

<논 문>

전기장에 따른 복합재 ER Beam의 진동제어 특성

Vibration Control Characteristics of Laminated Composite ER Beams with Electric Field Dependence

김재환* · 강영규* · 최승복*

Jaehwan Kim, Young Kyu Kang and Seung-Bok Choi

(2000년 11월 6일 접수 ; 2001년 1월 19일 심사완료)

Key Words : ER Fluid(전기유전유체), Laminated Composite Beam(복합적층보), Structural Damping(구조 감쇠), Finite Element Method(유한요소법), Structural Design(구조설계)

ABSTRACT

The flexural vibration of laminated composite beams with an electro-rheological(ER) fluid has been investigated to design a structure with maximum possible damping capacity. The equations of motion are derived for flexural vibrations of symmetrical, multi-layer laminated beams. The damping ratio and modal damping of the first bending mode are calculated by means of iterative complex eigensolution method. Finite element method is used for the analysis of dynamic characteristics of the laminated composite beams with an ER fluid. For the validation of modeling methodology using viscoelastic theory, the predicted dynamic properties are compared to the measured ones by author's previous work. They are in good agreement. This paper addresses a design strategy of laminated composite under flexural vibrations with an ER fluid.

기호설명

D : 비등방성 평판의 휨 강성 행렬
 F_{EXT} : 외력 행렬
 G_v : ER유체의 복소전단계수
 K_D : 감쇠 강성 행렬
 \overline{Q} : 변환 단층강성도
 q^e : 단위요소의 절점 변위
 T : 운동 에너지
 U : 변형 에너지
 u : 변위 벡터
 W : 외력에 의한 일
 w : 횡방향 변위
 ϵ : 변형률

γ : 전단변형각
 x : 곡률 벡터
 Ψ_u : 변위의 보간함수
 Ψ_x : 곡률의 보간함수
 ζ : 감쇠비
 $2\zeta\omega$: 모드감쇠
 ψ : 비감쇠용량

1. 서론

전기장의 세기에 따라 물리적 성질이 변하는 전기유전유체(electro-rheological fluid, ER fluid)는 1980년대에 들어와서 여러가지 응용분야에 대해 많은 연구자들이 관심을 보이기 시작하였다. Brooks⁽¹⁾는 전기유전유체의 점탄성 거동에 관한 연구를 하였고, 이를 통하여 ER유체의 감쇠가 부각되었다. Choi등은 ER유체를 포함하고 있는 복합보의 진동특성을 연구하여 ER Beam의 감쇠와 강성의 증가를 실험적으로 입증하였다.^(2,3) 또한 S. B. Choi등은 ER유체가 삽입된 유연외팔보의 능동제어를 수행하였다.^(4,5) 기존

* 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : jaehwan@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7326, Fax : (032) 868-1716

의 대부분의 연구는 3층구조의 복합재에 대한 것이었으며, 복합재료의 구조설계와 ER유체의 상관성에 대한 연구는 드물다. 본 논문에서는 테일러링 기법으로 강성과 감쇠를 조절할 수 있는 복합재료를 주구조물로 하여 ER유체와 전극의 역할을 하는 알루미늄 구속재를 이용한 복합적층보의 동특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한 전기장의 세기에 따라서 ER유체가 전체 구조물의 감쇠와 강성에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과를 토대로 효과적인 구조감쇠를 얻기 위한 ER유체 복합적층보의 설계 기법을 제시하고자 한다.

2. 방법

해석을 위한 유한요소 정식화 과정에서 다음의 몇 가지를 가정하였다. 첫째로 주구조물과 전극의 역할을 하는 구속재의 중립축은 동일한 휨선(deflection line)을 가진다. 둘째로 구조물을 구성하는 모든 층들은 동일한 횡방향의 변위(w)를 갖는다. 셋째로 ER유체는 순수한 전단변형만 한다.

ER유체가 포함된 복합적층보를 2차원의 판요소로 모델링하였으며, 운동방정식을 유도하는 과정에서 확장된 해밀턴의 원리(extended Hamilton's principle)를 이용하였다. ER유체가 있는 복합적층보의 운동방정식은 다음의 식을 만족한다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} [T - U + U_v + W] dt = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 t_1 과 t_2 는 임의의 두 시점이며, T 는 각 구성요소들의 운동에너지, U 는 위치에너지이며, U_v 는 ER유체의 전단변형에 의한 변형에너지이며, W 는 외력에 의한 일이다. Fig. 1에 ER유체가 포함된 5층 구조의 외팔 복합적층보를 나타내었다.

