

(論 文)

# 전기 유동유체를 함유하는 지능외팔보의 진동특성 및 제어

실험적 고찰

최승복\* · 박용군\*\* · 서문석\*\*\*

(1992년 7월 4일 접수)

## Vibration Characteristics and Control of Smart Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid

An Experimental Investigation

Seung-Bok Choi, Yong-Kun Park and Moon-Suk Suh

**Key Words :** Electro-Rheological Fluid(전기 유동유체), Smart Structure(지능구조물), Active Control System(능동제어계), Vibration Parameter(진동매개변수) Structural Damping(구조댐핑), Complex Moduli(복소 모듈라이)

### Abstract

This paper reports on a proof-of-concept experimental investigation focused on evaluating the vibration characteristics and control of smart hollow cantilever beams filled with an electro-rheological(ER) fluid. The beams are considered to be of uniform viscoelastic materials and modelled as a viscously-damped harmonic oscillator. Electric field-dependent natural frequencies, loss factors and complex moduli are evaluated and compared among three different beams : two types of different volume fraction of ER fluid and one type of different particle concentration of ER fluid by weight. Modal characteristics of the beams are observed in both the absence and the presence of electric potentials. It is also shown that by constructing active control algorithm the removal of structural resonances and the suppression of tip deflection are obtained. This result provides the feasibility of ER fluids as an active vibration control element.

### 1. 서 론

지능구조물(smart structure)에 대한 연구는 로켓의 고속운동을 위한 구조 경량화, 기름을 절약하기 위한 자동차 구조의 경량화, 그리고 피할수 없는 대형우주 구조물등의 경량화 요구에 따라 진동과 소음문제가 대두되면서 최근 미국을 비롯 여러

선진국에서 발생하는 첨단기술의 일환으로 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 연구개발 추세는 실제 산업현장의 생산성 및 품질향상을 통한 제조업의 경쟁력 강화와도 밀접한 관계가 있어 매우 큰 의미를 갖고 있다. 지금까지 정립된 정의에 의하면 지능구조물이란 현존하는 금속 혹은 복합재료 구조물에 연속(continuous) 혹은 분포(distributed)형의 액튜에이터 및 센서를 적합 혹은 삽입한 것으로써 구조물 자체가 예측하기 힘든 외란 및 내란에 대해 고유의 지능으로 유효 적절히 대처할 수 있는 기능을 보유하고 있는 것을 말한다. 현재 이러한 구조물을

\*정회원, 인하대학교 기계공학과

\*\*정회원, 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\*\*국방과학연구소

형성하는 매체로서는 액튜에이팅 및 센싱 능력을 동시에 갖고 있는 압전재료,<sup>(2)</sup> 센싱능력만을 보유하고 있는 광섬유,<sup>(3)</sup> 액튜에이팅 능력만을 보유하고 있는 형상기억합금<sup>(4)</sup>과 구조물의 동탄성 특성을 변화시키는 전기유동(electro-rheological : ER) 유체<sup>(5)</sup> 등이 있다.

이들 중 본 연구에서 제시된 ER유체는 압전재료 및 형상기억합금과 전혀 다른 형태의 제어요소 성질을 갖고 있다. 잘 알려진 바와 같이 압전재료는 전압부하에 따른 굽힘모멘트를 발생하여 진동을 제어하며, 형상기억합금은 열의 공급에 의해 기억된 형상으로 돌아가려는 성질과 구속조건 사이에서 발생된 구속력(constraint force)을 이용하여 진동제어를 수행한다. ER유체의 경우는 전장(electric field)부하시 구조물 자체의 감쇠, 강성 등의 변화에 따른 제어효과를 얻을 수 있다. 특히 구조물의 감쇠 고유진동수가 전장에 의해 제어되기 때문에 주파수 및 크기가 변화하는 외란에 의한 공진현상등 매우 위험한 상황을 능동적으로 제어할 수 있다. 지금까지 ER유체를 이용한 지능구조물에 대한 연구는 초기 단계로서 구조물의 정확한 정적 및 동적 모델링, 그리고 제어기 설계 등이 정립되지 않은 상태이다. 특히 제어측면에서 능동 제어기 설계에 대한 연구는 많은 매력을 갖고 있으나, 매우 부진한 실정이다. 이는 ER유체 자체의 복잡한 메카니즘과 더불어 구조물과의 결합에서 발생하는 여러 현상에 대한 파악이 매우 어려운 점에서 기인한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 ER유체를 조성하여 전장 부하시 그 현상을 실험한 후, ER유체를 함유하는 지능구조물을 제작하여 전장 부하의 증가에 따른 지능구조물의 동탄성 특성변화를 실험적으로 고찰하였다. 그리고 이 동탄성 특성의 변화를 토대로 하여 논리적인 능동 진동 제어알고리즘을 구성하였다. 특히 동탄성 특성변화에서는 기존의 논문<sup>(5)</sup>에서 고려되지 않았던 전장 부하에 따른 모드형상(mode shape) 및 복소 모듈라이(complex moduli)를 비롯하여 고유주파수, 손실계수(loss factor) 등의 변화를 고찰하였다. 먼저 일반적인 ER유체의 특성을 간단히 살펴본 다음, 샌드위치형의 알루미늄 구조물에 ER유체를 채운 지능외팔보의 제작에 대해서 언급하였다. ER유체를 구성하는 고체입자의 농도와 ER유체가 전체 구조물에 대해서 차지하는 체적비를 다르게 한 세가지 형태의 시편을 제작하고 전

