

고속 헤들 프레임용 복합재료 샌드위치 보의 진동 특성에 관한 연구

이창섭 · 오제훈* · 이대길**

A Study on the Vibration Characteristics of the Composite Sandwich Beams for High-Speed Heddle Frame

Chang Sup Lee, Je Hoon Oh and Dai Gil Lee

Key Words: Slender Beam, Composite, Sandwich, Vibration, Natural Frequency, Damping.

Abstract

A heddle frame is the major part of a loom that produces woven cloth by insertion of weft yarns between warp yarns. Warp yarns are manipulated by many heddles fixed in a heddle frame. Recently, the up and down speed of heddle frames has been increased much for the increase of productivity, which induces higher inertial stresses and vibrations in the heddle frame. The heddle frame has the rectangular cross-section. For the design of box type beams of rectangular cross-section, extensional stiffness EA , flexural stiffness EI , and torsional stiffness GJ as well as the vibration characteristics are important and should be simultaneously considered. In this paper, the vibration characteristics of the composite and the composite sandwich beams for high-speed heddle frame were tested by impulse frequency response.

1. 서 론

일반적으로 직물은 경사 (Warp)와 위사 (Weft), 두 종류의 실로 짜여진다. 직물의 길이 방향으로 뻗어있는 실을 경사라 하며, 경사를 가로질러 통과하는 실을 위사라 한다. Fig. 1은 헤들 프레임 구조 (Heddle Frame Structure)의 개략도를 나타내며, Fig. 1에 나타난 것처럼 각각 경사는 헤들 (Heddle)의 눈 (Eye)에 삽입되어 헤들 프레임 (Heddle Frame)에 의해 지지되며, 헤들 프레임 하나 당 약 2000 가닥의 경사를 지지한다. 따라서 경사는 헤들 프레임에 의해 아래 위로 움직이며 그 사이로 위사가 지나간다 [1]. 상용 헤들 프레임의 구조는 두 개의 보 (Beam)와 스테이 (Stay), 조인트 (Joint)로 이루어져 있으며 두 개의 헤들

프레임은 스테이와 조인트에 의해 서로 고정된다. 일반적으로 알루미늄 헤들 프레임은 $9\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 의 단면을 가지며 길이는 2000 mm , 무게는 20 N 정도이다.

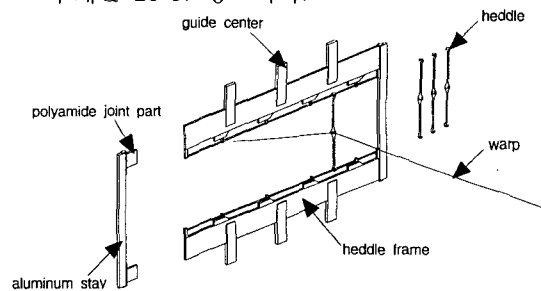


Fig. 1. Configuration of a heddle frame.

근래에 와서 고속 작동 캠 장치 (High-Speed Positive Cam Sytem)에 의해 구동되는 래피어 직기가 개발되어 제직 효율이 높아지고 고속 운전 시 안정화와 설계 자동화가 가능하게 되었다 [2].

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

과거에는 4 개의 헤들 프레임을 동시에 구동할 수 있는 태핏 캠 장치를 가진 직기가 200 rpm 으로 구동하였으나, 최근에는 12 개의 헤들 프레임을 동시에 구동할 수 있는 확동 캠 장치를 가진 직기에 의해 600 rpm 으로 구동하게 되었다. 캠 (Cam)의 회전 속도가 고속화 됨에 따라 헤들 프레임 (Heddle Frame)의 가속도 및 구동 속도가 증가하였기 때문에 헤들 프레임에 더 큰 응력과 진동이 발생하게 되었다. 따라서 헤들 프레임을 설계할 때, 비강도, 피로 특성 및 진동 특성을 고려하는 것이 중요하다.

