

# ER댐퍼를 이용한 유연 구조물의 진동 제어

<sup>0</sup>이재홍\*, 최승복\*\*

## (Vibration Control of Flexible Structures Using ER Fluid Dampers)

<sup>0</sup>J. H. Lee\*, S. B. Choi\*\*

### ABSTRACT

This paper presents a vibration control of a flexible structure using a controllable ER fluid damper. A clamped-clamped flexible structure system supported by two short columns mimicking a small-sized bridge system is considered. An ER fluid damper which is operated in shear mode is designed and attached to the middle of the flexible structure. The governing equation of motion and associated boundary conditions are derived from Hamilton's principle. A sliding mode control is formulated in order to actively suppress the vibration of the structure due to external excitations. Experimental control results are presented in the frequency domain.

### 1. 서론

최근 여러 곳에서 지진과 과다한 내부 부하 하중에 의한 건물과 다리 붕괴 사고에서 보았듯이, 현존하는 구조물들이 여러 가지 외부의 환경 조건 및 내부의 하중 조건에 매우 취약함을 알 수 있다. 따라서, 이러한 외부 환경 조건에 강건한 구조물 및 시스템을 설계 및 제어하는 연구가 중요한 관심의 대상이 되어 왔다.

이러한 취약성을 보완하는 방법으로 구조물 사이에 점탄성 재료를 삽입하여 상하 운동에 따른 점탄성 재료의 히스테리시스 루프를 발생시키는 샌드위치 구조물을 사용하는 방법, 진동 에너지의 빠른 분산으로 높은 감쇠효과를 지니고, 박판 적층 각도를 조정함으로써 강성을 변화시킬 수 있는 복합 재료를 이용한 방법, 또한 구조물의 하부에 고무나 스프링, 댐퍼 등을 부착하여 외부의 진동원을 차단하는 방법 등이 있다.

그러나, 이러한 방법들은 제작 후 재료에 따라 구조물의 특성이 고정되어 주파수 및 크기가 변하는 외란에 대해 능동적으로 대처할 수 없는 일종의 수동적 구조물(passive structures)이 된다. 따라서 위의 예에서 본바와 같이 외부의 환경 조건

및 내부의 하중 조건에 민감한 구조물 및 시스템의 갑작스런 대형 파괴를 초래하게 된다.

이러한 단점을 보완하고자 예측하기 힘든 외란 및 내란에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 지능 구조물(intelligent, smart, or adaptive structures)에 대한 연구가 한창 진행되고 있다. 현재 주로 이용되고 있는 재료로서는 전기 유동 유체(electrorheological fluid)<sup>(1)~(5)</sup>, 형상기억합금(shape memory alloy)<sup>(6)</sup>, 압전재료(piezoelectric material)<sup>(7)</sup> 등이 있다.

본 연구에서는 전기유동유체를 이용하여 제작한 ER 댐퍼를 유연 구조물의 중간에 부착시켜 진동 제어 실험을 수행하였다. 이를 위해 제안된 시스템의 동적 모델링을 수행한 후, 외란이나 불확실성에 강건한 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 제안한 제어기의 제어성능에 대한 우수성을 입증하기 위해 실험으로부터 얻은 진동 제어 결과를 주파수 영역에서 비교 고찰하였다.

### 2. 시스템 모델링

본 연구에서 제안한 시스템을 Fig.1에 나타내었다. Bernoulli-Euler beam으로 가정하여 압전 세라믹을 포함한 시스템의 운동에너지와 위치에너지를 나타내면 다음과 같다.

\* 인하대학교 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

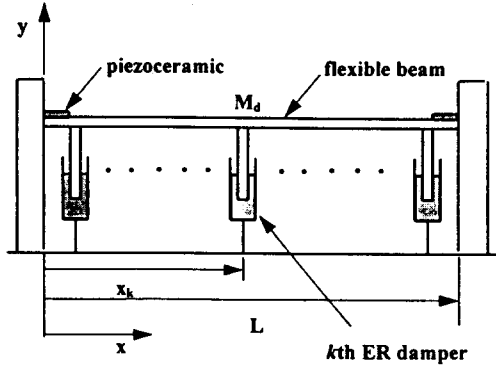


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed structure

$$T = \frac{1}{2} \int_0^{l_1} m_a \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{l_1}^{l_2} m_b \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{l_2}^L m_a \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{l_1}^{l_2} M_d \sum_{k=1}^n \delta(x-x_k) \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 dx \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^{l_1} \frac{1}{E_a I_a} \left( E_a I_a \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + c \cdot V \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{l_1}^{l_2} E_b I_b \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{l_2}^L \frac{1}{E_a I_a} \left( E_a I_a \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + c \cdot V \right)^2 dx \quad (2)$$

