

전기유동유체와 압전세라믹을 이용한 복합지능구조물의 감쇠특성 연구

윤신일*, 박근호*, 한상보+, 최윤대++,

A Study on the Damping Characteristics of a Hybrid Smart Structure Using Electrorheological Fluids and PZT

shinil Yun*, keunhyo Park*, sangbo Han⁺, youndae Choi⁺⁺,

Abstract

Many type of smart materials and control laws are available to actively adjust the structure from various external disturbances. Usually, a certain type of control law to activate a specific smart material is well established, but the effectiveness of the control scheme is limited by the choice of the smart materials and the responses of the structure. ER fluid is adequate to provide small but arbitrary control forces at any point along the structure. It was found that active vibration control of the structure embedded with ER fluids failde to suppress the vibration excited with broad band frequency due to the limited change of the structure characteristics. To compensate this limited effect of the control scheme with ER fluid alone, PPF control using PZT as an actuator is added to construct a hybrid controller.

Key Words : Hybrid Smart Structure(복합지능구조물), Electrorheological fluids(전기유동유체), Bigham fluids(빙햄유체), PPF(Positive position feedback, 양의 되먹임), Damping ratio(감쇠비)

기호설명

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| ξ : 구조물의 모달 좌표 | ζ_c : 제어기의 감쇠비 |
| ω : 구조물의 고유진동수 | E_1 : 점탄성 물질의 탄성모듈러스 |
| η : 제어기의 모달 좌표 | E_2 : 점탄성 물질의 손실모듈러스 |
| ζ : 구조물의 감쇠비 | |
| ω_c : 제어기의 고유진동수 | |

* 경남대학교 대학원 기계설계학과
주소: 631-701 경남 마산시 월영동 경남대학교 소음진동연구실
+ 경남대학교 기계자동화공학부
++육군3사관학교 기계공학과

1. 서론

기계구조물에 발생하는 진동은 구조물 자체의 불균형이나 외부의 힘에 의해 발생하며 구조물의 안정성에 많은 영향을 미치는데, 특히 공진 상태가 발생할 경우 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 이러한 진동 제어에 관한 연구는 많은 제어이론의 발달과 더불어 활발하게 진행되어지고 있다.

최근에는 감지기 및 작동기를 구조물의 표면에 부착하거나 구조물의 한 부분으로 삽입하고 제어시스템과 연결한 구조물인 지능구조물에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 지능구조물에 대한 최적의 진동제어를 수행하기 위해서는 효율적으로 진동을 억제할 수 있는 제어이론의 개발이 필수적이다. 하지만 제어가 실제 상황에 적절히 적용되기 위해서는 구조물의 상황을 좀 더 정밀하게 예측할 수 있는 감지기와 제어력을 충분히 발휘할 수 있는 작동기의 개발 또한 절실하다고 할 수 있다. 이와 같은 필요성을 만족시키기 위하여 다양한 형태의 지능 재료들이 개발되어 감지기 및 작동기로 활용되어지고 있다.

지능 재료들을 이용한 진동제어에 관한 연구는 다양한 제어이론의 개발과 새로운 지능 소재들의 개발로 인하여 많은 발전을 거듭하고 있다. 그러나 보다 효율적인 능동진동제어를 수행하기 위해서는 단일 기법의 적용만으로는 효과적인 진동제어를 수행할 수 없는 경우가 많다. 그래서 본 연구에서는 각각의 지능 재료들이 가진 장점을 최대한 활용한 복합제어를 수행하여 감쇠특성을 비교 연구해서 보다 나은 진동 제어 방법을 제시하고자 한다.

지능 재료들 중 전기점성유체(Electro-Rheological Fluids, 이하 ER유체)를 이용한 진동제어⁽¹⁾⁽²⁾의 경우에는 구조물의 역학적 특성을 변화시켜 진동제어를 수행하는데 공진점에 대한 진동제어는 효율적으로 이루어질 수 있으나 국부적인 작동힘 또는 모멘트를 발생시킬 수 없으므로 구조물의 특성에 맞는 진동제어를 수행하지 못하고 있다.

