

층간응력의 효과를 고려한 단일방향 90° 복합재 적층보의 진동감쇠 해석

임 종 휘*

(1999년 7월 30일 접수)

Vibration Damping Analysis in 90° Laminated Beam Considering the Effect of Interlaminar Stress

Jong Hee Yim

Key Words: Vibration(진동), Damping(감쇠), Loss Factors(감쇠계수), Laminated Composites(적층 복합재료), Flexural Bending Moment(굽힘 모멘트), Interlaminar Stresses(층간응력)

Abstract

This paper is concerned with the development of a general model for predicting material damping in laminates based on the strain energy method. In this model, the effect of interlaminar stress on damping is taken into accounts along with those of in-plane extension/compression and in-plane shear. The model was verified by carrying out the damping measurements on 90° unidirectional composite beams varying length and thickness. The analytical predictions were favorably compared with the experimental data. The transverse shear(σ_{yz}) appears to have a considerable influence on the damping behaviors in 90° unidirectional polymer composites. However, the other interlaminar stresses(σ_{xz} , σ_z) were shown to have little impact on vibration damping in 90° laminated composite beam.

1. 서론

최근 복합재료는 스포츠용품, 자동차타이어, 건축용 보강재, 헬리콥터브레이드, 비행기 및 선박 그리고 우주선과 차량의 구조재 등과 같이 여러 분야에 적용되고 있다. 복합재료는 기존의 금속 재료에 비해 가볍고 우수한 강도와 강성을 가지고 있으며 기존재료들이 가지지 않는 특성을 지

니고 있다. 이러한 우수한 특성에도 불구하고 경량의 성질로 인해 복합재료의 구조물중의 어떤 요소들은 쉽게 외부의 충격으로부터 원하지 않는 진동을 받을 수 있다. 따라서 이들 불필요한 진동을 방지할 수 있는 동적 구조물의 한 멤버로서 복합재료를 사용하기 위하여 그들의 진동감쇠 특성들을 이해 하여야한다.^(1,2) 이들 감쇠 특성은 복합재료의 동적 구조물의 설계에 있어서 중요한 변수로서 그 구조물과 재료의 고유진폭을 조정하고, 피로하중 또는 충격으로부터 보다 긴 수명을 그들 구조물과 재료에 부여하는 역할을 한다.⁽³⁾ 복합재료의 댐핑은 거시적으로는 섬유와 모재의 종류, 섬유방향, 적층 순서 그리고 섬유 부피율에 의존하고, 미시적으로는 섬유와 모재의 점탄성 거동, 복합재속의 결합, 섬유와 모재 사이의

* 회원, 광주전남지방 중소기업청

** 회원, 숭실대학교

Email : jhyim@digital.smba.go.kr

TEL : (062)360-9204 FAX : (062)366-9669

계면에서 전단거동, 섬유와 모재의 접합되지 않는 부위에서의 마찰 등에 의존한다.⁽¹⁻⁴⁾ 또한, 몇몇 연구자들에 의해서 층간 응력과 횡 전단변형의 효과를 고려하였다.⁽³⁻⁵⁾ 본 연구에서는 횡 방향 기본 감쇠계수를 결정하기 위하여 단일방향 90도 적층 복합재료 댐핑의 시험편 두께와 길이의 영향에 대하여 체계적으로 조사하였다. 일반적으로 구조물의 진동댐핑은 굽힘 진동의 결과^(5,6)로부터 발생된다는 가정 하에 Ni와 Adams는 플라이 응력(Ply Stress)조건하에 주 모멘트(M_1)만을 고려하여 에너지 접근방법을 유도하였다. 이들 이론을 발전시켜 층간 응력들의 영향을 고려하였다. 복합재료의 감쇠 근원은 다음 기구의 하나 혹은 그이상의 결합된 기구에 의해 나타난다.⁽¹⁻¹⁶⁾

(1)구성 성분의 점탄성 반응 (2)주기적인 열 흐름에 따른 열탄성 감쇠 (3)섬유와 모재 사이의 마찰 (4)재료의 손상부위의 성장과 시발점에서의 감쇠 및 기타 등등.

비록 이들 기구들을 각각 분리하여 예측하는 정확한 모델을 만들기는 어려울지라도 역학적 관점에서 적층 복합재료의 댐핑 예측모델을 유도하였다. 본 연구에서는 횡 방향 기본감쇠계수를 결정하기 위하여 단일방향 90° 적층 복합재료 댐핑의 시험편 두께와 길이의 영향에 대해서 체계적으로 조사하였다. 일반적으로 구조물의 진동 댐핑은 굽힘 진동의 결과로부터 발생된다는 가정 하에 Ni와 Adams⁽⁸⁾는 플라이 응력 조건하에 주 모멘트(M_1)만을 고려하여 에너지 접근방법을 유도하였다.

