

전기점성유체와 압전세라믹을 이용한 복합지능구조물의 진동제어

Vibration Control of Hybrid Smart Structure Using ER Fluids and Piezoelectric Ceramics

윤 신 일* · 박 근 효** · 한 상 보†

Shinil Yun, Keunhyo Park and Sangbo Han

(2003년 4월 23일 접수 ; 2003년 7월 10일 심사완료)

Key Words : Hybrid Smart Structure(복합지능구조물), ER Fluids(electro-rheological fluids, 전기점성유체), PPF Control(positive position feedback, 양의위치먹입제어), Piezoelectric Ceramics(압전세라믹)

ABSTRACT

A hybrid vibration control scheme using ER fluid and PZT patches is proposed. Dynamic characteristics of the beam embedded with the ER fluid can be controlled by changing the strength of the electric field applied on the ER fluid, thus provides a mean to avoid the resonance. It was found that active vibration control of the structure embedded with ER fluid failed to suppress the vibration excited with broad band frequency due to the limited change of the dynamic characteristics of the structure. To compensate this limited effect of the control scheme with ER fluid alone, PPF control using PZT patches as sensors and actuators is added to construct a hybrid controller. Experimental results suggests that proposed hybrid controller is effective to suppress the additional resonance vibration that appears when each controller is used alone.

1. 서 론

최근 산업기계, 항공우주 및 첨단기계산업 분야에서 고속화, 정밀화, 경량화 추세에 따라 구조물에 작용하는 진동의 특성 파악 및 제어에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 최근에는 지능구조물에 대한 관심이 매우 증가하고 있는데, 지능구조물이란 감지기 및 작동기를 구조물의 표면에 부착하거나 구조물의 한 부분으로 삽입하고 제어시스템과 연결한 구조물을 말한다. 지능구조물에 대한 최적의 진동제어를 수행하기 위해서는 효율적으로 진동을 억제할 수 있는 제어이론의 개발이 필수적이며 개발된 제어이론이 실제

상황에 적절히 적용될 수 있도록 구조물의 상황을 좀 더 정밀하게 예측할 수 있는 감지기과 제어력을 충분히 발휘할 수 있는 작동기의 개발이 절실하다고 할 수 있다. 이와 같은 필요성을 만족시키기 위하여 다양한 형태의 지능 재료들이 개발되고 있으며 각각의 특성을 최대로 발휘할 수 있는 방법을 통하여 여러 형태의 감지기 및 작동기로 활용되어지고 있다.

지능 재료들 중 전기점성유체(electro-rheological fluids, 이하 ER유체)를 구조물에 삽입하여 진동을 제어하고자 하는 경우에는 구조물의 동역학적 특성 변화를 통한 진동제어를 수행하는 것이 주목적인데, 공진점에 대한 진동제어는 효율적으로 이루어질 수 있으나 국부적인 제어력을 발생시킬 수 없으므로 구조물의 특성에 맞는 진동제어를 수행하는데 어려움이 있으며, 압전세라믹 중 PZT(lead zirconate titanate, 이하 PZT)를 이용한 진동제어의 경우에는 복잡한 구조물에 적용이 쉽고 넓은 주파수 영역에 걸쳐 제어할 수 있다는 장점을 갖지만 비교적 큰 힘의 제어력을

† 책임저자, 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail : sbhan@kyungnam.ac.kr

Tel : (055) 249-2623, Fax : (055) 249-2617

* 정회원, 경남대학교 대학원 기계설계학과

** 경남대학교 대학원 기계설계학과

발휘하지 못하는 단점이 있어 그 응용에 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 ER유체와 PZT를 병용한 복합지능구조물을 제안하고 이들 지능재료들이 가지고 있는 각각의 장점을 이용한 복합 진동제어기법을 제안하고 그 효율성을 입증하고자 한다.

