

# 전기유동유체와 압전필름 액츄에이터를 이용한 스마트 외팔보의 진동제어

박용군\*, 최승복\*\*

## Vibration Control of a Smart Cantilevered Beam Using Electro-Rheological Fluids and Piezoelectric Films Actuators

Yong-Kun Park\*, Seung-Bok Choi\*\*

### ABSTRACT

This paper deals with an experimental investigation on an active vibration control of a hybrid smart structure(HSS) via an electro-rheological fluid actuator(ERFA) and a piezoelectric film actuator(PFA). Firstly, an HSS is constructed by inserting a silicone oil-based electro-rheological fluid into a hollow cantilevered beam and perfectly bonding piezoelectric films on the upper and lower surfaces of the beam as an actuator and a sensor, respectively. The control scheme of the ERFA tuning stiffness and damping characteristics of the HSS with imposed electric fields is formulated as a function of excitation frequencies on the basis of field-dependent responses. On the other hand, as for the control scheme of the PFA permitting control voltages to generate axial forces or bending moments for suppressing deflections of the HSS, a neuro sliding mode controller(NSC) is employed. Furthermore, an experimental implementation activating the ERFA and the PFA independently is established to carry out an active vibration control in both the transient and forced vibrations. The experimental results exhibit a superior ability of the hybrid actuation system to tailor elastodynamic response characteristics of the HSS rather than a single class of actuator system alone.

**Key Words :** Hybrid Smart Structure(하이브리드 스마트 구조물), Electro-Rheological Fluid Actuator(전기유동유체 액츄에이터), Piezoelectric Film Actuator(압전필름 액츄에이터), Neuro Sliding Mode Controller(신경 슬라이딩 모드 제어기)

\* 명지전문대학 기계설계과  
 \*\* 인하대학교 기계공학과

## 1. 서론

로봇의 고속 운전과 에너지 절약을 위한 구조물의 경량화, 그리고 피할 수 없는 대형 우주 유연 구조물의 경량화 추세에 따른 진동과 소음을 감소 및 제어 하기 위해, 현존하는 금속이나 복합 재료 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 스마트 혹은 지능 구조물에 대한 연구가 활발히 진행 중이다<sup>(1)</sup>. 현재 이러한 스마트 구조물을 형성하는 액츄에이팅 매체로서는 전기유동(electro-rheological: ER) 유체, 압전재료(piezoelectric materials), 형상 기억합금(shape memory alloy) 등이 있다. 잘 알려진 바와 같이, ER 유체 자체가 전장부하에 의해 순간적이고 가역적인 유동 변화를 일으키므로 ER 유체를 연속체 구조물에 함유하였을 때, 구조물의 감쇠 및 강성을 전장부하에 의해 조율이 가능하다. 그래서, 외부 가전에 의한 구조물 공진점을 회피하여 효과적인 진동제어를 수행할 수 있다. 그리고, 압전 재료는 압전효과인 극전화 현상에 의해 구조물과 접촉되어 전압 공급에 따른 굽힘 모멘트 발생으로 진동을 제어한다. 한편, 형상 기억합금은 특정한 형상을 기억했다가 적절한 열의 공급에 의해 기억된 본래의 형상을 다시 찾을 수 있는 복원 능력을 지니고 있다. 이런 형상 복귀력과 특정한 구속 조건으로부터 발생하는 구속력을 이용하여 구조물의 모드(mode) 형태를 변화 시켜서 진동제어를 수행하는 액츄에이터로 사용된다. 그래서 이들 각각 매체의 독특한 특성을 연계한 스마트 구조물에 대한 연구는 지난 몇 년간 꾸준한 관심과 연구가 이루어졌다. Choi와 Park<sup>(2,3)</sup>은 ER 유체가 함유된 구조물에 대해 전장 부하에 따른 구조물의 동탄성 특성 고찰 및 주파수가 변화하는 외란에 대해서 구조물의 변위를 최소화하는 제어 알고리즘을 주파수 응답을 특징으로 도출한 후, 구조물의 진동제어를 수행하였다. 그리고, Hubbard<sup>(4)</sup>와 Choi<sup>(5)</sup>는 압전필름을 유연 구조물에 센서와 액츄에이터로 부착하여 구조물 에너지를 리야푸노프(Lyapunov) 함수로 적용한 후, 구조물의 안정성을 기초로 구조물 끝점 속도성분을 특징으로 하는 일정진폭, 일정계인 제어기를 제안하여 구조물의 진동제어를 수행하였다. 또한, Baz<sup>(6)</sup>는 실험과 이론적으로 형상 기억 합금 자체의 열적 및 동적 특성을 고찰한 후, 이를 토대로 형상 기억합금을 이용한 구조물의 진동제어를 실시 하였다.