장 변화에 따른 진동 매개변수의 변화를 주파수 영역에서 비교, 분석하였다. 그리고 전장 부하 변화에 따른 동탄성 특성 고찰로부터 ER유체를 제어요소로 하는 논리적인 진동 제어알고리즘을 제시하였고, 또한 이 제어알고리즘을 이용하여 시편 끝점에서의 변위를 제어한 결과를 주파수 영역과 시간 영역에서 분석하였다.

## 2. ER유체의 특성

초기 ER유체에 대한 해석은 전장 부하시 일어나는 유동변화(rheological change)의 이해부족으로 많은 문제점을 던져주었다. 예를 들어, 전장 부하에 의해 유체의 점성변화만이 발생한다는 생각은 잘못된 인식이다. 만일, 약간의 간격을 둔 기름으로 채워진 두개의 평판을 고려한다면, 판의 평면에 가해진 힘은 항상 미끄러움을 유발할 것이다. 가해진 힘과 판의 면적에 대한 미끄러움은 기름두께가 얇을수록 증가하며, 힘을 전혀 가하지 않은 경우라도 미끄러움은 결국 영으로 되지 않는다. 그러나 만일 두판 사이가 건조하고 함께 눌림을 받을 때는 아주 다른 운동현상이 나타난다. 즉, 가해진 힘이 정적 마찰력을 초과할 때까지는 미끄러움이 발생하지 않으며, 일단 미끄러움이 시작되면 그것을 유지하기 위한 힘이 정적 마찰력보다 조금 적으며 실제적으로 미끄러움과는 무관하다. 일반적으로 전장 무부하시 두판 사이의 ER유체는 일반 기름과 매우 유사한 운동을 하나 전장이 부가되면 그 운동은 건조한 판에서 일어나는 현상과 같다. 즉, 건조한 판에 가해진 힘의 증가에 따라 마찰력이 증가하는 것과 같이 두 판사이의 전장 부하증가에 따라 운동을 시작하고 유지하기 위한 힘이 증가한다. 따라서 Winslow가 보고한 유체<sup>(6)</sup>에 있어서의 유체 저항의 변화가 점성증가에만 있다고 한 가정은 잘못된 것이며, 용어 또한 'electro-viscous'보다는 현재 널리 사용되고 있는 'electro-rheological'이 더욱 적절한 표현이 된다.<sup>(7,8)</sup>

ER유체는 크게 물과 잘 섞이지 않는 용매액체, 극성을 띠고 물을 흡수하는 용질고체, 그리고 ER유체의 효과를 증진시키는 촉매 등 3가지로 이루어져 있는데, 외면상 가장 두드러진 현상은 전장 무부하시 액체상태가 전장 부하시 고체상태로 변화하는 것이다. Fig. 1은 인하대학교 기계공학과 제어측실험실에서 개발한 ER유체에 대해서 전장 무

