

고속 직기용 복합재료 헤들 프레임의 설계에 관한 연구

이창섭* · 오제훈* · 이대길**
(2000년 6월 3일 접수)

A Study on the Design of a High-Speed Heddle Frame

Chang Sup Lee, Je Hoon Oh and Dai Gil Lee

Key Words : Heddle Frame(헤들 프레임), Loom(직기), Fatigue(피로), Composite Materials(복합재료), Sandwich Structure(샌드위치 구조), Failure Load Map(파손 하중 맵).

Abstract

The up and down speed of heddle frames that produce woven cloth by insertion of weft yarns between warp yarns has been increased recently much for productivity improvement, which induces higher inertial stresses and vibrations in the heddle frame. The heddle frame is required to reduce its mass because the heddle frame contributes the major portion of the stresses in the heddle frames during accelerating and decelerating. Conventional aluminum heddle frames have a fatigue life of around 5 months at 550 rpm due to their low fatigue flexural strength as well as low bending stiffness. In this work, since carbon/epoxy composite materials have high specific fatigue strength(S/ρ), high specific modulus(E/ρ), high damping capacity and sandwich construction results in lower deflections and higher buckling resistance, the sandwich structure composed of carbon/epoxy composite skins and polyurethane foam were employed for the high-speed heddle frame. The design map for the sandwich beams was accomplished to determine the optimum thickness and the stacking sequences for the heddle frames. Also the effects of the number of ribs on the stress of the heddle frame were investigated by FEM analyses. Finally, the high-speed heddle frames were manufactured with sandwich structures and the static and dynamic properties of the aluminum and the composite heddle frames were tested and compared with each other.

1. 서론

일반적으로 직물을 제작할 때 사용되는 실(Yarn)은 경사(Warp)와 위사(Webt) 두 종류로 구분할 수 있다. 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

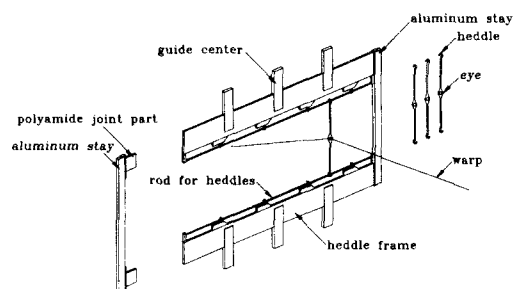


Fig. 1 Configuration of a heddle frame

* 한국과학기술원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : dglee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3221 FAX : (042)869-5221

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 2 kg 이다.

대표적인 무복직기(Shuttleless Loom)에는 래피어 직기(Rapier Loom), 그리퍼-복 직기(Gripper-Shuttle Loom), 제트 직기(Jet Loom) 등 세 종류가 있다. 이 중, 래피어 직기는 직기의 양 편에서 래피어에 의해 위사가 이송되는 방식으로 가장 널리 쓰인다.⁽²⁾ 근래에 와서 고속 확동 캠 장치(High-Speed Positive Cam System)에 의해 구동 되는 래피어 직기가 개발되어 제직 효율이 높아지고 고속 운전 시 안정화와 설계 자동화가 가능하게 되었다.⁽³⁾ 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. 따라서 고속화, 다양화, 조밀화 된 직조가 오늘날의 직기의 추세이다. 캠(Cam)의 회전 속도가 고속화 됨에 따라 헤들 프레임(Heddle Frame)의 가속도가 증가하였기 때문에 관성이 작고 강도 및 강성이 높은 헤들 프레임이 필요하게 되었다. 따라서 헤들 프레임을 설계할 때, 비굽힘강도(Specific Flexural Strength) 및 비피로강도(Specific Fatigue Strength)를 고려하는 것이 중요하다.

탄소섬유 에폭시 복합재료(Carbon Fiber Epoxy Composite Materials)와 같은 섬유 강화 고분자 기지 복합재료(Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Materials)는 기존의 금속 재료에 비하여 높은 비강성(Specific Stiffness, E/ρ)과 비강도(Specific Strength, S/ρ)를 나타내며 우수한 피로 특성을 가지기 때문에 항공기,⁽⁴⁾ 자동차,^(5,6) 로봇⁽⁷⁾ 등 경량화가 요구되는 구조물의 제작에 사용되고 있다. 또한 고분자 기지재의 점탄성 성질과 섬유와 기지재 사이의 계면(Interfacial) 특성으로 인하여, 기존의 금속 재료에 비하여 약 10 배 이상의 높은 감쇠능을 갖는다.⁽⁸⁾ 이러한 특성은 구조물의 소음 및 진동 흡수에 유리할 뿐만 아니라, 공진 현상 및 진동하는 구조물의 정정시간(Settling Time)을 감소시켜 피로수명(Fatigue Life)을 향상시킬 수 있다. 그리고, 장섬유 강화 고분자 복합재료는 섬유의 배열각도 및 플라이(Ply)의 적층 방법(Stacking Sequence)에 따라 기계적 물성을 조절할 수 있기 때문에 구조물의 사용 목적에 최적인 성질을 갖도록 제조할 수 있다.⁽⁹⁾ 이러한 고분자 복합재료의 장점을 이용하기 위하여 기존의 금속 구

조물을 섬유강화 고분자 복합재료 구조물로 대체하려는 일련의 노력들이 여러 산업 분야에서 진행되어 왔다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

샌드위치 구조(Sandwich Structure)는 면재(Face Materials)와 심재(Cores)로 이루어져 있다. 얇고 조밀하면서 높은 강도를 가지는 면재는 평면 내 하중(In-Plane Loads)이나 굽힘 하중(Bending Loads)을 견디는 역할을 하며, 밀도가 낮고 상대적으로 약한 심재는 면재와 강하게 결합하여 두께 방향으로의 전단 변형(Transverse Shear Deformation)을 줄여준다. 따라서 굽힘을 받는 구조물에 샌드위치 구조를 적용하려는 일련의 연구들⁽¹³⁻¹⁵⁾이 진행되어 왔으며, 샌드위치 구조를 적용하면 처짐량과 전단 응력이 줄어들고 좌굴 하중의 임계값이 높아지는 장점이 있다.

여러 연구자들의 연구를 통해 탄소섬유 에폭시 복합재료(Carbon/epoxy Composite Materials) 및 샌드위치 구조(Sandwich Structure)가 기존의 금속 재료에 비해 매우 우수한 기계적 성질을 가지는 것을 알 수 있었다. 기존의 알루미늄 헤들 프레임(Aluminum Heddle Frame)은 직기의 구동 특성상 그자중 때문에 피로 하중을 받으므로 낮은 관성(Low Inertia)과 피로에 대한 높은 내구성(High Fatigue Endurance)을 가지는 것이 유리하다.

본 연구에서는 Fig. 2 와 같은 순서로 탄소섬유 에폭시 복합재료 및 샌드위치 구조를 적용하여 고속 직기용 헤들 프레임(Heddle Frame for High-Speed Loom)을 설계하고 제작하고자 한다. 기존의 알루미늄 헤들 프레임의 수명을 평가하기 위하여 가속도계를 이용하여 실제 하중 이력을 측정하였다. 응력 해석을 통하여 가속도와 응력 간의 관계를 파악한 후, 레인플로우 카운팅 법(Rainflow Counting Method)과 팜그렌-마이너 법칙(Palmgren-Miner Rule)을 이용하여 헤들 프레임의 피로 수명(Fatigue Life)을 계산하였다. 또한 헤들 프레임의 설계에 응용하기 위하여 $10\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 의 단면을 가지는 중공형 복합재료 보(Hollow Composite Beam) 및 폴리우레탄 폼 샌드위치 보(Polyurethane Foam Sandwich Beam)의 파손 하중 맵(Failure Load Map)을 작성하였으며, 그 결과를 토대로 복합재료 헤들 프레임의 적층각(Stacking Angle) 및 복합 적층판의 두께를 결정하였다. 고강도 탄소섬유 에폭시 복합재료(High Strength Carbon Fiber Epoxy Composite Materials)와 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam)을 적용하여 헤들 프레임을 제작하였으며, 기존의 알루미늄 헤들 프레임과 비교하기 위하여 정적 및 동적 시험을 수행하였다.