한편, 각 매체는 독특한 장단점을 지니고 있는데, ER 유체는 전장부하에 의해 구조물의 동탄성 특성을 조율할 수 있기 때문에 공진점 부위에서 큰 진폭을 제어할 얻을 수 있지만 액츄에이팅 힘이나 모멘트를 발생 시키지 않기 때문에 실질적인 능동 진동제어를 수행하지 못해 어느 정도의 진폭이 항상 존재한다. 그리고, 압전필름은 유연하여 복잡한 형상의 구조물과 잘 연계되고 또한 매우 빠른 응답으로 인해 넓은 제어영역을 갖지만, 어느 일정 전압 이상에서 제어력이 포화된다. 형상 기억합금은 저주파수 영역에서 큰 제어력을 낼 수 있지만, 큰 제어 입력전류가 요구되며 응답속도는 매우 늦어 좁은 제어영역을 나타낸다. 최근 무게, 형상, 크기, 소모전력 등 여러 제약 조건 하에서 다양한 기능을 수행해야 하는 구조물이 많아지고 있다. 그래서 한가지의 액츄에이터 매체로서는 요구 성능을 만족 시킬 수 없기 때문에 하이브리드 스마트 구조물의 출현이 요청되고 있다. 지금까지 두 매체 이상을 결합한 하이브리드 스마트 구조물에 대한 연구는 초기 단계로서 구조물의 정확한 정적 및 동적 모델링, 그리고 제어기 설계 등이 정립되지 않은 상태이다. 특히, 제어측 면에서 능동 제어기 설계 및 실험적 구현에 대한 연구는 많은 매력을 갖고 있으나, 각 매체들 자체의 복잡한 메카니즘과 더불어 두 매체 이상 결합에서 발생하는 여러 현상에 대한 파악이 매우 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 잠재적 응용성이 매우 큰 ER 유체와 압전필름을 액츄에이터로 하는 하이브리드 스마트 구조물을 제안한 후, 능동 진동제어를 실시하였다. 먼저 중공(hollow)의 샌드위치 형태 복합재료(glass/epoxy) 판에 ER 유체와 압전필름을 각각 삽입과 접착을 하여 하이브리드 스마트 외팔보를 제작하였다. 그리고 각 매체의 액츄에이팅 특성을 고려하여, ER 유체 액츄에이터(ERFA)는 전장부하 함수로 도출되는 구조물의 주파수 응답을 특징으로, 압전필름 액츄에이터(PFA)는 신경 슬라이딩 모드 제어기(neuro sliding mode controller: NSC)를 적용하였다. 이 두 액츄에이터가 동시에 작동하는 능동 진동 제어계를 실험적으로 구현한 후, 과도 응답과 강제 응답에 대한 진동 제어 성능을 단일 액츄에이터 작동 시와 비교 고찰하여 제시된 하이브리드 액츄에이팅 방법론의 잠재적 응용성을 입증하였다.