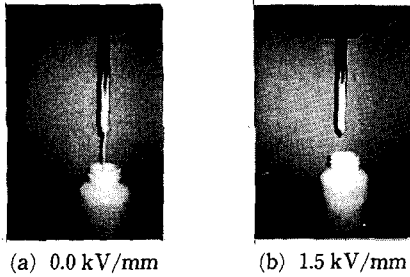


Fig. 1 Photograph of ER fluids

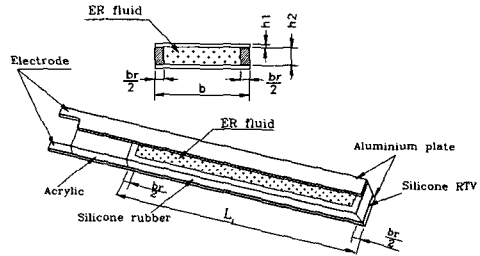


Fig. 2 Schematic diagram of smart beams

부하시와 전장 부하시의 현상을 나타내는 사진으로써 전장 무부하시에 흘러 내리던 유체가 전장 부하시에 젤(gel)상태가 되어 흘러내리지 않고 있는데, 이 전극사이에는 1.5 kV/mm의 전장이 가해져 있다. 일반적으로 알려진 ER유체의 역학적 성질은 전장 무부하시 뉴우튼 유체로 간주되지만 전장 부하시 비뉴우튼 유체중에서 빙햄(bingham) 성질을 띄어 항복 전단응력이 전장의 함수가 된다. 이것은 전장 무부하시 ER유체의 입자가 자유로이 운동하는 등방향(isotropic)의 물리적, 기계적 성질이 전장 부하시에는 ER유체의 입자가 체인형 구조로 되어 이방향(anisotropic)의 물리적, 기계적 성질로 변하기 때문이다. 이런 기둥모양의 구조는 유체의 흐름을 억제하여 강성 및 감쇠를 변화시킨다. ER유체의 종류마다 다르겠지만 일반적으로, 상변화(phase change)를 위해 요구하는 전장의 크기는 약 1~3 kV/mm(유체두께)이나 전류밀도(current density)가 약  $10 \mu A/cm^2$  이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. 그리고 전장 부하에 대한 ER유체 자체의 반응속도는 1 ms 이하이고 최대 반응주파수는 약 12 kHz이어서 제어요소의 요구조건을 만족한다.<sup>(7)</sup>

### 3. 실험장치 및 절차

#### 3.1 시편 제작

본 실험에서 사용된 시편은 Fig. 2와 같이 두 개의 알루미늄판, 실리콘 고무, 접착제, 아크릴 등으로 이루어진 샌드위치형의 보이다. 이 시편은 실험시 경계조건을 쉽게 하기 위해 외팔보 형태로 제작되었다. 알루미늄판은 전도체로서 전극(electrode) 역할을 하고 있으며, 실리콘 고무는 절연체(insulator) 역할을 하는 것으로서 부드럽고 내열성을 지니고 있다. 접착제는 알루미늄판과 실리콘 고무

를 접착시켜 ER유체가 밖으로 흐르는 것을 방지하여 주기 위한 것으로 실리콘 RTV를 사용했다. 이 접착제는 70°C에서 1~2시간 정도면 잘 굳는데, 굳고 나면 실리콘 고무와 같은 성질을 지닌다. 아크릴은 부도체로서 외팔보를 고정구에 지지시키기 위해서 사용된다. 실험에 사용된 시편의 외형치수 및 ER유체의 사양은 Table 1에 표시되어 있다. ER유체를 함유하는 지능구조물의 요소중에는 여러가지가 있으나 그중 ER유체의 농도와 체적비가 실험한 결과 가장 중요한 요소로 판정되어 본 논문에서는 이를 시편 구성의 중요 변수로 채택하였다. 시편 구성에서 ER유체 농도는 ER유체의 전체 구성 요소중에서 용질인 고체입자가 차지하는 중량비를 뜻하며, ER유체의 체적비는 알루미늄판을 포함한 전체 체적에 대해서 ER유체가 차지하는 체적비이다. 이것은 시편 양쪽의 고무폭을 변화시켜 조절하였다. 본 논문에서는 또한 여러가지 종류의 ER유체를 조성한 뒤 실험을 통하여 강성과 감쇠 효과가 제일 우수한 ER유체를 사용하였으며, 또한 본 논문에서 채택된 ER유체의 농도와 체적비의 수치는 ER유체의 혼합과 시편 제작을 고려하여 반복된 실험을 통하여 설정하였다. 그리고 시편의 외형 치수는 ER유체 자체 하중에 의한 변형과 ER유체가 구조물에 함유되었을 때의 진동 제어효과, 장비의 용량 및 특성 등을 고려하여 적절히 결정하였다.

#### 3.2 실험장치 및 절차

Fig. 3은 본 연구에서 제안된 실험장치를 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저 시편의 전극이 있는 한쪽 끝을 셰이커(shaker)위의 고정구에 고정시키고, 2채널 주파수 분석기(FFT analyzer)의 근원 신호(source signal)를 파워 증폭기로 증폭하여 셰이커를 가진시켰다. 셰이커의 가진 진폭크기는 ER유체의 효과, 출력장치인 비접촉식 변위기의 측정

Table 1 Specification of the specimens

Specimen	ER concentration (wt %)	ER volume fraction (%)	L (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	b (mm)	br (mm)
A	55	53.5	200	0.5	2	22	4
B	45	53.5	200	0.5	2	22	4
C	55	47.0	200	0.5	2	22	6