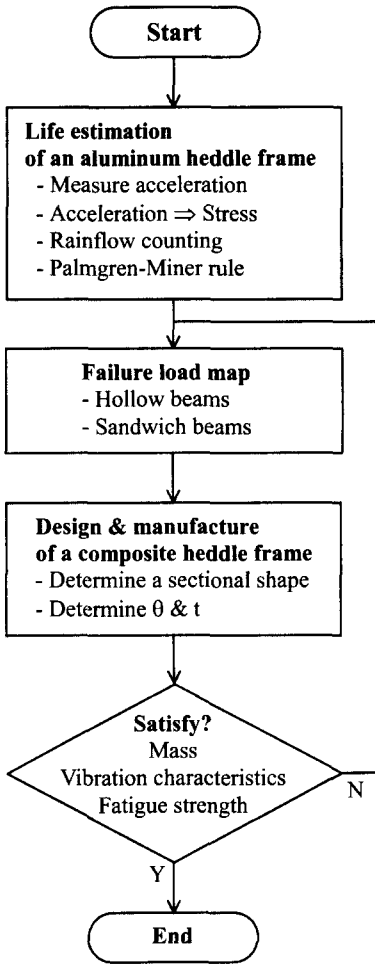


Fig. 2 Flow chart for the design of a composite heddle frame

2. 알루미늄 헤들 프레임의 수명 평가

구조물에 무작위 응력(Random Stresses)이 작용할 때, 수명을 평가하기 위하여 Rainflow Counting 법⁽¹⁶⁾과 Palmgren-Miner 법칙⁽¹⁷⁾이 가장 널리 쓰인다. Rainflow Counting 법은 무작위 신호의 반복 회수를 계산하는 방법으로 ASTM E1049-85에 잘 나타나 있으며, Palmgren-Miner 법칙은 구조물에 여러 응력 진폭을 가지는 응력이 작용할 때, 각 응력에서의 반복 회수와 피로 수명 간의 비율의 합이 1이 되면, 즉, 피로 수명의 100%가 고갈되면 피로 파괴가 발생하는 것을 의미하며, 다음과 같다.

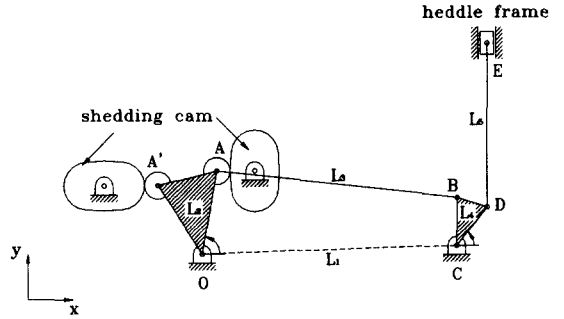


Fig. 3 Schematic diagram of a cam and link system

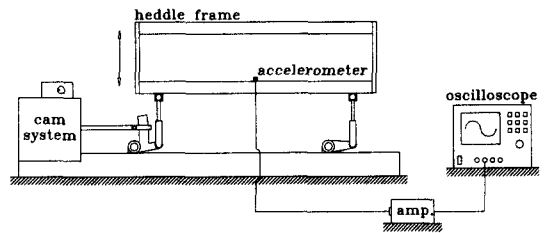


Fig. 4 Experimental setup for acceleration measurement with respect to the cam rotation speed

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = \sum \frac{N_j}{N_{fj}} = 1 \quad (1)$$

N_j, N_{fj} 는 각각 응력 진폭 σ_{aj} 에서의 사이클 수와 수명을 의미한다. 헤들 프레임(Heddle Frame)은 두 개의 확동 캠(Positive Cam)과 4절 링크(Four-Bar linkage)로 구성된 셰딩 캠 장치(Shedding Cam System)에 의해 구동한다. 두 개의 확동 캠은 각각의 주축에 설치되어 4절 링크를 움직인다. Fig. 3은 캠과 링크 장치의 개략도를 보여주며, 점 E는 헤들 프레임의 위치를 나타낸다.

헤들 프레임은 높은 가속도로 상하 운동을 반복하기 때문에 피로 하중을 받는다. 따라서 헤들 프레임의 피로 수명을 평가하기 위하여 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 하중 이력(Service Load History)을 측정하였다. Fig. 4는 가속도 측정 장치의 개략도를 보여준다.

헤들 프레임을 캠의 회전 속도를 제어할 수 있는 장치에 장착하여 캠의 회전 속도가 350, 450, 550 rpm 일 때의 1초 간의 가속도를 측정하였다. 헤들 프레임이 큰 가속도로 상하 반복 운동을 하기 때문에 헤들 프레임에 탭을 내어 나사 고정식 가속도계(Accelerometer, B&K Type 4371)을 부착하

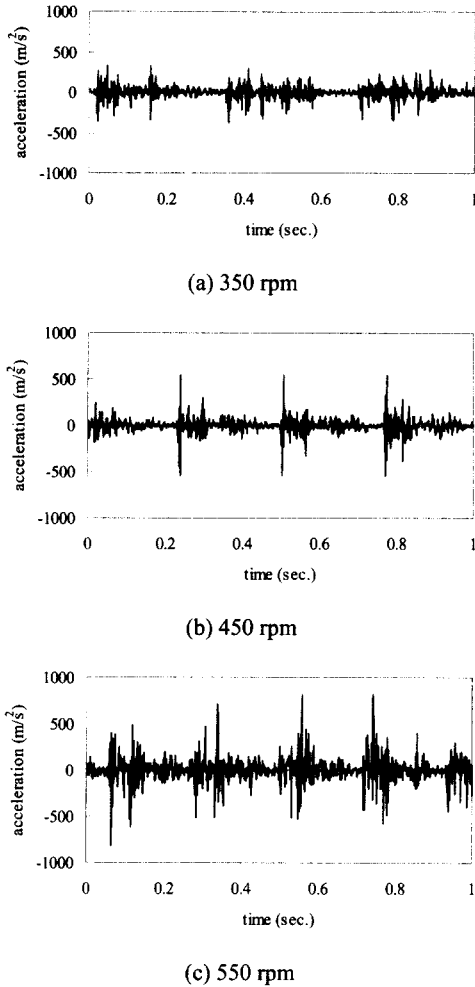


Fig. 5 Measured acceleration signals of the heddle frame for various cam rotation speeds

였으며, Fig. 5 는 캠의 회전 속도에 따른 측정된 가속도 신호를 보여준다.

가속도 측정 결과, 가속도 신호가 일정한 주기를 가지고 반복 구간이 나타났으며, 캠(Cam)의 회전 속도가 각각 350, 450, 550 rpm 일 때 0.341, 0.267, 0.218 초 마다 반복 구간이 나타났다. 가속도 신호는 헤들 프레임에 작용하는 관성 하중 뿐만 아니라 각 부품 간의 유격에 의한 충격과 다른 직기로부터의 진동 전파 등을 포함하므로 무작위 신호(Random Signal)를 나타내었다. 헤들 프레임의 실제 하중 이력을 얻기 위해서는 가속도를 작용 응력으로 변환해야 한다. 가속도 측정을 통해 얻은 신호를 응력으로 변환하기 위해서 가속도와 응력과의 관계를 알아야 하며, 이를 얻기 위하여

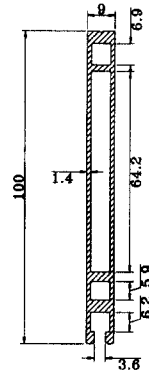


Fig. 6 Cross-sectional shape of the heddle frame

Table 1 Mechanical properties of aluminum and polyamide

Property	Al 6061	Polyamide
Tensile Modulus (GPa)	68.9	1.6
Poisson's Ratio	0.33	0.34
Density (kg/m ³)	2700	1130

상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ANSYS 5.3 을 이용하여 유한 요소 해석(Finite Element Analysis)을 수행하였다.