탄소섬유 에폭시 복합재료 (Carbon Fiber Epoxy Composite Materials)는 높은 비강성 및 비강도나 타내며 우수한 피로 특성을 가지기 때문에 항공기 [3], 자동차 [4-5], 로봇 [6] 등 경량화가 요구되는 구조물의 제작에 사용되고 있다. 또한 고분자 기지재의 점탄성 성질과 섬유와 기지재 사이의 계면 특성으로 인하여 기존의 금속 재료에 비하여 약 10 배 이상의 높은 감쇠능을 갖는다 [7]. 이러한 특성은 구조물의 소음 및 진동 흡수에 유리하다.

고속 직기용 헤들 프레임에 탄소섬유 에폭시 복합재료를 적용하면 비강도 및 피로 특성에서 우수한 성능을 가지는 것으로 밝혀진 바 있다 [8]. 그러나 복합재료 보 구조물은 얇은 외벽을 가지므로 압축 하중을 받을 경우 좌굴이 발생하기 쉽다. 그러므로 중공형 복합재료 보에 샌드위치 구조를 적용하면 굽힘 강성 및 비틀림 강성이 증가하여 임계 좌굴 하중이 높아지는 장점이 있다 [9].

본 연구에서는 복합재료 보의 우수한 기계적 특성을 얻기 위해 샌드위치 구조를 적용하였을 경우, 진동 특성이 어떻게 달라지는가를 알아보고자 한다. Chang [10] 등은 이중 접합 구조물의 감쇠 특성에 대해 연구하였으며, Jeong [11] 등은 탄소섬유 에폭시 복합재료 보의 동특성에 대해 연구하였다. 샌드위치 구조를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 진동 특성이 어떻게 달라지는가를 비교하기 위하여 적층각 및 복합재료 적층판의 두께에 따른 중공형 복합재료 보와 샌드위치 복합재료 보를 제작하고 임펄스 주파수 응답 특성 (Impulse Frequency Response)을 관찰하였다.

2. 시편의 제작

2.1 중공형 복합재료 보 시편의 제작

중공형 복합재료 보 시편은 Fig. 2 와 같은 방법으로 제작하였다.

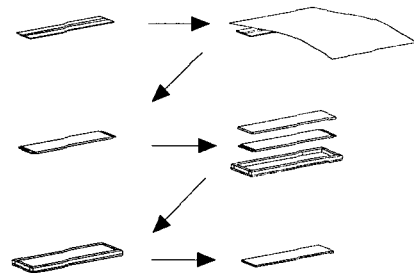


Fig. 2. Schematic diagram of the manufacturing procedure of the specimen.

탄소섬유 에폭시 프리프레그 (Prepreg)를 대칭 (Symmetric) 및 밸런스 (Balanced)가 되도록 $[\pm\theta]_s$ 로 적층한 후, 제품의 탈형을 용이하게 하기 위해서 Fig. 3 과 같은 분리형 맨드릴 (Mandrel)에 적층하였다.

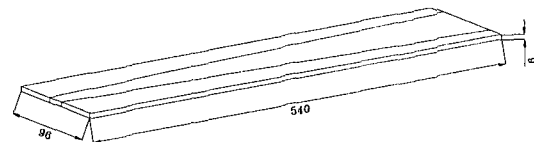


Fig. 3. Configuration of the mandrel.

오토클레이브 진공백 성형의 방법으로 Fig. 4 의 경화 사이클 (Cure Cycle)을 이용하여 경화시켰으며, 복합재료와 금속의 열팽창 계수의 차이로 맨드릴을 시편으로부터 분리하는 일이 어렵기 때문에 경화 후 온도가 내려가기 전에 복합재료 보와 맨드릴을 분리하였다. 보의 길이 방향으로 충분한 강도를 가지기 위해 시편의 적층각은 5° , 15° , 30° , 45° 로 결정하였으며, 시편의 두께는 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm로 결정하였다. 이것은 복합 적층판이 대칭 및 밸런스가 되도록 하기 위하여 두께가 0.125 mm 인 프리프레

그 (Prepreg)를 4 플라이 (Ply) 단위로 적층하였기 때문이다.