범위 등을 고려하여 결정하였다. 시편의 첫번째 고유주파수로 가진시 셰이커의 가진 진폭을 0.13 mm 가 되도록 설정하였다. 또한 주파수 분석기의 화면 출력 주파수범위는 시편의 첫번째 모드와 두번째 모드의 감쇠 고유주파수가 잘 표현될 수 있도록 10 Hz~150 Hz로 설정하였다. 셰이커위에 부착된 가속도계로 시편에 부가되는 입력을 측정하였고, 또한 시편 반대쪽 끝에는 와류식 비접촉식변위기 (noncontact proximity probe)로 시편 끝에서의 변위를 측정하였다. 가속도계의 신호와 이 변위기의 신호는 각각 증폭되어 주파수 분석기에 각각 입력, 출력으로 들어가 동탄성 특성 해석에 필요한 주파수 응답을 나타낸다. 그리고 ER유체를 함유하는 구조물이 전장 부하에 따라 공진점 주파수가 변하는 특성을 이용한 능동 진동 제어알고리즘을 위해서 이 변위기의 신호는 A/D 변환기를 통해 컴퓨터(PC 386)로 되먹임(feedback)되어 시편 끝에서의 주파수와 변위 정보를 제공한다. 이 정보는 현상학적인 실험을 통해 얻은 논리적 제어알고리즘과 연계되어 외란 주파수에 알맞는 전압이 결정되며 이 전압은 D/A 변환기를 거쳐 직류 고전압 증폭기에서 시편으로 공급된다.

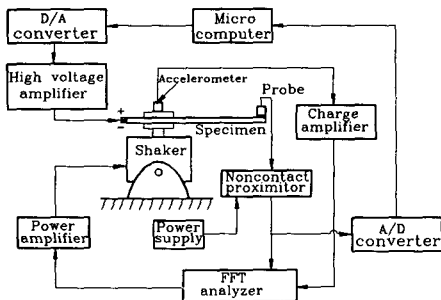


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

#### 4. 동탄성 특성

ER유체 자체의 가장 두드러진 특징은 전장 무부하시 액체상태의 액체가 전장 부하시 고체상태로 변화하는 것이다. 이 유체가 구조물과 결합되었을 때 전장부하에 따른 구조물의 동탄성 특성 변화에 대해서 실험적으로 고찰하였다. 본 실험에서는 0.2 kV/mm 간격으로 2.0 kV/mm까지 증가시키면서 각각의 전장에 해당하는 주파수 응답으로부터 첫번째 모드와 두번째 모드에 대한 감쇠 고유주파수를 구하였고, 손실계수  $\eta$ 는 하프파워포인트(half-power point)방법을 이용하여 구하였으며, 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\eta_i = \frac{\omega_{2i} - \omega_{1i}}{\omega_{di}} \quad (1)$$

여기서  $i$ 는 모드번호,  $\omega_{di}$ 는  $i$ 번째 모드의 감쇠 고유주파수,  $\omega_{2i}$ ,  $\omega_{1i}$ 는  $i$ 번째 모드의 감쇠 고유주파수에서의 진폭크기에 비해서 3dB이 낮은 진폭 크기 위치의 주파수이다. Fig. 4는 시편 A에 대한 주파수 응답을 나타낸 것으로서 전장 부하에 따라 지능구조물의 감쇠 고유주파수와 감쇠계수가 변화됨을 알 수 있었다. Fig. 5는 ER유체의 농도 및 체적비를 달리한 구조물에 대해서 전장부하의 증가에 따른 첫번째 모드와 두번째 모드에서의 감쇠 고유

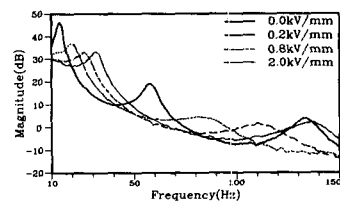
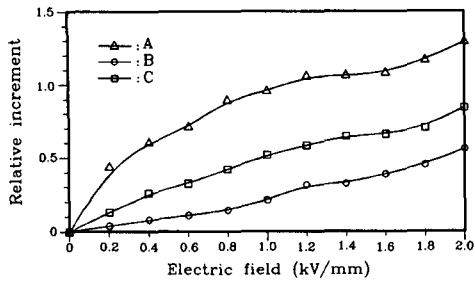
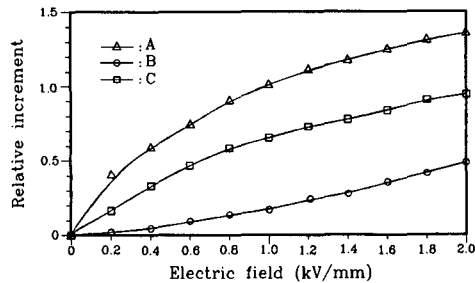


