는 압전필름을 유연구조물에 센서와 액츄에이터로 부착한 후 구조물 에너지와 리아푸노프 (Lyapunov) 안정성을 기초로하여 구조물 끝점의 속도성분을 특징으로 하는 제어기를 제안하여 구조물의 진동제어를 수행하였다. Baz⁽⁴⁾는 실험과 이론적으로 형상기억 합금 자체의 열적 및 동적 특성을 고찰한 후 이를 토대로 형상기억합금을 이용한 구조물의 진동제어를 실시 하였다. 한편, Choi와 Park^(5,6)은 ER 유체가

함유된 구조물에 전장부하를 인가하여 전장부하에 따른 구조물의 동탄성 특성 고찰 및 주파수가 변하는 외란에 대해서 구조물의 변위를 최소화하는 제어 알고리즘을 주파수 응답을 특징으로 도출한 후 구조물의 진동제어를 수행하였다.

한편, 각 매체는 독특한 장단점을 지니고 있는데 압전필름은 유연하고 매우 빠른 응답으로 고주파 영역에서의 제어효과가 큰 반면 어느 일정 제어전압 이상에서 포화되고 제어력이 작다. 형상기억합금은 저주파수 영역에서 큰 제어력을 낼 수 있지만 응답속도는 매우 느리다. 그리고 ER 유체는 전장부하에 의해 구조물의 동탄성 특성을 조절할 수 있기 때문에 공진점 부위에서 큰 진폭을 제어할 얻을 수 있지만 액츄에이팅 힘이나 모멘트를 발생 시킬 수 없어 실질적인 능동진동제어에 어려움을 준다. 그래서 최근 여러 제약 조건하에서 다양한 기능을 수행해야 하는 구조물에 대해 한가지의 액츄에이터 매체로서는 만족 시킬 수 없기 때문에 하이브리드형 지능구조물의 출현이 요구되고 있다.

지금까지 두 매체 이상을 결합한 하이브리드형 지능 구조물에 대한 연구는 초기 단계로서 구조물의 정확한 정적 및 동적 모델링, 그리고 제어기 설계 등이 정립되지 않은 상태이다. 특히, 제어측면에서 능동 제어기 설계 및 실험적 구현에 대한 연구는 많은 매력을 갖고 있으나 각 매체들 자체의 복잡한 메카니즘과 더불어 두 매체이상 결합에서 발생하는 여러 현상에 대한 파악이 매우 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 잠재적 응용성이 큰 ER 유체와 압전필름을 액츄에이터로 하는 하이브리드형 지능구조물을 제안한 후 능동 진동제어를 실시하였다. 먼저 중공 (hollow)의 샌드위치 형태 복합재료 (glass/epoxy) 보에 ER 유체와 압전필름을 각각 삽입과 접착을 하여 하이브리드형 지능구조물을 제작하였다. 그리고 각 매체의 액츄에이팅 특성을 고려하여, ER 유체 액츄에이터 (ERFA)는 전장부하 함수로 도출되는 구조물의 주파수응답을 특징으로하였고, 압전필름 액츄에이터 (PFA)는 신경 슬라이딩 모드 제어기 (neuro sliding mode controller: NSC)를 적용하였다. 이 두 액츄에이터가 동시에 작동하는 능동 진동제어계를 실험적으로 구현한 후 과도응답과 강제응답에 대한 진동제어 성능을 단일 액츄에이터 작동시와 비교 고찰하여 제시된 하이브리드 액츄에이팅의 효과를 입증하였다.