위에 나타난 운동에너지와 위치에너지를 Hamilton의 법칙을 적용시키면 다음과 같은 시스템의 운동방정식과 경계 조건을 얻을 수 있다.

$$i) 0 \leq x \leq l_1$$

$$m_a \ddot{y} + E_a I_a y^{(iv)} + c \cdot V'' = P(x, t) \quad (3)$$

$$y(0, t) = 0$$

$$\dot{y}(0, t) = 0$$

$$(E_a I_a y'' + c \cdot V) |_{x=l_1} = E_b I_b y'' |_{x=l_1}$$

$$(E_a I_a y''' + c \cdot V') |_{x=l_1} = E_b I_b y''' |_{x=l_1}$$

$$ii) l_1 \leq x \leq l_2$$

$$[m_b + M_d \sum_{k=1}^n \delta(x-x_k)] \ddot{y} + E_b I_b y^{(iv)} \quad (4)$$

$$= P(x, t) - U, \quad U = \sum_{k=1}^n \delta(x-x_k) F_{ER}$$

$$(E_a I_a y'' + c \cdot V) |_{x=l_1} = E_b I_b y'' |_{x=l_1}$$

$$(E_a I_a y''' + c \cdot V') |_{x=l_1} = E_b I_b y''' |_{x=l_1}$$

$$E_b I_b y'' |_{x=l_2} = (E_a I_a y'' + c \cdot V) |_{x=l_2}$$

$$E_b I_b y''' |_{x=l_2} = (E_a I_a y''' + c \cdot V') |_{x=l_2}$$

$$iii) l_2 \leq x \leq L$$

$$m_a \ddot{y} + E_a I_a y^{(iv)} + c \cdot V'' = P(x, t) \quad (5)$$

$$E_b I_b y'' |_{x=l_2} = (E_a I_a y'' + c \cdot V) |_{x=l_2}$$

$$E_b I_b y''' |_{x=l_2} = (E_a I_a y''' + c \cdot V') |_{x=l_2}$$

$$y(L, t) = 0$$

$$\dot{y}(L, t) = 0$$

여기서  $(\cdot)$ 은 시간에 대하여,  $(\cdot)$ 은 축방향좌표  $(x)$ 에 대한 편미분을 나타낸다.  $m$ 은 구조물의 단위 길이당 질량,  $EI$ 는 유효굽힘강성을 나타내고 있는데 여기서 아래 첨자  $a, b$ 는 각각 압전 세라믹과 스테인리스 스틸이 함께 붙어 있는 부분 ( $0 \leq x \leq l_1, l_2 \leq x \leq L$ ), 스테인리스 스틸만 붙어 있는 부분 ( $l_1 \leq x \leq l_2$ )을 나타낸다.  $P$ 는 외부로부터의 힘,  $M_d$ 는  $k$ 번째의 댄퍼 질량을 나타내고,  $U$ 는  $k$ 번째의 댄퍼에서 발생하는 댄핑력  $F_{ER}$ 을 나타낸다.

모드 가정법(assumed-mode method)을 이용하여 상미분방정식을 유도하기 위하여 진동 모드를 다음과 같이 가정한다.

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i^{(j)}(x) q_i(t) \quad (6)$$

여기서, 아래 첨자  $i$ 는 구조물의 각 진동 모드를 나타내며, 윗 첨자  $i$ 는 축방향에 따라 유효굽힘강성이나 단위길이당 질량 등이 다른 부분( $i=1,2,3$ )을 나타낸다. 또한,  $\phi_i^{(j)}(x)$ 는 가정된 모드 형상 함수,  $q_i(t)$ 는 일반화 좌표(generalized coordinate)를 각각 나타낸다.

여기서는 각 부분에 따라 다음과 같이 진동 모드를 고려하였다.

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i^{(1)}(x) q_i(t), \quad 0 \leq x \leq l_1 \quad (7)$$

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i^{(2)}(x) q_i(t), \quad l_1 \leq x \leq l_2 \quad (8)$$

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i^{(3)}(x) q_i(t), \quad l_2 \leq x \leq L \quad (9)$$