Fig. 6 은 상용으로 쓰이는 알루미늄 헤들 프레임의 단면 형상으로 헤들 프레임은 두 개의 판(Plate)에 네 개의 리브(Rib)가 삽입되어 있는 형태이다. Fig. 1 에 나타난 것처럼 두 개의 헤들 프레임을 서로 고정하기 위하여 알루미늄 스테이(Aluminum Stay)가 폴리아미드 조인트(Polyamide Joint)에 의해 고정되어 있다. 따라서 헤들 프레임의 경계 조건은 단순 지지 조건과 고정단 지지 조건의 중간 형태로 경계 조건이 불분명하기 때문에 스테이와 조인트를 포함하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석에 사용된 알루미늄⁽¹⁸⁾과 폴리아미드⁽¹⁹⁾의 물성은 Table 1 에 나타내었다.

헤들 프레임의 구조는 상하, 좌우 대칭이므로 헤들 프레임 구조의 1/4 만을 모델링(Modeling)하여 해석을 수행하였다. Fig. 7 은 헤들 프레임의 유한 요소 모델을 보여주며, 복잡한 단면 형상때문에 ANSYS 5.3 의 SOLID45 요소를 이용하여 모델링 하였다. SOLID45 요소는 3-D 구조 해석용 요소로 8 개의 절점으로 이루어진 요소이며, 3 자유도를 가지므로 각각의 요소는 x, y, z 방향으로의 변위를 표현할 수 있다.⁽²⁰⁾ 전체 절점(Node)의 개수는 19133 개이며 요소(Element)의 개수는 10764 개이다. 헤들 프레임의 각 부분의 절점과 유한 요소의

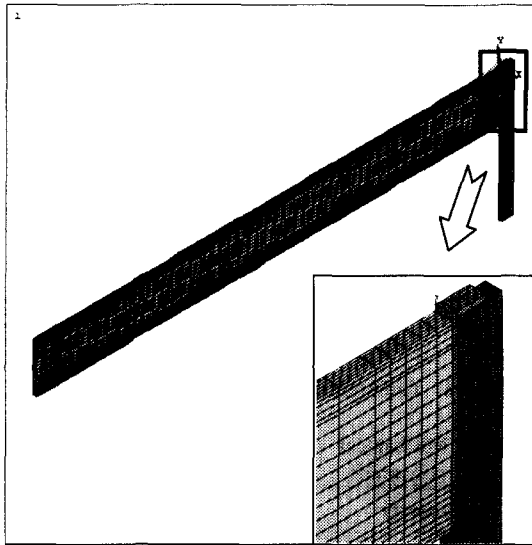


Fig. 7 Finite element model for the aluminum heddle frame

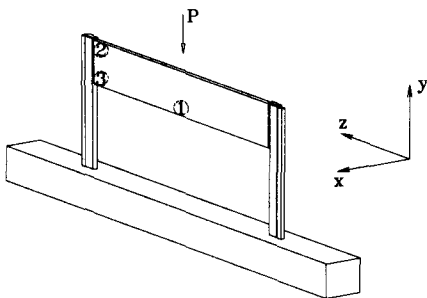


Fig. 8 Locations of strain gages for the validity test

개수를 Table 2 에 나타내었다.

헤들 프레임(Heddle Frame)과 조인트(Joint)는 서로 맞닿아 있으므로 유한 요소 모델에서 헤들 프레임과 조인트 사이의 절점(Node)은 같은 변위(Displacement)를 가지도록 커플링(Coupling)하였다. 그러나 하중이 작용하여 헤들 프레임이 변형을 일으키면 초기에 서로 접촉해 있던 헤들 프레임과 조인트 사이의 면 중에서 접촉하지 않는 부분이 생기기 때문에 반복 해석을 통해 접촉하지 않는 면의 절점은 커플링에서 제외하였다. 해석을 수행하여 헤들 프레임과 조인트 사이의 절점에서 의 힘(Nodal Force)을 살펴본 후, 인장력(Tensile Force)이 작용하는 부분을 커플링에서 제외하고 인장력이 작용하는 절점이 없을 때까지 반복 해석을 수행하였다.⁽²¹⁾ 조인트와 스테이는 기계적인 접

Table 2 Number of nodes and elements for the heddle frame analysis

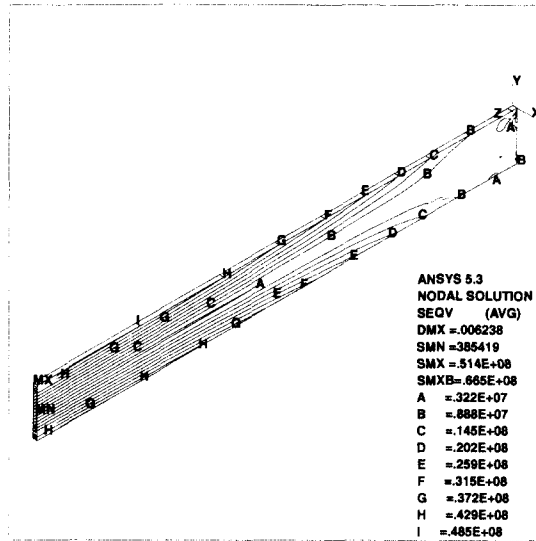
Part	Element Type	Node	Element
Heddle Frame	SOLID45	16160	8800
Joint	SOLID45	915	524
Stay	SOLID45	2058	1440
Total	-	19133	10764

Table 3 Comparison between the calculated and the measured strains

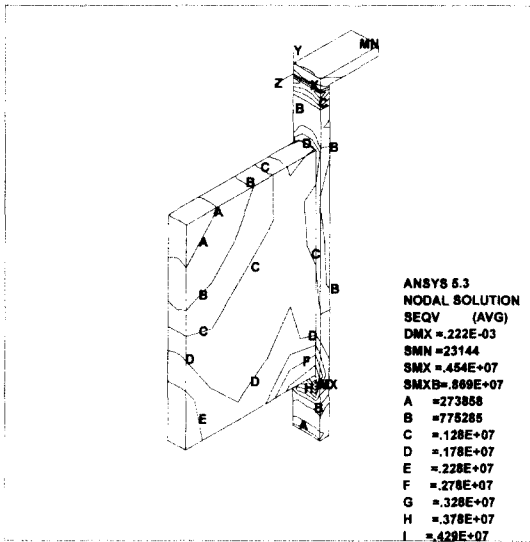
Position	Calculation	Measurement
Center ($\epsilon_{1y}, \mu S$)	79	76
Center ($\epsilon_{1y}, \mu S$)	236	227
Upper End Part ($\epsilon_{1y}, \mu S$)	2	5
Lower End Part ($\epsilon_{1y}, \mu S$)	31	38

합이 되어 있으므로 조인트와 스테이 사이의 면은 모두 접촉하고 있다고 가정하고 접촉면의 모든 절점을 같은 변위를 가지는 것으로 커플링 하였다. 전체 헤들 프레임 구조의 1/4 만을 유한 요소 모델에 포함하였으므로 헤들 프레임의 중앙부와 스테이의 중앙부에는 대칭 조건을 설정하였다. 또한, 헤들 프레임에 작용하는 가속도를 설정하여 헤들 프레임이 관성 하중을 받도록 하중 조건을 설정하였다.