복합적층보 자체와 구속재가 횡방향 진동시의 변위벡터 u 와 변형률 벡터는 다음과 같이 표현된다.

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

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ z \partial \beta_x \partial x + z \frac{\partial \beta_x}{\partial y} \end{bmatrix} = z\chi \quad (3)$$

여기서 w 는 횡방향 변위이며, x 와 y 는 각각 x 축과 y 축에 대한 회전이며, χ 는 곡률벡터이다. v 와 χ 는 아래와

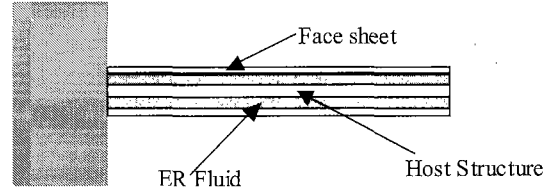


Fig.1 Laminated Composite Beam incorporating an ER fluid

같이 표현된다.

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

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

운동에너지 T 는 다음과 같이 정의된다.

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

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

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

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

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

식 (8)에서 \bar{Q} 는 변환된 단층강성도이며, z_k 와 z_{k-1} 는 각각 k 번째 층의 상하면으로부터 적층판의 중립축까지의 거리이다.

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

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_A - u_B}{t_v} = \frac{t_D}{t_v} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_c - u_s}{\frac{t_D}{2}} \right) \quad (9a)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{v_A - v_B}{t_v} = \frac{t_D}{t_v} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{v_c - v_s}{\frac{t_D}{2}} \right) \quad (9b)$$

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

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

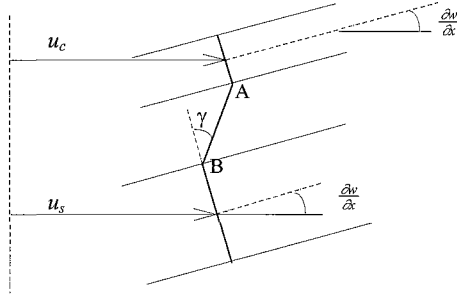


Fig. 2 Shear angle of ER layer under flexural motion

여기서 G_v 는 ER유체의 복소전단계수(complex shear modulus)이다. ER유체층의 전단변형에 의한 변형에너지 U_v 는 다음과 같이 표현된다.

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

외력에 의한 일은 다음과 같다.

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

여기서 $f(\mathbf{x}_i)$ 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 χ , 및 회전변위 α 는 4절점 12자유도를 갖는 사각평판요소를 이용하여 절점변위(nodal displacement)로 표현하면 다음과 같다.

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

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

$$\alpha = \begin{pmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (15)$$

여기서 Ψ_u , Ψ_χ 및 Ψ_v 는 각각 \mathbf{u} , χ 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.

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_c + \mathbf{M}_v) \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_c + \mathbf{K}_v) \mathbf{q} = \mathbf{F}_{Ext} \quad (16)$$

식 (16)에서 강성행렬 \mathbf{K}_s 와 \mathbf{K}_c 는 각각 주구조물 및 구속재의 굽힘에 대한 강성을 나타내며, \mathbf{K}_v 는 점탄성 재질 ER의 전단 강성(shear stiffness)을 의미한다.

복합재료의 감쇠는 구조동역학적인 관점에서 일반구조재료보다 더 중요하다. 고분자 기지재료의 특성으로 인해서

섬유방향으로는 매우 낮은 감쇠를 보이며, 섬유의 직각방향은 매우 높은 감쇠를 나타낸다. 복합재료의 감쇠는 이방성을 가지며 적층순서나 적층각도의 변화를 통해서 제어할 수 있다. 본 논문에서는 비감쇠용량(specific damping capacity, SDC)의 개념을 이용하여 복합적층보의 감쇠해석을 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.

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

$$\mathbf{K}_D = \sum_{elem} \int_A \Psi_x^T D^4 \Psi_x dA \quad (19)$$

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

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

여기서 하첨자 D 는 감쇠와 관련됨을 의미하며, ϕ_v 는 ER유체의 비감쇠용량이며, 복소 전단계수로부터 구해진다.

