

능동구속감쇠 기법을 이용한 보의 진동제어 실험

°최 진영*, 강 영규**, 김 재환**, 최승복*

Experiment on Vibration control of Beam using Active Constrained Layer Damping Treatment

°Jin-Young Choi*, Young-Kyu Kang**, Jae-Hwan Kim** and Seung -Bok Choi**

ABSTRACT

The flexural vibration of aluminum beams with active and passive constrained-layer damping has been investigated experimentally to design structure with maximum possible damping capacity. Piezoelectric film is used as sensor and piezoceramic as actuator for negative velocity feedback control. This paper shows the effectiveness of active constrained-layer damping treatment through experiment, and we have carried out an experiment to study effect of beam thickness

1. 서론

점탄성 재료는 에너지 소산력(energy dissipation)이 우수하여 수동구속감쇠층(passive constrained-layer damping, PCLD)^(1,2) 또는 비구속감쇠층(unconstrained-layer damping, UCLD)^(3,4)의 형태로 진동 및 소음제어에 많이 활용되어 왔다. 특히 유연구조물의 설계에 있어서 효과적인 구조감쇠를 얻기 위해서 점탄성 재료를 많이 활용하고 있다. 또한 최근에는 능동구속감쇠층(active constrained-layer damping)⁽⁵⁾을 이용하여 구조물의 감쇠특성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 능동구속감쇠층은 수동구속감쇠층에 비해서 효과는 뛰어나지만 제작비용이 많이 드는 단점이 있다. 본 논문에서는 알루미늄을 주구조물로 하여 점탄성재료와 구속재인 압전세라믹을 이용하여 부분적으로 피복된 유연보의 진동제어 실험을 수행하였다. 그 결과를 토대로 구조감쇠를 얻기 위한 압전감지기/

작동기 및 구속감쇠층의 위치, 그리고 주구조물(Core Structure)의 두께에 따른 진동제어의 영향을 고찰한다 그리고 주구조물(Core Structure)의 두께에 따른 진동제어의 영향을 고찰한다

2. 이론

실험에 앞서 기초적인 해석을 위한 유한요소 정식화 과정에서 다음의 몇 가지를 가정하였다. 첫째로 주구조물(core structure)과 구속재(constraining layer)는 순수한 굽힘운동을 한다. 둘째로 주구조물과 구속재의 중립축은 동일한 휨선(deflection line)을 가진다. 셋째로 수동구속감쇠의 경우에 구속재의 길이는 항상 일정하다. 넷째로 구조물을 구성하는 모든 층들은 동일한 휨방향의 변위(w)를 갖는다. 이러한 가정들은 유연보와 점탄성층의 두께가 얇은 경우에 전단감쇠가 주된 역할을 하므로 타당하다.

구속감쇠층을 가진 유연보를 2차원의 판요소로 모델링하였으며, 운동방정식을 유도하는 과정에서 확장된 해밀톤의 원리(extended Hamilton's principle)

* : 인하대학교 대학원

** : 인하대학교 기계공학과

를 이용하였다. 구속감쇠층이 있는 유연보의 운동 방정식은 다음의 식을 만족한다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} [T - U + U_v + W] dt = 0$$

식(1)에서 t_1 과 t_2 는 임의의 두 시점이며, T 는 각 구성요소들의 운동에너지, U 는 위치에너지이며, U_v 는 점탄성층의 전단변형에 의한 변형에너지이며, W 는 외력에 의한 일이다. Fig. 1에 능동구속감쇠층을 갖는 외팔 유연보를 나타내었다.

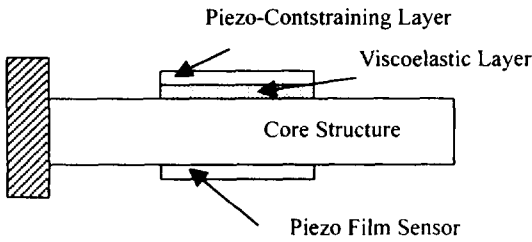


Fig. 1 Flexible beam with ACLD

유연보 자체와 구속재가 횡방향 진동시의 변위 벡터 u 와 변형률 벡터 ε 는 다음과 같이 표현된다.

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial w}{\partial x} \\ -z \frac{\partial w}{\partial y} \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z\beta_x \\ z\beta_y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & z \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial x} + z \frac{\partial \beta_x}{\partial y} \end{bmatrix} = z\kappa \quad (3)$$

여기서 w 는 횡방향 변위이며, β_x 와 β_y 는 각각 x

축과 y 축에 대한 회전이며, κ 는 곡률벡터이다. u 와 κ 는 아래와 같이 표현된다.