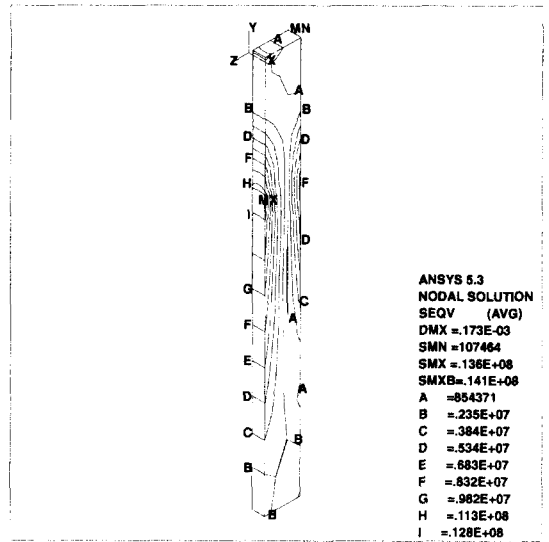
유한 요소 해석이 실제 상황과 잘 일치하는지 여부를 확인하기 위하여 검증 시험을 수행하였다. 길이 380 mm 의 헤들 프레임을 이용하여 굽힘 시험을 수행하였다. 충분한 굽힘 강성을 지닌 철 블록에 깊이 15 mm 의 구멍을 판 후 헤들 프레임을 스테이(Stay), 조인트(Joint)와 조립하여 삽입하였다. 직경 25 mm 의 로딩 지그>Loading Jig)를 이용하여 재료시험기(INSTRON 4206)에서 탄성 범위이내의 하중을 가하였다. 변형률 게이지(Strain Gauge)를 이용하여 각 부위에서의 변형률(Strain)을 측정하였다. 시험 속도는 1 mm/min 이었으며 변형률 측정 위치는 Fig. 8 과 같다. 1 번 위치에서는 이축 변형률 게이지를 사용하여 ϵ_{1y} 와 ϵ_{1z} 을 측정하였으며, 2 번과 3 번 위치에서는 ϵ_{2z} 와 ϵ_{3z} 를 측정하였다. 검증 시험을 통해 얻은 값과 유한 요소 해석을 통해 얻은 값과의 비교 값은 Table 3 에 나타내었다. 검증 시험을 통해 얻은 값과 유한 요소 해석을 통해 얻은 값은 잘 일치하였으며, 이로써 헤들 프레임의 유한 요소 모델과 경계 조건



(a) Heddle frame



(b) Joint



(c) Stay

Fig. 9 Stress contours on each component

이 실제 상황을 예측하기에 유효함을 확인할 수 있었다.

앞에서 설정한 유한 요소 모델과 경계 조건을 이용하여 알루미늄 헤들 프레임의 응력 해석을 수행하였다. 우선, 높은 가속도에 의한 관성 하중 외에 헤들 프레임의 자중과 헤들(Heddles) 및 경사(Warps)의 자중이 헤들 프레임에 유발하는 응력의 영향을 알아보기 위하여 각각의 경우에 대하여 응력 해석을 수행하였다. 헤들 프레임의 자중과 헤들과 경사의 자중에 상당하는 하중은 각각 10 N/m

와 50 N/m 이다. 또한, 캠의 회전 속도가 550 rpm 일 때 가속도가 817 m/s^2 이었고 헤들 프레임의 단위 길이 당 자중이 1 kg/m 이기 때문에 관성 하중에 의해 헤들 프레임에 작용하는 하중은 817 N/m 이다. 해석 결과, 헤들 프레임의 자중 및 헤들과 경사의 자중에 의해 유발되는 응력은 관성 하중에 의해 유발되는 응력에 비해 매우 미소하여 무시할 만하며, 각각의 경우에 대해 헤들 프레임에 작용하는 최대 응력은 Table 4 에 나타내었다.

Fig. 9 는 헤들 프레임에 최대 가속도인 817 m/s^2 가 작용하였을 경우의 각 부품의 응력 분포를 나

Table 4 Maximum stresses of the component of the heddle frame

Load Type	Heddle Frame (MPa)	Joint (MPa)	Stay (MPa)
Weight of Heddle Frame	0.6	0.05	0.16
Weight of Heddle and Warp	2.8	0.2	0.7
Inertial Force	51.4	4.5	13.6

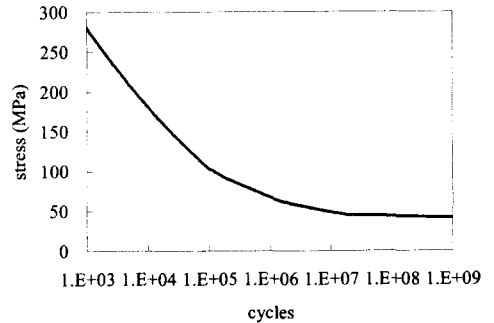
Table 5 Estimated life of the aluminum heddle frame for various cam rotation speeds

Cam Rotation Speed	Cycles	Years
350 rpm	1.0×10^{29}	2.8×10^{20}
450 rpm	6.5×10^{19}	1.4×10^{11}
550 rpm	2.5×10^8	4.3×10^1

타낸다. 최대 응력은 헤들 프레임의 중앙부에서 발생하며 단면의 맨 위 부분과 맨 아래 부분에 응력이 집중되는 것으로 보아 헤들 프레임의 굽힘이 발생함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 헤들 프레임 양 끝 단의 경계 조건은 고정단 지지 조건 보다는 단순 지지 조건에 가깝다는 것을 알 수 있었고, 또한 조인트(Joint)와 스테이(Stay)에서의 응력 수준은 매우 낮아서 무시할 만 하였다. 응력 해석을 통하여 가속도와 응력 간의 관계를 얻었으며, 하중 이력 측정을 통해 얻은 값을 Palmgren-Miner 법칙에 적용하여 알루미늄 헤들 프레임의 피로 수명을 평가하였다.

Fig. 10 에 나타난 Al6061-T6 의 S-N 곡선⁽²²⁾과 Palmgren-Miner 법칙을 이용하여 캠의 회전 속도가 350, 450, 550 rpm 인 경우의 알루미늄 헤들 프레임의 수명을 계산하였으며, 그 결과는 Table 5 에 나타내었다.

알루미늄 헤들 프레임(Aluminum Heddle Frame)의 피로 수명 평가를 통해 피로 수명은 약 5 개월임을 예측할 수 있었고, 섬유 기계 업계에서는 캠의 회전 속도가 550 rpm 일 때 알루미늄 헤들 프레임의 수명은 6-12 개월인 것으로 보고되었다. 따라서 알루미늄 헤들 프레임의 수명 평가 결과가 실제 상황과 잘 일치함을 알 수 있었다. 현재, 제작의 생산성 향상을 위해 래피어 직기의 속도가 증가 추세에 있으므로 알루미늄 헤들 프레임은 캠의 회전 속도가 500 rpm 이상인 고속 래피어 직기

**Fig. 10** S-N curve of Al6061-T6 at room temperature

에 적합하지 않다. 탄소섬유 에폭시 복합재료 (Carbon Fiber Epoxy Composite Materials)는 알루미늄에 비해 높은 비강도 및 비강성을 가지고 있으며 피로 특성이 좋으므로 탄소섬유 에폭시 복합재료를 적용하여 헤들 프레임용을 제작하면 알루미늄 헤들 프레임보다 우수한 성능을 나타낼 수 있다.