* 인하대학교 기계공학과 박사후 과정

** 인하대학교 기계공학과

2. 제어 알고리즘 도출

2-1. ERFA(전기유동유체 액튜에이터)

대부분의 ER유체는 전도성의 고체입자, 절연성의 기본 오일용매, 그리고 ER효과를 향상 시키기 위한 첨가제 등으로 이루어져 있고, 외면상 가장 두드러진 현상은 전장 무부하 시 액체상태가 전장부하를 인가하면 고체상태로 상변화하는 것이다. 전장부하 시 고체입자는 체인형 구조를 형성하여 유체 자체의 모든 유동성질을 변화 시키고, 이 유체가 구조물 속에 함유될 때 체인구조는 구조물의 강성 및 감쇠를 증가 시킨다. 1947년 미국의 Winslow(7)가 ER효과를 처음 발견 후, 이 현상을 규명하기 위한 많은 연구가들에 의해 ER유체 메카니즘에 대한 여러가지 이론과 모델이 제안되고 있으나 지금까지 이렇다할 만한 획기적인 구체적이고 정량적인 해석은 나오지 않고 있으며 의견조차 분분한 실정이다. 이와 같이 ER유체 자체에 대한 모델링의 복잡성은 무엇보다도 고체입자의 전기적 성질과 유체 흐름간에 상호작용에 대한 이해 부족에서 기인된다. 그러나, 일반적으로 ER유체의 거동을 나타내는 구성식은 ER효과 메카니즘을 기초로 하여 전단(shear)의 함수로 표현된다. 전단 변형율이 클 경우에는 전장부하 시 빙햄거동(Bingham behavior)을 나타내며 항복 전단 응력이 전장부하의 함수가 된다. 한편, 보나 평판 등과 같은 구조물에 안에 함유되어 있는 ER유체는 흐름이 없는 겹상태에서 외란을 받는 경우 전단 변형율은 매우 작아서 탄성과 점성을 동시에 갖는 점탄성을 나타낸다. 이때 복소전단 모듈러스가 전장부하의 함수가 되어 ER유체를 함유한 구조물의 강성 및 감쇠 특성을 인가하는 전장부하에 의해 조절하는 분포형 액튜에이터로 사용할 수 있어 관련 연구자들에게 많은 흥미를 끌었다.

Fig. 1과 같이 전장부하의 함수로 도출된 지능구조물의 주파수응답 중에서 각 주파수 대역에서 가장 낮은 곡선을 요구응답으로 설정한 후, 요구응답의 주파수 대역에 해당하는 전장부하를 요구 전장부하로 정한다. 이를 일반적인 논리제어 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{IF } \tilde{\omega}_i \leq \tilde{\omega} < \tilde{\omega}_{i+1}, \text{ THEN } \tilde{V}_d = \tilde{V}_j \quad (1)$$

여기서, $\tilde{\omega}$ 는 외란 주파수이고 \tilde{V}_j 는 요구 주파수응답에 상응하는 요구전장(\tilde{V}_d)이다. 한편, 본 연구에서 제시된 지능구조물에 대한

ERFA의 제어알고리즘은 다음과같이 도출된다.

$$\begin{aligned} \text{IF } 0.0\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 12.5\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 1.0\text{kV/mm} \\ \text{IF } 12.5\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 27.0\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 0.0\text{kV/mm} \\ \text{IF } 27.0\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 33.0\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 0.2\text{kV/mm} \\ \text{IF } 33.0\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 45.6\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 1.0\text{kV/mm} \\ \text{IF } 45.6\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 64.5\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 0.0\text{kV/mm} \\ \text{IF } 64.5\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 76.2\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 0.2\text{kV/mm} \\ \text{IF } 76.2\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 95.1\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 1.0\text{kV/mm} \\ \text{IF } 95.1\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 105\text{Hz}, \text{ THEN } \tilde{V}_d &= 0.0\text{kV/mm} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 설정된 모든 주파수범위의 외란에 대해서 효과적으로 공진 현상을 피하여 진동제어가 가능함을 알 수 있다.