## 2. 제어 알고리즘 도출

### 2.1 ERFA (전기유동유체 액츄에이터)

대부분의 ER유체는 전도성의 고체입자, 절연성의 기본 오일용매, 그리고 ER효과를 향상 시키기 위한 첨가제 등으로 이루어져 있는데, 외면상 가장 두드러진 현상은 전장 무부하 시 액체상태가 전장부하를 인가하면 겔(gel) 상태로 변화하는 것이다. 전장부하 시 고체입자는 체인형 구조를 형성하여 유체 자체의 모든 유동성질을 변화 시키고, 이 유체가 구조물 속에 함유될 때 체인 구조는 구조물의 강성 및 감쇠를 증가 시킨다. 1947년 미국의 Winslow<sup>(7)</sup>가 ER효과를 처음 발견 후, 이 현상을 규명하기 위한 많은 연구가들에 의해 ER유체 메카니즘에 대한 여러 가지 이론과 모델이 제안되고 있으나 지금까지 이렇다 할 만한 획기적인 구체적이고 정략적인 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, 보 (beam)나 평판(plate) 등과 같은 구조물에 안에 함유되어 있는 ER유체는 흐름이 없는 겔 상태에서 외란을 받는 경우 전단 변형율은 매우 작아서 탄성과 점성을 동시에 갖는 점탄성(viscoelasticity)을 나타낸다. 이때 복소 전단 모듈러스가 전장부하의 함수가 되어 ER유체를 함유한 구조물의 강성 및 감쇠 특성을 전장부하에 의해 조절하는 분포형 액츄에이터로 사용할 수 있어 관련 연구자들에게 많은 흥미를 끌었다. 그래서, 기존의 샌드위치 보이론과 전기장 함수의 복소 전단 모듈러스를 연계한 동적 모델링이 수행되었고, 실험적인 고찰을 통해 모델링의 타당성이 입증되고 있다<sup>(8)</sup>.

결국, 이론적 또는 실험적으로 Fig.1과 같이 전장부하의 함수로 도출된 스마트 구조물의 주파수 응답 중에서 각 주파수 대역에서 변위를 최소로 하는 가장 낮은 곡선을 요구 응답으로 설정한 후, 요구 응답의 주파수 대역에 해당하는 전장부하를 요구 전장부하로 정한다. 이를 일반적인 논리 제어 형태로 표현하면 다음 식과 같다.

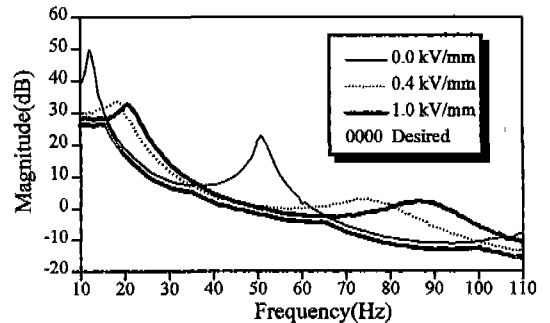
$$IF \ \bar{\omega}_i \leq \bar{\omega} < \bar{\omega}_{i+1}, \ THEN \ \bar{E}_d = \bar{E}_j \quad (1)$$

여기서,  $\bar{\omega}$  는 외란 주파수이고  $\bar{E}_j$  는 요구 주파수 응답에 상응하는 요구 전장 ( $\bar{E}_d$ )이다. 한편, 본 연구에서