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

3. 결과 및 고찰

점탄성 이론을 이용한 구조물의 전단변형에 대한 유한요소 정식화 기법의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 다른 연구자⁽⁶⁾의 3차원 요소(solid element)를 이용한 수치해석 결과와 비교연구를 수행하였다. 5층구조의 알루미늄 샌드

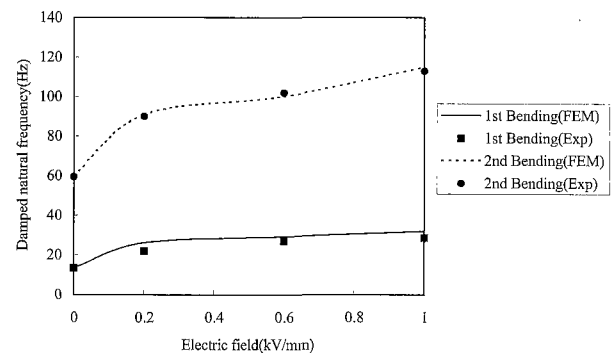


Fig.3 Comparison of the field-dependent damped natural frequencies of the ER-based aluminum beam

Table 1 Natural frequencies of the first five bending modes of the aluminum sandwich beam

Mode No.	Exact(Hz) ^(b)	CESM(Hz) ^(b)	Present(Hz)
1	29,082	29,103	28,076
2	152,992	152,214	154,09
3	390,253	391,983	389,86
4	747,936	745,027	742,17
5	1235,545	1227,342	1224,90

Table 2 Damping loss factors of the first five bending modes of the aluminum sandwich beam

Mode No.	Exact(Hz) ^(b)	CESM(Hz) ^(b)	Present(Hz)
1	0.58986	0.5801	0.5805
2	0.40645	0.4111	0.4464
3	0.34542	0.3304	0.34002
4	0.27482	0.2619	0.2694
5	0.22023	0.2315	0.22354

Table 3 Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Laminates(CU125NS)

Property	Symbol	Value
Young's modulus in fiber direction	E_1	114.7×10^9 Pa
Young's modulus in transverse direction	E_2	7.589×10^9 Pa
Shear Modulus	G_{12}	4.77×10^9 Pa
Poisson Ratio	ν_{12}	0.28
Volume Density	ρ	1510 kg/m^3
Damping capacity in fiber direction	φ_{S1}	0.013966
Damping capacity in transverse direction	φ_{S2}	0.049120
Damping capacity in shear direction	φ_{S12}	0.074344

위치보에 대한 고유주파수와 감쇠손실계수를 저차의 5개 모드에 대하여 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Table 1, 2에서 보면 본 논문의 유한요소 정식화 기법이 타당함을 알 수 있다. 또한 ER Beam에 대한 해석의 타당성을 확인하기 위하여 기존의 실험결과⁽⁴⁾와 본 논문의 유한요소 해석 결과를 주파수의 관점에서 비교하였다. Fig. 3에서 보면 첫번째와 두번째 굽힘 진동모드의 고유주파수가 실험치와 잘 일치하며, 본 연구의 유한요소 해석법이 구조 감쇠 설계를 위한 도구로 활용이 가능함을 알 수 있다.

ER유체층과 구속재가 부착된 탄소/에폭시 복합적층보의 감쇠비(ζ), 모드감쇠($2\zeta\omega$) 및 고유주파수를 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 적층순서는 $[\theta_2/0/90]_s$ 이고 적층각도는 0, 15, 30, 45, 60, 75 및 90°이다. 프리프렉의 두께