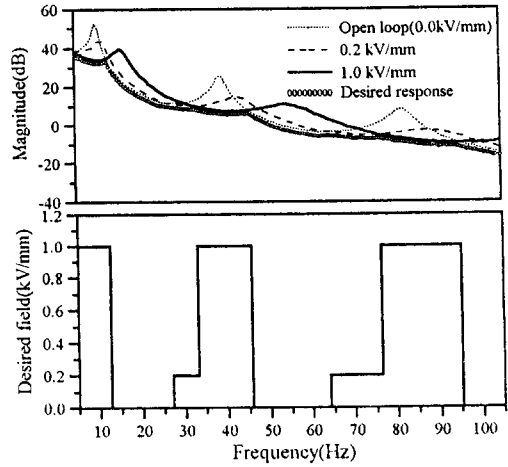


Fig. 1 Active control scheme for the ERFA

2-2. PFA(압전필름 액튜에이터)

본 연구에서 제시된 지능구조물은 ER유체 영역, 복합재료판, 압전필름, 실리콘 고무 등으로 이루어져 있기 때문에 비선형성이 강하며 시스템 모델링이 매우 어렵다. 그래서, PFA로서 시스템 모델에 대한 정보 필요없이 출력 정보만 갖고 학습을 통해 요구하는 출력을 얻을 수 있으며, 실험적 구현이 용이한 신경회로망 제어기를 채택하였다. 신경회로망 제어기는 연결된 많은 신경들과 여러 층으로 이루어져 오차 역전파 학습(back-propagation learning)알고리즘이라 불리는 오차 조정 기법으로 층과 층 사이 신경들의 연결 강도를 조정하여 요구출력을 얻는 것이다.

Fig. 2는 제시된 PFA에 적용한 신경-슬라이딩 모드 제어기(NSC)의 구조를 나타낸다. 입력층(i-th), 중간층(j-th) 그리고 출력층(k-th) 세층으로 이루어져 있고, 신경(neuron)의 갯수는 각각 2개, 5개, 1개이다. 중간층에서 출력층으로 사상은 선형 함수 $f_k(x) = 5x$ 로 이루어지고, 입력층에서 중간층으로 사상은 시그모이드 함수 $f_j = 2/(1 + \exp(-5 \cdot x)) - 1$ 를 통해 이루어진다.

오차 역전파 학습기법은 두 가지 국면을 가지고 있는데 그 하나는 앞쪽으로 전진하는 국면으로, 이는 입력이 주워지고 각 신경세포에 대해 출력을 계산하는 것이다. 입력층과 중간층 사이는 다음과 같다.

$$\text{net}_p^j = \sum_{m=1}^2 w_{pm}^j X_m + \theta_p^j, \quad (p=1, \dots, 5) \quad (3)$$

여기서 X_m 은 중간층에 들어가는 입력으로써 변위 $x(t)$ 와 이전 변위 $x(t-1)$ 로 나타내고 θ_p^j 는 중간층 옵셋이다. 그리고, net_p^j 는 중간층에 있는 p번째 신경에 대한 입력들의 합이고, w_{pm}^j 는 입력층에서 중간층의 p번째 신경까지의 연결강도이다. 따라서, 중간층의 출력은

$$O_p^j = f_j(\text{net}_p^j) = 2/(1 + \exp(-5 \cdot \text{net}_p^j)) - 1 \quad (p=1, 2, \dots, 5) \quad (4)$$

이다. 그리고 중간층과 출력층 사이의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$net_1^k = \sum_{p=1}^5 w_{1p}^k O_p^j + \theta_1^k \quad (5)$$

여기서 θ_1^k 는 출력층의 옵셋이다. 그리고 마지막층인 출력층의 출력은 다음식으로 얻어진다.

$$O_1^k = f_k(net_1^k) = s \cdot net_1^k \quad (6)$$

따라서, 출력층의 요구출력(T_1)과의 오차의 제곱의 합은 다음과 같다.

$$E = \sum (T_1 - O_1^k)^2 / 2 \quad (7)$$

한편, 오차 역전파 학습기법의 또 다른 하나의 국면은 오차를 갖고 출력층에서부터 입력층까지 층과 층 사이의 연결강도를 조절하는 것으로써 가능한 한 빠르게 출력층의 오차를 최소화 하기 위해 최급하강법 (gradient-descent method)이 적용된다. 중간층과 출력층에 대한 연결강도의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta w_{1j}^k = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{1j}^k} = \eta \delta_1^k O_p^j \quad (8)$$

여기서,

$$\delta_1^k = -\frac{\partial E}{\partial net_1^k} = (T_1 - O_1^k) \cdot s$$

입력과 중간층에 대한 연결강도의 변화:

$$\Delta w_{pi}^j = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{pi}^j} = \eta \delta_1^k w_{1j}^k O_p^j (1 - O_p^j) X_m \quad (9)$$

여기서 η 는 학습율이다.

