

유리직물/에폭시 복합재료 보의 내부구조와 충격굽힘진동특성

(Microstructure and Impactive Flexural Vibration Characteristics of
Glass-Fabric/Epoxy Composite Beams)

서 지웅(한양대 대학원)*, 최 낙삼(한양대 기계공학과)

J. W. Sue(Graduate School, Hanyang Univ.), N. S. Choi(Hanyang Univ.)

Abstract

The vibration behavior of glass-fabric reinforced plastic(GFRP) composite beams subjected to various transverse impacts has been investigated as a function of fiber orientation and void fraction. Theoretical results of resonant frequency, damping coefficient and modal amplitude dispersion using the Euler-beam theory were obtained along with the finite element analysis, which were compared with experimental ones. Consequently, it was shown that the transverse vibration characteristics were largely affected by fiber orientation and void fraction.

1. 서론

속도를 갖는 투사체가 자동차, 비행기, 건축, 토목 구조물 등과 충돌하면 구조물의 변형속도, 치수 및 질량, 강성/연성(Stiffness/Softness) 그리고 감쇠 효과를 수반하여 접촉 응력, 굽힘 응력, 전단 응력의 발생과 더불어 다양한 모드의 공진이 일어나고 구조물은 충격변형거동을 보인다[1]. 이와 같은 충격진동 및 변형거동은 다음 두가지로 검토할 수 있다. 첫째, 충격부에서의 높은 변형속도로 인한 국부적 소성변형과 미시파괴(microfracturing)의 발생이며, 둘째, 응력과 전파(stress wave propagation)에 따른 공진의 발생과 동적인 거시적 변형 및 파괴(Global dynamic deformation & fracture)이다. 복합재료의 경우 충격진동 및 변형거동에 관한 연구[2]는 거의 전자에 집중되어 있지만 본 연구에서는 후자인 동적인 거시적 횡진동특성에 연구의 초점을 맞추고 비파괴평가로서의 활용가능성, 즉 내부구조와 결합의 횡진동특성과의 관계를 탐색하고자 한다.

본 연구에서는 횡방향 충격하중을 받는 복합재료 보의 동적굽힘진동 거동에 대한 기초연구를 위해 먼저 복합재료의 제작 및 미시구조적 특징과 굽힘강성을 구하고 동적거동 특성에 대한 충격하중 유지시간과 구조감쇠(Structural damping)의 효과를 연구한다. 또한, 이론과 수치해석을 통해 공진 주파수와 각 공진 모드별 진폭을 구하고, 실험으로 구한 결과와 비교 분석한다. 해석 방법으로는 모드 중첩법(Mode superposition method)을 이용한 Euler-보 동적 이론 해석[1]과 시간 적분을 고려한 유한요소 수치해석을 수행한다[3]. 그래서, 시편의 기공함유 여부, 섬유배향 각에 따른 굽힘진동 응답을 검토한다.

2. 횡충격 진동의 해석

2.1 Euler-보 이론

1차원 보 구조물의 횡진동 거동을 Euler-보 이론 [4]으로 표현하면 다음 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(C_s I \frac{\partial^3 v(x,t)}{\partial t \partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = P(x,t) \quad (1)$$

여기서 E 는 탄성계수, I 는 면적관성 모멘트, C_s 는 내부감쇠계수(internal damping), m 은 단위 길이당 질량, C 는 외부감쇠계수(external damping), P 는 하중, v 는 처짐량, x 는 길이방향 좌표, t 는 시간이다. 식(1)에서 횡방향 변위응답을 얻기 위해 본 연구에서 사용한 방법은 모드 중첩법(Mode superposition method)이며 변위응답은 다음 식(2)와 같이 가정한다.

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) y_i(t) \quad (2)$$

여기서 $\phi_i(x)$ 는 모드형상(mode shape)이며 $y_i(t)$ 는 가중함수(weight function)이다. 식(1)은 연동되어 있는 방정식이므로 식(3)을 이용하여 비연동(decouple)화 한다.

$$C_s = \beta E, \quad C = \alpha m \quad (3)$$

여기서 α 와 β 는 각각 외부 감쇠계수(external damping coefficient)와 구조 감쇠계수(structural damping coefficient)이다. 식(1)에 식(2)와 식(3)을 대입하고 유도하면 식(4)과 같이 된다.