그리고 압전세라믹(Lead Zirconate Titanate, 이하 PZT)를 이용한 진동제어⁽³⁾⁽⁴⁾의 경우에는 복잡한 구조물에 적용이 쉬우며 넓은 제어 영역을 갖지만 비교적 큰 힘의 제어력을 발휘하지 못하는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 ER유체와 PZT를 동시에 적용

한 복합지능구조물을 제안하고 ER유체의 단점인 국부적인 작동힘을 PZT를 이용한 양의 되먹임(Positive position feedback, 이하 PPF)제어기법⁽⁴⁾을 적용하여 특정주파영역에서의 진동제어를 수행해 보고자 한다.

전기장 인가에 대한 상변화에 따른 동역학적 특성 변화를 이용하는 ER유체를 적용한 진동제어 기법은 점탄성 물질⁽⁵⁾⁽⁶⁾이 삽입된 구조물로 해석할 수 있는데, 강성 변화와 감쇠변화를 통하여 공진점에 대한 진동제어를 수행할 수 있다. 이에 본 연구에서는 강성변화에 따른 고유진동수 이동에 대한 공진점 회피의 진동제어기법과 추가적인 감쇠효과를 부여하는 PPF제어기법을 동시에 적용한 복합지능제어기법을 제안하고 그 효율성을 검증하고자 한다.

2. PPF제어기법

본 연구에서 적용한 아날로그 제어기법인 PPF제어기법은 일반화 변위를 계측, 되먹임하여 진동을 억제하는 방법으로 제어대상 주파수 영역을 확실하게 설정하여 제어할 수 있고 고유 진동 모드들이 밀집되어 있다하더라도 다수의 PPF 제어기를 사용하여 개개의 고유모드를 독립적으로 제어할 수 있는 장점이 있다. 그러나 PPF제어 기법을 시스템에 적용하기 위해서는 제어를 수행하기 전에 먼저 이론적 또는 실험적으로 시스템의 고유 진동 특성을 파악해야한다.

PPF제어 기법의 원리는 1자유도 진동계를 나타내는 2차 미분 방정식을 살펴보면 그 원리가 쉽게 이해되어지는데, 이 경우 각각의 모드에 대한 PPF제어기와 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega\xi + \omega^2\xi = g\omega^2\eta : \text{Structure}$$

$$\ddot{\eta} + 2\zeta_c\omega_c\dot{\eta} + \omega_c^2\eta = \omega_c^2\xi : \text{Controller}$$

또한 제어기의 전달함수는 다음식과 같이 표현된다.

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta_c\omega_c s + \omega_c^2} : \text{Controller}$$

결국 제어기의 전달함수는 2차 저역통과필터와 같은 형태로 표시되어짐을 알 수 있다.

3. ER유체의 특성

ER유체라 함은 인가되는 전기장의 강도에 따라 유체의 역학적 성질이 변하는 유체를 총칭하는 것으로 전기 변성유체 또는 전기 유동유체라고도 불린다. ER유체는 기본적으로 비전도성의 용액 중에 미세한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다.

ER유체에 전기장을 인가하면 유체에 분산된 입자가 유도분극을 일으켜 양쪽의 전극을 향하여 전기장과 평행한 섬유상 구조의 고리를 형성함으로써 외부에서 가해지는 전단력이나 유체 유동에 저항하게 된다. ER유체는 인가되는 전기장에 따라 항복응력과 점성이 변하며, 또한 전기장의 인가에 대해 매우 빠른 가역성을 보이며 전기장의 크기에 따라 연속적이고 국부적으로 제어 가능한 특성을 갖고 있다.

ER유체의 상 변화에 요구되는 전기장은 높지만 소오전력이 낮음으로 인해 매우 낮은 소비전력을 나타내는 장점을 가지고 있다.