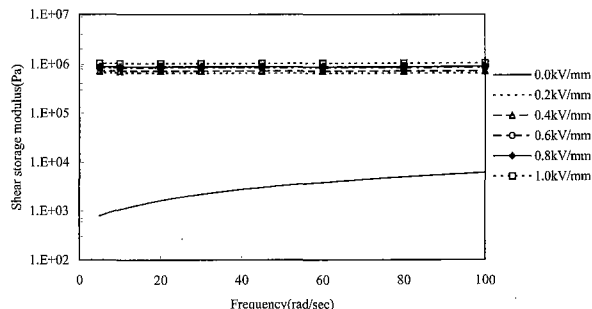


Fig. 4 Field-dependent shear storage modulus of the employed ER fluid

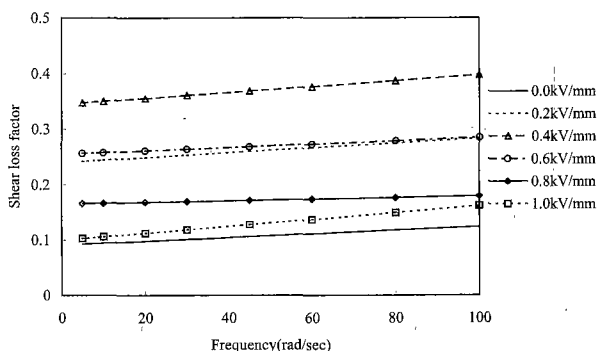


Fig. 5 Field-dependent shear loss factor of the employed ER fluid

는 0.125 mm이며 주구조물 시편의 크기는 $200 \times 22 \times 1$ mm이다. Fig. 1에 시편의 형상을 나타내었으며 Table 3에 탄소/에폭시 복합재료의 물성을 나타내었다. ER유체를 구조물에 고정하기 위하여 silicone rubber를 사용하였으며 두께와 폭은 각각 1 mm, 2 mm이다. 전기장에 따른 ER 유체의 전단계수와 손실계수를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 전극의 역할을 하는 구속재는 알루미늄이며 크기는 $200 \times 22 \times 0.5$ mm이다.

주구조물인 복합재료의 적층각도에 따라서 전체 구조물의 강성과 감쇠가 달라진다. Fig. 6과 Fig. 7은 ER유체가

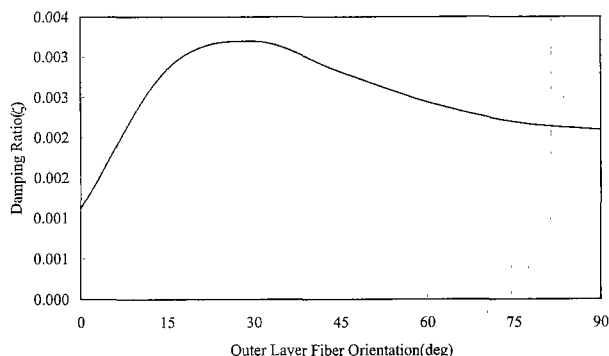


Fig. 6 Damping Ratio of laminated beams w/o ER fluid

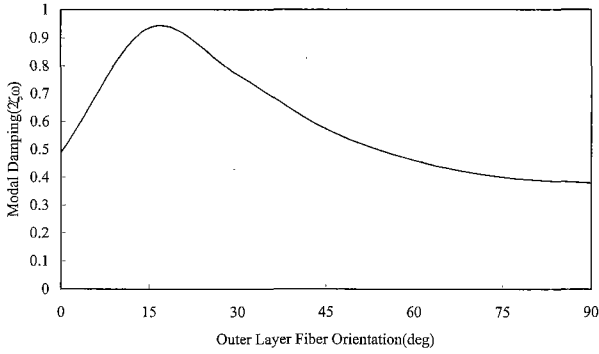


Fig. 7 Modal Damping of laminated beams w/o ER fluid

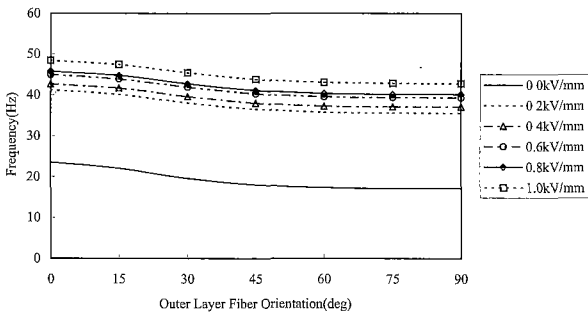


Fig. 8 Field-dependent damped natural frequency of ER-based laminated beams

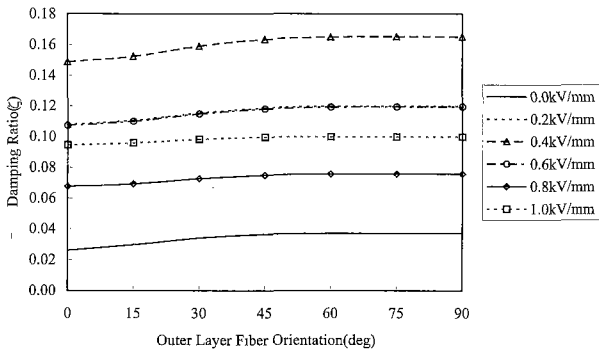


Fig. 9 Field-dependent damping ratio of ER-based laminated beams

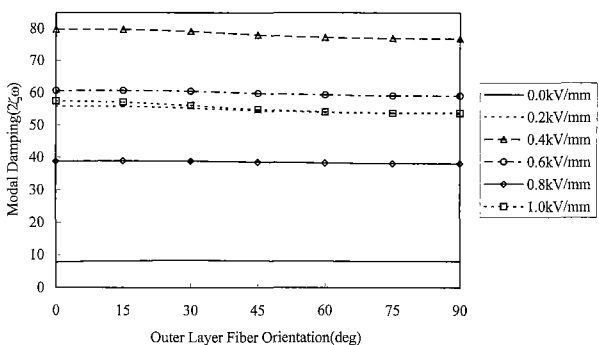


Fig. 10 Field-dependent modal damping of ER-based laminated beams

없는 주구조물인 복합적층보 자체의 첫번째 굽힘 진동모드에 대한 감쇠비 및 모드감쇠의 변화를 보여준다. 그림에서 보면 적층각도의 설계를 통하여 강성과 감쇠를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한 감쇠비와 모드감쇠가 적층각도의 변화에 매우 민감함을 알 수 있다.