이들 이론을 발전시켜 층간응력의 영향을 고려하였다. 그 댐핑 예측은 평면 응력들과 층간 응력을 고려하여 구하였다. 층간 응력을 고려하여 단일방향 90°로 적층된 복합재료의 두께 및 길이의 변화에 따른 감쇠계수의 민감성을 정량적으로 예측하여 보다 정확한 횡 방향 기본 감쇠계수를 측정하기 위한 시험편 치수 및 크기에 대해 도움을 주고자 연구하였다.⁽⁹⁻¹⁰⁾ 이 횡 방향 기본 감쇠계수는 여러 방향의 섬유로 적층된 복합재료의 진동감쇠 예측에 필수적인 기본 감쇠계수이다.

2. 이론 해석

Ni와 Adams의 이론⁽⁸⁾을 바탕으로 층간응력의 영향을 알아보기 위하여 평형방정식을 적용하였다. 적층된 보에 연속된 n 개 모드를 가지는 연속체인 보의 진동에서 진폭이 가장 큰 첫 번째 모드에 해당하는 주 굽힘 모멘트(M_1)를 고려하여 평면 응력들에 의한 에너지 소산량을 구하였다. 보의 층간 응력은 다음 가정하에 결정되었다. 이론공식은 Fig. 1에서 보여주는 좌표계위에서 유도되었다. 90도 적층보는 일반적으로 섬유방향과 90° 방향인 y 방향에 따라 좁고 길게 이루어져 있으므로 응력 분포가 x 방향에 무관하다는 가정하에 그 층간응력이 결정되었다. 따라서 소산된 에너지는 6종류의 응력들에 의해 나누어 계산될 수 있었다. 즉, 섬유방향 좌표계에서 σ_x , σ_y , σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yz} , σ_z 의 응력에 의한 적층된 복합재료의 소산에너지를 결정하였다. Ni와 Adams에 의해 구해진 평면 응력들을 다음 평형방정식에 대입함으로써 층간 응력을 구할 수 있다.

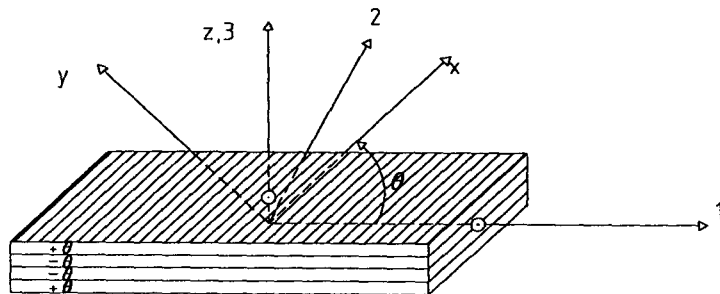


Fig. 1 Coordinate systems of geometric axes and principal material axes

$$\frac{\partial \sigma_x^{(t)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(t)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}^{(t)}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}^{(t)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^{(t)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}^{(t)}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}^{(t)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}^{(t)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z^{(t)}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

여기서, (t)= t 번째 적층판

따라서 보속에서의 최대저장에너지는 굽힘 변형에너지와 횡전단 변형에너지를 합함으로써 얻어졌다. 댄핑에 대한 충간 응력의 영향을 분석하기 위하여 실험장치에 해당하는 주 굽힘 모멘트를 고려할 목적으로 두 종류의 하중에 의해 일어난다고 가정하였다. 하나는 집중하중과 다른 하나는 분포하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 결국 90° 단일방향으로 적층된 복합재료의 에너지 소산량은 에너지 방법과 보 이론을 적용하여 예측하였다.

2.1 굽힘 모멘트

Ni와 Adams는 굽힘 모멘트로 인한 댄핑 이론을 정립하고자 보에서 순수 굽힘에 의해 발생된 변형에너지 소산량을 계산하기 위하여 그 보에서 발생하는 굽힘 응력을 섬유 좌표 계를 기준으로 3종류의 평면 응력으로 나누어서 총 소산에너지를 구하였다. 간단하게 아래와 같이 수식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta W = \Delta W_x + \Delta W_y + \Delta W_{xy} \quad (4)$$

각각의 항들 중에서 σ_x 에 대한 변형에너지 소산량을 더 자세히 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta W_x &= \int_0^l 2 \int_0^{h/2} \pi \eta_L \sigma_x \epsilon_x dz dx \\ &= 2\pi \eta_L \int_0^l \int_0^{h/2} \sigma_x \epsilon_x dz dy \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2\pi \eta_L}{I^*} \int_0^{h/2} m^2 (Q_{11} d_{11}^* + Q_{12} d_{12}^* + Q_{16} d_{16}^*) \\ & (m^2 d_{11}^* + mnd_{16}^*) z^2 dz \int_0^l M_1^2 dy \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

l = 보의 길이,

h = 보의 두께,

η_L = 축방향 기본 감쇠 계수,

d_{ij}^* = 단위화한 굽힘 컴플라이언스,

$M_1 = P_y$ = 집중 하중에 의한 굽힘 모멘트,

$M_1 = 1/2 w y^2$ = 분포 하중에 의한 굽힘모멘트,

$m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$.

