

PPF 제어기법을 적용한 전기점성유체가 함유된 보의 진동제어

윤신일*, 진도훈⁺, 윤문철⁺⁺

(논문접수일 2005. 2. 1, 심사완료일 2005. 3. 29)

Vibration Control of Beam Containing ER Fluid Using PPF Control Scheme

Shin-Il Yun*, Do-Hun Chin⁺, Moon-Chul Yoon⁺⁺

Abstract

Several types of smart materials and control scheme are available to adjust the structure actively in various external disturbances. A control scheme was introduced for a specific material. But the effectiveness of the control scheme has some limitation according to the choice of the smart materials and the response of the structure. The ER(Electrorheological) fluid is adequate for a large control force, and the PZT(lead zirconate titanate) patches are suitable for small but arbitrary control force at any point of the structure. It can be used for active control of structure by changing the dynamic characteristics of the structure. But it has some difficulty in suppressing the excited vibration in broad band. To compensate this resonance of the controlled structure, a hybrid controller was constructed using PPF(Positive position feedback) control with PZT and ER fluid control.

Key Words : Smart material(지능재료), ER fluids (Electrorheological fluids, 전기점성유체), PPF(Positive position feedback, 양의 되먹임), Piezoelectric Ceramics(압전세라믹)

1. 서 론

다양한 기능성 소재들의 개발로 인하여 이들을 이용한 진동 저감 기법에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다⁽¹⁻⁸⁾. 기능성 소재들을 이용한 효율적인 능동진동제어를 수행할 경우 특정의 소재에 적합한 한 가지 기법의 적용만으로는 만족스러운 결과를 얻지 못하는 경우가 많다. 본 연구에서는 ER

유체^(1-4,8)와 PZT(lead zirconate titanate, 이하 PZT)를 동시에 적용한 복합지능구조물을 제안하여, 두 가지 기능성 재료의 특성을 최대한 발휘할 수 있는 효율적인 복합진동제어를 수행해 보았다. ER유체는 다른 지능재료(압전재료, 형상기억합금 등)들 처럼 힘 또는 모멘트를 발생시켜 작동기 역할을 수행하는 것이 아니라, 구조물 속에 함유되어 구조물의 동특성을 변화시킴으로써 진동 제어 목적에 활용될 수 있는

* 경남대학교 기계자동화공학부 강의전담교수

+ 부경대학교 기계공학부 대학원

++ 교신저자, 부경대학교 기계공학부 (mcyoon@pknu.ac.kr)

주소: 608-739 부산광역시 남구 용당동 산100번지

것이다. 또한 PZT를 이용한 제어기법은 PZT의 압전효과를 이용하여 감지기 및 작동기의 역할을 수행하며 제어기와 함께 지능구조물을 이루어 진동제어를 수행하게 된다. 본 연구에서는 ER효과를 이용하여 인가 전기장의 크기에 따른 구조물의 동특성에 의해 새롭게 발생하는 공진점에 의해 발생할 수 있는 과도한 진동을 PZT^(5,6)를 이용한 PPF⁽⁷⁾제어기법을 적용하여 제어를 수행 해 봄으로써 제안한 복합진동제어 기법의 효율성을 실험적으로 검증하고자 한다.

2. PZT를 이용한 PPF 제어기법

본 연구에 적용한 제어기법인 PPF제어 기법은 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 파악해야 한다.

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

$$\ddot{\xi} + 2\zeta w \dot{\xi} + w^2 \xi = g w^2 \eta : \text{structure} \quad (1)$$

$$\ddot{\eta} + 2\zeta_c w_c \dot{\eta} + w_c^2 \eta = w_c^2 \xi : \text{controller} \quad (2)$$

여기서,

ξ : 구조물의 모달 좌표, w : 구조물의 고유진동수

η : 제어기의 모달 좌표, ζ : 구조물의 감쇠비

w_c : 제어기의 고유진동수, ζ_c : 제어기의 감쇠비

g : 피이드백 항의 이득

제어기의 운동방정식을 바탕으로 폐회로 시스템의 전달함수를 구해보면 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$H(s) = \frac{w_c^2}{s^2 + 2\zeta_c w_c s + w_c^2} : \text{controller} \quad (3)$$

식 (3)과 같이 표현되는 제어기의 전달함수는 2차 저역 통과필터와 같은 형태로 표시되어짐을 알 수 있다. 저역통과

필터는 차단주파수에서 위상이 90°바뀐다는 사실과 구조물의 감쇠에 의한 영향이 변위와 90°위상차로 나타난다는 것을 고려해 볼 때 제어기의 차단주파수를 구조물의 고유진동수와 일치시키면 인위적인 감쇠가 증가하여 진동 제어 성능이 우수하게 발휘된다는 것을 알 수 있다.