Fig. 4 Frequency responses of the smart beam A

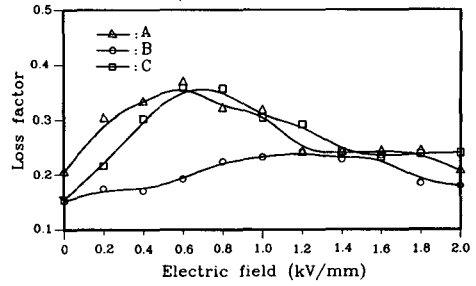


(a) First mode

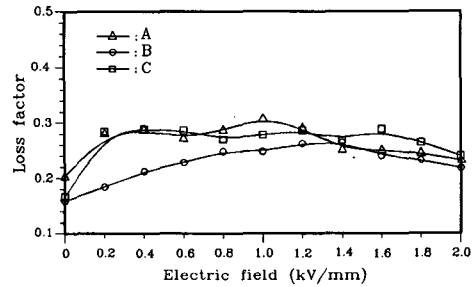


(b) Second mode

Fig. 5 Relative increments of damped natural frequencies



(a) First mode



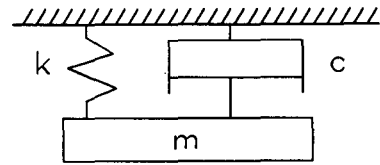
(b) Second mode

Fig. 6 Variations of loss factors

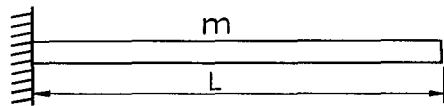
주파수의 증가를 전장 무부하시의 감쇠 고유주파수에 대해서 상대적인 증가율로 나타낸 것이다. 첫번째 모드와 두번째 모드에 대해서 ER유체 농도와 체적비가 가장 큰 시편 A가 첫번째 모드와 두번째 모드에서 가장 높은 증가를 나타내었다. 이는 ER유체를 제어요소로 사용할 경우 시편 A가, 시편 B, C보다 넓은 폭의 제어영역(control bandwidth)을 줄 수 있음을 의미한다. 또한 전장 부하의 변화에 대한 감쇠 고유주파수의 변화에 있어서 ER유체의 농도가 ER유체의 체적비보다 더 중요한 인자임을 알 수가 있다. Fig. 6은 전장 부하의 증가에 따른 손실계수의 변화를 나타내는 것으로서 첫번째 모드에서는 ER유체의 농도가 큰 시편 A, C가 0.6 kV/mm까지는 크게 증가하다가 그 후로는 완만하게 감소하기 시작하였다. ER유체의 농도가 작은 시편 B는 작은 크기로 증가하다가 1.6 kV/mm 이후로 감소하기 시작하였다. 손실계수는 농도가 클수록 유체의 고상화가 일찍 발생되어 전장 부하가 빠른 증가를 보이다가 빨리 감소하고 ER유체의 농도가 적을수록 유체의 고상화가 늦게되어 적은 전장부하가 작은 값으로 증가하고 천천히 감소하였

다. 두번째 모드의 손실계수 변화도 첫번째 모드에서와 비슷한 현상을 나타내었다. 전장 부하의 증가에 따른 손실계수의 변화에 있어서 ER유체의 농도가 ER유체의 체적비보다 더 중요한 인자임을 알 수가 있었다.

지능구조물의 복소 모듈라이(complex moduli)를 구하기 위해 Fig. 7과 같은 1 자유도계로 모델상사



(a) Viscous damping oscillator



$$m_{eff} = 0.236m \quad K_{eff} = 3E_s I / L^3$$

(b) Smart beam

Fig. 7 Model analogy

(model analogy)를 시켜 해석하였다. Fig. 7(a)로부터 자유 진동상태에서의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right) + c\left(\frac{dx}{dt}\right) + kx = 0 \quad (2)$$

여기서  $x$ 는 변위,  $m$ 은 질량,  $c$ 는 점성감쇠상수,  $k$ 는 스프링 강성이다. 식(2)의 해는

$$x(t) = e^{(-c/2m \pm (c/2m)^2 - (k/m)^{0.5})t} \quad (3)$$

로 주어진다. 이 경우  $(c/2m)^2 > (k/m)$ 일 때는 과감쇠계(overdamped system),  $(c/2m)^2 = (k/m)$ 일 때는 임계감쇠계(critically damped system),  $(c/2m)^2 < (k/m)$ 일 때는 저감쇠계(underdamped system)이다. 본 실험에서 적용된 경계조건, 부가되는 전장조건 등을 고려하면 제시된 지능외팔보의 경우는 저감쇠계이었다. 그러므로 식(2)의 해는

$$x(t) = x_0 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (4)$$

가 된다. 여기서  $\zeta = c/c$ ,  $\omega_n^2 = k/m = (c_c/2m)^2$ ,  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 이다.

상사된 외팔보의 모델을 고려하여, 등가강성(effective stiffness)과 등가질량(effective mass)로 고유주파수를 표현하면 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{(k_{eff}/m_{eff})} = \sqrt{(3E_R I / L^3 m_{eff})} \quad (5)$$

여기서 등가강성( $k_{eff}$ )은 보의 보의 끝점에서 단위 변위당 하중으로써 구해지고, 등가질량( $m_{eff}$ )은 보 전체에 분포되어 있는 질량이 갖고 있는 운동에너지를 발생 시킬 수 있는 보 끝점에서의 집중질량을 고려하여 얻어지는데  $m_{eff}$ 는 전체 외팔보 질량( $m$ )의 0.236배이다.

