

電氣流動 流體를 特徵으로 하는 知能
외팔보의 振動特性和 調律에 관한 研究

최 승 복*, 정 재 천*, 박 용 군*, 서 문 석**

A Study on Vibration Characteristics and Tuning of Smart Cantilevered Beams
Featuring an Electro-Rheological Fluid

S. B. Choi*, C. C. Cheong*, Y. K. Park*, M. S. Suh**

ABSTRACT

Electro-Rheological(ER) fluids undergo a phase-change when subjected to an external electric field, and this phase-change typically manifests itself as a many-order-of-magnitude change in the rheological behavior. This phenomenon permits the global stiffness and energy-dissipation properties of the beam structures to be tuned in order to synthesize the desired vibration characteristics. This paper reports on a proof-of-concept experimental investigation focussed on evaluation the vibration properties of hollow cantilevered beams filled with an ER fluid, and consequently deriving an empirical model for predicting field-dependent vibration characteristics. A hydrous-based ER fluid consisting of corn starch and silicone oil is employed. The beams are considered to be uniform viscoelastic materials and modelled as a viscously-damped harmonic oscillator. Natural frequency, damping ratio and elastic modulus are evaluated with respect to the electric field 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. Transient and forced vibration responses are examined in time domain to demonstrate the validity of the proposed empirical model and to evaluate the feasibility of using the ER fluid as an actuator in a closed-loop control system.

Key Words : Electro-Rheological Fluid (전기유동유체), smart Structure (지능 구조물), Elastodynamic Property (동탄성 특성), Pseudo-Control Force (가제어력), Vibration Tuning (진동 조율), Vibration Control (진동 제어)

1. 序 論

知能(smart or intelligent) 構造物에 대한 開發은

로봇의 高速運動을 위한 構造 輕量化, 기름을 절약하
기 위한 자동차 構造의 輕量化, 그리고 피할 수 없는
대형 宇宙 構造物등의 輕量化 要求에 따라 振動과 騒

* 인하대학교 기계공학과 (정희원)

** 국방과학연구소

같은 문제가 대두 되면서 최근 미국을 비롯 여러 선진국에서 新生하는 尖端技術의 일환으로 활발한 研究가 진행되고있다. (1)-(6) 이러한 研究 開發 추세는 실제 産業現場의 生産性 및 品質 向上을 통한 製造業의 競爭力 강화와도 밀접한 관계가 있어 매우 큰 의미를 갖고있다. 지금까지 定立된 定義에 의하면 知能 構造物이란 現存하는 金屬 혹은 複合材料 構造物에 連續(continuous) 혹은 分布(distributed)형의 액츄에이터 및 센서를 접합 혹은 삽입한 것으로써 構造物 自體가 豫測하기 힘든 外亂에 대해 固有의 지능으로 有效 적절히 대처할 수 있는 機能을 보유하고 있는 것을 말한다. 現在 이러한 構造物을 형성하는 媒體로서는 액츄에이팅 및 센싱 능력을 동시에 갖고 있는 壓電필름(2), 센싱 능력만을 보유하고 있는 光纖維(3), 액츄에이팅 능력만을 보유하고 있는 形狀記憶合金(4)과 電氣流動(ER) 流體(5), (6) 등을 들 수 있다.