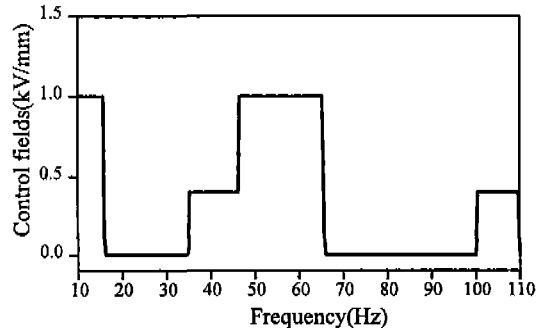
제시된 스마트 구조물에 대한 ERF의 제어 알고리즘은 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} IF \ 0.0Hz \leq \bar{\omega} < 16.1Hz, \ THEN \ \bar{E}_d &= 1.0kV/mm \\ IF \ 16.1Hz \leq \bar{\omega} < 34.5Hz, \ THEN \ \bar{E}_d &= 0.0kV/mm \\ IF \ 34.5Hz \leq \bar{\omega} < 45.3Hz, \ THEN \ \bar{E}_d &= 0.4kV/mm \quad (2) \\ IF \ 45.3Hz \leq \bar{\omega} < 65.5Hz, \ THEN \ \bar{E}_d &= 1.0kV/mm \\ IF \ 65.5Hz \leq \bar{\omega} < 99.6Hz, \ THEN \ \bar{E}_d &= 0.0kV/mm \\ IF \ 99.6Hz \leq \bar{\omega} < 110.0Hz, \ THEN \ \bar{E}_d &= 0.4kV/mm \end{aligned}$$

따라서 설정된 주파수 범위의 외란에 대해서 효과적으로 공진 현상을 피하여 진동제어를 수행할 수 있다.



(a) Field-dependent frequency responses



(b) Desired electric fields

Fig. 1 Control strategy for the ERF

## 2.2 PFA (압전필름 액츄에이터)

본 연구에서 제시된 스마트 구조물은 ER유체 영역, 복합 재료판, 압전필름, 실리콘 고무 등으로 이루어져 있기 때문에 비선형성이 강하며 시스템 모델링이 매우 어렵다.

그래서, PFA로서 시스템 모델에 대한 정보 없이 출력 정보만 갖고 학습을 통해 요구하는 출력을 얻을 수 있으며, 실험적 구현이 용이한 신경회로망 제어기를 채택하였다. Fig.2는 제시된 PFA에 적용한 신경-슬라이딩 모드 제어기(NSC)의 구조를 나타낸다. 입력 층( $i$ -th), 중간 층( $j$ -th) 그리고 출력 층( $k$ -th) 세 층으로 이루어져 있고, 신경(neuron)의 갯수는 각각 2개, 5개, 1개이다. 제시된 NSC의 학습은 구조물의 요구 변위 및 속도를 얻는 요구 제어전압( $V$ )을 각 층 사이에 있는 신경의 연결강도(interconnecting weight)를 조절하여 발생 시키는 것이다. 그래서, 신경 회로망을 학습 시키기 위한  $\delta_1^k$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>(9,10)</sup>

$$\delta_1^k = S_1 + \dot{S}_1 \quad (3)$$

여기서, 슬라이딩 평면  $S_1 = 50e_1 + e_2$ ,  $e_1 = x_1 - x_{1d}$ ,  $e_2 = x_2 - x_{2d}$ 이다. 그리고  $x_1, x_2$ 는 구조물의 실제 끝점 변위와 속도,  $x_{1d}, x_{2d}$ 는 구조물의 요구 끝점 변위와 속도이다. 본 연구에서는 요구 변위 및 속도를 영(zero)으로 선택하였다. 그래서, 역전파 학습(back-propagation learning) 알고리즘에 의한 오차 조정 기법으로 층과 층 사이 신경들의 연결 강도를 조정은 다음 식과 같다.

(i) 입력 층과 중간 층 사이의 연결강도 변화 ( $\Delta w_{pi}^j$ ) 및 출력 ( $O_p^j$ )

$$\begin{aligned} \Delta w_{pi}^j &= \eta \delta_1^k w_{1j}^k O_p^j (1 - O_p^j) X_i, \\ O_p^j &= f_j(\text{net}_p^j) = 2 / (1 + \exp(-5 \cdot \text{net}_p^j)) \\ &\quad - 1 (p = 1, 2, \dots, 5) \end{aligned} \quad (4)$$