$$\ddot{y}_j(t) + 2\omega_j\xi_j\dot{y}_j(t) + \omega_j^2 y_j(t) = p_j(t)$$

$$p_j(t) = \int_0^l \phi_j(x) p(x, t) dx \quad (4)$$

여기서 ω_j 는 고유 각진동수, ξ_j 는 감쇠비이다. sine sweep 시험을 통해 주파수 응답함수를 구하고 ξ_j 를 half-power 법[5]으로 산출하며 α , β 값은 1차 공진 주파수 ω_1 , 2차 공진 주파수 ω_2 를 이용하여 다음 관계식을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned} 2\xi_1 \omega_1 &= \alpha + \beta\omega_1^2 \\ 2\xi_2 \omega_2 &= \alpha + \beta\omega_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 유한요소해석

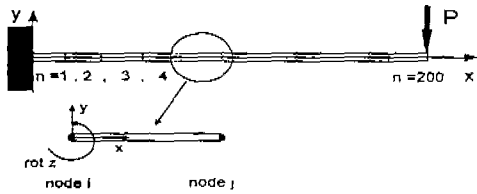


Fig. 1 FEM model

외팔보의 충격 횡진동거동을 수치해석하기 위해, 유한요소의 각 절점에서 3개의 자유도(변위 x , y 와 기울기 $\text{rot}z$)를 갖는 200개의 Euler-보 요소를 사용했다[3]. 시간 적분(Time integration)을 위해 Newmark 방식을 사용했으며, 유한요소 모델의 형상과 메쉬는 Fig. 1에 나타냈다. 이때, 보 구조물의 치수는 길이 230mm, 폭 10mm, 두께 1.5mm이다. 수치해석에서 사용한 감쇠 계수는 식(3)에 근거하여 다음식(6)과 같이 가정했다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6)$$

여기서 $[M]$ 은 질량 매트릭스, $[K]$ 는 강성 매트릭스이다.

3. 실험 방법

3.1 복합재료

본 실험에서 사용된 복합재료 판은 유리 지물/에폭시 프리프레그(한국화이버제 #118, 두께 0.18mm, 경사 34, 위사 34)를 단일 방향으로 12 플라이 적층하여 오토클레이브(autoclave)에서 제작했다. 경화사이클은 120°C에서 60분간 유통화한 후 170°C에서 60분간 경화시킴을 원칙으로 했다. 기공이 있는 시편의 경우 대기압 하에서 두께 3mm의 철판(자중에 의한 압력 236Pa)으로 적층판을 편평하게 압착하면서 경화시켰으며, 기공이 없는 경우에는 초기부터 진공 및 가압하여 기공을 제거하고 경화가 시작될 때 진공상태를 해제하여 제작했다. 적층판의 치수는 길이 330mm, 폭 215mm였으며 전자의 두께는 2.0mm, 후자의

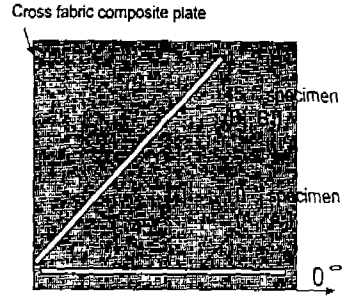


Fig. 2 Specimen preparation according to fiber orientation

두께는 1.75mm였다. 제작된 복합재료 판을 Fig. 2와 같은 각도로 다이아몬드 절단기를 이용하여 절단함으로써 일정한 섬유배향각도를 가지며 길이와 폭방향으로 동일하고 두께 방향으로 다른 기계적성질을 갖는 직교이방성 시험편을 만들었다. 시험편은 폭 10mm, 길이 230mm로 하였다.

3.2 충격굽힘실험

충격굽힘실험을 위해 Fig. 3와 같이 외팔보 시편에 2가지 종류의 하중을 가했다. 먼저 굽힘 탄성계수와 감쇠계수를 구하기 위해 하중을 일정하게 가하다가 갑자기 제거했다. 두 번째로 금속구를 시편에서 90mm, 920mm 떨어진 지점에서 자유 낙하시켰다. 시편 위의 타격 지점은 시편의 구속점으로부터 길이방향으로 225mm 떨어진 곳으로 시편 폭의 중앙위치이다. 시편의 횡방향 변위응답은 고정단에서 임의의 거리 $x=215\text{mm}$ 만큼 떨어진 지점에서 레이저 미소변위계를 이용하여 측정했다. 동적인 변위응답에 대해서는 FFT해석을 했다.