3. 파손 하중 맵

일반적으로 보 구조물을 설계할 때, 과도한 응력이나 처짐량 혹은 공진이나 좌굴에 의해 파손을 고려해야 한다. 샌드위치 구조는 두께 방향으로의 전단(Transverse Shear)을 심재가 지지하여 처짐량이 줄어들고 임계 좌굴 하중(Critical Buckling Load)이 높아지는 등의 이점이 있으므로 보 구조물의 설계에 많이 적용된다.⁽²³⁾ 따라서, 헤들 프레임용 보의 설계에 적용하기 위하여 보 구조물의 파괴(Fracture) 및 좌굴(Buckling)에 샌드위치 구조가 미치는 영향을 조사하기 위하여 두 종류의 보 시편을 제작하고 시험하고, 그 결과를 이용하여 파손 하중 맵(Failure Load Map)을 작성하였다.

6 mm × 96 mm 의 단면을 가지는 맨드릴을 이용하여 중공형 보 시편과 샌드위치 보 시편을 제작하였다. 보 시편의 크기는 일반적인 헤들 프레임용 보에 적용할 수 있도록 크기를 결정하였다. 보 시편은 탄소섬유 에폭시 복합재료와 폴리우레탄 폼을 이용하여 제작하였으며, 탄소섬유 에폭시 복합재료와 폴리우레탄 폼의 물성은 각각 Table 6 과 Table 7 에 나타내었다.

St. Venant 의 원리에 의하면 보의 중앙에서 일정한 응력을 받기 위해서는 보의 길이는 단면 치수 길이의 두 배 이상이 되어야 하며, 굽힘 시험을 하는 경우에 단보 전단의 영향을 피하기 위해서는

Table 6 Mechanical properties of the carbon / epoxy composite materials

Property	Longitudinal Direction	Transverse Direction
Tensile Strength (MPa)	1800	60
Compressive Strength (MPa)	1100	200
Shear Strength (MPa)	75	-
Tensile Modulus (GPa)	130	8
Shear Modulus (GPa)	4.5 (G_{12})	3.5(G_{23})
Poisson's Ratio	0.28(ν_{12})	0.40(ν_{23})
Fiber Volume Fraction (%)	60	-
Density (kg/m^3)	1550	-

Table 7 Mechanical properties of the polyurethane foam

Property	Value
Tensile Strength (MPa)	4.9
Compressive Strength (MPa)	4.2
Shear Strength (MPa)	2.1
Tensile Modulus (MPa)	401
Shear Modulus (MPa)	143
Poisson's Ratio	0.385
Density (kg/m^3)	370

보의 길이가 단면 치수의 네 배 이상이 되어야 한다.^(24,25) 따라서 보의 길이를 500 mm, 스패 길이 (Span Length)는 400 mm 로 결정하였다.

Fig. 11 은 중공형 보 시편의 제작법을 나타낸다. 탄소섬유 에폭시 프리프레그(Prepreg)를 대칭 (Symmetric) 및 밸런스(Balanced)가 되도록 $[\pm\theta]_s$ 로 적층한 후, 제품의 탈형을 용이하게 하기 위해서 분리형 맨드릴(Mandrel)을 이용하였다. 맨드릴 위에 적층된 프리프레그를 툴 플레이트(Tool Plate)에 놓고 네 개의 댐(Dam)으로 둘러싼 후, 오토클레이브 진공백 성형법(Autoclave Vacuum Bag Process)으로 시편을 경화시켰다.

적층각은 Fig. 12 에 나타난 것과 같이, 보의 길이 방향과 탄소섬유 방향이 이루는 각으로 정의된다. 복합재료는 섬유 방향으로의 강성 및 강도가 좋으므로 구조물에 적용할 때 일반적으로 적은 적층각을 가지도록 제작한다. 따라서 시편의 적층각은 5°, 15°, 30°, 45° 로 결정하였다. 시편의 두께는

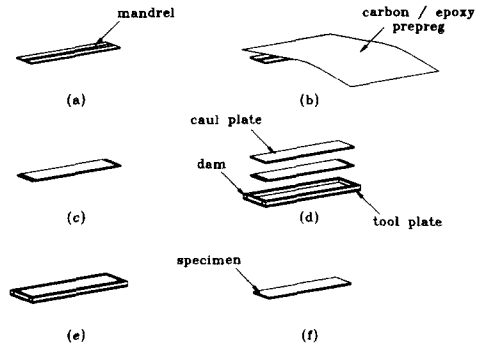


Fig. 11 Manufacturing procedure of the hollow beam specimen

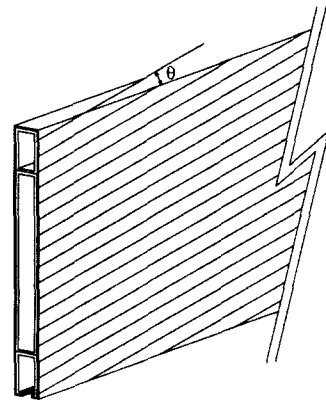


Fig. 12 Stacking angle of the specimen

0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm 로 결정하였다. 이것은 복합 적층판이 대칭 및 밸런스가 되도록 하기 위하여 두께가 0.125 mm 인 프리프레그(Prepreg)를 4 플라이(Ply) 단위로 적층하였기 때문이다. 샌드위치 보 시편은 중공형 보 시편과 같은 방법으로 제작하였으나, 금속 맨드릴(Mandrel) 대신에 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam)을 맨드릴로 이용하여 제작하였다.

보가 견딜 수 있는 수직 임계 하중을 구하기 위하여 Fig. 13 과 같은 지그(Jig)를 이용하여 굽힘 시험을 수행하였다. 로딩 지그(Loading Jig)는 시편에 분포 하중을 고르게 줄 수 있도록 강철 보 (Steel Bar)와 얇은 고무 판(Rubber Plate)과 우레탄 판(Urethane Plate)으로 이루어져 있다. 강철 보는 충분한 굽힘 강성을 가지도록 두껍게 ㄷ 자 형으로 제작하였으며, 강성이 작고 변형이 큰 고무 판을 안쪽에 넣고 바깥 쪽에는 마찰이 적은 우레탄 판을 이용하였다. 또한 받침 지그(Jig)는 시편에 비해 충분한 굽힘 강성을 가지도록 제작되었으며,

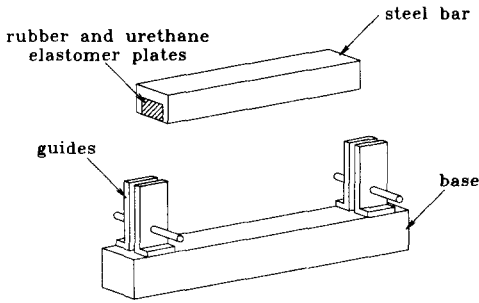
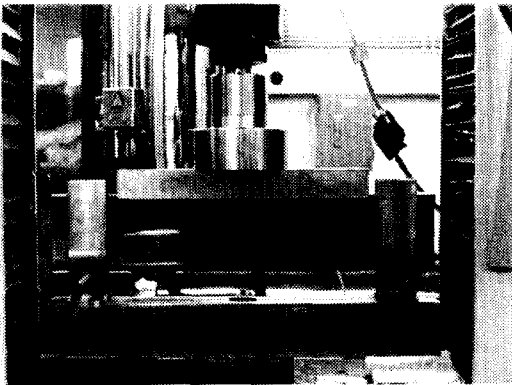
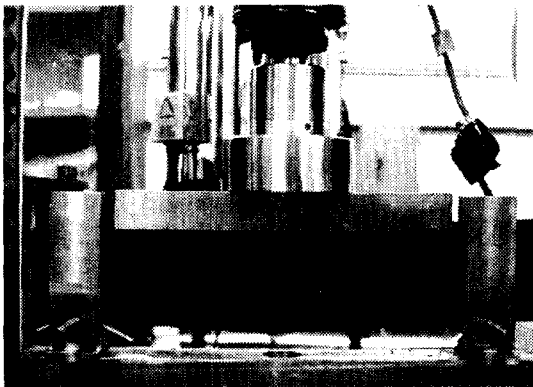