3. ER유체 조성 및 점도측정 실험

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 빙헴(bingham)유체의 거동을 나타나게 된다. ER유체 점도 측정 실험은 silicone oil(한국신에스사, KF-96 계열 50cSt)과 starch(sigma사 제조, 이하 starch)를 무계분율 40wt%가 되도록 조성하여 점도측정 장치(독일 Haake사, VT-500)를 이용해서 전기장을 E = 0 ~ 1kV/mm까지 0.25kV/mm씩 단계적으로 변화를 주어 그 결과를 측정하였으며, 점도 측정시의 온도는 상온 20°C로 고정하였다.

Fig. 1은 점도측정 결과를 전단속도비와 전단응력의 관계로 나타낸 것으로, 인가 전기장의 크기가 증가할수록 전단응력이 증가함을 알 수 있는데, 이는 전기장을 인가하면 유체의 겔보기 점도가 증가함을 보여주는 것이다. ER유체의 점도측정에서 전단속도비가 낮은 영역에서 전단응력이 불규칙

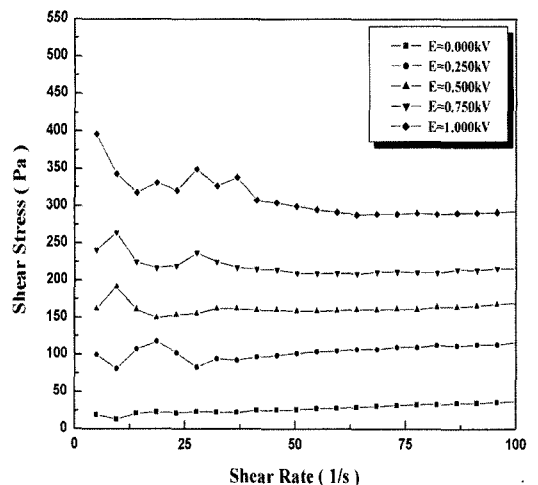


Fig. 1 Relationship between shear stress and shear rate (20°C, silicone oil 50cSt + starch = 40wt%)

하게 변하는 것은 점도계에서 +전극과 -전극에 전기장이 인가되면, 전극의 간극 내에 채워진 ER유체가 정지된 상태에서 클러스터를 형성하게 되고, 초기상태에서 +전극이 회전하려는 순간에는 +전극과 -전극사이에 형성된 클러스터가 순간적으로 파괴됨으로서 큰 토크가 필요하며, +전극 축 지지에 작용하는 미소한 마찰손실토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상이다⁽⁴⁾.

4. 복합구조물의 제작 및 실험장치

Fig. 2와 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. 본 연구에서 제안한 복합지능구조물에 대한 진동제어 효과를 파악하기 위하여 Fig. 3과 같은 실험 장치를 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 250MHz 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.

PZT가 부착된 보의 운동방정식은 해밀턴의 원리와 보의 횡방향 진동 변위에 대하여 단일 모드 $v = \varphi q$ 만을 고려한 Assumed mode method를 적용하면 다음 식과 도출할 수 있다. 여기서 ϕ 은 진동모드함수, q 는 일반화변위를 의미한다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Au_i \tag{4}$$

여기서, M, C, K 는 일반화 질량, 감쇠, 강성이며, Au_i 는 PZT에 인가된 전압이다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 ER유체를 활용한 진동제어