ER유체가 있는 복합적층보의 첫번째 굽힘진동 모드에 대하여 주파수, 감쇠비 및 모드감쇠를 전기장의 세기에 따라서 각각 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보면 전기장의 세기가 증가함에 따라서 전체 구조물의 강성은 증가하지만 감쇠비와 모드감쇠의 경우는 전기장의 세기가 0.4 kV/mm인 경우에 최적의 특성을 나타내며, 전기장의 세기가 0.0 kV/mm인 경우의 결과는 구속감쇠 (constrained-layer damping) 효과에 의한 것이다. Fig. 9에서 보면 유연한 시편, 즉 적층각도가 90도인 시편의 감쇠비 특성이 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 6의 결과와 비교해 보면 ER유체가 감쇠비에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 감쇠비 뿐만 아니라 고유주파수도 동시에 고려하는 모드감쇠(modal damping)의 관점에서 보면 보의 적층각도에 따라서 진동제어 특성이 달라진다. 복합적층보 자체에 대한 모드감쇠는 Fig. 7의 결과에서 보듯이 15도 시편이 가장 좋은 모드감쇠를 보여주지만, ER유체 적층보의 경우에는 모드감쇠의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 즉 모드감쇠의 경우는 적층각도보다는 전기장의 세기에 매우 민감함을 알 수 있다.

4. 결론

ER유체가 포함된 복합적층보의 동특성에 관한 연구를 다양한 전기장의 세기에 대하여 수행하였으며 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째로 점탄성 이론을 적용한 유한요소 해석 기법의 타당성을 기존의 실험적 연구와 비교하여 확인하였다. 전기장의 세기에 따른 진동특성을 수치모사한 결과 첫번째 굽힘 진동 모드의 감쇠비 및 모드감쇠가 적층각도에 따라서 달라지며 굽힘강성이 작은 유연한 시편일수록 감쇠비 효과가 크다. 둘째로 모드감쇠의 경우에는 복합적층보 자체의 경우에는 15° 시편이 매우 우수하지만 ER유체의 영향으로 전기장이 가해짐에 따라서 굽힘강성이 큰 시편이 약간 우수함을 알 수 있다. 마지막으로 전기장의 세기에 따라서 강성 및 감쇠가 달라지며, 0.4 kV/mm인 경우가 최적의 감쇠성능을 보여준다. 따라서 적절한 적층각도와 전기장의 세기를 선택하면 구조물의 감쇠를 극대화할 수 있다.

후 기

본 과제는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-304-005-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Brooks, D. A., Goodwin, J., Hjelm, C., Marshall, L. and Zukoski, C., 1986, "Viscoelastic Studies on An Electro-rheological Fluid," *Colloids and Surfaces*, Vol. 18, pp. 293~312.

(2) Choi, Y., Sprecher, A. F. and Conrad, H., 1990, "Vibration Characteristics of a Composite Beam Containing an Electro-rheological Fluid," *J. of Intell. Mat. Syst. And Structures*, Vol. 1, pp. 91~104.

(3) Choi, Y., Sprecher, A. F. and Conrad, H., 1992,

"Response of Rheological Fluidfilled Laminated Composites to Forced Vibration," *J. of Intell. Mat. Syst. And Structures*, Vol. 3, pp. 17~29.

(4) Choi, S. B. and Park, Y. K., 1994, "Active Vibration Control of Cantilevered Beam Containing an Electro-rheological Fluid," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 172, No. 3, pp. 428~432.

(5) Choi, S. B., Park, Y. K. and Cheong, C. C., 1996, "Active Vibration Control of Intelligent Composite Laminate Structures Incorporating an Electro-rheological Fluid," *J. of Intell. Mat. Syst. And Structures*, Vol. 7, pp. 411~419.

(6) Lin, R. M., and Lim, M. K., November 1996, "Complex Eigensensitivity-based Characterization of Structures with Viscoelastic Damping," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 5, pp. 3182~3191.