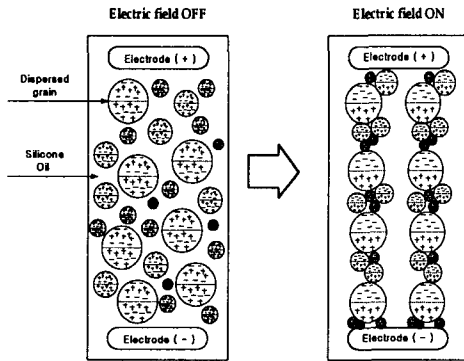


Fig. 1 Effect of ER fluids under the electric field

Fig. 1과 같이 전기장 무인가시에는 비전도성 용매 중에 분산된 전도성의 고체미립자가 자유로이 운동하는 뉴턴유체와 같은 거동을 하지만 전기장이 인가되면 (+)전극과 (-)전극 사이에서 전도성 입자가 대전되어 유전분극한 입자끼리 사슬모양의 클러스터를 형성하여 항복응력을 가지는 빙햄(bingham)유체의 거동을 나타내게 된다.

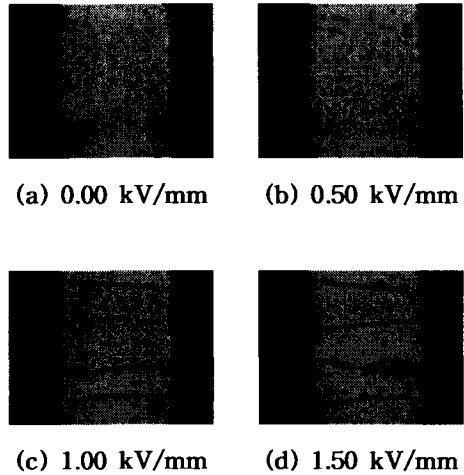


Fig. 2 Photographs of under various electric field ER fluids

Fig. 2는 비전도성 용매인 50 CS의 실리콘 오일에 전도성 고체미립자인 Glass Beads를 분산시켜 제조한 ER유체의 거동을 가시화한 것이다. 가시화사진에서 볼수 있듯이 인가된 전기장의 강도가 클수록 단일 클러스터 형성에서 복합 클러스터의 형성으로 변화하는 것을 알 수 있는데, 이것은 ER유체의 겔보기 점도(항복전단응력)가 빙햄 유체의 특성을 나타내는 원인이 된다.

본 연구실에서 제조한 ER유체는 비전도성의 용매에는 다양한 점성(50, 100, 300, 1000CS)을 가진 silicone oil(KF96계열, Korea Shinetsu Silicone사 제조)을 사용하였으며, 고체미립자는 strach(Sigma Chemical co. 제조)를 사용하여 제조하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 복합지능구조물의 설계 및 제작

본 연구에서 제안한 ER유체와 PZT를 이용한 복합 지능구조를 Fig. 3과 같이 설계·제작하였으며 그 사양은 Table 1과 같다.

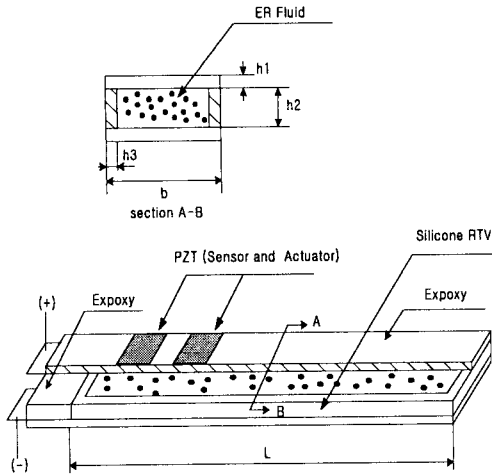


Fig. 3 Schematic diagram of the proposed hybrid smart structure

Table 1 Specification of ERF beam (mm)

L	b	GAP(h2)	h1	h3
200	30	2	0.5	2

인가 전기장의 크기에 따라 반응하는 ER유체를 위한 전극으로는 구리테이프를 사용하였으며, ER유체의 삽입에 따른 밀폐를 위해 실리콘(silicone RTV)을 사용하였다.