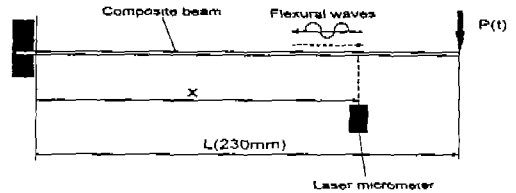


Fig. 3 Impact bending test

3.3 공진주파수와 감쇠계수 측정

감쇠계수는 다음 2가지 방법으로 측정하여 비교하고자 했다. 첫째, sine sweep 시험을 통해 주파수 응답함수(frequency response function)를 구하고 식(7)의 half-power 법[5]을 이용하여 실험적인 감쇠비를 구했다.

$$\xi_i = \frac{\Delta f}{2f_i} \quad (7)$$

여기서 f_i 는 공진주파수, Δf 는 공진폭의 0.707에 대응하는 공진주파수 전후의 주파수의 차이이다. 둘째, 일정하중을 가한 후 갑자기 제거(sudden load release)

한 뒤 발생하는 횡방향 동적변위응답의 실측곡선과 유한요소해석 상의 횡방향 동적변위응답곡선 사이의 미소 시간 별 오차량의 합계를 목적함수로 하고 식 (6)의 α , β 를 변수로 하는 최적화 기법[3]을 통해 목적함수가 최소가 되도록 α , β 값을 구했으며 식 (5)의 관계식을 이용하여 감쇠비(damping ratio ξ_1 , ξ_2)를 구했다. 공진주파수는 이론 및 유한요소해석과 실험을 통해 각각 동적변위응답을 구하고 FFT해석을 수행하여 구한 후 비교 분석했다. 감쇠가 있는 경우의 유한요소해석에서는 앞에서 구한 감쇠계수 α , β 값을 적용하여 공진주파수를 구했다. 감쇠가 고려된 공진주파수에 대한 이론값은 다음식(8)[4]으로 구했다.

$$f_{di} = \frac{\omega_n \sqrt{1 - \xi_i^2}}{2\pi} \quad (8)$$

4. 결과와 고찰

4.1 시험편의 내부구조

Table 1에 각 시험편 밀도 및 섬유와 기공의 체적 분율값을 나타냈다. 기공 없는 시험편의 V_m 는 약 61%, 기공 있는 시험편의 V_m 는 약 58%였다.

Table 1 Specimens and their microstructures

specimen	fiber direction	density (g/cm ³)	V_m (%)	V_f (%)	V_g (%)
A ₁	0°	1.672	57.78	37.11	5.11
A ₂	0°	1.762	60.89	39.12	0
B ₁	45°	1.617	57.96	34.87	7.16
B ₂	45°	1.742	62.44	37.56	0

4.2 탄성 및 감쇠계수

본 연구에서 사용하는 시험편, Fig.2에 나타난 바와 같이 시험편의 길이와 폭방향으로 동일한 내부구조와 성질을 나타내고 시험편 내부의 섬유직물층간에 수치 과다층이 부분적으로만 생성되어 종횡탄성계수비(길이방향 종탄성계수/두께방향 전단 탄성계수)가 2.2 - 5.0으로 추정되는, 세장비(길이/두께)가 약 115인 적층시험편이다. 따라서 시험편의 세장비가 종횡탄성계수비 보다 훨씬 크므로, 정적 굽힘거동 및 충격횡진동거동의 해석시에 적층판 내의 층간변형이나 두께방향의 전단변형을 시험편의 굽힘변형에 비교하여 무시할 수 있어서[6] Euler-보 이론 및 Euler-보 유한요소해석 결과를 실험해석 결과와 관련시킬 수 있다.

감쇠비는 sine sweep 실험에 의한 half-power 법으로 구한 결과와 최적화 기법을 이용한 수치적 접근 방법으로 구한 결과(optimization)로서 Table 2에 나타났다. 수치적 접근 방법으로 구한 감쇠비가 1차 모드만 있는 이유는 접근대상 실험을 위해 일정하중 후 갑자기 제거하는 하중(sudden load release)을 사용했는데 이 경우 1차 모드의 거동이 지배적이고 2차 모드 이상의 거동이 미미하여 감쇠계수를 구할 수 없었

다. half-power 법과 수치적인 기법으로 구한 1차 모드의 감쇠비는 2~10%차이로 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 실험시의 충격하중이력을 알고 대상구조물을 전산구조로 모델링하는 것이 가능하다면 실험결과와 수치해석 시뮬레이션의 비교를 통해 감쇠계수를 정확히 구할 수 있음을 나타낸다.