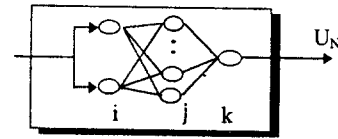
한편, 오차 역전파 학습을 제어에 적용시 시스템의 요구응답을 얻어내는 제어기의 요구 출력(T_1)을 미리 알지 못하기 때문에 역전파 학습에 필요한 δ_1^k 직접 얻어질 수 없다.

그래서 효과적으로 시스템의 요구 응답을 얻기 위해 연결강도를 조정하기 위한 많은 방법 등이 제안되어왔다⁽⁸⁾. 본연구에서는 슬라이드 모드 제어기 개념에 기초하여 다음과 같은 신경 슬라이딩 모드제어기를 적용하였다⁽⁹⁾.

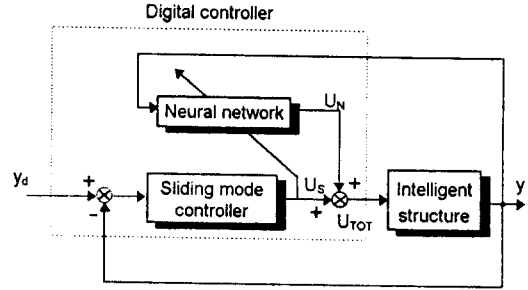
$$\delta_1^k = S_1 + \dot{S}_1, U_{TOT} = U_N + U_S = O_1^k + K_1 S_1 \quad (10)$$

일단 변수 S_1 와 \dot{S}_1 을 영으로 접근 시키면 U_S 는 최소화 되므로, U_{TOT} 는 U_N 과 거의 같은 값이 되고 연결 강도를 조절할 필요가 없게 된다. 따라서 출력 Y 는 요구되는 출력 Y_d 와 같아진다. 그러나 제어되는 플랜트의 변수들이 변하거나 그 플랜트에 외란이 작용한다면 되먹임 오차 신호의 편향 U_S 가 생성되고, 출력 Y 가 요구되는 값과 같을 때까지 되먹임 오차 신호를 최소화하는 연결 강도의 수정이 필요하다.

본 연구에서는 요구 상태변수 $x_{1d} = x_{2d} = 0$ 로 설정하였다. x_{1d}, x_{2d} 는 즉 각각 끝점에서 요구 변위 및 속도를 zero로 하는것이다. 제어 입력 전압 U_{TOT} 는 압전필름에 대한 최대 허용 전압을 고려해 볼 때 1.5kV로 제한된다. 반면 슬라이딩 초평면(sliding hyperplane)의 식은 $S_1 = 10e_1 + e_2$ 이다. 여기서 $e_1 = x_1 - x_{1d}$, $e_2 = x_2 - x_{2d}$. 그리고 실험에 사용된 변수값 들은 $\eta = 0.5$, $K_1 = 8$, $\theta_1^k = \theta_p^j = 0.0$ 이다



(a) Architecture of neural network



(b) Block diagram of the proposed controller

Fig. 2 Configuration of the NSC

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험장치 및 절차

Table 1은 제시된 지능구조물의 구성 요소인 복합재료판, 알루미늄박, ER유체, 압전필름의 물리적 성질 및 치수를 나타낸다. 그리고 지능구조물의 형상은 Fig.3과 같이 샌드위치 형태의 외팔보이다. 복합재료판 (glass/epoxy)은 강성을 가지고 전체 구조물을 지탱하고 또한, ERFA와 PFA를 동시에 액츄에이팅할 때 제어 전압이 서로 간섭이 발생되지 않도록 하는 절연 역할을 수행한다. 한편, 알루미늄박은 복합재료 판 내부에 접촉되어 ERFA의 제어전압을 공급하는 전극 역할을 수행한다. 실리콘 고무는 절연체 역할을 하는 것으로서 부드럽고 내열성을 지니고 있으며 ER유체가 함유될 수 있는 공간을 형성한다. 압전필름은 복합재료판 상하면에 부착되어 액츄에이터 역할을 한다.