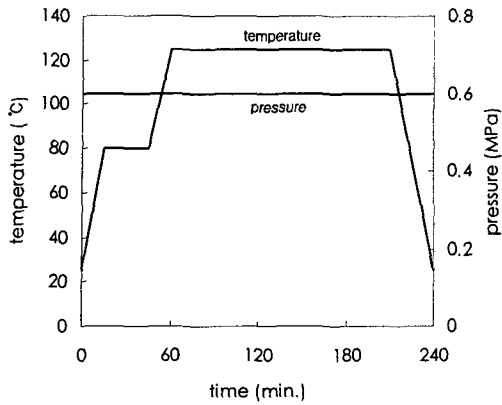


Fig. 4. Cure cycle of the carbon fiber epoxy prepreg (USN125).

2.2 복합재료 샌드위치 보 시편의 제작

샌드위치 보의 심재와 면재로 구성되며, 심재는 접착 면적이 넓고 가격이 싸면서 우수한 물성을 가지는 폴리우레탄 폼 (Polyurethane Foam)을 사용하였다.

폴리우레탄 폼은 폴리올 (Polyol)과 폴리아이소시아네이트 (Polyisocyanate)를 1 : 1로 섞어 사출하는 RIM (Reaction Injection Molding)의 방법으로 제작하였다. 폴리올과 폴리아이소시아네이트의 혼합액의 온도를 20°C로 유지하고 금형의 온도를 80°C로 유지한 상태에서 금형에 사출한 후 오토클레이브에서 80°C로 30분간 후경화시켜 완성하였다. 제작된 폴리우레탄 폼의 밀도는 370 kg/m³이었다. 제작한 폴리우레탄 폼을 맨드릴로 이용하여 동시경화 접착 방법으로 샌드위치 보를 제작하였다. 복합재료 샌드위치 보 시편의 제작 방법은 중공형 복합재료 보 시편과 마찬가지로 Fig. 2와 같이 제작하였다.

3. 진동 시험

3.1 이론

보의 고유 진동수는 보의 길이 방향의 굽힘 강성과 무게의 비에 관계하며, 보의 굽힘에 대한

지배방정식으로부터 다음과 같이 나타난다 [12].

$$f_n = \frac{X_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (1)$$

f_n 은 보의 고유 진동수를 나타내며, L 은 보의 길이, E, I, ρ, S 는 각각 보의 강성 및 관성 모멘트, 밀도, 단면적을 나타낸다. X_n 은 공진 시의 보의 굽힘 지배 방정식이 가지는 해로, 보의 경계 조건 및 진동 모드에 따라 다른 값을 가진다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 보의 길이 및 밀도가 일정할 경우, 보의 굽힘 강성과 면적의 비의 제곱근에 비례함을 알 수 있다. 또한 R.K.U. 방정식에서 고차항을 제거하여 유도된 이중 접합 구조물의 감쇠 계수는 다음과 같이 나타난다 [10].

$$\eta = \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \eta_1 + \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \eta_2 \quad (2)$$

η 는 이중 접합 구조물의 감쇠 계수를 나타내며, $\eta_1, \eta_2, E_1, E_2, I_1, I_2$ 는 각각의 감쇠 계수, 강성 및 관성 모멘트를 나타낸다. 식 (2)에서 이중 접합 구조물의 감쇠 계수는 각각의 굽힘 강성과 전체 굽힘 강성의 합의 비로 나타난다.

3.2 주파수 응답 특성

진동 시험을 통해 보의 임펄스 주파수 응답 특성을 측정하였다. FFT 신호 분석기 (FFT Signal Analyzer)와 임펄스 해머 (Impulse Hammer) 그리고 가속도계 (Accelerometer) 등을 이용하여 보의 고유 진동수 (Natural Frequency) 및 진동 감쇠 계수 (Damping Factor)를 측정하였으며, Fig. 5와 같이 진동 시험을 수행하였다.