本 研究에서 提示된 ER流體의 가장 두드러진 特徵은 電場 負荷時 液體 상태에서 固體 상태로 相變化(phase change)하는 것인데, 一般의으로 ER流體는 크게 물과 잘 섞이지 않는 溶媒液體, 極성을 띠고 물을 吸收하는 溶質 固體, 그리고 ER流體의 效果를 증진시키는 觸媒등 세지로 이루어져 있다. 一般의으로 알려진 ER流體의 力學的 性質은 電場 無負荷時 뉴우튼 流體로 간주되지만 電場 負荷時 비뉴우튼 流體에서 빙헴(Bingham) 性質을 띄어 降伏 剪斷應力이 電易의 函數가 된다. 이것은 電場 無負荷時 ER流體의 粒子가 자유로이 운동하다가 電場 負荷時에는 ER流體의 粒子가 체인형 구조로 되어 流體의 흐름을 억제하여 이와 連繫된 構造物 혹은 시스템의 剛性 및 댐핑을 증가시킨다. 一般의으로 ER流體의 相變化를 위해 要求되는 電場의 크기는 약 1~3kV/mm(流體두께)이나 電流密度(current density)가 약 10 μ A/cm² 이하이기 때문에 相變化를 위해 要求되는 電力은 매우 낮다. 그리고 電場에 대한 流體의 반응속도는 1ms 이하이고 最大 反應 周波數는 약 12kHz 이어서 制御 액츄에이터로서의 要求 條件을 만족한다. 보다 자세한 ER流體의 力學的 特性, 物理的 特性 및 應用 分野는 相關 참고문헌에서 찾아 볼 수 있다. (7)-(10)

本 論文은 ER流體를 特徵으로 하는 知能 외팔보에 대해서 電場에 따른 動彈性 變化를 實驗的으로 考察하였고, 나아가서 現象學적 모델을 통한 振動 特性의 豫測에 대하여 조사하였다. ER流體와 構造物이 결합된

경우, 現象의 舉動이 매우 복잡 하므로, 單純化 시키는 假定들이 모델링에 適用되는데, 試片을 一定한 粘彈性 물질로 간주하여 粘性減衰 調和 振動으로 相似하였다. 이런 假定들과 實驗的 觀察을 통해서 얻어진 現象의인 支配方程式이 假狀態 피드백 制御係(pseudo-state-feedback control system)가 되어, 원하는 應答을 얻기위해 단순히 피드백계인을 제한함으로써 試片의 振動應答을 調律할 수가 있었다. 假制御力(pseudo-control force)은 ER流體에 電場 負荷에 따른 試片의 變化된 減衰와 剛性を 意味한다. 時間領域에서 過度 및 強制 振動 應答 상태를 觀察하여 本 論文에서 提示된 方法論에 대한 妥當性を 立證하였고, 또한 ER流體가 閉루프 制御係의 액츄에이터로서 使用 可能함을 確認하였다.

2. 動彈性 特性

本 實驗에서 提案된 知能 외팔보는 Fig.1에서 보는 바와 같이 두개의 알루미늄판, 실리콘 고무, 接着劑, 아크릴등으로 이루어진 샌드위치형의 外팔보이다. 알루미늄판은 傳道體로서 電極(electrode) 役割을 하고 있고, 실리콘 고무는 絶緣體(insulator) 役割을 하는 것으로서 부드럽고 耐熱性を 지니고 있다. 接觸제는 알루미늄판과 실리콘 고무를 接觸시켜 ER流體가 밖으로 흐르는 것을 방지 하여 주기 위한 것으로 실리콘 RTV를 사용했다. 이 接着劑는 70℃에서 1~2시간 정도면 잘 굳는데, 굳고 나면 실리콘 고무와 같은 性質을 지닌다.

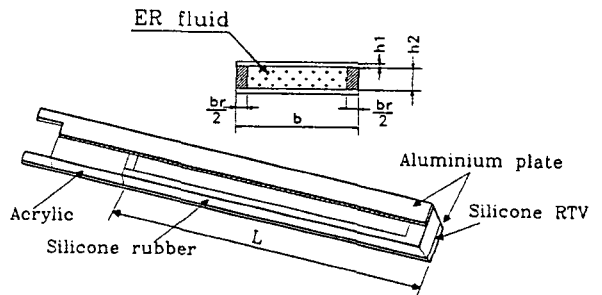


Fig.1 Schematic diagram of the beam specimen

아크릴은 不導體로서 外팔보를 固定具에 支持 시키기 위해서 사용된다. 實驗에 사용된 試片의 外形 치수 및 ER流體의 仕様은 Table 1에 표시된다. 試片 構成에

서 ER流體 濃度は ER流體의 전체 構成 要素 중에서 溶質인 固體粒子가 차지하는 重量比를 뜻하며 ER流體의 體積化는 알루미눔을 포함한 전체 體積에 대해서 ER 流體가 차지하는 體積比이다. 이것은 試片 양쪽의 고무폭(br)을 변화시켜 調節하였다.