제안된 지능외팔보는 구조댐핑(structural damping)을 갖고 있으므로 다음과 같이 복소 모듈라이(complex muduli)로 표시할 수 있다.

$$E^* = E_R + iE_I \quad (6)$$

여기서  $E_R$ 은 탄성 모듈러스(elastic modulus),  $E_I$ 는 손실 모듈러스(loss modulus)이다. 그리고, 이들의 비는 다음 관계식으로 주어진다.

$$E_I / E_R = \eta \quad (7)$$

여기서  $\eta$ 는 손실계수(loss factor)이다.  $\eta = 2\zeta$ 의 관계에서  $\zeta$ 를 구한 다음, 주파수응답에서 얻어진 감쇠 고유주파수 ( $\omega_d$ )와  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$  관계에서  $\omega_n$ 을 식(5)에 대입하면 탄성 모듈러스( $E_R$ )가 얻어

지고 식(7)에  $E_R$ 과  $\eta$ 를 대입하면 손실 모듈러스( $E_I$ )가 얻어진다.

Fig. 8은 전장 부하 증가에 따라 복소 모듈라이인 탄성 모듈러스와 손실 모듈러스 값을 ER유체의 농도와 체적비를 다르게 한 시편에 대해서 나타낸 것이다. 탄성 모듈러스는 ER유체의 농도와 체적비가 큰 시편 A가 크게 증가하였는데 이는 전장 부하에 따라 감쇠 고유주파수가 가장 크게 증가하였기 때문이다. 손실 모듈러스 값은 손실계수와 탄성 모듈러스의 곱으로 나타내는데, 시편 A, B, C가 같은 정도로 증가하였다. 한편 전장 무부하시와 부하시에 대해서 각 지능외팔보의 고유치(eigenvalues)는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 서로 분리됨을 알 수 있다. 이는 다시 말하여, 시편 표면에 비접촉식

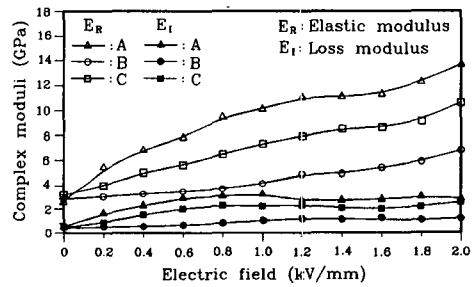


Fig. 8 Variations of complex moduli (first mode)

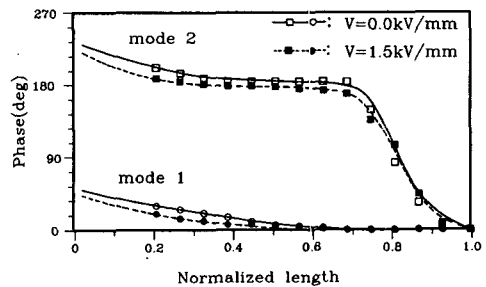
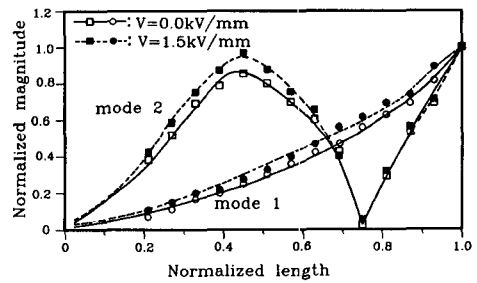


Fig. 9 Mode shapes of the smart beam A

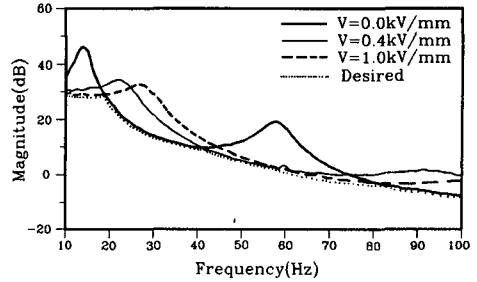
변위기의 목표점을 설정하여, 전장 무부하시와 부하시 각 시편의 끝점을 기준으로 모드형상을 얻은 결과, Fig. 9에서 보는바와 같이 모드형상이 전장 무부하시와 부하시 모두 실상(real)에 가까움을 나타내는 것과 같다. 그러나 트러스 구조물과 같은 복잡한 구조물에서는 유사한 현상의 예측이 매우 어렵다고 생각된다.