2. ER유체와 PZT를 이용한 연구경향

ER유체의 특성을 이용한 충격 흡수장치, 댐퍼, 클러치, 밸브, 브레이크 및 탄성 마운트 등과 같은 응용시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 최근에는 지능 구조물에 대한 응용 연구가 자동차, 항공기 등 다양한 분야에서 활발히 진행되어지고 있다. 이들 연구 중에서도 ER유체를 적용한 보 구조물에 대한 연구의 사례로는 Choi^(1, 2) 등이 ER유체를 포함하는 복합보의 진동특성을 연구하여 보의 강성 및 감쇠의 증가를 실험적으로 입증하였으며, 또한 ER유체가 삽입된 유연외팔보의 능동진동제어를 수행하였다. Coulter⁽³⁾ 등은 전기장 세기에 대한 ER유체의 복소 전달계수로부터 해석적인 진동모델을 유도하였으며, Choi⁽⁴⁾ 등은 ER유체와 압전필름을 동시에 적용한 복합지능구조물에 대한 진동제어를 수행하였다.

한편, 압전재료의 거동에 대한 모델링은 변분법을 사용하여 구할 수 있음을 Nisse⁽⁵⁾가 보여주었는데 구조물과의 연성효과가 아닌 전기 재료와 탄성 재료가 결합된 압전재료 그 자체의 진동해석을 위한 연구 결과이다. 이를 바탕으로 Holland⁽⁶⁾는 변분법을 다시 사용하여 압전세라믹 재료의 공진 특성에 관한 결과를 발표하였는데, 그는 이론적인 결과가 실험결과와 잘 일치함을 보여주었다. 압전재료가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발하는데 Crawely와 de Luis⁽⁷⁾의 논문은 압전작동기에 대한 초기 논문들 중의 하나이다. 이 논문에서 그들은 압전재료와 탄성 구조물간의 연성을 묘사하는 두 개의 일차원 정적 모델을 제시하였다. 이에 관한 연구로는 Hangud, Obal과 Calise⁽⁸⁾의 논문이 있는데 그들은 외팔보에 압전 작동기와 감지기를 부착한 시스템을 고려하여 유한요소법을 이용한 모델화로 유한자유도계의 운동방정식을 유도하였다.

Hagwood, Chung과 von Flotow⁽⁹⁾는 구조물과 압전재료 그리고 전자장치가 결합된 시스템인 기전(electro-mechanical)시스템에 관한 운동 방정식을 유

도하는데 있어 좀더 일반화된 접근 방법을 제시하였으며, Bronowicki⁽¹⁰⁾는 압전 재료와 구조물이 결합되어 있는 경우에 관한 이론을 정리 발표하였고, Banks와 Smith⁽¹¹⁾는 압전세라믹 조각이 셀, 평판, 보 등에 접착되어 있을 경우에 대한 모형화기법을 다루었으며, Lazarus와 Crawely⁽¹²⁾는 판 모양의 구조물이 압전 작동기와 감지기와 결합된 경우에 대하여 Rayleigh-Ritz 기법을 사용하여 운동방정식을 구하였다.

국내에서도 압전 재료가 포함된 구조물에 관한 연구가 시작되어 남창호, 황재혁, 오승민⁽¹³⁾은 압전 재료를 복합재 평판 내층에 부착한 경우를 고려하여 항공기 날개로의 적용을 다루었고 운동 방정식의 유도를 위하여 Rayleigh-Ritz 방법을 사용하였으며, 황우석과 박현철⁽¹⁴⁾은 압전감지기/작동기가 결합된 유연보의 진동 제어 문제를 다루면서 제어 성능면에서의 관측성, 제어성, 안정성 조건을 다루었고 제어 성능을 높일 수 있는 제어 설계 방법을 제시하였다.

김중선⁽¹⁵⁾은 경계 제어를 사용하는 진동 제어 방법을 제시하고 spillover의 영향과 감지기의 최적 위치 결정 방법을 토의하였으며 실험 결과를 제시하였다. 남창호, 황재혁과 오승민⁽¹⁶⁾은 LQR 제어기를 적용하여 진동 제어 성능을 극대화하기 위한 최적화 기법을 사용하여 최적의 설계 파라미터를 결정할 수 있음을 보였고, 김승한, 최승복과 정재천⁽¹⁷⁾은 압전필름을 이용한 외팔보의 능동 진동 제어를 bang-bang제어 방법을 사용하여 수행하였다.