Table 1. Specification of the specimens.

Specimen	ER concentration (wt %)	ER volume fraction (%)	L (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	b (mm)
A	55	52.3	200	0.2	2	20
B	55	45.3	200	0.5	2	20
C	45	52.3	200	0.5	2	20

Fig. 2는 實驗裝置를 나타내는 것으로서 試片을 셰이커(shaker) 위에 固定시키고, 試片和 연결된 直流 高電壓 電力供給器(DC high voltage power supply)의 電流를 고정 시킨 후(0.5mA) 要求되는 電場을 連續的 혹은 on-off 형태로 試片에 供給한다. 셰이커의 운동은 信號 發生器에서 나온 一定한 周波數를 갖고 있는 正弦波를 增幅하여 얻는다. 셰이커의 加振으로 인한 試片의 變位는 非接觸式變位器(noncontact proximitor)로 測定하였는데, 이것은 試片表面에 高電壓이 흐르기 때문이다. 이 變位器로 부터 나오는 出力信號는 周波數 分析器(FFT analyzer)를 사용하여 時間領域과 周波數 領域에서 分析되었다.

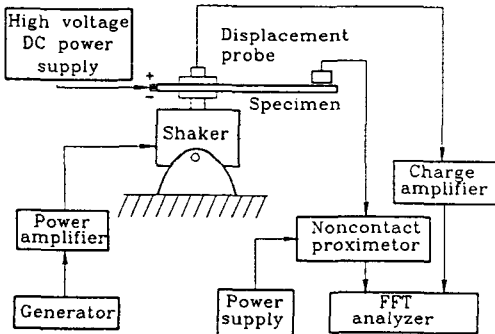


Fig. 2 Experimental set-up

試片을 셰이커 위에 固定 시킨후 電場을 0~1.5kV/mm까지 0.2kV/mm 간격으로 증가 시키고, 正弦波 發生器를 사용하여 0Hz부터 100Hz까지 스위핑(sweeping)시켜 周波數 應答 函數에서 振幅이 최대인

점을 찾아 각 電場 強度에 해당하는 減衰固有振動數(ω_d ;damped natural frequency)를 얻었다. 提案된 외팔보의 경우 一定한 粘彈性 物質이고 또한 첫번째 모드가 支配的인 것으로 假定하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 자유진동의 1 自由度로 모델상사(model analogy)를 시켜 解析하였다. Fig. 3으로부터 自由 振動狀態에서의 支配方程式은 다음과 같이 表現된다.

$$m_e \ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + k_e x(t) = 0 \quad (1)$$

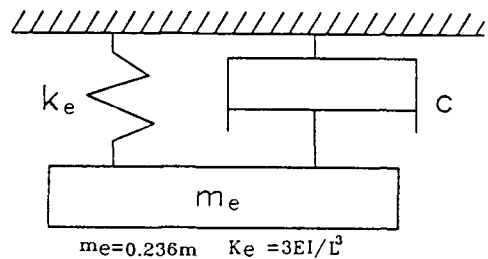


Fig. 3 Analogized beam model

여기서 x 는 變位, m_e 은 等價 質量(effective mass), c 는 粘性減衰 常數, k_e 는 等價 스프링 剛性(effective stiffness)이다. 여기서 等價剛性(k_e)은 보의 끝점에서 單位荷重當 變位로써 구해지고, 等價質量(m_e)은 보 전체에 分布되어 있는 質量이 갖고 있는 運動 에너지를 발생 시킬수 있는 보끝점에서의 集中質量을 고려하여 얻어지는데 m_e 는 全體 외팔보 質量(m)의 0.236배이다. 本 研究에서 提示된 知能 외팔보의 경우는 低減衰界이므로 式(1)의 解는

$$x(t) = x_0 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (2)$$

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

相似된 외팔보의 모델을 고려하여, 等價剛性和 等價質量으로 固有 振動數를 表現 하면 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{(k_e/m_e)} = \sqrt{(3EI/L^3 m_e)} \quad (3)$$