### 5. 능동제어 특성

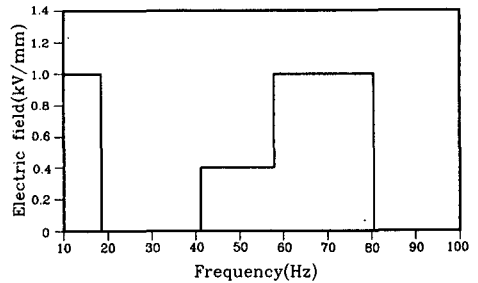
구조물에 대한 진동문제를 해결하기 위해 감쇠 물질을 구조물에 부착하는 방법(constraint layer)에 대한 연구는 오래전부터 진행되어 왔다. 이 방법은 구조물 제작 초기에 미리 외란을 예측하여 공진점을 피하고 또한 감쇠효과를 증진시키는 물질 특성을 갖도록 만들어지는데 제작 후에는 물질 특성이 고정되어 외란의 변동에는 대처할 수 없는 일종의 수동식 진동 제어방법이다. 본 논문에서는 전장 부하 증가에 따른 동탄성 특성 변화를 토대로하여, 외란의 주파수가 임의로 변화하더라도 외란에 대한 정보를 출력으로 되먹임(feedback)하여 전장 부하를 능동적으로 변화시켜 구조물 자체가 공진점을 피할 수 있는 능동진동 제어 알고리즘을 구성하였다. 우선 동탄성 특성 변화의 고찰에서 제어성이 우수한 시편 A를 선택하였고, 또한 실험된 여러가지 주파수 응답중에서 감쇠 고유주파수, 손실계수, 가진조건, 전장 부하조건 등을 고려하여 능동제어 효과에 최적인 Fig. 10(a)와 같은 주파수응답을 얻은후, 시편 끝에서의 변위의 크기를 최소화하기 위한 요구 주파수응답을 가는 점선과 같이 설정하였다. Fig. 10(b)은 요구 주파수응답에 상응하는 전압( $V_d$ )을 나타내는데, 이를 논리적인 제어알고리즘으로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } 0 \text{ Hz} \leq \omega < 18.5 \text{ Hz} \quad \text{THEN } V_d = 1.0 \text{ kV/mm} \\
 & \text{IF } 18.5 \text{ Hz} \leq \omega < 43.6 \text{ Hz} \quad \text{THEN } V_d = 0.0 \text{ kV/mm} \\
 & \text{IF } 43.6 \text{ Hz} \leq \omega < 58.2 \text{ Hz} \quad \text{THEN } V_d = 0.4 \text{ kV/mm} \\
 & \text{IF } 58.2 \text{ Hz} \leq \omega < 80.6 \text{ Hz} \quad \text{THEN } V_d = 1.0 \text{ kV/mm} \\
 & \text{IF } \omega \text{ Hz} \geq 80.6 \text{ Hz} \quad \text{THEN } V_d = 0.0 \text{ kV/mm}
 \end{aligned} \tag{8}$$

이 능동 제어알고리즘의 기본개념은 가진조건, 시편의 ER유체의 농도 및 체적비 등 여러 조건에 따라 변하는 동탄성 특성 고찰을 통해 얻어진 요구 주파수응답으로부터 주파수 대역 설정 및 그에 대



(a) Selected frequency responses



(b) Desired electric field

Fig. 10 Frequency response and electric field for active vibration control of the smart beam A

응하는 전장 부하를 설정하는 것이다. 그러므로 가진조건, 시편의 종류에 따라 전장 부하에 따른 동탄성 특성의 변화가 다르기 때문에 제어알고리즘에 적용되는 주파수 대역과 전장의 크기는 달라질 수 있다.

Fig. 11(a)는 식(8)에 주어진 논리적 능동제어 알고리즘을 이용하여 시편 A 끝점에서의 변위 제어 정도를 나타낸 것이다. 실험은 첫번째 공진 주파수인 13.8 Hz로 가진시 가진 진폭을 0.13 mm로 고정된 상태에서, 10 Hz부터 100 Hz까지 2 Hz씩 가진(외란) 주파수를 변경하면서 측정하였는데 지능구조물의 첫번째와 두번째 감쇠 고유주파수에서 변위 제어효과가 가장 크게 됨을 알 수 있다. 또한 전 주파수 범위에 걸쳐서 일정량의 크기의 변위가 발생되는데 이것을 ER유체가 다른 액츄에이터처럼 힘 또는 모멘트를 발생시키지는 못하고 다만 구조물과 결합되었을 때 전장부하에 따라 시스템 특성만을 변경시키기 때문이다. Fig. 11(b)는 시편 끝에서의 변위 억제상태를 시간영역에서 나타낸 것이다. 즉, 첫번째 공진 주파수(13.8 Hz)로 가진 시킨후 1.0 kV/mm 능동제어시 변위의 감소와, 다시 1.0 kV/mm 전장 부하시의 공진 주파수(26.9 Hz)