같은 방법으로 나머지 항들 즉 ΔW_y , ΔW_{xy} 는 다음과 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned} \Delta W_y &= \frac{2\pi \eta_T}{I^*} \int_0^{h/2} n^2 (Q_{11} d_{11}^* + Q_{12} d_{12}^* \\ & + Q_{16} d_{16}^*) (n^2 d_{11}^* - mnd_{16}^*) z^2 dz \int_0^l M_1^2 dy \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{xy} &= \frac{2\pi \eta_{LT}}{I^*} \int_0^{h/2} mn (Q_{11} d_{11}^* + Q_{12} d_{12}^* \\ & + Q_{16} d_{16}^*) (2mnd_{11}^* - (m^2 - n^2) d_{16}^*) z^2 dz \int_0^l M_1^2 dy \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, η_T = 횡 방향 기본감쇠계수, η_{LT} = 기본 전단 감쇠계수, I^* = 단위화된 관성 모멘트의 단면계수($h^3/12$).

그리고 보에서 굽힘에 의해 발생하는 총 변형 에너지는 다음과 같이 기본역학으로부터 유도되었다.

$$W_b = \int_0^l M_1 \kappa_1 dx = \frac{d_{11}^*}{I^*} \int_0^l M_1^2 dy \quad (8)$$

2.2 층간 응력

적층판의 평형방정식(1-3)로부터 그 층간응력을 구하기 위하여 Ni와 Adams가 유도한 평면 응력들을 그들 평형방정식에 대입하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(t)} &= \frac{zM_1}{\Gamma^*} m^2(Q_{11}^{(t)} d_{11}^* + Q_{12}^{(t)} d_{12}^* + Q_{16}^{(t)} d_{16}^*) \\ &= \frac{zf_1^{(t)} M_1}{\Gamma^*} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y^{(t)} &= \frac{zM_1}{\Gamma^*} n^2(Q_{11}^{(t)} d_{11}^* + Q_{12}^{(t)} d_{12}^* + Q_{16}^{(t)} d_{16}^*) \\ &= \frac{zf_2^{(t)} M_1}{\Gamma^*} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xy}^{(t)} &= \frac{zM_1}{\Gamma^*} (-mn)(Q_{11}^{(t)} d_{11}^* + Q_{12}^{(t)} d_{12}^* + Q_{16}^{(t)} d_{16}^*) \\ &= \frac{zf_3^{(t)} M_1}{\Gamma^*} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$f_1^{(t)} = m^2(Q_{11}^{(t)} d_{11}^* + Q_{12}^{(t)} d_{12}^* + Q_{16}^{(t)} d_{16}^*) \quad (12)$$

$$f_2^{(t)} = n^2(Q_{11}^{(t)} d_{11}^* + Q_{12}^{(t)} d_{12}^* + Q_{16}^{(t)} d_{16}^*) \quad (13)$$

$$f_3^{(t)} = (-mn)(Q_{11}^{(t)} d_{11}^* + Q_{12}^{(t)} d_{12}^* + Q_{16}^{(t)} d_{16}^*) \quad (14)$$

90°적층 복합재 보에 대해서 보는 섬유 좌표계의 y축의 방향으로 길게 뻗어있어 y축의 영향을 주로 받는다는 가정 하에 그 층간 전단 응력을 구하였다. 즉 보속의 응력들을 그 보가 y축 방향으로 길게되어 x축에 무관하다는 가정 속에 90° 단일방향으로 적층된 복합재의 층간응력의 효과를 구하기 위해 그 평형방정식을 적용하여 다음과 같이 유도하였다.

$$\sigma_{yz}^{(t)} = -\frac{1}{\Gamma^*} \int_{-h/2}^{z'} f_2^{(t)} \frac{dM_1}{dy} z dz \quad (15)$$

보의 이론으로부터 다음과 같이 다시 쓸 수 있

다:

$$\sigma_{yz}^{(t)} = -\frac{Q}{\Gamma^*} \int_{-h/2}^{z'} f_2^{(t)} z dz \quad (16)$$

같은 방법으로

$$\sigma_{xz}^{(t)} = -\frac{Q}{\Gamma^*} \int_{-h/2}^{z'} f_3^{(t)} z dz \quad (17)$$

$$\sigma_z^{(t)} = \frac{1}{\Gamma^*} \int_{-h/2}^{z'} \int_{-h/2}^{z'} f_2^{(t)} \frac{d^2 M_1}{dy^2} z dz dz \quad (18)$$

여기서, Q = P = 집중 하중하에 굽힘 하중, 혹은, Q = wy = 분포 하중하에 굽힘 하중.