여기서 E 는 彈性 模들러스(elastic modulus), I 는 2차 慣性모멘트이다. 한편, 代數減衰率 δ 는 試片 끝에서의 일정한 變位를 준 다음 自由 振動狀態에서 다음 式으로 결정된다.

따라서 식 (5)의 오른쪽 항을 假制御力(pseudo-control force)으로 하여 임의의 電場 負荷에서의 振動特性을 豫測할 수가 있다. 假制御力을 電場 負荷의 크기 V로 나타내기 위해서, 剛性 및 減衰의 增加와 附加된 電場 負荷사이의 關係를 앞장에서 구한 實驗值를 통하여 얻어냈다. 電場 無負荷時에 대해서 각각의 電場 負荷時의 固有 周波數와 減衰比의 증가치를 分析하여, 식 (5)의 假制御力을 아래와 같은 형태로 표시하였다.

$$\frac{\zeta(V) \omega_n(V)}{\zeta_0 \omega_0} = \alpha_1 V$$

$$\frac{\omega_n^2(V)}{\omega_0^2} = \alpha_2 V \quad (6)$$

여기서 α_1 와 α_2 는 實驗 常數이다. Fig. 6은 本 論文에서 提示된 知能 외팔보에 대한 關係式 (6)을 나타낸 것인데, 測定된 값을 最小자승법을 사용하여 직선으로 나타냈다. 이 직선의 기울기를 구하면 α_1 는 5.6078, α_2 는 0.8123이 된다.

따라서, 다음 變換을 사용하면

$$[x_1 \ x_2]^T = [x \ \dot{x}]^T \quad (7)$$

式 (5)는 아래와 같이 狀態 空間 式으로 表現된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta_0 \omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

여기서

$$u = -\beta K x_1 - K x_2$$

$$K = 2\alpha_1 \zeta_0 \omega_0 V$$

$$\beta = \alpha_2 \omega_0 / 2\alpha_1 \zeta_0 \quad (9)$$

적절한 피드백 계인 K(電場의 함수)를 이용 함으로써 우리가 원하는 振動 應答을 나타내는 시스템을 얻을 수가 있다. ER流體의 應答速度가 1msec이하이고 直流 入力電壓을 쉽게 加할 수가 있어, 이러한 계인의 실질적 適用이 可能하다. 요구 시스템(desired system)의 支配方程式은 아래와 같이 表現될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{d1} \\ \dot{x}_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{dn}^2 & -2\zeta_{dn} \omega_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{d1} \\ x_{d2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

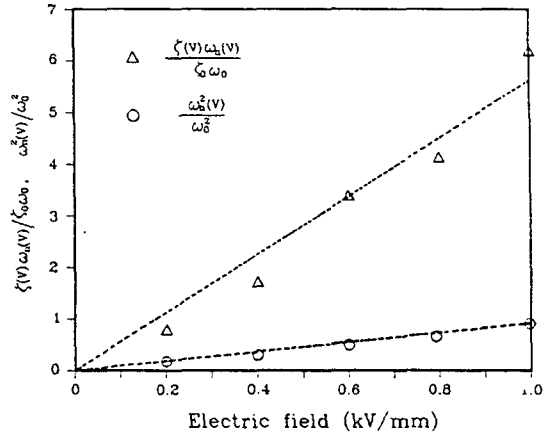


Fig. 6 Governing characteristics of the beam A

이 시스템의 特性은 실제적으로 供給 可能한 高電壓에 의해 좌우된다. 式 (8)에서 제어기의 귀환 이득 K는 하나이므로 원하는 固有值를 임의로 놓을 수는 없다. 式 (8)-(10)은 피드백 계인 K에 따른 時間 領域에서의 應答을 얻기위한 式이다.