Fig. 4는 제시된 하이브리드 지능구조물의 진동제어 특성을 고찰하기 위한 실험장치를 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저 시편의 한쪽 끝을 셰이커 위의 고정구에 고정 시키고, 2채널 주파수 분석기(FFT analyzer)의 근원 신호를 파워 증폭기로 증폭하여 셰이커로 입력한다. 또한, 주파수 분석기의 화면 출력 주파수 범위는 시편의 첫번째 모드와 두번째 모드의 감쇠 고유주파수가 잘 표현될 수 있도록 5Hz-105Hz로 설정하였다. 셰이커위에 부착된 가속도계로 시편에 인가되는 가속도 입력을 측정하였고, 또한 시편 반대쪽 끝에는 와류식 비접촉식 변위기로 시편 끝에서의 변위를 측정하였다. 가속도계의 신호와 이 변위기의 신호는 ERFA를 위해 각각 증폭되어 주파수 분석기에 각각 입력, 출력으로 들어가 전장 변화에 따른 주파수 응답(전달함수)을 제공한다. 실험은 전장을 0.2kV/mm 간격으로 10kV/mm까지 증가 시키면서 각각의 전장에 해당하는 주파수 응답을 얻는다. 또한, 시편 끝에서의 변위 정보가 비접촉

변위기를 통해 A/D변환기(12bit)를 거쳐 컴퓨터로 되먹임된 후 마이크로 프로세서에 입력된 ERFA와 PFA의 제어 알고리즘과 연계되어 제어입력 전압이 결정된다. 각각 서로 독립적으로 결정된 입력 전압이 2채널의 D/A 변환기를 거쳐 두개의 고전압 증폭기에서 증폭되어 지능 구조물로 공급된다.

Table 1 Dimensional and material properties of the proposed intelligent structure

Composite laminated layer (glass/epoxy)				
Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length
32 GPa	0.6 mm	1850 kg/m ³	25.0 mm	250.0 mm
Aluminum foil				
Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length
70 GPa	0.018 mm	2700 kg/m ³	25.0 mm	250.0 mm
Piezoelectric film				
Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length
2 GPa	0.052 mm	1780 kg/m ³	25.0 mm	175.0 mm
Piezoelectric strain constant			$23 \times 10^{-12} \frac{m/m}{V/m}$	
Piezoelectric stress constant			$216 \times 10^{-3} \frac{V/m}{N/m^2}$	
Electro-rheological fluid				
Base liquid	Particle	Volume fraction	Particle concentration	
Silicone oil	Starch	47.3 %	55 %	

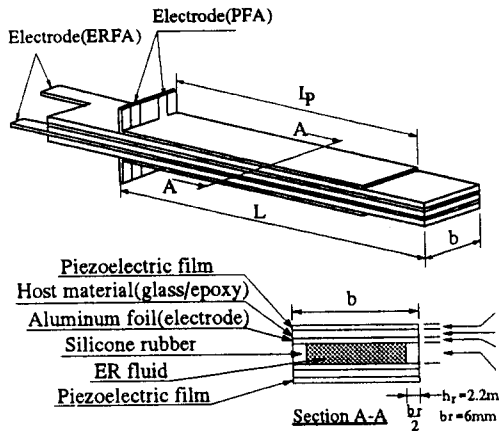


Fig.3 Schematic diagram of the intelligent beam

3-2. 결과 고찰

Fig.5는 제시된 하이브리드 지능구조물에 대한 과도 응답을 나타낸다. 제어가 없을 때(open loop)의 감쇠비 0.024가 제어를 적용하면 0.030(PFA), 0.107(ERFA), 0.113(HYA)로 증가하였다. 특히 ERFA(1.0kV/mm)를 적용 하였을 때 강성과 댐핑의 증가는 PFA를 적용하였을 때보다 더 우수한 성능을 보였다. 한편 두 액튜에이터를 합친 하이브리드(HYA) 경우에는 보다 더 우수한 성능이 나타남을 알 수 있다.