(ii) 중간 층과 출력 층 사이의 연결강도 변화 ( $\Delta w_{ij}^k$ ) 및 출력 ( $O_1^k$ )

$$\Delta w_{ij}^k = \eta \delta_1^k O_p^j, \quad O_1^k = f_k(\text{net}_1^k) = 5 \cdot \text{net}_1^k \quad (5)$$

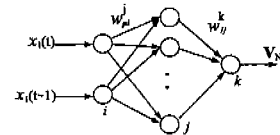
여기서,  $X_i$ 는 중간 층에 들어가는 입력으로써 현재 변위  $x_1(t)$ 와 이전 변위  $x_1(t-1)$ 이고,  $\eta$ 는 학습율이다.  $f_j(\cdot)$ 와  $f_k(\cdot)$ 는 각각 중간 층과 출력 층에 대한 사상(mapping) 함수이고, 이 함수 각각에 해당하는 입력은  $\text{net}_p^j$ 와  $\text{net}_1^k$ 이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{net}_p^j &= \sum_{i=1}^2 w_{pi}^j X_i + \theta_p^j, \quad (p = 1, \dots, 5), \\ \text{net}_1^k &= \sum_{p=1}^5 w_{1p}^k O_p^j + \theta_1^k \end{aligned} \quad (6)$$

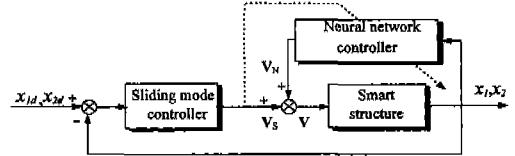
여기서,  $\theta_p^j$ 는 중간 층 옵셋,  $\theta_1^k$ 는 출력 층 옵셋이다. 결국, 본 연구에서 제시된 PFA에 대한 요구전압은 Fig.2에서 나타내는 바와 같이 다음 식이 된다.

$$V = V_N + V_S = O_1^k + K_1 S_1 \quad (7)$$

본 연구에서는 제어 입력 전압  $V$ 는 압전필름에 대한 최대 허용 전압을 고려하여  $1.5kV$ 로 제한되며, 실험에 사용된 변수 값 들은  $\eta = 0.5$ ,  $K_1 = 80$ ,  $\theta_1^k = \theta_p^j = 0.0$ 이다.



(a) Architecture



(b) Block-diagram

Fig. 2 Neuro-sliding mode controller for the PFA

### 3. 실험 및 결과 고찰

#### 3.1 실험장치 및 절차

Table 1은 제시된 스마트 구조물의 구성 요소인 복합 재료판, 알루미늄박, ER유체, 압전필름의 물리적 성질 및 치수를 나타낸다. 그리고 스마트 구조물의 형상은 Fig.3과 같이 샌드위치 형태의 외팔보이다. 복합 재료판(glass/epoxy)은 강성을 가지고 전체 구조물을 지탱하며, 제시된 ERFA와 PFA를 동시에 액튜에이팅할 때 제

어 전압이 서로 간섭이 발생되지 않도록 하는 절연 역할을 수행한다. 한편, 알루미늄박은 복합재료 판 내부에 정착되어 ERFA의 제어전압을 공급하는 전극 역할을 수행한다. 실리콘 고무는 절연체 역할을 하는 것으로서 부드럽고 내열성을 지니고 있으며 ER유체가 함유될 수 있는 공간을 형성한다. 한편, 이 고무의 두께와 폭은 전체 구조물에 대한 ER유체의 체적비를 조절하는 변수가 된다. 압전필름은 복합 재료판 윗 면과 아랫 면에 부착 되어 각각 액츄에이터와 센서로 역할을 한다.