式 (8)로 表示된 實驗 모델 式의 妥當性을 확인 하기 위해, 단순히 電場 負荷를 一定한 시간동안 附加한 후 時間 領域에서 過度 振動 應答 및 強制 振動 應答을 測定하였다. 電場 無負荷時의 시스템은 式 (8)의 피드백 계인 K가 零일 때이다. 이때 固有值는 $-1.7313 \pm 91.107i$ 이다. 요구 시스템은 式 (10)으로 표현되고 그때의 원하는 固有值를 $-11.44 \pm 122.14i$ 로 설정한다. 이는 式 (8)의 계인 K를 19.42로 선택 하여서 구한다. Fig. 7은 K값이 零과 19.42일때 式 (8)을 이용하여 過

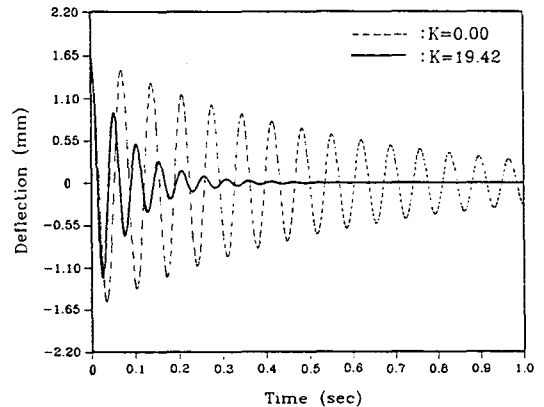
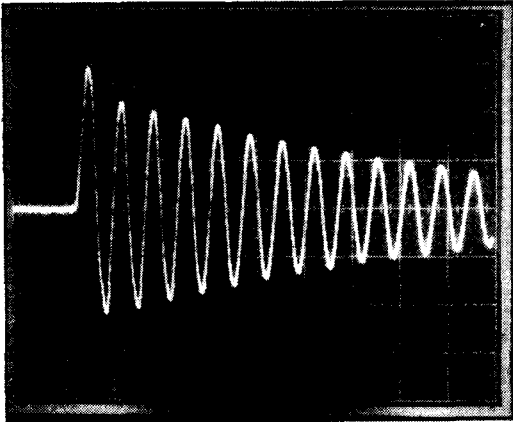
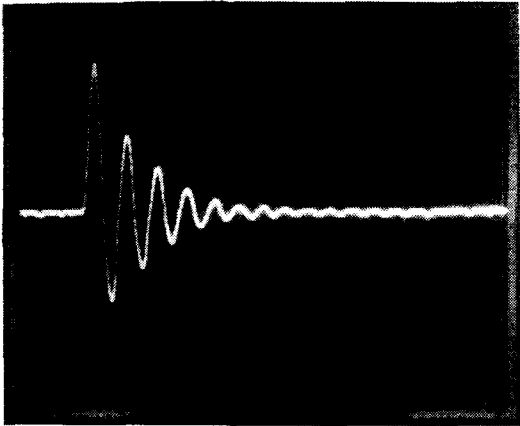


Fig. 7 Simulated transient responses of the beam A



(a)



(b)

Fig.8 Measured transient responses of the beam A
 (a) $V=0.0\text{kV/mm}; 0.1\text{sec/div}, 2\text{V/div}$
 (b) $V=1.0\text{kV/mm}; 0.1\text{sec/div}, 2\text{V/div}$