3. ER유체의 특성 측정

ER유체는 전기장의 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 나타나게 된다. ER효과의 광학적 관찰을 위해 제작된 ER 유체는 비전도성 용매로 실리콘오일(한국신에츠사, KF-96 계열 50 cSt)을 사용하였고, 전도성의 고체미립자로는 starch(sigma사 제조, 이하 starch)를 1 wt % 무게분율로 조성하였다. 비전도성의 실리콘 오일은 온도변화에 의한 점성변화가 거의 없으며 투명하다는 장점이 있다. ER효과의 광학적 관찰을 위해 다

양한 점도의 실리콘 오일(50, 100, 500, 1000 cSt 등)을 사용하여 실험을 수행해 보았는데 유전율과 비중은 다른 제품과 차이가 별로 없었지만 ER유체의 활성도 높이기 위하여 점도가 낮은 실리콘 오일(KF-96 계열 50 cSt)을 선택하였다.

고체미립자로 사용한 starch의 입도 분석자료는 Fig. 1과 같으며 평균직경은 44.66 μm 로 나타났다. 전기장 인가에 따른 ER효과의 광학적 관찰을 위해 Fig. 2와 같이 빛을 투과할 수 있는 투명 유리판에 1 mm 간격으로 전극을 설치하여, 현미경의 배율은 60 배로 고정하고 인가 전기장의 크기에 의해 다양하게 형성되는 클러스터를 CCD 카메라를 이용하여 관찰하였다.

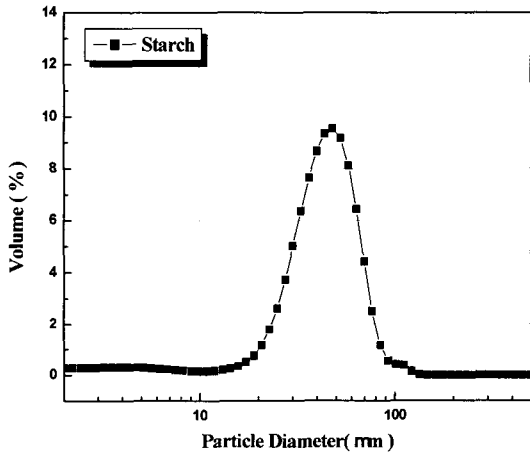


Fig. 1 Distribution of the size of ER particle used in the experiment

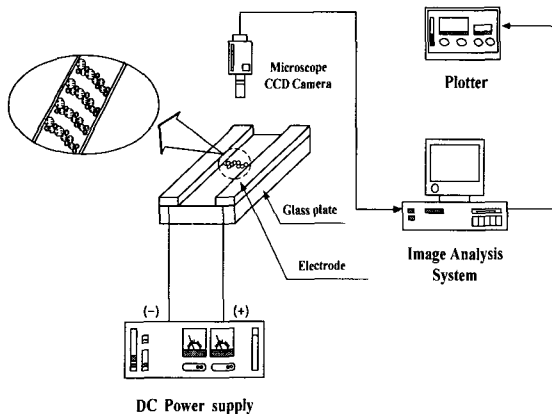


Fig. 2 Schematic of the apparatus employed for observations of ER behavior with an optical microscope

Fig. 3은 인가전기장의 크기를 0 kV/mm에서 0.5 kV/mm 단위로 1.5 kV/mm까지 인가하면서 클러스터의 형성 모습을 관찰한 그림이다. 전기장을 인가하지 않을 경우(Fig. 3의 (a)의 경우)에는 비전도성 용매인 실리콘오일 속에 입자(starch)가 불규칙적으로 흩어져 있지만, 전기장을 인가했을 경우에는 규칙적으로 클러스터가 형성됨을 볼 수 있는데, 인가 전기장의 크기가 높으면 높을수록 단일 클러스터의 형성에서 복합클러스터 형성으로 바뀔 수 있는데, 이는 ER유체의 겔보기 점도가 증가함을 보여주는 것이다.