(1)

$$u = \{w \ \beta_x \ \beta_y\}^T \quad (4)$$

$$\kappa = \left\{ \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \ \left(\frac{\partial \beta_y}{\partial x} + \frac{\partial \beta_x}{\partial y} \right) \right\}^T \quad (5)$$

운동에너지 T 는 다음과 같이 정의된다.

$$T = \int_V \frac{1}{2} \rho u^T \ddot{u} dv \quad (6)$$

여기서 ρ 는 밀도, v 는 구조물의 부피이다. 유연보의 변형에너지는 고전 적층판 이론(classical laminated plate theory)으로부터 유도되며, 전체 변형에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$U = \frac{1}{2} \int_A \kappa^T D \kappa dA \quad (7)$$

여기서 A 는 단면적이며, D 는 이방성 판의 굽힘강성행렬(flexural stiffness matrix)로 다음과 같이 표현된다.

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{N/LAY} (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (8)$$

여기서 \bar{Q} 는 변환된 단층강성도이며, z_k 와 z_{k-1} 는 각각 k 번째 층의 상하면으로부터 적층판의 중립축까지의 거리이다.

굽힘진동시에 점탄성층이 받는 전단변형각 γ 는 Fig. 2로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_A - u_B}{t_v} = \frac{u_c - u_b + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{t_D}{2}}{t_v} \quad (9)$$

여기서 $t_D = t_s + 2t_v + t_c$ 로 표현되며, 하부침자 s, v, c 는 각각 주구조물, 점탄성층 및 구속재를 의미한다. 또한 점탄성 전단층에 대해서 전단변형각과 전단응력은 다음의 관계를 가진다.

$$\begin{pmatrix} \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \end{pmatrix} = G_v \begin{pmatrix} \gamma_{zx} \\ \gamma_{zy} \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서 G_v 는 점탄성재료의 복소전단계수(complex shear modulus)이다

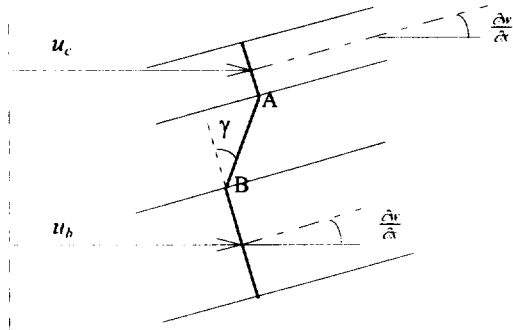


Fig. 2 Shear angle of VE layer under flexural motion

점탄성층의 전단변형에 의한 변형에너지 U_v 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_v = 2 \int_{V_v} \frac{1}{2} \left\{ \gamma_{zx} \quad \gamma_{zy} \right\} \begin{bmatrix} \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \end{bmatrix} dV_v \quad (11)$$

외력에 의한 일은 다음과 같다.

$$W = \sum_{i=1}^{n_f} \mathbf{u}^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) \quad (12)$$

여기서 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i)$ 는 \mathbf{x}_i 에 작용하는 힘벡터이며, $\mathbf{u}(\mathbf{x}_i)$ 는 \mathbf{x}_i 에서의 변위벡터이며, n_f 는 외력의 갯수이다.

변위 \mathbf{u} , 곡률 κ 및 회전변위 α 는 4절점 12자유도를 갖는 사각평판요소를 이용하여 절점변위(nodal displacement)로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = \Psi_u \mathbf{q}^e \quad (13)$$

$$\kappa = \Psi_\kappa \mathbf{q}^e \quad (14)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} = \Psi_\alpha \mathbf{q}^e \quad (15)$$

여기서 Ψ_u, Ψ_κ 및 Ψ_α 는 각각 \mathbf{u}, κ 및 α 에 대한 보간함수이며 \mathbf{q}^e 는 요소절점의 변위벡터이다. 운동에너지와 위치에너지, 전단변형 에너지 및 외력에 의한 일 등을 식 (1)에 대입하여 변분을 취하면 절점변위에 대한 운동방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}_{\text{Ext}} \quad (16)$$

구조물의 감쇠는 구조동역학적인 관점에서 중요하다. 본 논문에서는 비감쇠용량(specific damping capacity, SDC)의 개념을 이용하여 유연보의 감쇠 해석을 수행하였다. 비감쇠용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \Delta U / U \quad (17)$$

여기서 ΔU 는 소산된 에너지이다. 식(13), (14), (15)에 의해서 식 (17)을 이산화하여 절점변수로 표현되면 비감쇠용량 ϕ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi = \frac{\mathbf{q}^T (\mathbf{K}_D + \mathbf{K}_{v_D}) \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v) \mathbf{q}} \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_D = \sum_{elem} \int_A \Psi_k^T \mathbf{D}^A \Psi_k dA \quad (19)$$

$$\mathbf{K}_{v_o} = \sum_{elem} \int_A G_v \varphi_v \frac{2}{t_v} \left(\frac{t_D}{2} \Psi_v + \Psi_u \right)^T \left(\frac{t_D}{2} \Psi_v + \Psi_u \right) dA \quad (20)$$

$$\mathbf{K}_v = \sum_{elem} \int_A G_v \frac{2}{t_v} \left(\frac{t_D}{2} \Psi_v + \Psi_u \right)^T \left(\frac{t_D}{2} \Psi_v + \Psi_u \right) dA \quad (21)$$

여기서 하첨자 D 는 감쇠와 관련됨을 의미하며, φ_v 는 점탄성재료의 비감쇠용량이다.