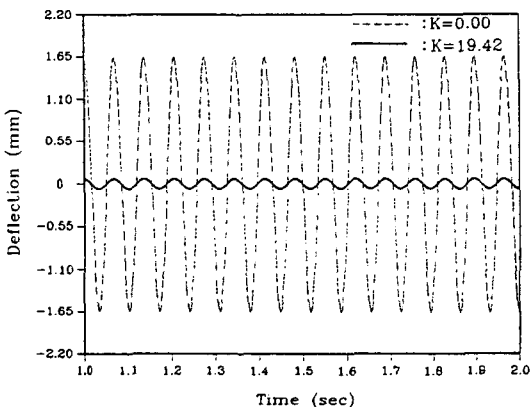
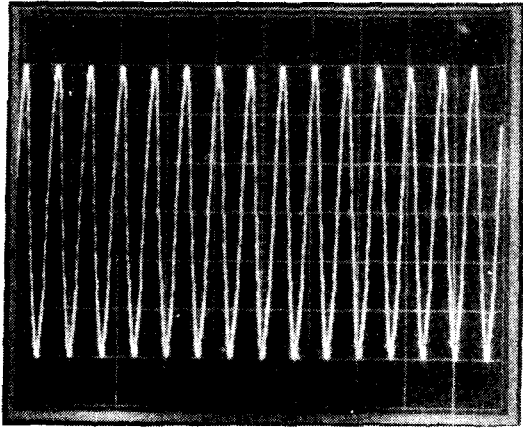


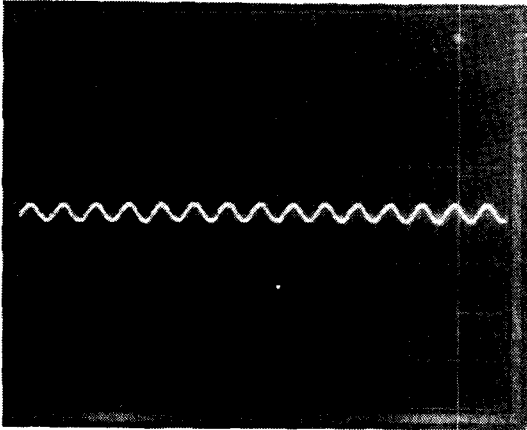
Fig.9 Simulated steady-state responses of the beam A

渡 振動應答를 시뮬레이션한 것이다. Fig. 8은 실제적으로 實驗에서 얻은 것으로서, 電場 負荷 1kV/mm ($K=19.42$ 에 해당)時 固有値는 $-12.44 \pm 122.52i$ 가 됨을 알 수 있다. 이는 提示된 모델 式(8)에 대한 妥當性を 立證하는 것이다. Fig.9는 피드게인 K 가 있을 때와 없을 때 각각에 대해서 提案된 모델 式(8)을 이용하여 強制 振動狀態의 定常 狀態를 시뮬레이션한 것이다. 외부의 加振力은 $0.45\sin\omega t$ 형태인데 여기에서 ω 는 強制 固有振動數로서 91.1062rad/sec 이다. 이 경우의 支配方程式은 式(8)의 오른쪽 항에 $0.45\sin\omega t$ 를 添加하면 된다. 強制 固有振動數가 電場 無負荷의 試片의 固有 振動數와 일치함으로써 共振現象을 일으켜 振幅이 크게 된다. 그러나 電場 負荷時 減衰과 固有 振動數의 變化로 共振 現象을 피하여 振幅이 감소 된다. Fig.10은 實驗상에서 구한 強制振動 應答인데, 시뮬레이션과 잘 일치하고 있다. 따라서 電場의 함수인 假制御力을 導入한 方法論을 이용하여 원하는 振動 特性을 얻어낼 수가 있다. 또한 이 방법에 既存의 制御 理論을 添加하여 係의 自體 內亂 및 外亂과 같은 不確實性에 대해서 強健 制御에 필요한 安定性を 提供 할 수 있다.