Fig. 13 Schematic diagram of the loading bar and bending jig



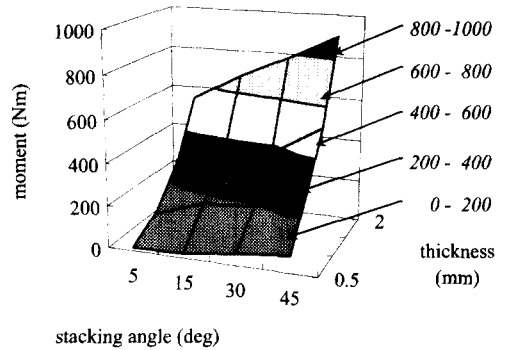
(a) Buckled



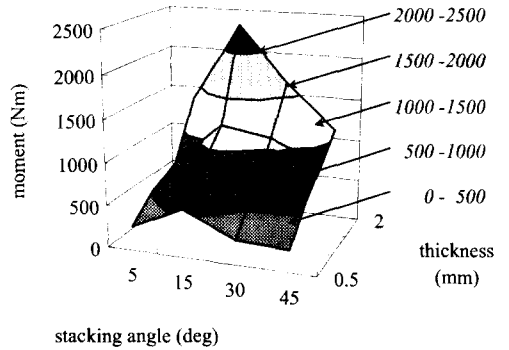
(b) Fractured

Fig. 14 Photographs of the buckled and fractured specimens

시편이 시험 도중 쓰러지거나 튀어나가지 않도록 가이드가 설치되어 있다. 가이드에 직경 12 mm의 구멍을 가공하고 연마판을 삽입하여 시편이 굽힘을 받을 때 보의 아래 편에 단순 지지 조건을



(a) Hollow beams



(b) Sandwich beams

Fig. 15 Failure load map with respect to the thickness and stacking sequences of $[\pm\theta]_n$ s

갖도록 하였다. 보의 아래 편 지지부에는 시편의 표면을 보호하고 하중이 고르게 분포할 수 있도록 알루미늄 탭(Tab)을 사용하였다. 재료시험기(INSTRON 4206)를 이용하여 하중을 가하였으며, 시험 속도는 1 mm/min 이었다. Fig. 14 는 보 시편의 좌굴 및 파괴 모습을 보여준다.

탄소섬유 에폭시 복합재료(Carbon / Epoxy Composite Materials)와 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam)으로 중공형 보 및 샌드위치 보를 제작하여 굽힘 시험을 수행하였다. 중공형 보는 보의 웹에서 좌굴이 발생하여 파손되었으며, 샌드위치 보는 5° 시편에서만 좌굴이 발생하였으며, 나머지 시편에서는 굽힘에 의한 파괴가 발생하였다. 시험 결과를 토대로 파손 하중 맵을 작성하였으며, 파손 하중 맵은 보에 파손이 발생할 때 작용하는 최대 모멘트를 두께 및 적층각에 대하여 Fig. 15 와 같이 나타내었다.

4. 복합재료 헤들 프레임의 설계

기존의 알루미늄 헤들 프레임의 수명 평가 결과와 파손 하중 맵을 이용하여 복합재료 헤들 프레임을 설계하였다. 헤들 프레임의 단면은 얇은 두 장의 판과 리브(Rib)로 구성되어 있으며 헤들(Heddle)을 장착하기 위하여 아래 부분에 열린 단면을 가지고 있는 복잡한 형태로 되어있다. 또한, 헤들 프레임은 스테이와 조인트로 결합되어 있으며, 높은 가속도로 상하 운동을 반복하므로 관성에 의한 굽힘 응력의 형태로 피로가 작용한다. 따라서 복합재료의 섬유 방향을 보의 길이 방향으로 배열하여 피로에 강하도록 하는 것이 유리하며, 관성 하중이 작용하므로 헤들 프레임의 단면적을 줄여 자중을 줄이는 것이 중요하다. 본 장에서는 헤들 프레임의 단면에서 리브 개수를 결정하여 단면을 결정한 다음, 파손 하중 맵을 이용하여 적층판의 두께 및 적층각을 결정하는 방법으로 헤들 프레임을 설계하였다.

복합재료 헤들 프레임의 적층각 및 두께를 결정하기 위해서는 기준 모멘트를 결정하여 파손 하중 맵에서 만족하는 점을 찾지만 하면 된다. 기준 모멘트는 헤들 프레임의 자중과 가속도와 관계가 있으며, 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m = (\rho_c A_c + \rho_f A_f) L$$

$$M_o = \frac{wL^2}{8} = \frac{m a L}{8} \tag{2}$$

m 은 복합재료 헤들 프레임의 자중으로 탄소섬유 에폭시 복합재료의 자중과 폴리우레탄 폼의 자중의 합으로 표현되며, 중공형일 경우에는 폴리우레탄 폼의 자중을 0 으로 가정할 수 있다. ρ_c 및 A_c 는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 밀도 및 단면적을 나타내며, ρ_f 및 A_f 는 폴리우레탄 폼의 밀도 및 단면적을 나타낸다. 기준 모멘트 M_o 는 분포 하중이 작용하는 단순 지지 보의 모멘트를 표현한 것이며, a 는 헤들 프레임에 작용하는 가속도, L 은 헤들 프레임의 길이를 나타낸다. 1000 rpm 으로 구동하는 직기를 기준으로 각각의 기준 모멘트를 계산하고 파손 하중 맵에서 만족하는 값을 찾아본 결과, 중공형 복합재료 보의 파손 하중 맵에서는 임계 하중을 만족하는 지점을 찾을 수 없었으며, 샌드위치 보의 파손 하중 맵에서는 복합 적층판의 두께 1 mm, 적층각 15° 인 경우와 두께 1.5 mm,

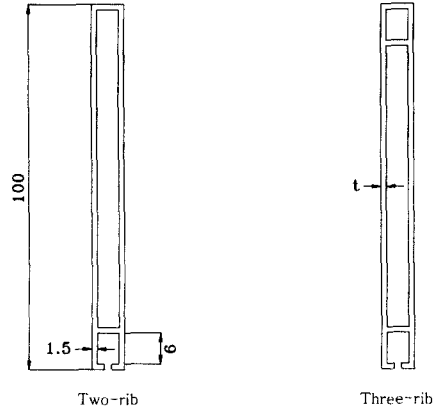
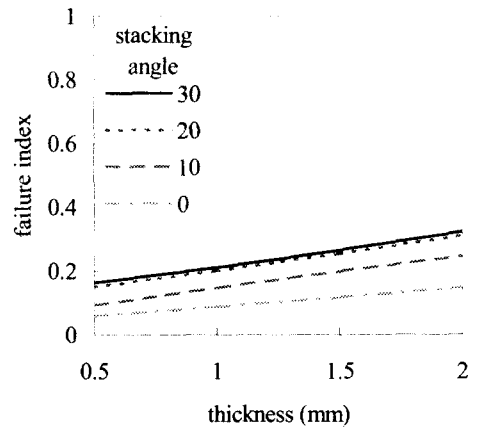
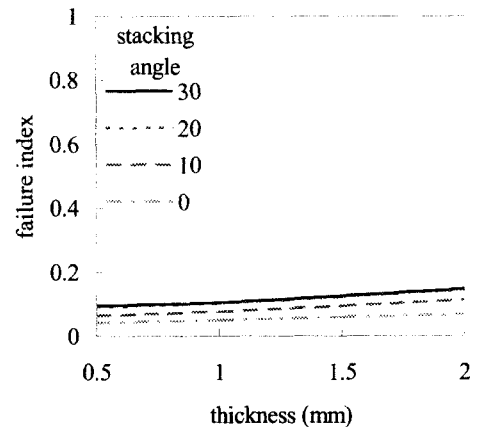


Fig. 16 Cross-sectional shapes of the composite heddle frames with a different rib configuration



(a) Two-rib section



(b) Three-rib section

Fig. 17 Failure indices with respect to thickness and stacking angles

적층각 15°~30° 인 경우 및 두께 2 mm, 15°~30° 인 경우에 만족하는 값을 찾을 수 있었다. 헤들 프레임에 작용하는 하중은 판성 하중이므로 헤들 프레임의 자중은 작을수록 좋다는 점을 고려할 때, 샌드위치 구조를 적용하여 복합 적층판의 두께 및 적층각을 각각 1 mm, 15° 로 결정하였다.