점탄성 재료의 물성은 주파수와 온도의 함수이므로 감쇠비와 모드감쇠를 구하기 위해서는 비선형 고유치 문제를 풀어야 한다. 본 논문에서는 감쇠행렬이 포함된 운동방정식을 상태방정식으로 표현한 다음 역순환법(inverse iteration)으로 복소고유치 문제를 풀었다.

3. 실험장치와 실험방법

본 연구에서 사용하고 있는 호스트구조물인 알루미늄, 압전필름 센서, 그리고 압전세라믹 작동기의 성질과 제원은 Table 1과 같다. 압전세라믹은 PZT5H를 사용하였다. 그리고 제어실험에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다.

가진신호는 Signal analyzer를 통하여 공급되며, 가진시 발생하는 구조물의 귀환 신호는 외팔보의 밑면의 감지기용 압전필름을 이용하여 얻었다.

또한 구속감쇠층으로 사용되고 있는 점탄성재료는 3M사의 ISD-112이며 크기는 60 x 25 x 0.127mm이다. 그리고 제어프로그램내의 모든 샘플링시간은 2300HZ로 설정하였다. 진동제어 실험을 하기 전에 레이저센서를 이용하여 보의 끝단 변위를 측정하여 압전필름에서 나오는 신호와 보의 끝단 변위가 선형임을 확인하였다. 주구조물인 알루미늄의 시편의 크기는 240 x 25 x 2mm이다.

Table 1. Mechanical Properties of Aluminum, Piezofilm and Piezoceramic

<Aluminum>		
Property	Symbol	Value
Young's modulus	E_1	63Gpa
Poisson's ratio	ν	0.33
Density	ρ	2700 kg/m ³
Length	L	240mm
Width	W	25mm
Thickness	T	2mm

<Piezofilm>		
Property	Symbol	Value
Young's modulus	E_1	2GPa
Piezoelectric Strain Const.	d_{31}	$23 \times 10^{-12} \text{ m/m/V/m}$
Piezoelectric Stress Const.	g_{31}	$216 \times 10^3 \text{ V/m/N/m}^2$
Density	ρ	1780 kg/m ³
Length	L	150mm
Width	W	20mm
Thickness	T	0.052mm

<Piezoceramic(PZT5H)>		
Property	Symbol	Value
Young's modulus	E_1	61Gpa
Dielectric Constant.	ϵ_3^T	$3400 \epsilon_0$
Coupling coefficient	k_{31}	0.39
Capacitance	C_{P3}	45.09nF
Length	L	60mm
Width	W	25mm
Thickness	t	1mm

또한 시편의 두께에 따른 능동구속감쇠 효과의 차이를 알아보기 위해 210x 25x 0.5mm의 시편을 사용하여 실험하였다. Impact Hammer로 시편을 가진시키고 가속도계(accelemerter)와 charge amplifier를 통해 제어프로그램을 작동시킬때와 작동시키지 않을 때, 시편의 주파수 응답특성을 구하여 제어효과를 관찰하였다. 주파수 응답특성은 Fig. 4와 같다.

압전필름에서 받은 신호를 아날로그 필터를 통하여 제어프로그램으로 들어가는데 이때 아날로그

필터는 압전필름의 임피던스를 매칭시키기 위한 역할도 수행한다. 제어프로그램에서 압전필름 신호를 증폭시켜 압전세라믹에 귀환신호를 보내주었다. 최적의 게인(gain)값을 찾기위해 제안된 외팔보의 첫번째 모드로 가진하여 가진전압을 지속적으로 공급하면서 최적의 게인값을 찾았다. 이러한 방법으로 강제진동 제어실험시 제어효과를 동시에 볼 수 있다. Fig. 5는 강제진동에 대한 제어실험결과이다. 또한 두께가 0.5mm인 시편을 이용하여 과도진동 제어실험을 수행하였다. Fig. 6은 외팔보의 초기변위에 대한 과도진동 제어 실험결과이다.