위의 적분은 각 적층부에서 횡 전단응력이 연속적인 분포하에 있다는 가정하에 계산되었다. 보의 횡전단 변형에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_{yz} = \int_{vol} \frac{\sigma_{yz}^2}{2G_c} dv = \frac{1}{2G_c} \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yz}^2 b dz dy \quad (19)$$

여기서, G_c =G_{yz} =적층판의 횡 전단계수.

따라서 층간 응력에 관련한 소산된 에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta W_{yz} = \frac{\pi \eta_s}{G_{yz}} \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yz}^2 b dz dy \quad (20)$$

같은 방법으로,

$$\Delta W_{xz} = \frac{\pi \eta_{xz}}{G_{xz}} \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xz}^2 b dz dy \quad (21)$$

$$\Delta W_z = \frac{\pi \eta_z}{E_z} \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_z^2 b dz dy \quad (22)$$

여기서, 90°로 적층된 단일방향 복합재의 횡전단 기본 감쇠계수를 편의상, $\eta_{xy} = \eta_{xz} \approx \eta_{yz}$ 으로 가정하였다. 또한 E_z=E_y, η_m =모재의 감쇠계수, G_m=모재의 전단계수, G_c= 복합재의 전단계수.

2.3 보 속에 총 저장에너지

보 속에 총 저장된 에너지는 최종적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 W &= W_b + W_{xz} + W_{yz} + W_z \\
 &= \frac{d_{11}^*}{I^*} \int_0^l M_1^* dy + \frac{1}{2G_{xz}} \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xz}^2 b dz dy \\
 &+ \frac{1}{2G_{yz}} \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yz}^2 b dz dy + \frac{1}{2E_z} \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_z^2 b dz dy
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

여기서, W_b = 외팔보의 굽힘 변형에너지, (W_{xz}, W_{yz}, W_z) = 충간 응력에 의한 변형 에너지. 위의 에너지 접근 방법의 결과로부터 총 감쇠 계수는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \phi_{ov} &= \frac{\sum \Delta W}{\sum W} \\
 &= \frac{\Delta W_x + \Delta W_y + \Delta W_{xy} + \Delta W_{xz} + \Delta W_{yz} + \Delta W_z}{W_b + W_{xz} + W_{yz} + W_z}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

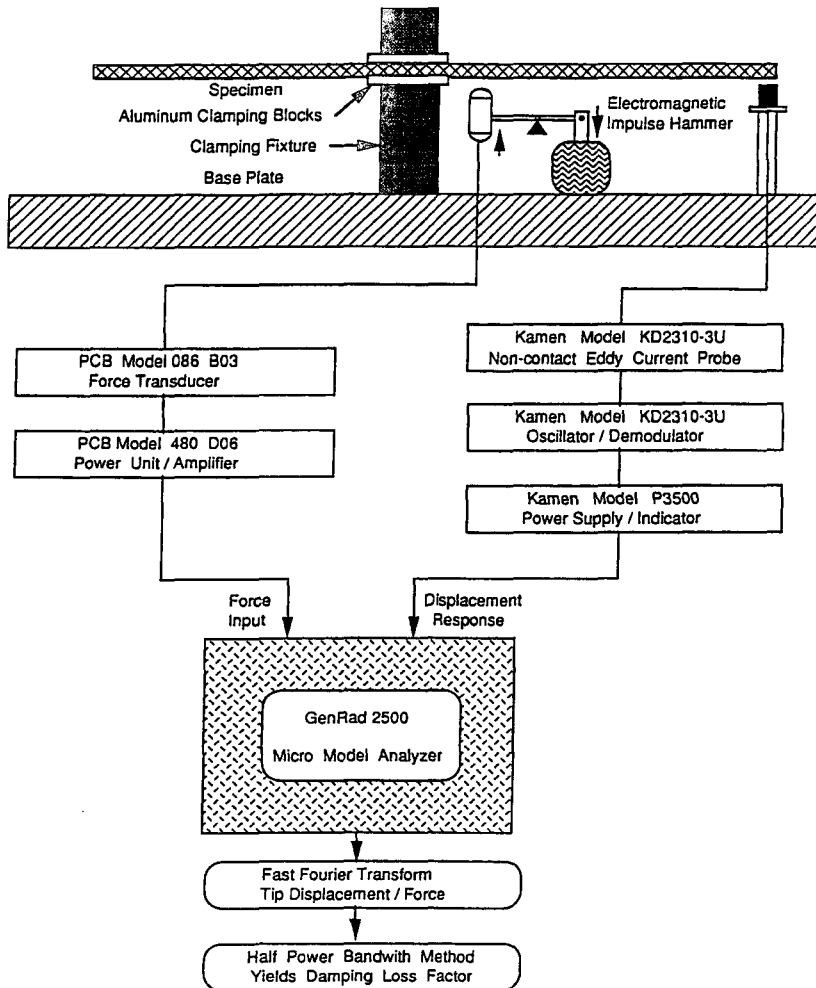


Fig. 2 Instrumentation for impulse technique

여기서, $\psi_{ov.} = 2\pi \eta_{ov.} =$ 비 감쇠용량, $\eta_{ov.} =$ 총 감쇠계수.