ER유체 점도 측정 실험은 silicone oil과 starch를 무게분율 40 wt%가 되도록 조성하여 점도측정장치(독일 Haake사, VT-500)를 이용해서 전기장을 $E = 0 \sim 1 \text{ kV/mm}$ 까지 0.25 kV/mm씩 단계적으로 변화를 주어 그 결과를 측정하였으며, 점도 측정시의 온도는 상온 20 $^{\circ}\text{C}$ 로 고정하였다.

ER유체를 빙헴유체로 취급하는 경우 전단응력과 전단속도비의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = \tau_y(E) + \mu \frac{du}{dy} \quad (2)$$

여기서, $\tau_y(E)$ 는 전기장 인가시 항복전단응력, μ 는 점성, du/dy 는 전단속도비, E 는 전기장의 강도를 나타낸다.

Fig. 4는 그 점도측정 결과를 전단속도비와 전단응력의 관계로 나타낸 것으로, 인가 전기장의 크기가 증가할수록 전단응력이 증가함을 알 수 있는데, 이는

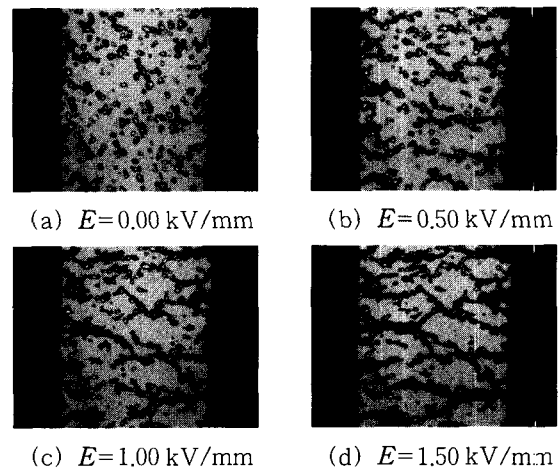


Fig. 3 Behavior of ER fluid with different electrical field

전기장을 인가하면 유체의 겔보기 점도가 증가함을 보여주는 것이다.

ER유체의 점도측정에서 전단속도비가 낮은 영역에서 전단응력이 불규칙하게 변하는 것은 점도계에서 +전극과 -전극에 전기장이 인가되면, 전극의 간극내에 채워진 ER유체가 정지된 상태에서 클러스터를 형성하게 되고, 초기상태에서 +전극이 회전하려는 순간에는 +전극과 -전극사이에 형성된 클러스터가 순간적으로 파괴됨으로서 큰 토크가 필요하며, +전극 축 지지부에 작용하는 미소한 마찰손실토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상이다.

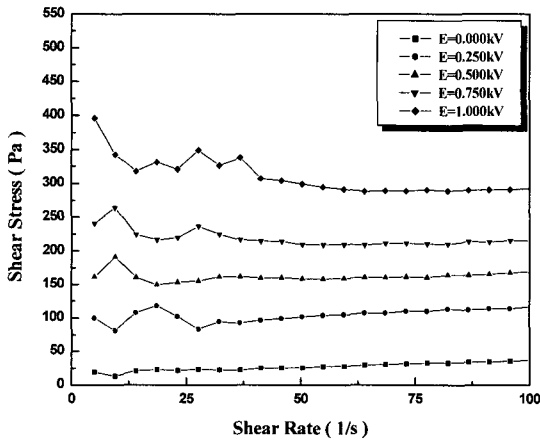


Fig. 4 Relationship between shear stress and shear rate (20 °C, silicone oil 50 cSt + starch = 40 wt%)