Fig. 11은 時間領域에서 試片 A의 첫번째 모드와 두번째 모드에 대해 電場 負荷를 on-off 형태로 附加한 후 振幅의 變化를 測定하여 知能의 判別の 制御性에 대해서 考察한 것이다. Fig. 11(a)에서 보는 바와같이 電場 無負荷시의 첫번째 모드의 固有周波數인 14.5Hz 로 加振 했기 때문에 0kV/mm 時 共振現象이 일어나 振幅이 매우 컸으나, 1.5kV/mm 의 電場 負荷時 固有周波數의 이동과 減衰 係의 變化로 인해 振幅이 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 1.5kV/mm 電場 負荷時의 固有周波數인 21.9Hz 로 加振하면 共振現象이 다시 나타나고 電場供給을 중단하면 共振을 피할 수가 있다. 이는 외부의 加振 周波數에 따라 알맞은 혹은 最適의 on-off형태의 電場을 供給함으로써 振動制御 效果를 얻을 수 있음을 意味한다. Fig. 11(b)는 두번째 모드의 固有周波數로 加振한후 電場 負荷에 따른 變化를 나타낸것인데 첫번째 모드의 현상인 Fig. 11(a)와 같은 效果를 나타낸다. 14.5Hz (첫번째모드)와 60.3Hz (두번째 모드)로 加振할 경우 電場無負荷時에서 1.5kV/mm 의 電場負荷를 附加 했을때 각각에 대한 振幅 減少率 및 過度應答時間을 實驗한 결과, 振幅은 85%와 84%의 減少率을 나타내고, 過度應答時間은 0.14sec 와



(a)



(b)

Fig.10 Measured steady-state responses of the beam A

(a) $V=0.0\text{kV/mm}; 0.1\text{sec/div}, 2\text{V/div}$

(b) $V=1.0\text{kV/mm}; 0.1\text{sec/div}, 2\text{V/div}$

0.15sec이다. 결국 能動制御界의 액튜에이터로서 要求條件이 만족하여 사용이 可能함을 알 수 있었다. 물론 같은 형태의 電場을 한곳에 附加하여 다른 모드에 대해서도 마찬가지로 振幅을 制御할 수 있는 것이 ER流體가 액튜에이터로서의 長點이라고 할수 있다.

4. 結 論

本 研究에서는 ER流體를 이용한 知能 외팔보를 一定한 粘彈性 물질로 假定한 다음, 粘性減衰 調和 진

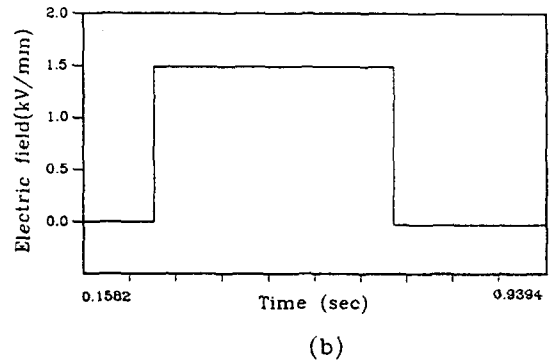
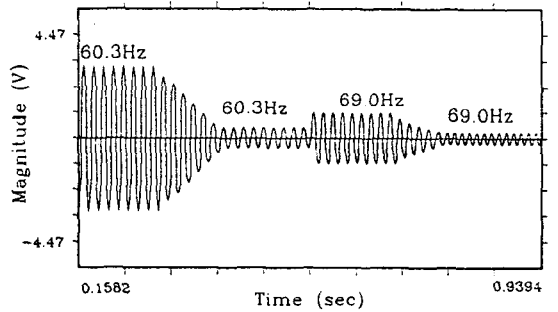
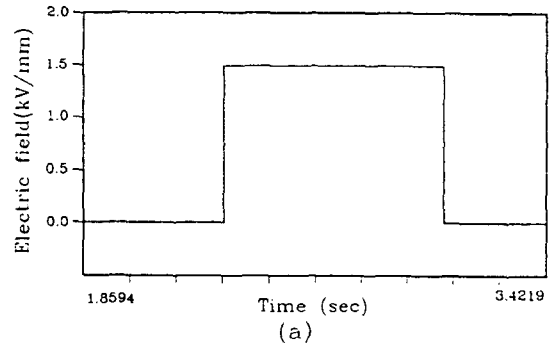
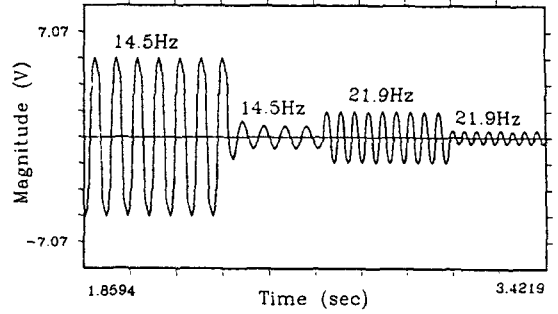