3. 실험

본 연구에서 사용된 90° 적층 복합재료 (AS4/3501-6)의 진동 재료댐핑은 측정하기 위한 실험방법으로 가진력은 충격기법이 사용되었다. 실험장비의 주요한 부분은 시험편, 시험편을 물리는 지그, 전자기적 충격 햄머, 비접촉 와류전류 탐상과 FFT분석기 등으로 구성되었다. 시험편은 지그 속에서 외팔보 형태로 지지된 편평한 적층 보이다. 모든 시험편의 폭은 2.54cm이고 두께는 3종류로 8(0.10668 cm), 20(0.254 cm)와 32(0.41148 cm)플라이를 사용하였다. 시험편의 길이는 감쇠계수 측정을 용이하게 하기 위하여 길이에 따른 고유진동수를 조절할 수 있게 하였다. 사용된 전자기적 햄머는 자동으로 일정 크기의 충격을 가하도록 제작되었다. 또한, 트랜듀서를 시험편에 부착하여 시험편의 움직임을 감지할 때 그 트랜듀서의 무게에 의한 영향을 받게되므로 그 영향을 줄이기 위해 사용한 비접촉식 와류 전류 탐상법을 사용하였으며 이는 시험편 끝단 위에 알루미늄 포일을 장착하여 끝단에서의 시험편의 진동 움직임을 감지하도록 그 끝단 바로 아래쪽에 센서를 설치하였다. 가진력(Force)와 시험편의 진동 움직임을 감지하는 센서로부터의 그 신호들은 FFT분석기에 입력되어 다음공식에 의하여 진동 감쇠계수가 측정되었다.

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_r} \quad (25)$$

여기서, $\Delta f_n =$ half power점에서 진동수 대역폭
 $f_r =$ 공진 진동수

감쇠계수의 데이터 처리방법으로 컴퓨터 스크린의 진동수 분해능에 의한 half-power bandwidth 방법으로 감쇠계수를 평가하기 위하여 컴퓨터 스크린상의 확대 모드상속에서 진동수 반응 함수 곡선 위에서 측정하였다. 본 연구에 사용된 실험장비가 Fig. 2에서 보여주고 있다. 실험방법의 자세한 내용은 참고문헌 (7)에 기술되었다.

4. 결과 및 토의

Table 1은 AS4/3501-6 복합재 보의 댐핑 예측을 위하여 사용된 기본 재료 상수가 주어져있고, Table 2는 실험에 의해 측정된 댐핑과 고유진동수를 나타내고있다. 그리고, 단일방향 90° 복합재 보의 시험편의 길이와 두께의 비에 따른 댐핑의 변화가 Figs. 3-10에서 보여주고 있다. 또한 그들 그래프에서 20플라이 90° 복합재 보의 실험 데이터가 각각의 이론 커브와 함께 비교하여 나타내었다. 이론 예측 댐핑값이 실험치 보다 약간 차이가 있을지라도 그들 사이의 값들은 합리적으로 유사한 경향을 나타냈다. 90° AS4/3501-6 복합 재에서도 그 감쇠계수 값은 보의 길이가 감소함에 따라 일반적으로 증가하였다. 그들 댐핑 변화는 두꺼운 보에서의 댐핑이 얇은 보의 것보다 더 크게 영향을 받았다. 본 연구에서 시험편의 두께의 영향을 조사하기 위하여 8, 20와 32플라이 적층 복합재를 사용하였다. 그 감쇠계수 값은 그림들에서 보여 주듯이 시험편의 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, 단일방향 90° 복합재료에서 길이와 두께를 변화시키면서 측정한 감쇠계수는 일정하게 변화하지 않아서 이론 값과 비교해 보았다. 그리고, 이러한 90° 방향 시험편 형상은 모재의 영향을 더 받기 때문에 감쇠계수는 모재의 감쇠계수와 비슷할 것으로 예상하였다. 본 논문에서 모재 시험편에 대한 재료 감쇠계수 값을 실험에 의해 결정하였다. 일반적으로 등방성 재료나 점탄성 재료는 일정한 진동수 범위 내에서 시험편 길이가 짧아지면서 진동수 증가에 따라 감쇠계수가 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 이론적으로 90° 단일방향 시험편에서 최대 감쇠계수는 가장 높은 고유진동수에서 일어났다. 또한 진동수 100~ 400Hz 범위 내에서 감쇠계수는 거의 일정하게 나타나거나 진동수증가에 따른 약간의 증가하는 경향을 보여주었다. 후자의 진동수 증가에 따른 감쇠계수의 증가는 시험편 형상의 재료특성이 모재에 의해 지배되는 것으로 예상되었다. 실험에서 측정된 보다 낮은 고유진동수에서 높은 감쇠계수는 실험에 사용된 시험편 길이가 긴 보와 낮은 강성계수로 인한 중력효과와 비 선형 감쇠효과에 기인될 수 있는 것으로 사료된다. 또한, 시험조건에 맞는 굽힘 모멘트를 고려하기 위해 두가지 하중조건을 적용하였다. 집중하중에 의한 댐핑 값이 Figs.3-6과 분포하중에 의한 댐핑