Table 2 Composite bending modulus, poisson's ratio and damping coefficient

Specimen	Bending modulus (GPa)	Poisson's ratio	Damping ratio (ξ_i)		
			Optimization method	Sweep test	
				ξ_1	ξ_1
A ₁	19.5	0.183	0.00241	0.00237	0.00191
A ₂	25.7	0.186	0.00236	0.00211	0.00193
B ₁	11.1	0.425	0.00623	0.00577	0.00441
B ₂	12.7	0.486	0.00591	0.00554	0.00475

4.3 공진 주파수

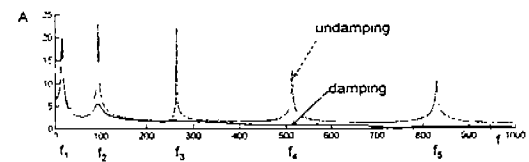


Fig. 4 FEM simulation result of damping effect on flexural vibration

Fig. 4은 유한요소해석에 의한 동적변위응답의 FFT 해석결과를 나타낸다. 감쇠가 없는 경우는 각 모드로 에너지(modal power)가 크게 분산 되고 있는 반면에 감쇠가 있는 경우에는 식(5), (6)으로 α 와 β 를 1차와 2차 공진주파수에 맞추어 보정하므로 3차 이상의 모드에선 과대 감쇠가 발생하여 에너지가 상실되고 1, 2차 모드에서만 에너지가 집중되어 있음을 알 수 있다. 이 두가지 예는 실제 구조물에서는 극단적인 경우라고 볼 수 있지만, 적어도 1차 모드와 2차 모드만을 수치해석으로 모델링할 경우엔 감쇠를 갖는 실제의 굽힘진동곡선에 근접될 수 있다.

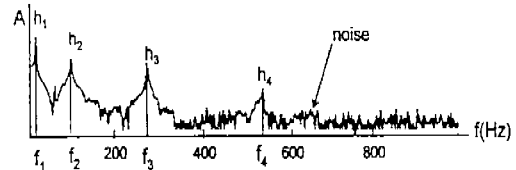


Fig. 5 Spectral analysis result of impactive vibrations due to steel-ball drop, h=920mm

Fig. 5는 시험에서 920mm 떨어진 위치에서 금속구를 자유낙하시킴으로써 실측한 FFT해석결과이다. 모달 에너지는 4차 모드까지 분포하고 있다. 5차 이상의 모드는 Noise level에 의해 나타나지 않았다.

Table 3 Comparison of resonant frequencies of specimen B₂, obtained by theory, FEM, experiment

frequency (f)	Undamped		Damped			
	Theor.	FEM	Theor.	FEM	Exp. h=90 (mm)	Exp. h=920 (mm)
f ₁	15.6	15.6	15.6	15.6	15.5	15.5
f ₂	97.7	97.7	97.7	97.7	97.6	99.3
f ₃	273.7	273.7	273.7	273.6	274.6	275.7
f ₄	536.4	536.8	536.2	536.0	538.7	541.5

Table 3에 이론해석, 수치해석 그리고 실험을 통해 구해진 공진 주파수를 나타냈다. 이론해석과 수치해석의 공진주파수가 매우 유사한 것으로 보아, 유한요소해석 시에 사용한 Euler-보 요소는 본 연구의 시편 형상에 대해 상당히 타당한 것으로 기대된다. 그러나 이들 해석결과는 금속구의 초기높이 h가 커지고 고차모드가 될수록 실험결과와 상당한 차이를 보인다. 이것은 이론해석과 유한요소해석에서는 1차원의 단순보 및 이상적 단위충격하중(unit impulse)을 적용했으나 실험에서는 두께 2mm, 폭 10mm의 다소 2차원에 해당하는 구조물과 금속구간의 충격접촉으로 동적인 국소변형과 다양한 공진모드가 발생하여 횡방향 동적 변형거동과 관련하였기 때문이라고 생각된다. Table 4는 실험에 의한 시편별 공진주파수와 모달진폭분산 결과이다. 실험조건은 920mm 높이에서 금속구 자유낙하를 이용한 충격으로 각 시편에 대해 동일했다. A₁, A₂의 공진 주파수가 각각, B₁, B₂의 공진 주파수보다 크게 나타나는 데 이는 섬유 배향이 시편의 길이 방향과 일치하여 강성이 크기 때문이다.