가속도계 (Accelerometer Type 4374, B&K)를 보에 부착하여 수직 방향 및 가로 방향에 대하여 시험을 수행하였다. FFT 신호 분석기를 통해 얻은 가속도 신호는 단위 입력 힘 당 출력 가속도의 크기로 나타나며, 이것을 Inertance 또는 Accelerance라 한다. 신호의 절대값은 사용한 증폭기 (Amplifier)의 게인 (Gain) 값에 따라 변할 수 있는 값이므로 물리적으로 중요한 의미는 가

지지 않으며 진동 감쇠 계수를 구하기 위하여 상대적인 값만이 중요한 의미를 가진다.

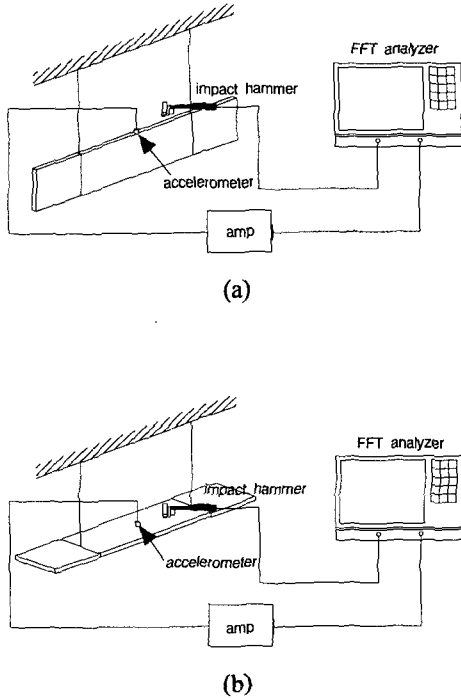


Fig. 5. Vibration test setup.
(a) vertical direction
(b) lateral direction

측정된 FFT 신호는 Fig. 6 과 같이 나타났으며, 적층각 및 두께에 따른 보의 고유 진동수 및 진동 감쇠 계수를 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 복합재료 보에 샌드위치 구조를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 진동 특성이 어떻게 달라지는가를 비교하기 위하여 적층각 및 복합재료 적층판의 두께에 따른 중공형 복합재료 보와 샌드위치 복합재료 보를 제작하고 임펄스 주파수 응답 특성을 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중공형 복합재료 보를 제작하고 수직 방향으로의 임펄스 주파수 응답을 관찰한 결과, 복합 적층판의 두께가 2.0 mm, 적층각이 15° 일 때 가장 높은 고유 진동수를 가졌으며, 감쇠비는 0.005~0.037 사이였다.

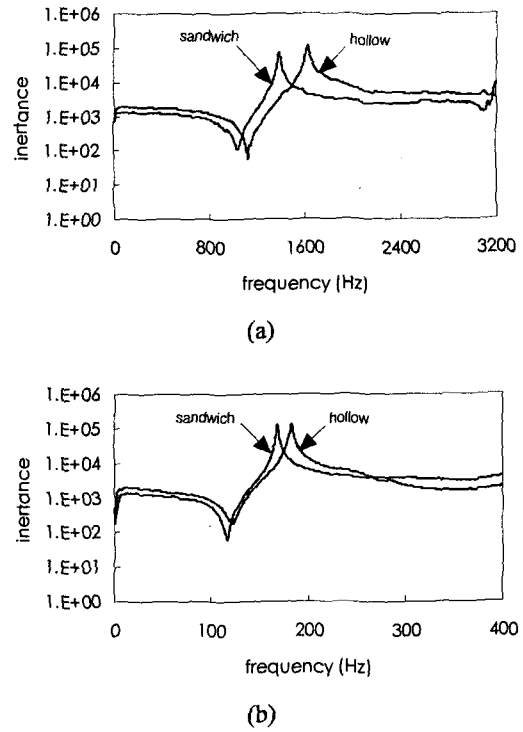
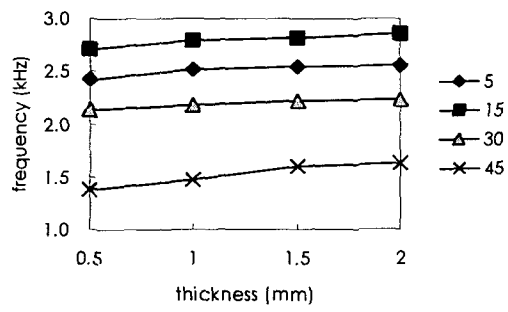