값이 Figs.7-10에 나타났다. 두 하중조건에서 분포 하중에 의한 댐핑 값이 집중하중에 의한 값보다 실험치에 더 근접하였다. 결과적으로 90° 단일방향 복합재료는 100Hz 이하의 고유진동수에서

얻어진 감쇠계수는 진동수 감소와 함께 감쇠계수의 증가하는 경향을 보여주었다.

Table 1 Basic material properties of AS4/3501-6 composites used in this study.

E_L (Gpa)	E_T (Gpa)	ν_{LT}	G_{LT} (Gpa)	η_L ($\times 10^{-3}$)	η_T ($\times 10^{-3}$)	η_{LT} ($\times 10^{-3}$)	V_f (%)
128	9.26	0.3	5.9	1.8405	8.5801	9.477	65

Table 2 AS4/3501-6 [90]₂₀ composites experimental damping data.

Beam Length (cm)	First Mode		Beam Length (cm)	First Mode	
	f_1 (Hz)	Loss factor ($\times 10^{-4}$)		f_1 (Hz)	Loss factor ($\times 10^{-4}$)
20.3	1	24.22	7.6	1	182.17
	2	24.22		2	182.78
	3	24.22		3	182.39
	Avg.	24.22		Avg.	182.45
	S.D.	0.0000		S.D.	0.3089
15.2	1	47.50	6.0	1	266.54
	2	47.56		2	266.61
	3	47.51		3	266.61
	Avg.	47.52		Avg.	266.59
	S.D.	0.0321		S.D.	0.0404
10.2	1	99.70	4.8	1	422.14
	2	99.95		2	422.54
	3	99.54		3	422.47
	Avg.	99.73		Avg.	422.38
	S.D.	0.2066		S.D.	0.2136
9.5	1	101.40		1	82.28
	2	102.34		2	71.92
	3	101.69		3	82.67
	Avg.	101.81			78.96
	S.D.	0.4814			6.0971

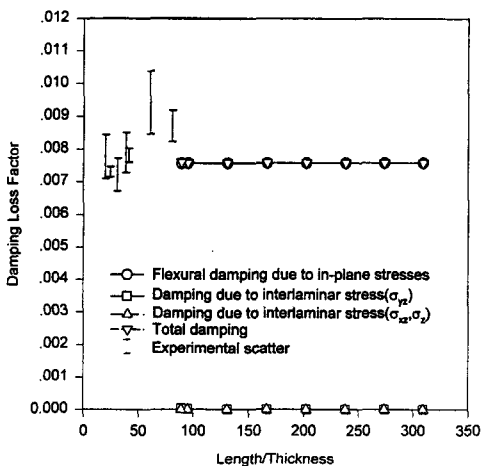


Fig. 3 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree 8ply AS4/3501-6 composites under point loading

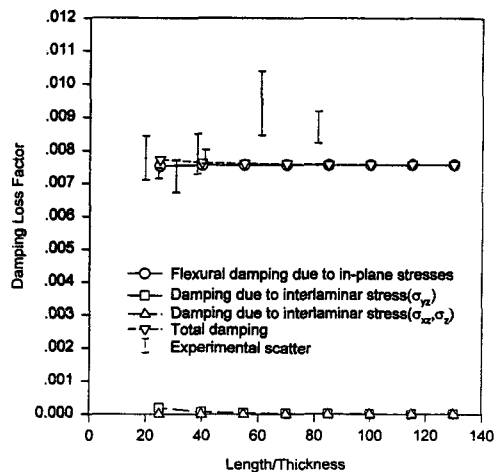


Fig. 4 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree 20ply AS4/3501-6 composites under point loading

이러한 사실은 시험편의 비 선형 효과와 중력의 영향을 받는 결과일 수 있다. 일반적으로 진동수에 따른 감쇠계수의 변화는 선형적인 증가라기보다 거의 일정하고 또한 진동수 증가에 따른 약간의 증가하는 경향을 보여주었다. 그 감쇠계수는 시험편 길이와 두께에 비교적 덜 민감한 것으로 나타났다.

5. 결 론

단일방향 90° 적층 복합재 외팔보의 이론과 실험으로부터 다음과 같이 결론을 요약할 수 있었다.