헤들 프레임의 단면은 얇은 두 개의 판과 여러 개의 리브로 구성되어 있다. 헤들 프레임은 굽힘을 받으므로 질량을 아래 위로 편중 시키는 것이 유리하다. 또한, 헤들 프레임에 헤들을 장착하기 위해서는 헤들 프레임 단면의 맨 아래 부분은 열린 단면이어야 하며, 단면 아래 부분에 최소 6 mm 높이의 공간이 필요하다. 따라서 리브는 최소 2 개 이상이 필요하며, 굽힘을 받는 구조로 되어있기 때문에 리브를 대칭적으로 배열하는 것이 유리하다. Fig. 16 은 리브 개수에 따른 복합재료 헤들 프레임의 단면을 보여준다.

복합재료 헤들 프레임의 적당한 단면을 결정하기 위하여 리브 개수에 따른 Tsai-Wu 파괴 지수를 계산하였다. 리브 개수에 따른 복합재료 헤들 프레임의 Tsai-Wu 파괴 지수는 Fig. 17 과 같다.

파괴 지수를 살펴보면, 리브가 세 개인 경우 더 작은 값을 가졌으며 적층각이나 두께에 따른 파괴 지수의 변화가 작았다. 리브가 네 개인 경우는 네 번째 리브가 단면의 가운데에 위치하여 굽힘을 받을 경우 이득이 없으며, 리브가 세 개인 경우에 비하여 제작 공정이 복잡해진다. 따라서 본 연구에서는 복합재료 헤들 프레임의 리브 개수를 세 개로 결정하였다.

복합재료 헤들 프레임의 설계를 통해 결정된 값이 실제로 유용한가를 판단하기 위하여 직접 복합재료 헤들 프레임을 제작하였다. 복합재료 헤들 프레임의 제작 과정은 두 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 세 개의 내부 빔을 각각 제작하는 단계이며, 두 번째 단계는 바깥쪽에 복합 적층판을 적층하여 경화시키는 단계이다. 이러한 두 단계의 과정을 거치는 이유는 단면에 리브(Rib)를 가지기 때문이다.

Fig. 18 에 나타난 것처럼 폴리우레탄 폼에 $[\pm 15]_2$ 로 적층된 복합 적층판을 적층한 후, 오토클레이브 진공백 성형법(Autoclave Vacuum Bag Degassing Molding)으로 경화시켰다. 이 때, 폴리우레탄 폼과 복합재료의 접착 방식은 동시경화법(Co-Curing)을 이용하였고, 진공 및 3 기압의 외부 압력을 가해주었다. 그리고 나서 각각의 보를 80 매쉬 사포로 표면 처리한 후,⁽²⁷⁾ 필름 접착제를 이용하여 접착하고 바깥쪽에 $[\pm 15]_2$ 로 적층한 복합 적층판을

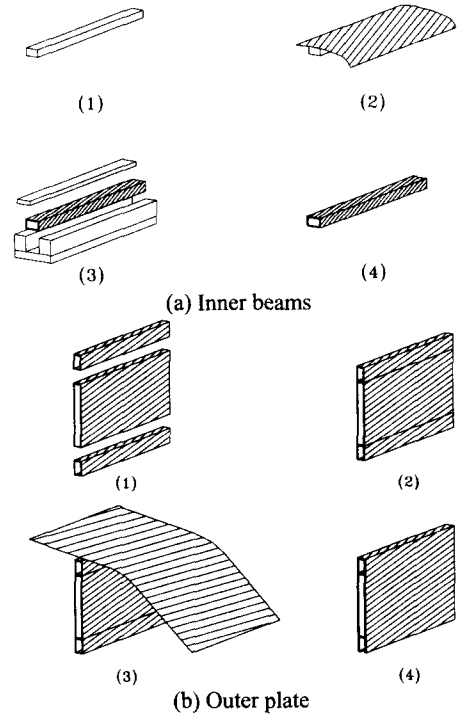
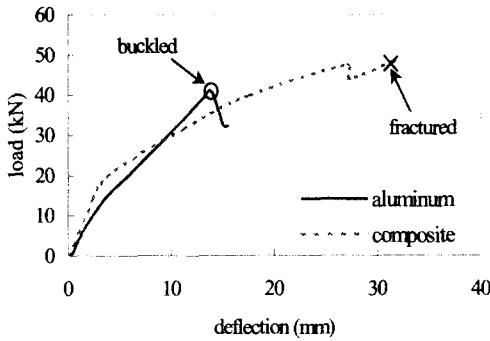


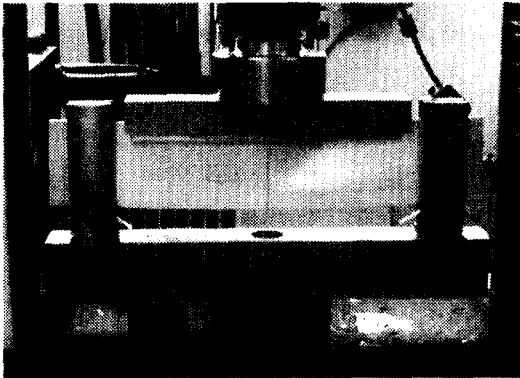
Fig. 18 Manufacturing procedure of the composite heddle frame

적층하여 다시 경화시켰다. 마지막으로 아래 부분에 절단 연삭의 방법으로 홈을 내어 헤들 장착부를 완성하였다. 제작된 헤들 프레임의 무게는 0.280 kg 이었으며 이것은 알루미늄 헤들 프레임의 무게의 57 % 에 해당한다. 따라서 직기 구동 시 복합재료 헤들 프레임에 작용하는 최대 응력은 알루미늄 헤들 프레임에 작용하는 최대 응력의 69 % 수준이 된다. 헤들 프레임에 작용하는 가속도는 캠의 회전 속도의 제곱에 비례하므로 캠이 1000 rpm 의 속도로 회전할 경우 헤들 프레임에 작용하는 가속도와 최대 응력은 각각 2700 m/s^2 , 124 MPa 이며, Awerbuch⁽²⁸⁾의 실험 결과와 비교하여 볼 때, $[\pm 15]_2$ 로 적층된 헤들 프레임은 100 년 이상 구동 가능함을 알 수 있다.

기존의 알루미늄 헤들 프레임과 복합재료 헤들 프레임의 내구성 및 진동 특성을 비교하기 위하여 정적 굽힘 시험 및 진동 시험을 수행하였다. Tsai-Wu 파괴 지수 식⁽²⁶⁾과 웹 좌굴 하중 식⁽²³⁾으로부터 알루미늄 헤들 프레임 시편은 각각 46.4 kN 및 48.8 kN 의 하중을 가하였을 때 좌굴 및 굽힘에 의한 파괴가 발생하며 복합재료 헤들 프레임 시편은 각각 123.8 kN 및 50.4 kN 의 하중에서 좌굴 및 굽힘에 의한 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.