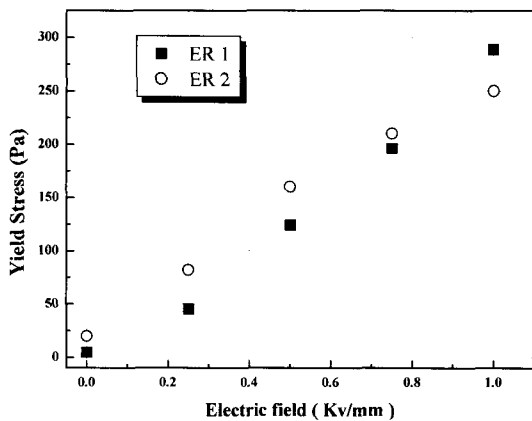


Fig. 5 Relationship between yield stress and electric field (ER1 : silicone oil 50 cSt + starch, 40wt%) (ER2 : silicone oil 50 cSt + polyaniline(PANI), 20wt%)

Fig. 5는 본 연구실에서 자체 제작한 ER유체의 효과 검증을 위하여 점도측정 실험을 수행하여 획득한 인가전기장의 크기에 따른 항복응력의 크기변화를 polyaniline(PANI) 입자와 실리콘 오일 50 cSt 20 wt%로 조성한 ER유체와 비교한 결과이다. 두 유체 모두 공통적으로 인가전기장의 크기에 따라 항복응력이 증가하는 경향이 있다는 것을 알 수 있는데, 이러한 사실은 일반적으로 알려진 ER유체의 용매와 용질을 사용하여 실험실에서 손쉽게 ER유체의 제조가 가능함을 보여준다. 항복응력의 크기의 차이는 유체 조성시 사용된 용매의 점도와 입자의 무게분율의 차이에 기인한 것이다.

4. 복합지능구조물의 제작 및 실험장치

Fig. 6과 같이 ER유체가 삽입된 외팔보 형태의 구조물의 고정단에 PZT를 접착하여 복합지능구조물을 제작하였다. PZT는 PPF제어기법을 적용하기 위한 감지기 및 작동기의 역할을 하며 이 구조물의 제원은 Table 1에 주어져 있다.

ER유체의 작동을 위한 전극으로는 구리테이프를 사용하였으며, ER유체의 삽입에 따른 밀폐를 위해 실리콘(silicone RTV)을 사용하여 밀봉하였다.

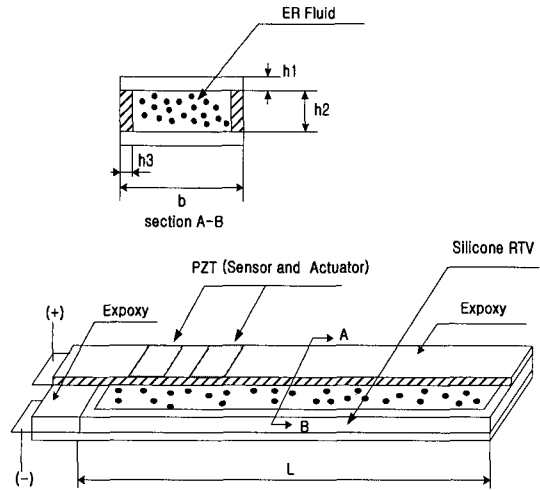


Fig. 6 Schematic diagram of the proposed hybrid smart structure

Table 1 Specifications of hybrid smart structure

Unit	L	b	h_1	h_2	h_3
mm	200	30	0.5	2	2

본 연구에서 제안한 복합지능구조물에 대한 진동제어 효과를 파악하기 위하여 Fig. 7과 같은 실험장치를 구성하였다. 구조물의 주파수 응답함수 추출을 위한 가진 신호로는 주파수 대역이 0~100 Hz인 sine-sweep 신호를 사용하였으며, 감지기로부터의 전하 신호를 전압 형태로 변환시키기 위하여 전하증폭기를 설치하였고, 신호의 변환(A/D, D/A)을 위해 변환기(D-SPACE, powerPC 250 MHz controller board)를 사용하였다. 또한 작동기에 입력되는 제어신호의 증폭을 위해 증폭비 조절이 가능한 증폭기(EA40)를 사용하였다. 복합진동제어의 구현을 위한 실험 방법은 먼저, 인가 전기장의 크기변화에 따른 ER유체의 특성 변화를 통한 복합지능구조물의 진동특성을 파악한 후, 특정 전기장 인가 하에서 발생하는 지능구조물의 진동을 대상으로 PPF제어기법을 적용해 봄으로써 ER유체와 PZT를 동시에 사용할 경우의 복합제어기법의 실효성을 파악해 보고자 하였다.