Fig. 4는 인가 전기장을 0~1.5kV/mm까지 0.5kV/mm씩 증가시키며 sine sweep(0~100Hz)의 입력신호에 대하여 실험적으로 구한 복합지능구조물의 FRF를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 ER유체에 전기장을 인가하면 ER유체의 동특성 변화에 의해 감쇠고유진동수와 감쇠비가 증가함을 볼 수 있다. 감쇠고유진동수와 감쇠비를 Table 2에 나타내었다. 또한, 1차 모드에 대한 경향에서 강성 변화에 의한 고유진동수의 증가는 확연하게 커짐을 알 수 있지만, 감쇠비의 증가는 그다지 크게 나타나지 않는다. 는 것을 알 수 있는데, 그 이유는 지능구조물의 제작 시 ER유체의 밀봉에 사용된 실리콘 RTV의 영향이 지배적으로 작용하기 때문으로 판단된다. 결국, ER유체에 전기장을 인가하게 되면 고유진동수의 이동, 즉 강성의 변화와 감쇠성질이 변화하게 되는데 이러한 구조물의 특성변화를 이용하면 공진점 회피를 통한 진동제어를 수행할 수 있고 특정 전기장 인가를 통해 필요한 크기의 고유진동수 변화 결과를 얻을 수가 있다.

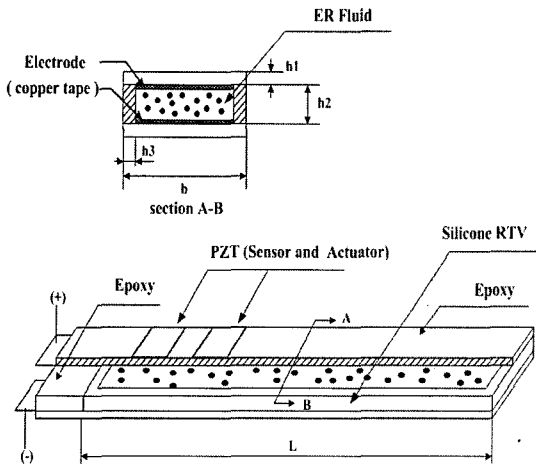


Fig. 2 Schematic diagram of proposed hybrid smart structure

Table 1 Specification of ERF beam(mm)

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

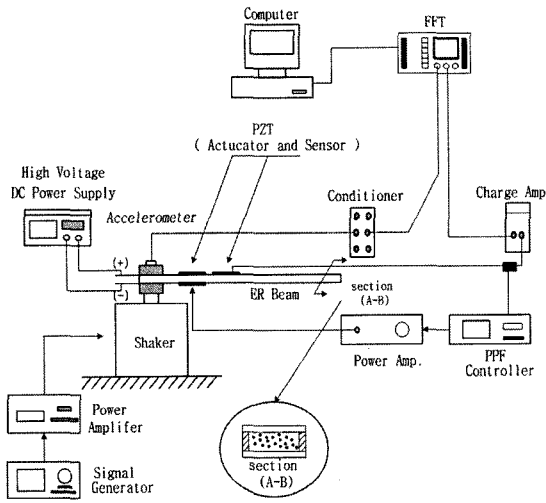


Fig. 3 Experimental set-up

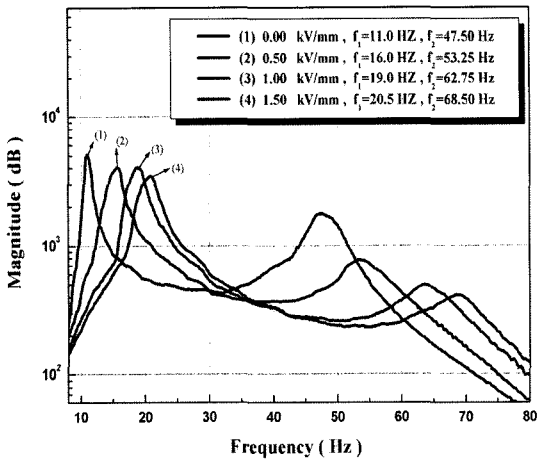


Fig. 4 Frequency response functions of smart structure using 40wt% ER fluid with various applied electric fields

Table 2 Natural frequencies and damping ratios of the proposed 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 |

5.2 PPF기법을 활용한 진동제어

연구에서 제안된 복합지능구조물에 대한 PPF 제어기법의 실효성을 검증하기 위하여 디지털 PPF제어기를 상용 프로그램인 MATLAB과 A/D & D/A 변환기가 내장된 dSPACE를 이용하여 구현하였다.