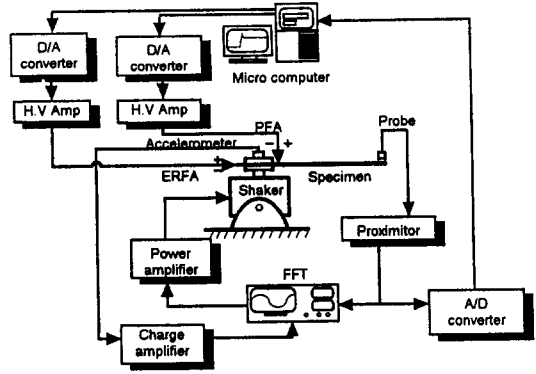


Fig. 4 Experimental apparatus for control implementation

Fig.6은 고찰 되어지는 전 주파수 영역인 5Hz-105Hz에서, 강제 진동시 제시된 PFA, ERFA, HYA 의해 제어된 결과를 나타낸다. 예상한 바와 같이, ERFA는 공진점 부근에서 매우 효과적인 진폭 억제율을 얻을 수 있다. 한편 PFA는 공진부위에서는 제어력 부족에 의해 ERFA보다 진폭억제 능력이 떨어짐을 알 수 있고 공진영역에서 벗어난 고주파수 영역에서 효과적이다. 한편, 제시된 ERFA와 PFA는 이렇게 전극 한 부위에 전압을 부가하여 여러 모드를 동시에 제어할 수 있어 분포형 구조물 진동 제어에서 흔히 발생될 수 있는 스피로버 문제를 해결할 수 있는 가능성을 제시하였다. Fig. 7은 첫번째 모드(10Hz)로 가진할 때 제어성을 시간영역에서 나타낸 것이다. 액튜에이터가 작동하지 않을 때(open loop) 4.69mm 변위가 PFA를 작동시켜 2.84mm로, ERFA(1.0kV/mm)로 0.45mm, 그리고 HYA로 0.29mm로 감소되었다.