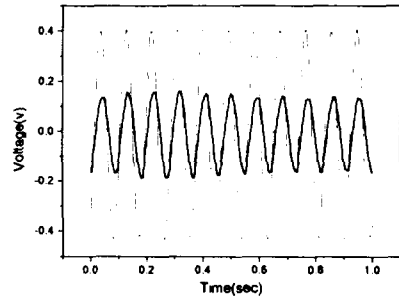


Fig. 5 Time response of forced vibration control

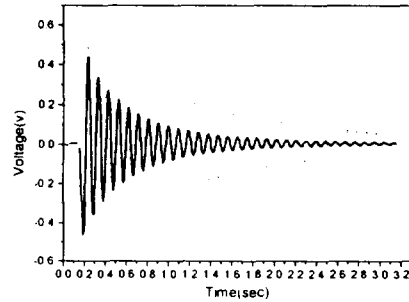


Fig. 6 Time response of transient vibration control

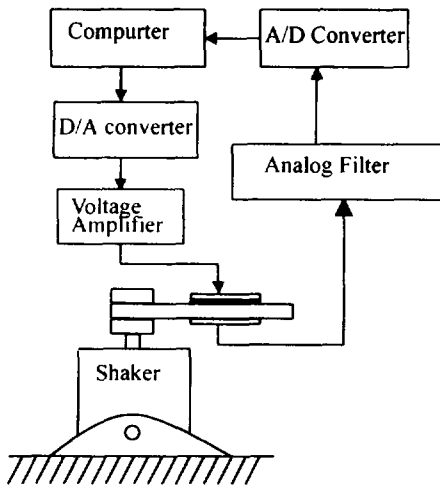


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

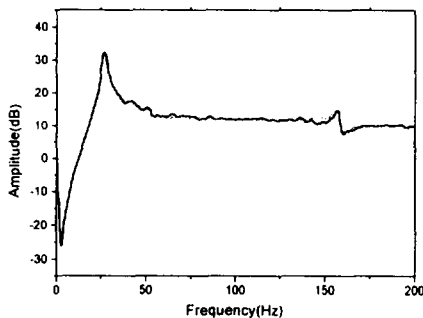


Fig. 4 Frequency response

4. 실험결과 해석

본 연구에서 제안된 240x25x2mm 외팔보의 첫번째 공진 주파수는 28Hz이다 능동구속감쇠에서 반속도 되먹임제어를 이용하였을 때, 되먹임 이득은 30이었다. 이 때 능동구속감쇠 제어실험의 결과 진폭은 약 3dB 줄었고 감쇠비는 약33% 증가하였다. 그리고 두번째 공진 주파수는 158Hz이며 진폭은 약 3dB 줄었고 감쇠비는 약 50% 증가하였다. 또한 210x25x0.5mm 알루미늄 시편을 사용할 경우는 약68% 증가하였다. 첫번째 시편과 같은 크기는 아니지만 여기서 알 수 있는 것은 강성이 큰 시편보다는 유연한 시편의 능동감쇠비가 우수함을 알 수 있었다.

5. 결론

Composite and Isotropic Plates through Intelligent
Constrained-Layer Treatments," Smart, March 1994.

본 능동구속감쇠 제어 실험을 통하여 국부적으로 피복된 능동구속감쇠가 수동구속감쇠보다 나은 성능을 얻을 수 있었다. 점탄성재료의 적절한 위치선정을 통하여 더 나은 실험결과가 나오리라 기대된다. 그리고 본 연구의 기법을 복합재료 구조물의 진동제어에 응용하면 적절한 적층각도와 되먹임 이득을 이용하여 구조물의 감쇠를 극대화할 수 있다.

참고문헌

1. Rao, D. K., "Vibration of Short Sandwich Beams," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 52, No. 2, pp. 253-263, 1977.
2. Douglas, B. E., and Yang, J. C. S., "Transverse Compressional Damping in the Vibratory Response of Elastic-Viscoelastic-Elastic Beams," *AIAA Journal*, Vol. 16, No. 9, pp. 925-930, September 1978.
3. Soni, M. L., and Bogner, F. K., "Finite Element Vibration Analysis of Damped Structures," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 700-707, May 1982.
4. Rao, M. D., and He, S., "Dynamic Analysis and Design of Laminated Composite Beams with Multiple Damping Layers," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 736-745, April 1993.
5. Roy, P. K. and Ganesan, N., "Dynamic Studies on Beams with Unconstrained Layer Damping Treatment," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 195, No. 3, pp. 417-427, 1996.
6. Yi, S., Ahmad, M. F. and Hilton, H. H., "Dynamic Response of Plates with Viscoelastic Free Layer Damping Treatment," *Transactions of the ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 118, No. 3, pp. 362-367, July 1996.
7. Shen, I. Y., "Bending-Vibration Control of