감지기의 전하신호를 전압신호로 변환하기 위하여 전하 증폭기를 설치하였으며, 작동신호의 증폭을 위해 PA41칩을 이용한 전력증폭기를 설치하였다. Table 3은 본 연구에 사용된 PZT(미국 Piezo Systems社 제조)의 사양이다.

d_{33} 는 폴링 방향의 압전 변형률 상수, d_{31} 는 전단 압전 변형률 상수, Y_{E3} 는 탄성계수, Y_{E1} 는 전단탄성계수를 나타낸다. Fig. 5는 도출된 운동방정식을 바탕으로 이론적으로 구한 주파수 응답함수와 실험적으로 구한 주파수 응답함수를 비교하여 제시한 그래프로 두 그래프가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이때 적용한 PPF제어기의 차단주파수는 제어대상 구조물의 1차고유진동수인 17.00Hz로 설정하였으며, 제어기의 감쇠비는 0.1로 선정하였다. PPF제어기법의 적용은

Table 3 Specification of PZT patches

| Material Designation | value | unit |
|----------------------------------|----------|-------------------------|
| Piezoelectric Strain Coefficient | d_{33} | 450e-12 m/V |
| | d_{31} | -108e-12 m/V |
| Elastic Modulus | Y_{E3} | 5.0e10 N/m ² |
| | Y_{E2} | 5.7e10 N/m ² |
| Density | ρ | 7700 Kg/m ³ |

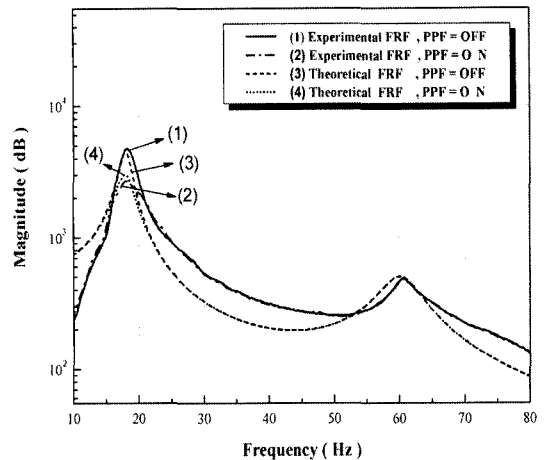


Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental frequency response functions of the proposed smart structure with PPF controller on and off

인위적인 감쇠효과를 부과하여 진동제어를 수행하는 것인데 감쇠비의 변화가 PPF제어기법의 적용 전에는 0.0419였으며, 적용 후에는 0.0713으로 변화한 것을 확인하였다.

Fig. 6은 인가 전기장을 0.75kV/mm로 인가하여 공진점 회피를 통한 1차 공진주파수에 대하여 PPF제어기의 감쇠비 변화에 따른 추가의 진동제어를 수행한 결과를 주파수 응답함수로 구한 것이다. PPF제어기의 감쇠비가 0.03일 경우는 14dB, 0.1일 경우는 4.5dB, 0.3일 경우는 3dB 정도의 진동제어 효과를 나타낼 수 있다. 이 때 적용한 PPF제어기의 차단주파수는 변화된 구조물의 1차 공진주파수인 17.00Hz로 선정하였으며 제어신호의 증폭비를 20으로 하여 작동기에 공급하였다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 PPF제어기법의 적용 시 제어기의 감쇠비의 선정은 진동제어효과는 물론 시스템의 안정성에 많은 영향을 미치게 되는데, 그 선정에 있어서 너무 작은 값(본 연구의 경우는 0.03 - 감쇠비 선정에 따른 진동제어 효과를 비교 검토하기 위해 감쇠비 변화에 따른 실험결과를 바탕으로 선정)을 선정하게 되면 공진점에 대한 진동제어 능력은 뛰어나게 발휘되지만 그로 인하여 시스템이 불안정하게 되며, 너무 높은 값을 선정하게 되면 감쇠영역이 넓어져 그 효과가 미미해 짐을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안한 복합진동제어기법의 적용 시 시스템의 안정성과 효율적인 진동제어의 실험을 위하여 PPF 제어기의 감쇠비는 0.1로 선정하여 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 무게분율 40wt%의 ER유체와 PZT를 이용한 PPF제어기법을 동시에 적용한 경우의 주파수 응답함수를 실험적 구한 것인데, ER유체에 인가한 전기장의 크기는 감지기 및 작동기의 역할로 사용되어진 PZT가 원활히 작동할 수 있는 0.75kV/mm로 일정하게 인가하였다. 전기장 인가에 의해 1차 감쇠고유진동수는 11.00Hz에서 17.00Hz로, 2차 감쇠고유진동수는 47.50Hz에서 59.25Hz로 증가함을 알 수 있었고, 감쇠비의 경우에는 1차 모드에 대해서만 고찰하였으며 감쇠비가 0.0409에서 0.0419로 증가하였음을 알 수 있었다. 변화된 동특성에 대하여 PPF제어기법을 1차 모드에 한정하여 진동제어를 수행하여 보았는데, 이때 적용한 PPF제어기의 차단주파수는 변화된 구조물의 1차 공진주파수와 일치시켜 17.00Hz로 선정하였으며, 제어기의 감쇠비는 시스템의 안정성을 고려하여 0.1로 제한하였다. 또한, 작동기에 입력되는 신호의 증폭비는 시스템의 안정성을 고려하여 증폭비 30의 경우에 대한 실험을 수행하였으며, 주파수 응답함수의 결과에서 알 수 있듯이 전기장에 의한 변화된 구조물의 공진주파수에서 8dB의 추가진동제어 효과를 볼 수 있었다.