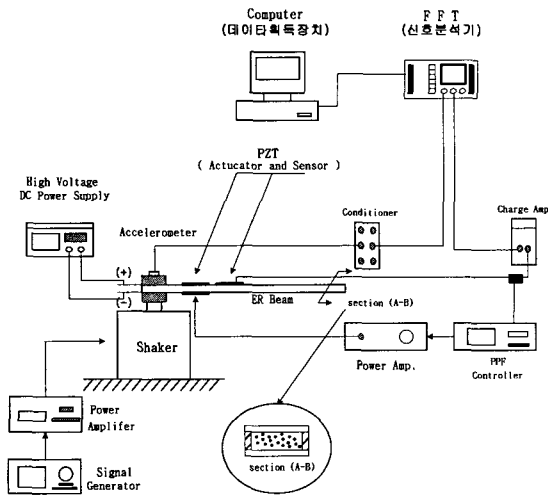


Fig. 7 Experimental set-up

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

Voltage (kV/mm)	Damping ratio (1st mode)	Natural Frequency (Hz)	
		1st mode	2nd mode
0.0	0.0409	11.00	47.50
0.5	0.0417	16.00	53.25
1.0	0.0422	19.00	62.75
1.5	0.0457	20.50	68.50

5. ER유체를 이용한 진동제어

ER유체를 이용한 진동제어의 효과를 검증하기 위하여 인가 전기장의 크기를 변화시키면서 복합지능구조물의 주파수응답함수를 살펴보았다. Fig. 8에서와 같이 복합지능구조물의 고유진동수는 인가 전기장의 크기 변화에 따라 이동함으로써 공진점 회피를 통한 진동제어의 수행할 수 있었다. 이 현상은 전기장 인가에 따른 ER유체의 특성 변화, 즉 상변화로 인하여 구조물이 동특성이 변화하기 때문이다.

ER유체를 함유하고 있는 구조물은 점탄성거동⁽¹⁸⁾의 구조물로 가정할 수 있는데 점탄성 물질의 역학적 특성 변화는 복소 탄성계수(complex moduli) 형태로 표현 될 수 있다.

실수 부분은 탄성 모듈러스(elastic modulus)로서

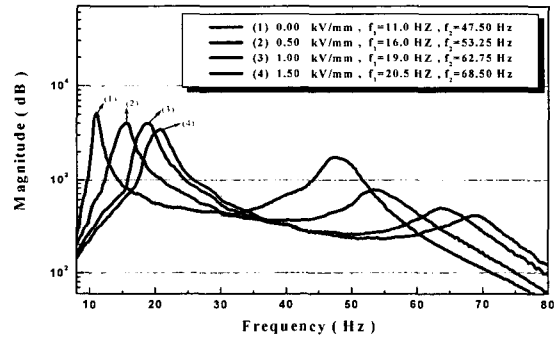


Fig. 8 Frequency response function of the hybrid smart structure with various applied electric field

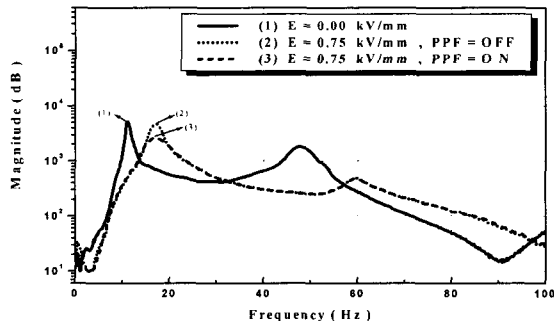


Fig. 9 Active vibration control of the proposed hybrid smart structure using ER fluids and PZT (frequency domain)

강성의 크기를 나타내며, 허수 부분은 손실 모듈러스(loss modulus)로 감쇠의 크기를 나타낸다.