Table 4 Frequencies(f_i) and the corresponding modal amplitudes(h_i) for each specimen

spec.	f ₁	h ₁	f ₂	h ₂	f ₃	h ₃	f ₄	h ₄
A ₁	21.64	35.83	136.49	11.52	385.04	5.78	729.58	2.69
A ₂	20.53	44.16	122.06	15.54	338.99	5.09	660.79	3.90
B ₁	16.64	54.06	106.53	16.04	308.48	4.50	604.75	3.12
B ₂	15.53	58.07	97.65	16.88	274.63	4.65	538.73	3.24

한편, 모달진폭 분산(Fig. 8의 h₁, h₂, h₃, h₄)을 각 공진 주파수에 대응하도록 Table 4에 나타냈는데, A₁, A₂ 시편의 진폭이 B₁, B₂ 시편보다 매우 작은 이유는 A 시편의 강성이 커서 횡방향 변위가 작게 나오기 때문이다. 또한 감쇠가 큰 B 시편에서 기공의 유무에 따라 모달진폭의 차이가 작은 이유는 강성의 차이가 작았기(Table 2) 때문으로 생각된다. 공진주파수가 클수록 진폭값이 현저히 작아지는 것은 시편의 히스테리시스 손실에 따른 것이다[7]. 주파수의 증가

에 따른 진폭 값의 감소율의 정도는 B 시편면에서 더욱 커졌는데, 이는 감쇠계수가 A시편보다 1차와 2차 모드를 기준으로 약 2.5배 크면서 히스테리시스 손실에너지 U가 다음식(9)[7]에 의거하여

$$\Delta U = C_f N \epsilon_a^2 \quad (9)$$

(여기서 C_f는 주파수의 손실계수, N은 총사이클수, ε_a은 변형률진폭)모드별 주파수와 변형률 진폭의 제곱 값에 함께 의존함으로써 B시편의 고차모드에서 진동 감쇠가 매우 커졌기 때문으로 생각된다.

5. 결론

직물형 유리섬유강화에폭시(GFRP) 복합재료 보를 제작하여 섬유 배향각, 기공의 유무에 따른 횡충격 진동특성을 연구했다. 또한 Euler-보 이론과 유한요소 수치해석을 행하여 충격실험에 의한 횡방향 진동 변위응답과 비교 검토했다.

- (1) 동적 변위거동을 수치해석으로 수립시켜 구한 감쇠비는 sweep시험으로 구한 값과 유사했다.
- (2) 공진주파수의 경우에는 이론과 수치해석 결과는 거의 일치했으나, 실험 결과는 고차 모드로 갈수록 또한 충격 속도가 클수록, 해석 결과와 차이가 있었다.
- (3) 모달진폭 분산 정도는 충격하중시간과 재료의 강성, 감쇠계수에 크게 의존했다.
- (4) 횡충격에 의한 공진주파수와 감쇠계수, 모달진폭거동을 평가함으로써 복합재료 내의 섬유 배향각과 기공의 유무를 판단할 수 있음을 알았다.

참고 문헌

- (1) Johnson, W., Impact strength of materials, Edward Arnold, Ltd., London, 1972.
- (2) Lifshitz, M., "Impact strength of angle ply fiber reinforced materials", Journal of Composite Materials, Vol. 10, 1976, PP.92-100.
- (3) Ansys User's Guide for Revision 5.1, (1995), 2-1 ~ 3-139.
- (4) Rao, S., Mechanical Vibrations, U.S.A. : Addison-wesley Pub. 2nd. ed., 1990.
- (5) Thomson, W. T. and Dahleh, M. D., Theory of Vibration with Applications, 5th edition, Prentice-Hall, 1993, pp.72-75.
- (6) Choi, N. S., Yamaguchi, H. and Takahashi, K., "Fracture behavior of unidirectional commingled-yarn-based carbon fiber/polyamide 6 composite under three-point bending", Journal of Composite Materials, Vol. 30, 1996, pp.760-784.
- (7) Dowling, N. E., Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, 1993, pp.728-736.