Fig.11 Controllability of the beam A

(a) First mode

(b) Second mode

동기로 相似하여 電場負荷의 변화에 따른 감쇠 固有振動數, 減衰比, 彈性모듈러스와 같은 動彈性 媒介變數 要素의 변화를 測定하였다. 이들의 값은 電場 負荷에 따라 거의 직선적으로 增加하였고, 이런 變化에서 ER 流體를 構成하는 固體粒子的 濃도가 ER流體 體積比 보다 더욱 중요한 因子임을 알 수 있었다. 振動 特性을 調律하는 現象學的 實驗 모델링을 提示하였고, 또한 그 方法論의 妥當性を 時間領域에서 過度應答과 強制應答 실험을 통하여 立證하였다. 이는 電場 負荷를 假制御力으로 하는 既存의 比例-微分(PD)制御 理論을 導入하여 원하는 振動 應答을 얻는 것이다. 또한 電場負荷를 뱅뱅형태(on-off)로 附加하여 振幅 減少 및 過度應答 時間을 測定하여 ER流體가 能動制御係의 엑츄에이터로써 使用 可能함을 立證하였다. 향후 이 電場 負荷를 假制御力으로 하는 能動 閉制御係에 대한 理論의 및 實驗的인 알고리즘이 研究 開發되어야 할 것으로 思料된다.

참고문헌

1. Rogers, C. A., Barker, K. D., and Jaeger, C. A., "Introduction to Smart Materials and Structures", U.S. Army Research Office Workshop on Smart materials, Structures and Mathematical Issues, Blacksburg, VA. pp.17~28. (1988).
2. Crawley, E. F. and De Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures", AIAA J., Vol.25, No.10, pp.1373~1385 (1987).
3. Claus, R. O., Mckeeman, J. C., May, R. G. and Bennett, K. D., "Optical Fiber Sensors and Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications", U.S. Army Research Office Workshop on Smart Materials, Structures and Mathematical Issues, Blacksburg, VA. pp.29~38. (1988).
4. Rogers, C. A., Liang, C. and Brarker, K. D., "Dynamic Control Concepts Using Shape Memory Alloy Reinforced Plates", U.S. Army Research Office Workshop on Smart Materials, Structures and Mathematical Issues, Blacksburg, VA. pp.39~62. (1988).
5. Gandhi, M. V., Thompson, B. S. and Choi, S. B., "A New Generation of Innovative Ultra-advanced Intelligent Composite Materials Featuring Electro-Rheological Fluids; An Experimental Investigation", J. of Composite Materials, Vol.23, No.12, pp.1232~1255 (1989).
6. Gandhi, M. V., Thompson, B. S. and Chio, S. B. and Shakir, S., "Electro-Rheological Fluid-Based Articulating Robotic Systems", ASME J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol.111, No.3, pp.328~336 (1989).
7. Block, H. and Kelly, J. P., "Electro-Rheology", J. of Physics D; Applied Physics, Vol.21, pp.1661~1677 (1988).
8. Stangroom, J. E., "Electro-Rheological Fluids", J. of Physics Technology, Vol.14, pp.290~296 (1983).
9. Winslow, W. M., "Induced Fibration Suspensions", J. of Applied Physics, Vol.20, pp.1137~1140 (1949).
10. Stevens, N. G., Sproston, J. L. and Stanway, R., "The Influence of Pulsed D.C Input Signals on Electro-Rheological Fluids", J. of Electro-Statics, Vol.17, pp.181~191 (1985).