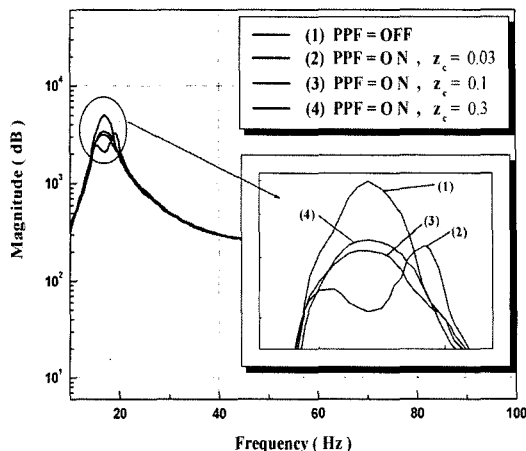


Fig. 6 Frequency response functions of the proposed smart structure applying PPF controller with different damping ratios

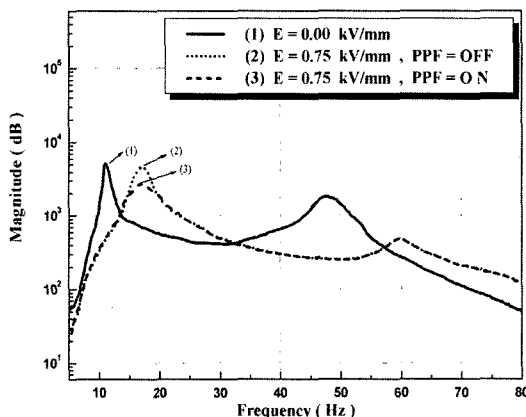


Fig. 7 Measured frequency response functions of the proposed hybrid smart structure with PPF controller on and off

6. 결론

본 연구에서는 ER유체가 함유된 보에 대하여 PPF제어기법의 적용을 위한 PZT를 활용한 복합기능구조물을 제안하였으며, 두 가지 기능성 재료의 특성을 동시에 이용한 효율적인 복합진동제어를 수행해 보았다. 인가 전기장의 크기에 따른 ER효과를 이용하여 구조물의 특성을 변화시킴으로서 공진점 회피를 통한 진동제어를 일차적으로 수행한 후, 변화된 구조물의 동적특성에 의해 새롭게 발생하는 공진점에 의해 발생할 수 있는 과도한 진동을 PZT를 이용한 PPF제어기

법을 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

이 논문은 2005년도 BK21사업에 의하여 일부 지원되었음.

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) Jang, S. C., and Yum, M. O., 2004, "Design and Performance Test of Valve Operated by ER Fluids," *KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 63~68.
- (5) Fanson, J. L., and Caughey, T. K., 1990, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 4, pp. 717~724.
- (6) Kwak, M. K., and Denoyer, K. K., 1996, "Dynamic Modelling and Vibration Suppression of a Slewing Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 189, No. 1, pp. 13~31.
- (7) Kwak, M. K., 2001, "Active Vibration Control of Smart Structure Using Piezoceramics," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 12, pp. 30~46.
- (8) Yun, S. I., Choi, Y. D., and Han, S. B., 2002, "Vibration Response Characteristics of the ERF-Cantilevered Beam Under Electrode Gap Change," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 457~462.