모드 해석을 이용해서 구한 운동에너지 와 위치 에너지, 일반화 힘을 Lagrangian방정식에 대입하면 다음과 같은 상미분방정식이 구해진다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{Q_i(t)}{I_i} \quad (10)$$

$$Q_i(t) = \int_{l_1}^{l_2} \phi_i^{(2)}(x) (P(x, t) - U(x, t)) dx$$

$$- c \cdot V \left[ \int_0^{l_1} \phi_i^{(1)''}(x) dx + \int_{l_2}^L \phi_i^{(3)''}(x) dx \right]$$

$$I_i = \int_0^{l_1} m_a (\phi_i^{(1)}(x))^2 dx$$

$$+ \int_{l_1}^{l_2} m_b (\phi_i^{(2)}(x))^2 dx$$

$$+ \int_{l_2}^L m_a (\phi_i^{(3)}(x))^2 dx$$

$$+ \int_{l_1}^{l_2} M_d \sum_{k=1}^n \delta(x-x_k) (\phi_i^{(2)}(x))^2 dx$$

여기서,  $\omega_i$ 는  $i$ 번째 모드의 고유 진동수,  $\zeta_i$ 는 감쇠비,  $Q_i$ 는 일반화 힘(generalized force)과 압전 세라믹에 의한 굽힘 모멘트,  $I_i$ 는 일반화 질량을 각각 나타낸다.

Table 1.은 제안한 유연 구조물의 기하학적 및 물리적 성질을 나타낸 것이다.

Table 1. Dimensional and mechanical properties of the flexible structure

| Flexible Beam(stainless steel) |           |                        |       |        |
|--------------------------------|-----------|------------------------|-------|--------|
| Young's modulus                | thickness | density                | width | length |
| 190GPa                         | 0.5mm     | 7920 kg/m <sup>3</sup> | 40mm  | 600mm  |

한편, ER댐퍼에서 발생하는 댐핑력  $F_{ER}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{ER} = \int_{l_1}^{l_2} \tau_y dA = \int_{l_1}^{l_2} (\tau_y 2\pi r) dh = 2\pi r L \tau_y \quad (11)$$

$$= 2\pi r L \left( \eta \frac{\dot{y}_k}{h} + \alpha \left( \frac{V}{h} \right)^\beta \cdot \text{sgn}(\dot{y}_k) \right)$$

여기서,  $\tau_y$ 는 유체의 점성에 의한 전단응력과 전기장 부하에 의하여 증가하는 ER유체의 전단응력의 합으로 나타나는 전단응력이다. 그리고,  $\eta$ 는 ER유체의 점도,  $h$ 는 안쪽 실린더와 바깥쪽 실린더 사이의 간격,  $V$ 는 가하는 전압의 세기를 각각 나타낸다. 또한,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 ER유체의 용매 종류, 입자 종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 ER유체의 조성 조건에 영향을 받는 ER유체의 고유 상수,  $r$ 은 안쪽 실린더의 반지름,  $L$ 은 안쪽 실린더와 바깥쪽 실린더의 전극 길이,  $y_k$ 는 댐퍼의 속도이다. Table 2는 제작한 ER댐퍼의 기하학적 성질을 나타낸 것이며,

Fig. 2는 그 형상을 나타낸다.

Table 2. Dimensional properties of the ER damper

| ER Fluid Damper                       |        |                           |        |
|---------------------------------------|--------|---------------------------|--------|
| inner cylinder (coated aluminum foil) |        | outer cylinder (aluminum) |        |
| outer radius                          | length | inner radius              | length |
| 50mm                                  | 40mm   | 54mm                      | 70mm   |

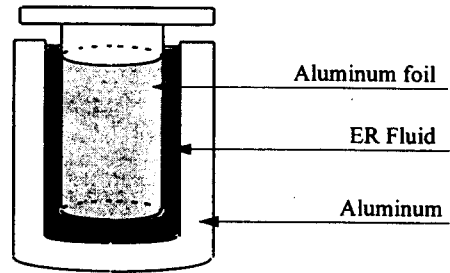


Fig 2. Schematic diagram of the ER Fluid Damper

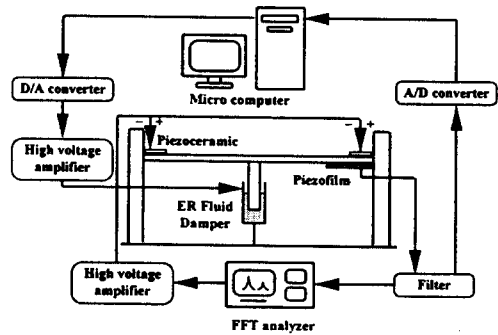


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

### 3. 실험 장치 및 제어기 구현

#### 3.1 실험 장치

본 연구에서 실시한 실험에 대한 그림은 Fig.3에 나타나 있다. 먼저, 유연 보의 양단을 고정된 후, 양쪽 끝단에 압전 세라믹을 붙인다. 그리고, 유연 보의 가운데 부분에 변위를 측정하기 위해서 한쪽 끝단에 압전 필름을 붙여 2채널 주파수 분석기(FFT analyzer)에서 변위를 측정하였다. 가진 입력력은 2채널 주파수 분석기의 근원 신호(source signal)를 고전압 증폭기(High voltage amplifier)에