Table 2는 인가 전기장 크기 변화에 따른 고유진동수의 변화와 하프파워포인트(half power points) 추출 방법을 이용한 감쇠비의 변화를 보여주고 있는데, Fig. 8의 주파수 응답 함수를 살펴보면 2차 모드에서는 전기장의 인가에 따라 강성의 증가에 따른 고유진동수의 증가는 물론, 감쇠비의 값도 증가함을 알 수 있다.

이와 같이 ER유체에 전기장을 인가하게 되면 ER유체를 포함하는 구조물의 동특성 변화에 의해 고유진동수와 감쇠 성질이 변화하게 되는데 이러한 인가 전기장의 크기에 따른 구조물의 특성변화를 이용하면 효과적으로 구조물의 공진을 회피할 수 있다.

6. ER유체와 PZT를 이용한 복합진동제어

Fig. 9는 본 연구에서 제안한 복합지능구조물에 대한 복합진동제어의 실현을 위하여 0.75 kV/mm의 전기장을 ER유체에 인가하여 공진점 회피를 통한 진동제어를 일차적으로 수행하고 난 후, ER유체의 동특성 변화에 따라 새롭게 발생한 공진점에 대한 진동제어를 수행하기 위해 PPF 제어기법을 동시에 적용한 결과이다. ER유체를 이용한 진동제어를 수행한 후 새롭게 발생하는 공진점에 대한 진동제어를 위하여 적용한 PPF제어기법은 일반화 변위를 측정하여 이를 되먹임하여 진동제어를 수행하는 기법으로 인위적인 감쇠효과를 부여하게 된다.

PPF제어기법의 적용에 있어서 최적의 진동제어를 수행하기 위한 조건으로 제어기의 고유진동수와 구조물의 고유진동수를 일치시켜야 하는데, 본 연구에서는 ER유체의 ER효과에 의해 새롭게 발생한 공진주파수와 제어기의 고유진동수를 일치시켜 17 Hz로 설정하였다. 또한, PPF 제어시스템의 안정성과 제어력을 고려하여 감쇠비는 0.1로 선정하였으며, 작동기에 입력되는 신호는 시스템의 안정성을 고려하여 약 30배 정도로 증폭하여 실험을 수행하였는데, 그 결과 Fig. 9와 같이 새롭게 발생된 일차 모드의 공진점 대하여 약 8 dB의 추가 진동제어 효과를 얻을 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서는 ER유체와 PZT를 적용한 복합지능

구조물을 제안하였으며, 두 가지 기능성 재료의 특성을 동시에 이용한 효율적인 복합진동제어를 수행해 보았다. 인가 전기장의 크기에 따른 ER효과를 이용하여 구조물의 동특성을 변화시킴으로서 공진점 회피를 통한 진동제어를 일차적으로 수행한 후, 변화된 구조물의 동특성에 의해 새롭게 발생하는 공진점에 의해 발생할 수 있는 과도한 진동을 PZT를 이용한 PPF제어기법을 적용하여 제어하고자 하였다.

그 결과 ER유체에 일정 전기장을 인가하여 구조물의 고유진동수를 변화시킬 수 있다는 것을 보였으며 이러한 특성을 이용하여 공진점 회피를 통한 진동제어를 수행할 수 있다는 것을 확인하였다. 동특성이 변화된 구조물에 발생할 수 있는 공진에 의한 진동의 크기는 PZT를 감지기와 작동기로 사용한 PPF제어기법을 적용하여 제어할 수 있다는 것을 보였는데, 인위적인 감쇠를 부여하는 효과를 나타내는 PPF 제어기의 적용은 제어기의 고유진동수를 변화된 구조물의 고유진동수와 일치시키고, 구조물의 안정성을 고려한 감쇠비와 증폭비를 사용하여야 효율적인 진동제어를 수행할 수 있다는 것을 파악하였다.