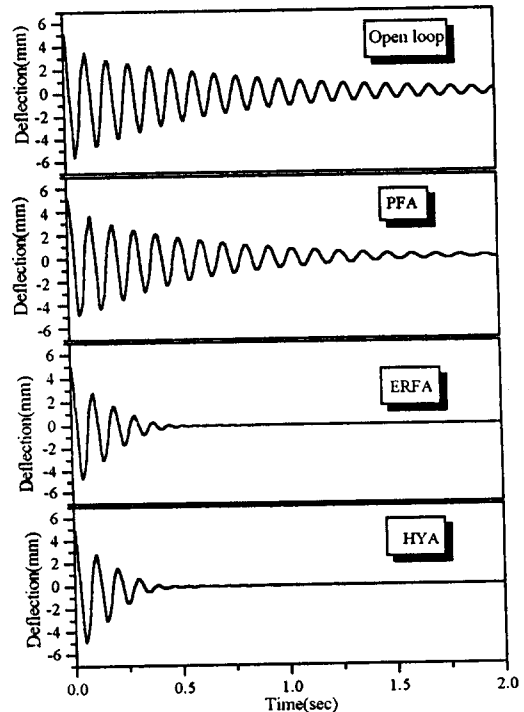


Fig. 5 Transient vibration responses

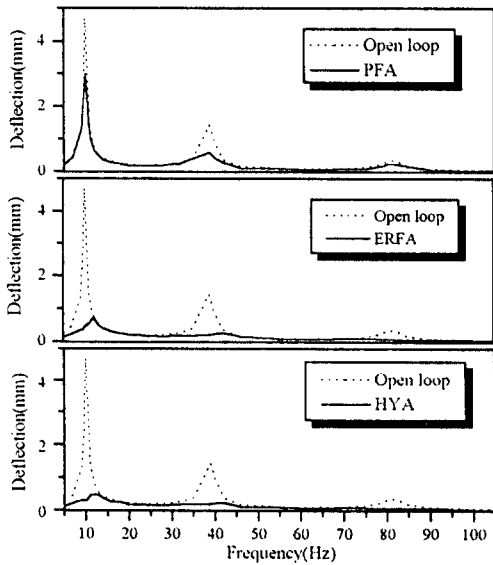


Fig. 6 Forced vibration responses in the frequency domain

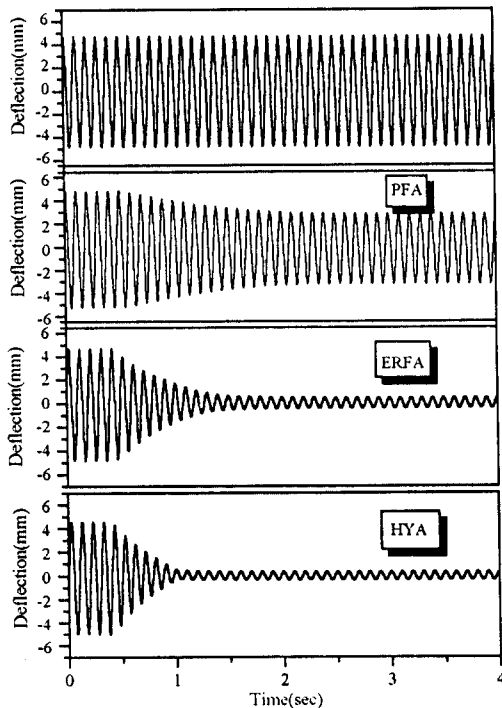


Fig. 7 Forced vibration responses in the time domain

4. 결론

본 연구에서는 잠재적 응용성이 큰 ER유체와 압전필름을 특징으로 하는 하이브리드형 지능구조물을 제안 하였다. 그리고 두 액튜에이터에 대한 제어 알고리즘을 도출한 후, 액튜에이터가

개별적으로 동시에 작용하는 실험적 구현을 통해 능동 진동제어를 실시하였다. 과도진동과 강제진동에서 감쇠비 증가와 진폭억제 등의 진동특성 고찰을 통하여 제시된 하이브리드형 지능구조물의 우수성을 제시하였다. 한편, ERFA는 공진점 부근에서 큰 변위 진동에 효과적이고, PFA는 공진점을 벗어난 고주파 영역의 작은 진동변위 제어에 효과적이었다. 향후 보다 다양한 매체를 이용한 최적의 하이브리드 지능구조물에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Gandhi, M. V. and Thompson, B.S.,1992, "Smart Materials and Structures," London : Chapman &Hall.
- (2) Bailey, T. and Hubbard, Jr. J. E., 1985, " Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," AIAA. J. Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611.
- (3) Choi, S. B., 1995, " Alleviation of Chattering in a Flexible Beam Control via Piezofilm Actuator and Sensor," AIAA Journal , Vol. 33, No. 3 , pp. 564-567.
- (4) Baz, A., Iman, K. and McCoy, J., 1990, " Active Vibration Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators," Journal of Sound and Vibration, Vol. 140, No. 3, pp. 437-456.
- (5) Choi, S.B., Park, Y.K. and Suh, M.S., "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid: Experimental Results," AIAA Journal, Vol. 32, No 2, pp. 438-440, 1994.
- (6) Choi, S.B. and Park, Y. K., 1994, "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid," J. of Sound and Vibration, Vol. 172, No. 3, pp. 428-432.
- (7) Winslow, W.M., 1949, "Induced Fibration Suspensions," Journal of Physics Technology, Vol. 20, No. 12, pp. 1137-1140.
- (8) Tang, Y.S, Hawang, S.T. and Wang, Y.S., 1994, "A Neural Network Controllers for Constant Turning Force," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 4, pp. 453-460.
- (9) Venugopal, X.P. and Smith, S.M., 1993, " A Feedback Scheme for Improving Dynamic Response of Neuro-Controllers," ACC, San Francisco, California, June, pp. 84-88.