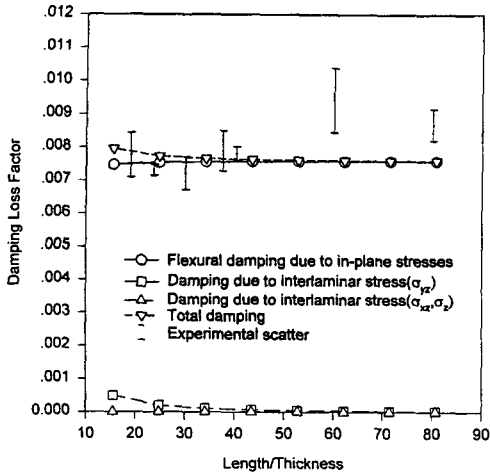


Fig. 5 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree 32ply AS4/3501-6 composites under point loading

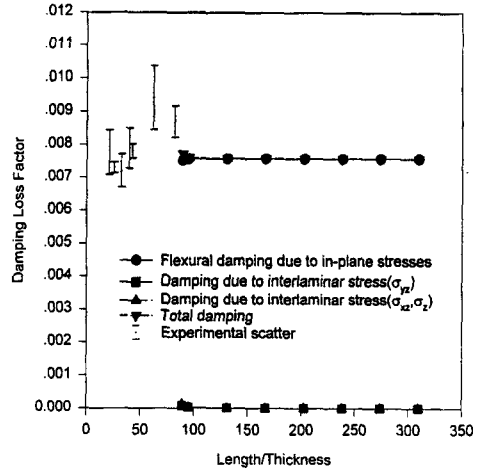


Fig. 6 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree AS4/3501-6 composites on 33.02cm sample length under point loading

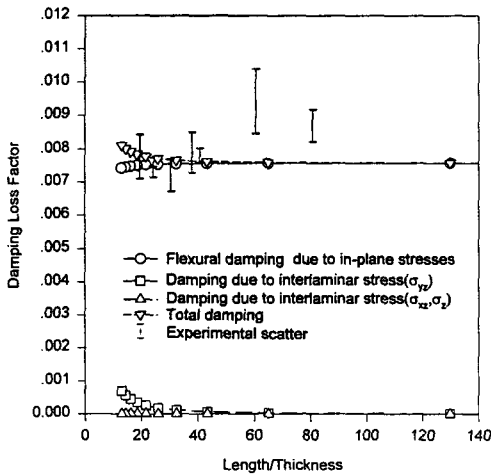


Fig. 7 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree 8ply AS4/3501-6 composites under distributed mass

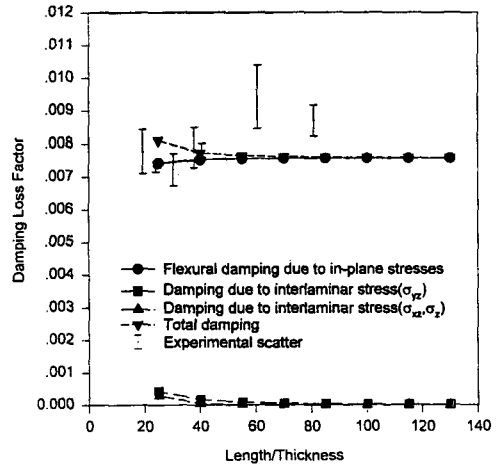


Fig. 8 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree 20ply AS4/3501-6 composites under distributed mass

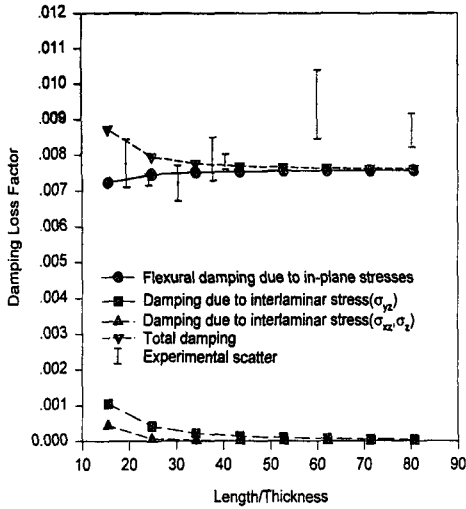


Fig. 9 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree 32ply AS4/3501-6 composites under distributed mass

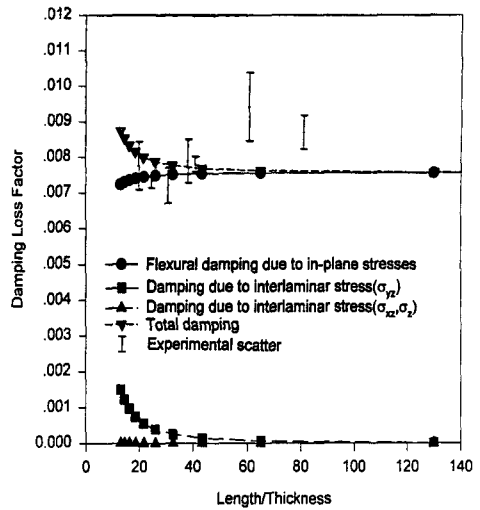


Fig. 10 Analytical and experimental loss factor versus sample length/thickness for 90 degree AS4/3501-6 composites on 33.02cm sample length under distributed mass