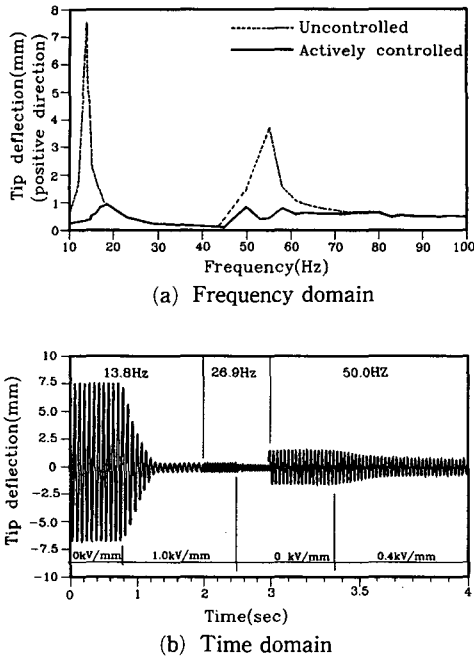


Fig. 11 Controllabilities of the smart beam A

로 가질시 0.0 kV/mm로 능동제어한 변위를 나타낸 것이다. 그리고 이 그림으로부터 전장 무부하시의 두번째 공진점 근처에서 변위가 증가할때 0.4 kV/mm로 능동제어한 결과 변위가 감소되었음을 알 수 있다. 첫번째 공진 주파수(13.8 Hz)로 가질 시킨 후 1.0 kV/mm 능동제어시 실험치로 구한 결과 시편 끝부분에서의 변위는 7.5 mm에서 0.35 mm으로 감소하였고 전장을 부가하여 완전한 변위 감소의 5퍼센트(percent)이내에 정착될 때까지 걸린 시간은 0.4 sec이었다. 이는 ER유체 자체의 전장 부하에 따른 반응속도는 1.0 ms이하지만 구조물과 결합되고 여러장비를 거쳐서 반응된 시간이다. 다른 기존의 제어 액추에이터는 제어하고자하는 모드에 따라 특정한 곳에 설치하여 모드별 제어를 하지만 ER유체를 함유하는 지능구조물은 전극한 곳에 전장을 부가하여도 모든 모드에 대해서 진폭 제어가 가능한 것이 장점이라고 할 수 있다.

## 6. 결 론

ER유체를 함유하는 지능의팔보의 감쇠 고유주파수, 손실계수, 탄성모듈러스와 같은 동탄성 특성이 전장 부하 증가에 따라 변화됨을 고찰하였다. 그리

고 이를 이용하여 능동 진동 제어알고리즘을 도출하여 진동제어 효과를 실험하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정한 가진 진폭하에서 전장 부하 변화에 따라 ER유체를 함유하는 지능구조물의 감쇠 고유주파수, 손실계수, 탄성 모듈러스 등과 같은 동탄성 특성이 변화되었다.

(2) 감쇠 고유주파수는 전장 부하의 증가에 따라 첫번째 모드, 두번째 모드에서 증가하였다. 그러나 손실계수는 낮은 전장 부하시에는 증가 하다가 어느 일정 전장 부하에서부터 감소하였다.

(3) 전장 부하 증가에 따른 감쇠 고유주파수와 손실계수의 변화에 있어서 ER유체 농도가 ER유체 체적비보다 중요한 ER유체 구성인자로서 작용됨을 알 수 있었다.

(4) 동탄성 특성 고찰을 통해 얻은 능동 진동 제어 알고리즘을 이용하여 주파수가 변하는 외란에 대해서도 공진현상을 능동적으로 피해 진동 제어효과를 얻을 수 있었다.

향후 본 연구에서 얻은 기초적 자료를 바탕으로 보다 다양한 ER유체의 자체 개발과 ER유체를 함유하는 지능구조물의 현상학적 혹은 이론적 모델링을 통한 지배방정식 도출에 대한 연구와 여러가지 능동 제어알고리즘 개발에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구의 일부는 1992년도 한국과학재단의 일반목적 기초연구과제(923-0900-011-2)로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Rogers, C.A., Baker, K.D. and Jaeger, C.A., 1988, "Introduction to Smart Materials and Structures," Proc. of U.S.A. ARO Workshop, pp. 17~28.
- (2) 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.
- (3) Claus, R.O., Mckeeman, J.C., May, R.G. and Bennett, K.D., 1988, "Optical Fiber Sensors and



- Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications," Proc. of U.S.A. ARO Workshop, pp. 29~38.
- (4) Yaeger, J.R., 1984, "A Practical Shape Memory Electromechanical Actuator," Proc. of International Symposium on Automotive Technology and Automation, Vol. 1, pp. 633~642.
- (5) Gandhi, M.V., Thompson, B.S. and Choi, S.B., 1989, "A New Generation of Innovative Ultra-Advanced Intelligent Composite Materials Featuring Electro-Rheological Fluids : An Experimental Investigation," J. of Composite Materials, Vol. 23, pp. 1232~1255.
- (6) Winslow, W.H., 1949, "Induced Fibrillation Suspensions," J. of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137~1140.
- (7) Stangroom, J.E., 1983, "Electro-Rheological Fluids," J. of Physics Technology, Vol. 14, pp. 290~296.
- (8) Block, H. and Kelly, J.P., 1988, "Electro-Rheology," J. of Physics D, Applied Physics, Vol. 21, pp. 1661~1677.