본 논문에서 제시된 복합진동제어 기법은 ER유체를 포함한 구조물에 대한 정확한 동적 모델링과, ER유체 작동 시 직류 전기장의 크기와 PZT에 입력되는 제어 신호와의 상호교란현상에 대한 정확한 이해가 수반될 경우 더욱 효과적으로 적용될 수 있다고 판단되며 또한, PZT의 허용 용량을 고려한 최대 증폭비의 적용을 통하여 제어력을 극대화시킬 경우 더욱 광범위하게 산업 현장의 구조물에 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구[R05-2002-000-00789-0(2002)] 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Choi, Y., Sprecher, A. F. and Conard, H., 1990, "Vibration Characteristics of a Composite Beam Containing an Electrorheological Fluid," *Journal of Intelligent Material System and Structure*, Vol. 1, pp. 91~104
- (2) Choi, S. B. and Park, Y. K., 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.
- (3) Park, Y. K. and Choi, S. B., 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.
- (4) David, L. Don. and John, P. Coulter, 1995, "An Analytical and Experimental Investigation of Electrorheological Material Based Adaptive Beam Structures," *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 6, pp. 846~853.
- (5) Nisse, E. P. E. 1967, "Vibrational Method for Electroelastic Vibration Analysis," *IEEE, Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. su-14, No. 4, pp. 153~160.
- (6) Holland, R., 1967, "Resonant Properties of Piezoelectric Ceramic Rectangular Parallelepipeds," *Vol. 43, No. 5*, pp. 988~997.
- (7) Crawley, E. F. and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (8) Hanagud, S., Obal, M. W. and Calise, A. J., 1992, "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 15, No. 5, pp. 1199~1206.
- (9) Hagwood, N. W., Chung, W. H. and Von Flotow, A., 1990, "Modeling of Piezoelectric Actuator Dynamic for Active Structural Control," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 1, No. 3.
- (10) Bronowicki, A. J., 1992, "Advanced Composites with Embedded Sensors & Actuators (ACESA)," *US Airforce Phillips Lab Internal Report*.
- (11) Banks, H. T., Fang, W., Silcox, R. J. and Smith, R. C., 1992, "Approximation Methods for Control of Acoustic/Structure Models with Piezoceramic Actuators," *NASA Contractor Report, ADA244 350*, pp. 1~28.
- (12) Lazarus, K. B. and Crawley, E. F., 1992, "Multivariable High-authority Control for Plate-Like Active Structures," *AIAA Paper 92-2529*.
- (13) 남창호, 황재혁, 오승민, 1993, "압전 재료가 있는 복합재 평판의 진동 제어를 위한 구조/제어 최적 설계," *한국항공우주학회지*, 제 21 권, 제 4 호, pp. 49~59.
- (14) 황우석, 박현철, 1993, "유연보 진동 제어를 위한 압전감지기/작동기 설계," *한국항공우주학회지*, 제 21 권, 제 2 호, pp. 26~36.
- (15) 김종선, 1992, "압전 소자를 액추에이터로 이용한 탄성 보의 능동 진동 제어," *한국소음진동공학 회논문집*, 제 2 권, 제 3 호, pp. 173~180.
- (16) 남창호, 황재혁, 오승민, 1993, "압전 재료가 있는 복합재 평판의 진동 제어를 위한 구조/제어 최적설계," *한국항공우주학회지*, 제 21 권, 제 4 호, pp. 49~59.
- (17) 김승환, 최승복, 정재천, 1993, "압전 필름을 이용한 외팔보의 능동 진동 제어," *한국항공우주학회 지*, 제 21 권, 제 5 호, pp. 76~78.
- (18) 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.
- (19) 광문규, 2001, "압전세라믹을 이용한 지능구조물의 능동진동제어" *한국정밀공학학회지*, 제 18 권 제 12 호, pp. 30~46.
- (20) Kwak, M. K. and Han, S. B., 1998, "Application of Genetic Algorithm to the Determination of Multiple Positive Position Feedback Controller Gains for Smart Structure," *SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego California USA*, Vol. 3323, pp. 637~648.