서 증폭하여 양쪽 끝단에 붙인 압전 세라믹에 입력된다. 또한, ER댐퍼는 관심의 대상인 유연 보의 가운데 부분에 부착하여 0.0 kV/mm, 0.5 kV/mm, 1.0 kV/mm, 1.5 kV/mm의 전기장을 가하여 각각의 전기장에 따라 주파수를 스위핑하면서 응답을 2채널 주파수 분석기를 통하여 얻었다. 이와 같은 실험 방법을 통하여 유연 보의 가운데 부분에 대한 각각의 전기장에 따른 주파수 응답을 나타낸 것이 Fig. 4이다.

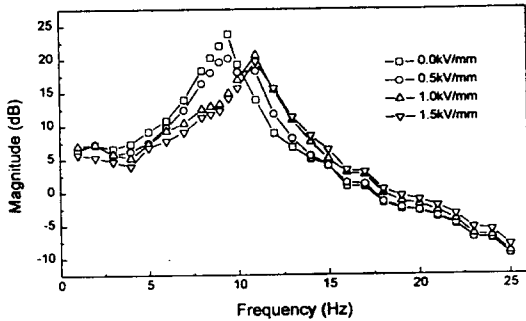


Fig. 4 Transfer functions of the proposed system at various electric fields

그림에서 보는 바와 같이 제 1차 공진점 (9.5 Hz)부근에서 전기장의 강도가 증가함에 따라 구조물 가운데 부분의 진폭 억제 효과가 향상됨을 알 수 있다. 이는 부하 되는 전기장이 ER유체의 항복 응력을 발생시켜 댐퍼의 댐핑력을 증가시키기 때문이다. 또한 전기장 강도가 증가할수록 ER유체의 항복응력이 증가되어 더 큰 진폭 억제 효과를 나타내고 있다. 그러나, 10Hz이상의 주파수 대역에서는 전기장에 의하여 증가된 댐핑력이 전기장 무부하시 보다 진폭 억제 효과를 더 악화시킴을 볼 수 있다. 일반적으로 ER유체를 적용한 시스템은 전기장 강도에 따라 강성과 댐핑이 변화되며, 시스템의 공진 주파수를 증가시킨다는 사실이 여기서도 잘 입증되고 있다. 이 그림으로부터 고려한 주파수 전 영역에 걸쳐 우수한 진폭 억제 효과를 얻기 위해서는 각각의 주파수마다 적절한 전기장이 부하 되어야 함을 알 수 있다. 따라서 이러한 요구 성능을 충족시키기 위하여 본 연구에서는 슬라이딩 모드 (sliding mode) 제어를 사용하였다.

### 3.2 제어기 설계

본 연구에서 제안된 제어알고리즘은 고려한 주파수 전 영역에 걸쳐서 구조물 가운데 변위의 고른 진폭 억제 효과를 나타내기 위해 제어 시스템

의 파라미터 변화와 외란에 대하여 강건한 슬라이딩 모드 제어기를 설계한다. 우선 슬라이딩 모드 제어를 위해 설정한 오차는 다음과 같다.

$$e = y - y_d = N_p \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial \phi_i^{(2)}(L_p)}{\partial x} x_i(t) - y_d \quad (12)$$

여기서,  $x_i$ 는  $X = [q_1 \dot{q}_1 \cdots q_n \dot{q}_n]^T$ 이고,  $N_p$ 는 감지기인 압전 필름의 형상과 성질에 의해 결정되는 상수이고,  $L_p$ 는 압전 필름의 길이를 나타낸다.  $y_d$ 는 구조물의 진동을 없애는 것이 목적이므로 영으로 결정한다. 또한 제어 입력은 ER댐퍼에 가해지는 전기장 강도 하나이므로 아래와 같은 단일 슬라이딩 서피스를 설정하였다.

$$s = ge + \dot{e} = g \left[ N_p \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial \phi_i^{(2)}(L_p)}{\partial x} x_i(t) \right] + N_p \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial \phi_i^{(2)}(L_p)}{\partial x} \dot{x}_i(t) \quad (13)$$

$g$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기를 나타내고, 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$ss < 0 \quad (14)$$

위의 조건을 만족시키는 슬라이딩 모드 제어기를 다음과 같이 설계한다.