Fig. 3과 같이 ER유체가 삽입된 외팔보 형태의 구조물에 PPF제어기법을 적용하기 위해 감지기(sensor) 및 작동기(actuator)역할의 PZT를 고정단의 위치에 부착하여 복합지능구조물을 설계·제작하였다.

4.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 제안한 ER유체와 PZT를 이용한 복합지능구조물의 감쇠 특성이 진동 제어 효과에 미치는 영향을 연구하기 위해 Fig. 4와 같이 실험장치를 구성하였는데, 구조물의 동특성 파악을 위해 가진 신호로는 sine-sweep (0~100Hz) 신호를 사용하였으며, 감지신호는 센서로 사용되는 PZT를 통하여 획득하였다. ER유체의 상변화에 따른 동특성 변화를 고찰위해 고전압발생기를 이용하여 ER유체에 전기장을 인가하였으며, PPF제어기법을 적용하기 위한 감지기 역할의 PZT(sensor)는 기계적인 변화에 의해 전하

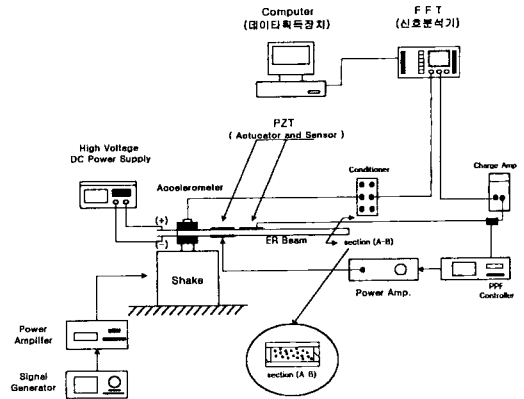


Fig. 4 Experimental set-up

를 발생시키는데, 이 전하의 안정 및 증폭을 위해 전하증폭기를 사용하였으며, 작동기 역할의 PZT의 제어력을 증대하기 위해 증폭비 조절이 가능한 증폭기를 사용하였다.

본 연구에서는 ER유체와 PZT를 동시에 적용하는 복합지능제어기법의 감쇠특성 파악을 위해 일정 전기장에 인가에 따른 복합지능구조물의 동특성을 파악하였으며, 인위적인 감쇠효과를 부여하는 PPF제어기법을 적용하여 진동제어의 수행을 통하여 감쇠특성을 비교 분석하였다.

5. ER유체를 이용한 진동제어

Fig. 5는 본 연구실에서 설계·제작한 ER유체가 함유된 구조물의 주파수응답함수를 인가 전기장의 크기 변화에 따라 나타낸 그림이다.

주파수응답함수의 추출을 위해 가진신호로는 sine-sweep(0~100Hz)형태의 신호를 사용하였으며 주파수응답함수를 Curve-fitting을 하여 일차자유도계를 이룬을 적용한 감쇠비를 추출하였다.

Table 2 Natural frequencies and damping ratio of the hybrid smart structure

Voltage (kV/mm)	Damping ratio (1st mode)	Natural frequency(Hz)
		1st mode
0.0	0.0409	11.00
0.5	0.0417	16.00
1.0	0.0422	19.00
1.5	0.0457	20.50

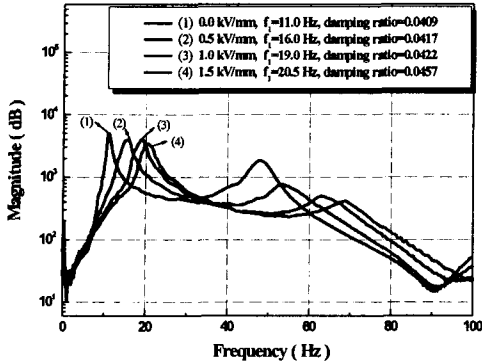


Fig. 5 Frequency response function of the Hybrid smart structure respected with various electric field applied