Table. 1 Dimensional and mechanical properties of the proposed smart structure

Composite laminates(glass/epoxy)				
Young's modulus ( $E_2$ )	Thickness( $h_2$ )	Density( $\rho_2$ )	Width( $b$ )	Length( $L$ )
32 GPa	0.6 mm	1850 kg/mm <sup>3</sup>	25.0 mm	260.0 mm
Piezofilm(PVDF)				
Young's modulus ( $E_1$ )	Thickness( $h_1$ )	Density( $\rho_1$ )	Width( $b$ )	Length( $L_1$ )
2 GPa	0.052 mm	1780 kg/mm <sup>3</sup>	25.0 mm	175.0 mm
Piezoelectric strain constant( $d_{31}$ )		23 X10 <sup>-12</sup> (m/m)/(V/m)		
Aluminum foil				
Young's modulus ( $E_3$ )	Thickness( $h_3$ )	Density( $\rho_3$ )	Width( $b$ )	Length( $L$ )
70 GPa	0.018 mm	2700 kg/mm <sup>3</sup>	25.0 mm	260.0 mm
Electro-rheological fluid				
Based oil	Volume fraction	Particle concentration	Width( $b_p$ )	Particle
Silicone oil	44.9 %	55 %	19.0 mm	Starch

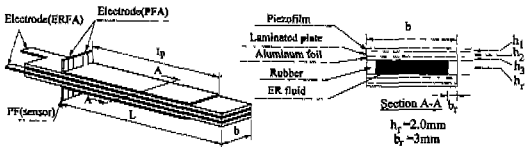


Fig. 3 Schematic diagram of the proposed HSS beam

Fig. 4는 제시된 하이브리드 스마트 구조물의 진동 제어 특성을 고찰하기 위한 실험장치를 도시적으로 나타낸 것이다. 먼저 시편의 한쪽 끝을 가진기(shaker) 위의 고정구에 고정 시키고, 2채널 주파수 분석기(FFT analyzer)의 근원 신호를 파워 증폭기로 증폭하여 가진기로 입력한다. 또한, 주파수 분석기의 출력 주파수 범위는 시편의 첫번째 모드와 두번째 모드의 감쇠 고유주파수가 잘

표현될 수 있도록 5Hz-105Hz 로 설정하였다. 가진기 위에 부착된 가속도계로 시편에 인가되는 가속도 입력을 측정하였고, 또한 시편 아랫 면에 부착된 압전필름으로 시편 끝에서의 변위를 측정하였다. 가속도계의 신호와 이 센서 압전필름의 신호는 제시된 ERFA를 위해 각각 증폭되어 주파수 분석기에 각각 입력, 출력으로 들어가 전장 변화에 따른 주파수 응답 (전달함수)을 제공한다. 본 연구에서 주파수 응답을 얻기 위한 랜덤 가진의 크기는 RMS 1.10m/s<sup>2</sup>로 설정하였다. 실험은 전장을 0.2kV/mm간격으로 1.0kV/mm까지 증가 시키면서 각각의 전장에 해당하는 주파수 응답을 얻는다. 또한, 센서용 압전필름의 시편 끝 변위 정보가 A/D변환기(12bit)를 거쳐 컴퓨터로 되먹임된 후, 마이크로 컴퓨터에 입력된 ERFA(Eq.(2))와 PFA(Eq.(7))의 제어 알고리즘과 연계되어 제어입력 전압이 결정된다. 이때 변환기의 샘플링 시간은 1msec로 하였다. 한편, 서로 독립적으로 결정된 제어 입력 전압이 2채널의 D/A변환기를 거쳐 두개의 고전압 증폭기(1000 배 증폭비)에서 증폭되어 제안된 스마트 구조물로 공급된다.