$$F_{ER} = -\frac{1}{P} \left( g \left[ N_p \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial \phi_i^{(2)}(L_p)}{\partial x} x_i(t) \right] + N_p \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial \phi_i^{(2)}(L_p)}{\partial x} (-\omega_i^2 x_i(t) - 2\zeta_i \omega_i \dot{x}_i(t)) + k \cdot \text{sgn}(s) \right) \quad (15)$$

where  $P =$

$$-N_p \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial \phi_i^{(2)}(L_p)}{\partial x} \cdot \frac{\int_{I_i} \sum_{k=1}^n \delta(x-x_k) \phi_i^{(2)}(x)}{I_i}$$

여기서,  $k$ 는 불연속 계인이고, 실제적인 제어기 구현에 있어서 불연속 제어기는 chatter( chatter)를 발생시켜 제어에 바람직하지 못하므로 정해진 경계 영역 내에서 불연속 제어를 연속 제어기로 근사화하여 사용한다. 또한 제어 신호는 식(11)과 식(15)로부터 다음의 전기장 값으로 변환된다.

$$E = \left[ \frac{1}{\alpha} \left( \frac{F_{ER} \text{sgn}(y_k)}{2\pi r L} - \eta \cdot \frac{y_k}{h} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (16)$$

### 3.3 제어 결과

제안된 제어 알고리즘과 전기장 부하에 따른 주파수 응답 곡선을 Fig. 5에서 비교하였다.

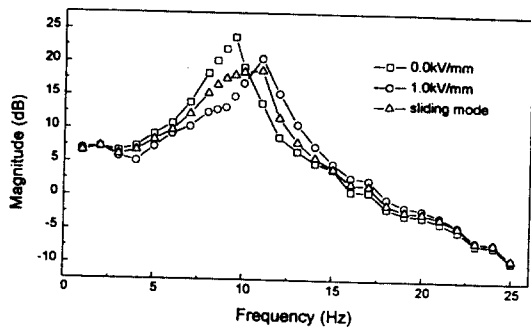


Fig. 5 Comparison of transfer functions of the proposed system

그림에서 보는 바와 같이 공진 주파수 부근에서는 슬라이딩 모드 제어기를 사용한 경우보다 전기장을 계속 1.0kV/mm로 부하하는 경우가 진폭 억제 효과가 좋으나 10Hz이상의 높은 주파수 영역에서는 효과가 떨어짐을 알 수 있다. 따라서, 고려한 주파수 전 영역에서는 슬라이딩 모드 제어기가 우수한 성능을 나타낸다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 ER댐퍼를 이용한 유연 구조물의 진동 제어에 대하여 실험을 수행하였고, ER댐퍼를 직접 제작하고, 압전 세라믹을 가진기로써 사용하였다. ER댐퍼 및 압전 세라믹을 포함한 유연 구조물의 동적 모델링을 Hamilton 법칙으로부터 유도하였으며, 또한 고려한 주파수 전 영역에서 구조물의 우수한 진폭 억제 효과를 얻기 위하여 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였고, 그에 따른 실험을 수행하였다. 실험 결과에서 보는 바와 같이 공진 주파수 부근에서도 우수한 제어 효과를 나타내었다. 본 연구에서는 제어 진동 모드를 1차모드만 고려하였으나 여러 진동 모드까지 확장하는 연구도 계속 수행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Park, Y. K., Choi, S. B., and Cheong, C. C., 1994, "Dynamic Modeling and Vibration Control of Smart Structures Incorporating Electro-Rheological Fluids," in Proc. of the 5th International Conference on Adaptive Structures, Sendai, Japan.
- (2) Wang, K. W., Kim, Y. S., and Shea, D. B., 1994, "Structural Vibration Control Via Electrorheological-Fluid-Based Viscous and Frictional Damping," J. of Sound and Vibration, 177(2), pp. 227-237.

- (3) Stanway, R., Sproston, J.L., and El Wahed, A. K., 1996, "Adaptive Vibration Control Using an Electro-Rheological Squeeze-Flow Damper," SPIE Vol. 2715, pp. 110-120.

- (4) 최승복, 박용균, 1995, "전기유동유체를 이용한 지능구조물 시스템의 구성 및 응용," 한국소음진동 공학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 275-283.

- (5) Choi, S. B., Park, Y. K., and Suh, M. S., 1994, "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid : Experimental Results," AIAA, J. Vol. 32, No. 2, pp. 438-440.

- (6) Rogers, C. A., 1990, "Active Vibration and Structural Acoustic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites : Experimental Results", J. of Acoustic Soc. Am. Vol. 88, No. 6, pp. 2803-2811.

- (7) Bailey, T. and Hubbard, J. E., Jr., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," J. of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611.