Fig. 6. Impulse frequency responses.
(a) vertical direction
(b) lateral direction

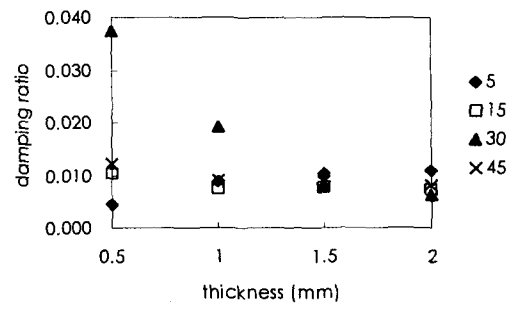
(2) 중공형 복합재료 보의 가로 방향으로의 임펄스 주파수 응답을 관찰한 결과, 복합 적층판의 두께가 2.0 mm, 적층각이 30° 일 때 가장 높은 고유 진동수를 가졌으며 감쇠비는 0.005~0.037 사이였다.

(3) 복합재료 샌드위치 보를 제작하고 수직 방향으로의 임펄스 주파수 응답 특성을 관찰한 결과, 복합 적층판의 두께가 2.0 mm, 적층각이 15° 일 때 가장 높은 고유 진동수를 가졌으며, 감쇠비는 0.003~0.008 사이였다.

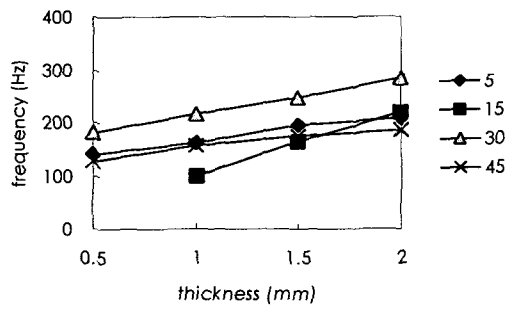
(4) 복합재료 샌드위치 보의 가로 방향으로의 임펄스 주파수 응답 특성을 관찰한 결과, 복합 적층판의 두께가 2.0 mm, 적층각이 5° 일 때 가장 높은 고유 진동수를 가졌으며, 감쇠비는 0.003~0.008 사이였다.



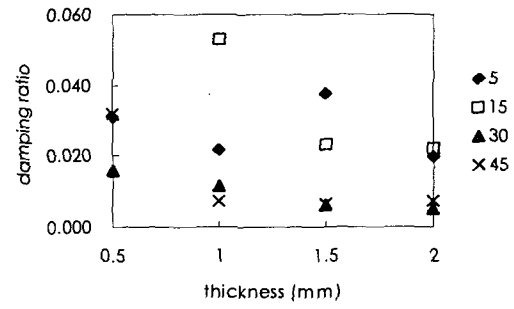
(a)



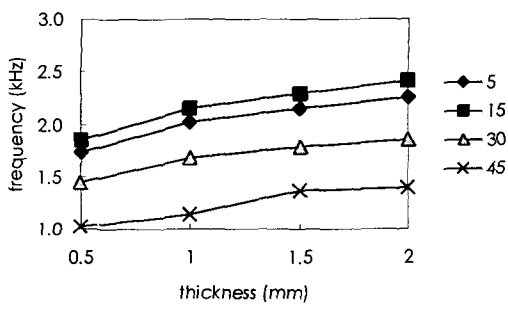
(a)