Table 2는 인가전기장의 크기에 따른 복합지능구조물의 동특성 변화를 보이고 있는데, 인가전기장의 크기가 커짐에 따라 고유진동수와 감쇠비도 증가함을 알 수 있는데, 이는 ER유체의 병행 특성으로 인하여 구조물의 동특성이 변화한 것이라 할 수 있으나, 고유진동수의 증가 즉 강성에 대한 변화는 확연하게 보여주고 있지만 감쇠비의 증가는 미미한 것을 알 수 있는데 이것은 지능구조물의 제작 시 ER유체의 밀봉을 위해 사용한 RTV의 영향이 지배적인 것에 기인한다. ER유체를 함유하는 구조물은 점탄성 물질로 가정할 수 있는데 점탄성 물질의 역학적 특성 변화는 복소모듈라이(complex moduli)형태로 표현 될 수 있다.

$$E = E_1 + i E_2,$$

$$\eta = \frac{E_1}{E_2} = 2 \zeta$$

실수부분은 탄성 모듈러스(elastic modulus)로서 강성의 변화를 나타내며, 허수 부분은 손실모듈러스(loss modulus)로 감쇠의 변화를 나타내며, η 는 손실계수를 나타낸다. Fig. 6은 인가전기장의 변화에 의해 구한 손실모듈러스함이다. 탄성 모듈러스함은 오일러-베르누이 보 해석의 결과식을 이용하여 구했으며, 감쇠비와 탄성 모듈러스함의 관계에 의해 손실모듈러스함을 구하였다. Fig. 6에서 인가전기장의 변화에 따라 손실모듈러스함 즉 감쇠가 증가함을 보여준다.

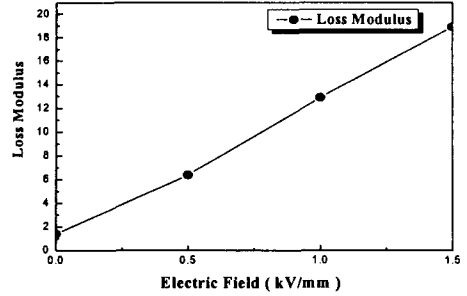


Fig. 6 Loss modulus of the hybrid smart structure under various electric field applied

6. PZT를 이용한 진동제어

Fig. 7은 시스템의 안정성을 고려한 PPF제어의 감쇠비를 최적으로 선정하기 위해 특정주파수영역에서 감쇠비(0.03, 0.3, 0.1)를 변화시키면서 진동특성을 살펴본 결과인데, PPF제어의 감쇠비 선정에 있어서 0.03인 경우는 14dB, 0.1인 경우는 4.5dB, 0.3인 경우는 3dB 정도의 진동제어 효과를 나타낼 수 있었다. PPF제어의 감쇠비 선정은 진동제어효과에 많은 영향을 주는데, 감쇠비가 클 경우에는 진동제어효과에 크지만 시스템이 불안정해지는 경향을 보였다.

본 연구실에서는 시스템의 안정성과 적정한 진동제어를 위해 최적의 감쇠비를 0.1을 선정하여 복합지능구조물에 적용하여 진동제어를 수행하고 감쇠특성을 비교 분석하였다.

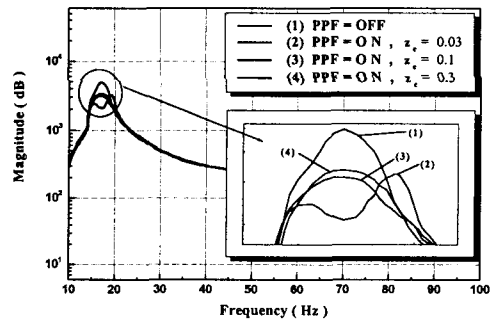


Fig. 7 Frequency response function of the hybrid smart structure under PPF controller with different damping ratio change

7. ER유체와 PZT를 동시에 적용한 복합진동제어

Fig. 8은 PPF제어기의 고유진동수를 ER유체에 의해 새롭게 변화하는 공진주파수 17 Hz로 선정하였고 시스템의 안정성과 진동제어를 고려하여 감쇠비는 0.1로 선정하였으며, 작동신호의 증폭도 30배 정도의 증폭비를 선정하여 진동제어를 수행한 결과이다.