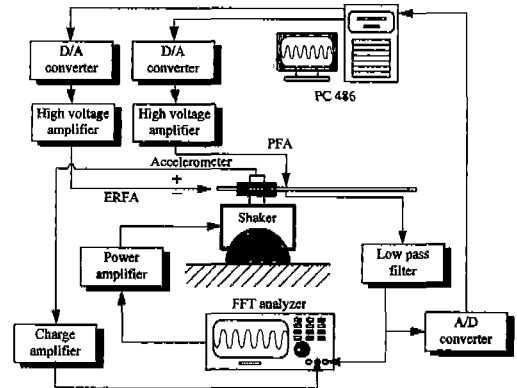


Fig. 4 Experimental apparatus for the vibration control

### 3-2. 결과 고찰

Fig.5는 제시된 하이브리드 스마트 구조물에 대한 과도 응답을 나타낸다. 제어기가 없을 때(open loop)의 감쇠비는 0.018로써 실제로 액츄에이터를 인가하지 않고 있지만 고무(rubber), 압전필름, 전기유동유체가 함께 있기 때문에 샌드위치 구조물이 되어서 수동적 진동제어 효과가 있다. 그러나, 제시된 PFA를 적용하면 0.035,

ERFA를 부가하면 0.119, 그리고 두 제어를 합한 하이브리드 액츄에이터(HYA)를 적용하면 0.157로 감소비가 훨씬 증가하였다. 특히 ERFA(1.0kV/mm)를 적용하였을 때 강성과 댐핑의 증가는 PFA를 적용하였을 때보다 더 우수한 성능을 보였다. 한편 두 액츄에이터를 합친 HYA 경우에는 보다 더 우수한 성능이 나타남을 알 수 있다.