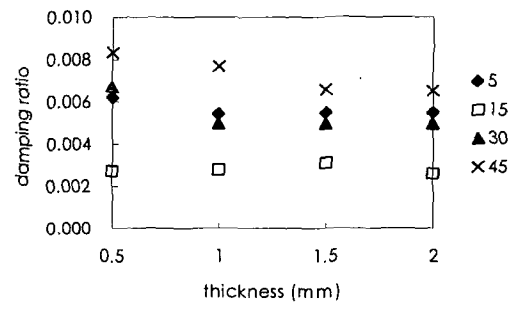
(b)



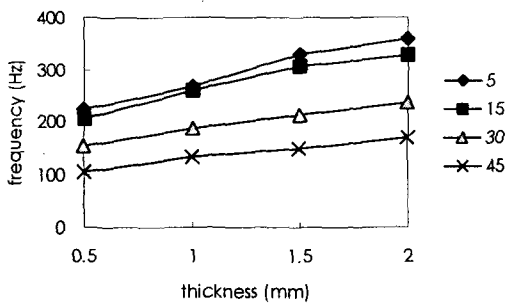
(b)



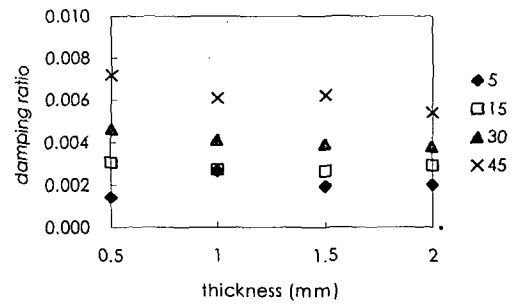
(c)



(c)



(d)



(d)

Fig. 7. Natural frequencies.

- (a) hollow beam in the vertical direction
- (b) hollow beam in the lateral direction
- (c) sandwich beam in the vertical direction
- (d) sandwich beam in the lateral direction

Fig. 8. Damping factors.

- (a) hollow beam in the vertical direction
- (b) hollow beam in the lateral direction
- (c) sandwich beam in the vertical direction
- (d) sandwich beam in the lateral direction

후 기

본 연구는 BK21 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) I. B. Wingate, *Textile Fabrics and Their Selection*, 7th Edition, 1976, Prentice-Hall, Inc., Chapter 4.
- (2) 한국기계연구원, *High Speed Positive Cam Shedding 기계 개발*, 통상산업부, 1996.
- (3) R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, 1994, Chapter 1.
- (4) S. S. Cheon, J. H. Choi and D. G. Lee, "Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars," *Composite Structures*, 1995, Vol. 32, pp. 491-499.
- (5) D. H. Cho, D. G. Lee and J. H. Choi, "Manufacturing of One-Piece Automotive Driveshafts with Aluminum and Composite Materials," *Composite Structures*, 1997, Vol. 38, pp. 309-319.
- (6) D. G. Lee, K. S. Kim and Y. K. Kwak, "Manufacturing of a Scara Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Materials," *Robotica*, 1991, Vol. 9, pp. 219-229.
- (7) 이대길, 정광섭, 최진호, *복합재료 역학 및 제조 기술*, 시그마 프레스, 1998, Chapter 1.
- (8) 이창섭, 정광섭, 오제훈, 이대길, "고속 직기용 탄소 섬유 에폭시 복합재료 헬드 프레임의 설계," *1999 복합재료학회 춘계학술발표대회 논문집*, 1999, pp. 129-134.
- (9) J. R. Vinson, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Technomic Publishing, Co., INC., 1999.
- (10) D. G. Lee, S. H. Chang and H. S. Kim, "Damping Improvement of Machine Tool Columns with Polymer Matrix Fiber Composite Material," *Composite Structures*, 1998, Vol. 43, pp. 155-163.
- (11) 정광섭, 이대길, 박윤근, "대칭 적층한 얇은 고강도 탄소섬유 에폭시 복합재 보의 기계적 동특성," *1994, 대한기계학회논문집*, 제 18 권, pp. 2123-2138.
- (12) F. C. Nelson, *Mechanical Vibrations for Engineers*, 1983, John Wiley & Sons, Chapter 4.