(1) 단일방향 90도 AS4/3501-6 복합재 보에서 재료 댐핑은 이론적으로 시험편의 두께가 증가하고 시험편의 길이가 짧아질수록 층간 전단응력의 영향으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나, 실험에서는 다음 진동수 100-440Hz의 범위에서 일정하거나 약간의 증가를 보였으며, 그 댐핑은 층간 응력의 효과에 비교적 덜 민감한 것으로 나타났다.

(2) 두꺼운 시험편의 길이변화에 따른 댐핑의 변화는 얇은 시험편의 것보다 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

(3) 두가지 하중조건중 분포하중조건으로부터 예측된 댐핑 값이 집중하중조건으로부터 예측된 값보다 크게 예측되었다.

(4) 100Hz 이하 범위에서 측정된 댐핑은 그 진동수의 감소와 함께 댐핑의 증가를 나타냈는데 이는 시험편의 낮은 강성계수로 인한 비 선형효과와 중력효과에 기인된 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Adams, R.D.,1987, Damping Properties Analysis of Composites, Engineering Materials Handbook, Composites, Vol.1, pp. 206~217, ASM.
- (2) Bicos, A.S. and Springer, G.S.,1989, "Analysis of Free Damped Vibration of Laminated Composite Plates and Shells," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, pp.129~149, 1989.
- (3) Koo, K.N. and Lee, I.,1993,"Vibration and Damping Analysis of Composite Laminates Using Shear Deformable Finite Element,"*AIAA J.*,Vol.31, No. 4, April, pp.728~735.
- (4) Saravanos, D.A., 1994,"Integrated Damping Mechanics for Thick Composite Laminates and Plates," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 61, pp.375~383.
- (5) Hwang, S. J. and Gibson, R. F.,1991,"Contribution of Interlaminar stress on Damping of Laminated Composites," *Comp. Struc.*, 41, pp. 379~393.
- (6) Alam, N. and Asnani, N.T., 1986,"Vibration and Damping Analysis of Fibre Reinforced

- Composite Material Plates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, pp. 2~18.
- (7) Yim, J.H., Burmeister, J.S., Kaminski, R.L. and Gillespie, J.W. Jr., Experimental Characterization of Material Damping in Laminated Polymer Matrix Composites, Center for Composite Materials Report 1988-39, University of Delaware, Newark, Delaware.
- (8) Ni, R. G. and Adams, R. D., 1984, "The Damping and Dynamic Moduli of Symmetric Laminated Composite Beams-Theoretical and Experimental Results," *J. Comp. Mats*, Vol. 18, p. 104.
- (9) 임종휘, Jang, B.Z., Shuling, J.C., and Gillespie, J.W. Jr., 1997, "0-degree 단일방향 적층된 복합재료의 댐핑에 대한 횡전단 응력의 영향", 한국복합재료학회지, 제10권, 제4호, pp. 26~35.
- (10) Yim, J.H. and Jang, B.Z., 1999, "An Analytical Method for Prediction of the Damping in Symmetric Balanced laminated Composites," *Polymer Composites*, Vol. 20, No. 2, pp. 192~199.
- (11) Willway, T.A. and White, R.G., 1989, "The Effects of Matrix Complex Moduli on the Dynamic Properties of CFRP Laminate," *Composites Science and Technology*, Vol. 36, pp. 77~94.
- (12) Henneke, E. G., II and Jones, T. S., 1979, "Detection of Damage in Composite Materials by Vibrothermography," *Nondestructive Evaluation and Flaw Criticality of Composite Materials*, ASTM STP 696, R. B. Pipes, Ed., American Society for Testing and Materials, pp. 83~95.
- (13) Yim, J.H., 1998, "Comparison of Prediction Methods for Damping of a Symmetric Balanced Laminated Composite," *KSME International J.*, Vol. 12, No. 4, pp. 536~543.
- (14) Crane, R.M. and Gillespie, J.W. Jr., 1991, "Characterization of the Vibration Damping Loss Factor of Glass and Graphite Fiber Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 40 pp. 355~375.
- (15) Hashin, Z., 1970, "Complex Moduli of Viscoelastic Composites: II. Fiber Reinforced Materials," *Int. J. Solids and Struc.*, Vol. 6 pp. 797~807.
- (16) Wren, G.G. and Kinra, V.K., 1990, "An Experimental Study of the Complex Dynamic Modulus," *Dynamic Elastic Modulus Measurements in Materials*, ASTM STP 1045, pp. 58~79.