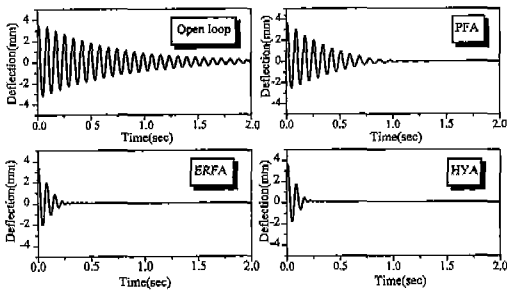


Fig. 5 Transient responses for the HSS beam

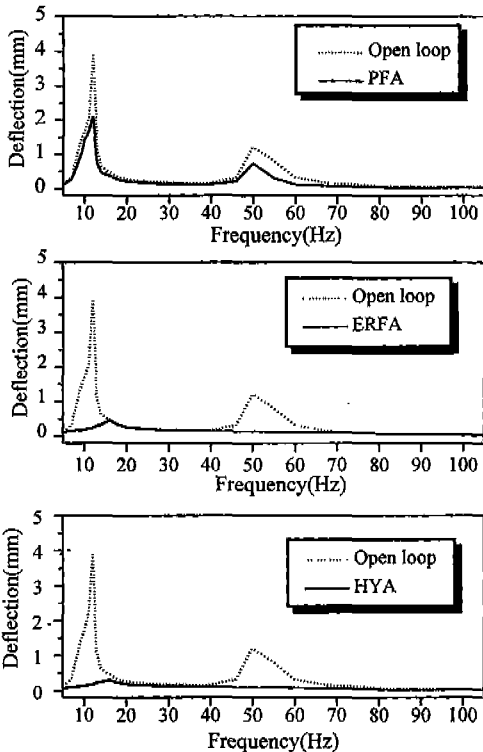


Fig. 6 Forced vibration responses in the frequency domain

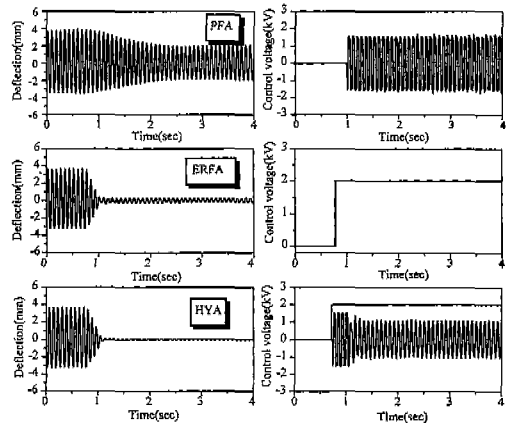


Fig. 7 Forced vibration responses at the first mode of 12Hz

Fig.6은 5Hz-105Hz범위에서 각각 주파수 대역에서 정현파 강제 진동 시 제시된 PFA, ERFA, HYA의해 진동 제어된 결과를 나타낸다. 예상한 바와 같이, ERFA는 공진점 부근에서 매우 효과적인 진폭 억제력을 얻을 수 있다. 그러나 ERFA는 공진점 회피에 의한 진동 억제로써 실질적인 능동 진동제어를 수행하지 못해 강제진동 시 항상 일정 크기 변위는 존재한다. 이러한 단점을 PFA를 통해 보완할 수 있음을 알 수 있다. 한편, PFA는 공진 근처에서는 제어력 부족에 의해 ERFA보다 진폭억제 능력이 떨어짐을 알 수 있고 공진영역에서 벗어난 고주파수 영역에서 효과적이다. 한편, 제시된 ERFA와 PFA는 이렇게 진폭 한 부위에 전압을 부가하여 여러 모드를 동시에 제어할 수 있어 분포형 구조물 진동 제어에서 흔히 발생할 수 있는 스피로버 문제를 해결할 수 있는 가능성을 제시한다. Fig.7은 전 주파수 영역 중에서, 첫번째 모드12Hz로 가진할 때 제어성을 시간영역에서 나타낸 것이다. 액츄에이터가 작동하지 않을 때(open loop) 3.90mm변위가 PFA를 작동시켜 2.10mm로, ERFA(1.0kV/mm)로 0.37mm, 그리고 HYA로 0.12mm로 감소되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 잠재적 응용성이 큰 ER유체와 압전필름을 특징으로 하는 하이브리드 스마트 구조물을 제안하였다. 그리고 두 액츄에이터에 대한 제어 알고리즘을 도출한 후, 액츄에이터가 개별적으로 또한 동시에 작용하는 실험적 구현을 통해 능동 진동제어를 실시하였다. 과도진

동과 강제진동에서 각각 감쇠비 증가와 진폭억제 등의 진동제어 특성 고찰을 통하여 제시된 하이브리드 스마트 구조물의 우수성을 제시하였다. 한편, ERFA는 공진점 부근에서 큰 변위 진동제어에 효과적이고, PFA는 공진점 영역을 벗어난 고주파 영역과 ERFA 적용 후에도 존재하는 작은 진동변위 제어에 효과적이었다. 향후, 보다 다양한 매체를 이용한 최적의 하이브리드 스마트 구조물에 대한 광범한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- Gandhi, M. V. and Thompson, B.S., "Smart Materials and Structures," London : Chapman & Hall, 1992.
- 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.
- Choi, S.B. and Park, Y. K., "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid," J. of Sound and Vibration, Vol. 172, No. 3, pp. 428-432, 1994.
- Bailey, T. and Hubbard, Jr. J. E., "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," AIAA. J. Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611, 1985.
- Choi, S. B., "Alleviation of Chattering in a Flexible Beam Control via Piezofilm Actuator and Sensor," AIAA Journal , Vol. 33, No. 3 , pp. 564-567, 1995.
- Baz, A., Imam, 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.
- Winslow, W. M., "Induced Fibration Suspensions," Journal of Physics Technology, Vol. 20, No. 12, pp. 1137-1140, 1949.
- Park, Y.K., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Modeling and Vibration Control of ERF-Based Intelligent Structures via Sandwich Beam Theory," J. of KSPE, No. 13, Vol. 2, February , pp. 110-121, 1996.
- Tarng, Y.S, Hawang,S.T. and Wang,Y.S., "A Neural Network Controllers for Constant Turning Force," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 4, pp. 453-460, 1994.
- Venugopal, K. P. and Smith, S. M., " A Feedback Scheme for Improving Dynamic Response of Neuro-Controllers," ACC, San Francisco, California, June, pp. 84-88, 1993.