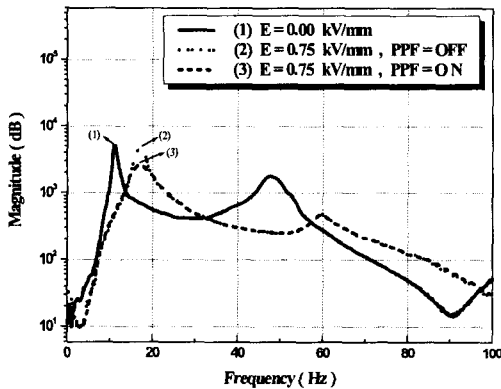


Fig. 8 Active vibration control of the proposed hybrid smart structure using ER fluids and PZT (Frequency Domain)

Fig. 8 결과에서 알 수 있듯이 ER유체의 의한 진동 제어기법은 강성의 변화를 통해 공진점 회피를 함으로써 진동제어를 수행할 수 있었으며, 감쇠변화는 그다지 큰 변화를 보이지 않았다. 이에 인위적인 감쇠효과를 부여하는 PPF제어기법을 적용함으로써 8dB 정도의 진동제어효과를 수행할 수 있었다. 이에 ER유체와 PZT를 동시에 적용한 복합지능구조물의 진동제어를 수행해본 결과 감쇠비의 변화는 일차모드의 경우 0.0420에서 0.0731로 증가함을 알 수 있었다.

8. 결론

본 연구에서 제안된 전기유동유체와 압전세라믹을 이용한 복합지능구조물의 진동제어에 관한 연구는 인가 전기장에 따른 ER유체의 동특성 변화를 이용하

여 공진점 회피를 통한 제어효과를 수행하였으며, 다음으로 PZT를 적용한 PPF제어기법으로 인위적인 감쇠효과를 부가하여 진동제어를 수행할 수 있었다.

ER유체는 점탄성 거동으로 볼 수 있으므로 전기장 크기 변화에 따른 동특성 변화는 강성의 변화와 감쇠의 변화로 구성되어진다. 강성의 변화를 통한 고유진동수의 변화를 이용하여 공진점 회피의 진동제어를 수행할 수 있었으며, 감쇠의 변화는 그다지 크지 않았다. 이에 본 연구에서는 PPF제어기법을 적용하여 인위적인 감쇠의 부가함으로써 효과적인 진동제어를 수행할 수 있었다.

향후 다양한 지능재료들이 결합된 복합진동제어기법에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) S.B. Choi, Y.K. Park, 1994, "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid" *Journal of Sound and Vibration*, Vol.172, No. 3, pp.428-432
- (2) Yong-kun Park, Seung-Bok Choi, 1999, "Vibration Control of a Cantilevered Beam via hybridization of Electro-Rheological Fluids and Piezoelectric Films" *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 225, No. 2, pp. 391-398
- (3) Moon Kyu Kwak, 2001, "Active Vibration Control of Smart Structure Using Piezoceramics" *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* Vol. 18, No. 12, pp. 30-46
- (4) Lesieutre, G. A., 1998 "Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Material," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 30, pp. 187-195
- (5) David I.G. Jones, Ahid D. Nashif, John P. Henderson, "Vibration Damping", John Wiley & Sons.
- (6) McLeish, T.C.B., Jordan. T., and Shaw, M.T., 1991, "Viscoelastic Response of Electro-Rheological Fluids. I. Frequency dependence", *Journal of Rheology*, Vol. 35, pp.427-448.