(a) Load-deflection curve



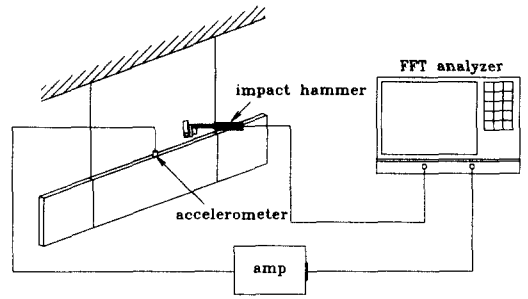
(b) Buckling of the aluminum heddle frame



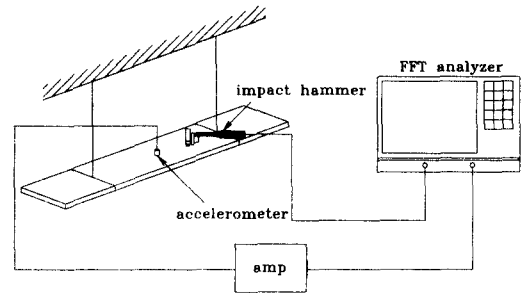
(c) Fracture of the composite heddle frame

Fig. 19 Load-deflection curves and photographs of failure

따라서 알루미늄 헤들 프레임은 좌굴이 발생할 것으로 예상하였으며, 복합재료 헤들 프레임은 굽힘에 의한 파괴가 발생할 것으로 예상하였다. 보의 굽힘 시험과 같은 방법으로 내구성 시험을 수행한



(a) Vertical direction



(b) Lateral direction

Fig. 20 Vibration test setup

결과, 알루미늄 헤들 프레임은 하중 40.8 kN 에서 헤들 프레임의 중앙에 좌굴이 발생 하였으며, 복합재료 헤들 프레임은 하중 48.3 kN 에서 지그의 연마핀에서 파괴가 발생하였다. 이것은 헤들 프레임의 아래 쪽에 헤들을 장착하기 위하여 열린 단면을 가지므로 연마핀에 의해 응력이 집중되어 국부적인 좌굴이 발생하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 19 는 알루미늄 헤들 프레임과 복합재료 헤들 프레임의 하중-변위 곡선과 시험의 파손된 모습을 보여준다.

알루미늄 헤들 프레임과 복합재료 헤들 프레임의 고유 진동수 및 진동 감쇠 계수를 비교하기 위하여, 가속도계(Accelerometer, B&K Type 4374)를 부착하여 보의 수직 방향(Vertical Direction) 및 가로 방향(Lateral Direction)에 대하여 Fig. 20 과 같이 진동 시험을 수행하였다.

Fig. 21 은 주파수 응답 신호를 보여준다. FFT Analyzer 를 통해 얻은 주파수 응답 신호로부터 고유진동수(Natural Frequency) 및 진동 감쇠비(Damping Ratio)를 구하였다. Table 8 에는 알루미늄 헤들 프레임과 복합재료 헤들 프레임의 고유 진동수와 진동 감쇠비를 나타내었다.

복합재료 헤들 프레임의 고유 진동수는 알루미늄

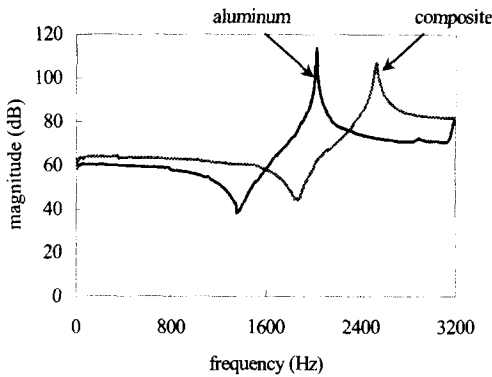


Fig. 21 Impulse frequency responses

Table 8 1st natural frequencies and damping ratios of the aluminum and composite heddle frames

	Direction	Aluminum	Composite
1st Natural Frequency (Hz)	Vertical	2024	2356
	Lateral	246	312
Damping Ratio	Vertical	0.0024	0.0089
	Lateral	0.0038	0.0064

헤들 프레임과 비교하여 수직 방향으로 16 %, 가로 방향으로 27 % 개선되었으며, 진동 감쇠비는 3.7 배와 1.7 배가 증가하였다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 알루미늄 헤들 프레임의 하중 이력을 측정하였으며, 하중 이력을 토대로 알루미늄 헤들 프레임의 수명을 평가해 본 결과, 알루미늄 헤들 프레임은 500 rpm 이상의 고속 직기에 수명이 짧아 부적합하다는 것이 밝혀졌다. 따라서 탄소섬유 에폭시 복합재료와 샌드위치 구조를 적용하여 고속 직기용 헤들 프레임을 설계 및 제작한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알루미늄 헤들 프레임의 하중 이력을 측정하고 수명을 평가하여 캠의 회전 속도가 550 rpm 일 때 수명이 약 5 개월임을 알 수 있었다.

(2) 중공형 보를 제작하고 정적 굽힘 시험을 수행한 결과, 모두 좌굴에 의한 파손이 발생하였다. 복합 적층판의 두께가 두꺼워 질수록, 적층각이 커질수록 높은 임계 좌굴 하중을 나타내었다.

(3) 샌드위치 보를 제작하고 정적 굽힘 시험을 수행한 결과, 15°-45° 시편에서는 굽힘에 의한 파

괴가 발생하였으며 5° 시편에서는 좌굴이 발생하였다. 파손 하중은 복합 적층판의 두께가 두꺼워 질수록 높았고, 적층각이 15° 일 때 가장 높았다.

(4) 정적 굽힘 시험 결과를 토대로 파손 하중 맵을 작성하였으며, 보의 경계 조건이나 길이에 상관없이 사용할 수 있도록 최대 모멘트를 복합 적층판의 두께 및 적층각에 대해 표현하였다.

(5) 유한 요소 해석 및 파손 하중 맵을 이용하여 복합재료 헤들 프레임을 설계 하였으며, 리브 개수는 세 개, 복합 적층판의 두께 및 적층각은 각각 1.0 mm 와 15° 로 결정하였다.

(6) 탄소섬유 에폭시 복합재료와 샌드위치 구조를 적용하여 복합재료 헤들 프레임을 제작하였으며, 복합재료 헤들 프레임의 자중은 알루미늄 헤들 프레임의 69 % 였고, 직기가 1000 rpm 의 속도로 구동하여도 100 년 이상의 수명을 가짐을 알 수 있었다.

(7) 알루미늄 헤들 프레임과 복합재료 헤들 프레임을 기계적 물성을 비교하기 위하여 내구성 시험 및 진동 시험을 수행하였다. 알루미늄 헤들 프레임은 40.8 kN 에서 좌굴이 발생하였고, 복합재료 헤들 프레임은 48.3 kN 에서 파괴가 발생 하였다. 또한, 진동 시험으로부터 복합재료 헤들 프레임의 고유 진동수는 알루미늄 헤들 프레임과 비교하여 수직 방향으로 16 %, 가로 방향으로 27 % 개선되었으며, 진동 감쇠비는 각각 3.7 배 및 1.7 배가 증가하였다.

참고문헌

- (1) Wingate, I. B., 1976, *Textile Fabrics and Their Selection*, 7th Edition, Prentice-Hall, Inc.
- (2) Hall, A. J., 1975, *The Standard Handbook of Textiles*, 8th Edition, Newnes-Butterworths.
- (3) 한국기계연구원, 1996, *High Speed Positive Cam Shedding 기계 개발*, 통상산업부.
- (4) Gibson, R. F., 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill.
- (5) Cheon, S. S., Choi, J. H. and Lee, D. G., 1995, "Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars," *Composite Structures*, Vol. 32, pp. 491-499.
- (6) Cho, D. H., Lee, D. G. and Choi, J. H., 1997, "Manufacturing of One-Piece Automotive Driveshafts with Aluminum and Composite Material," *Composite Structures*, Vol. 38, pp. 309-319.

- (7) Lee, D. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., 1991, "Manufacturing of a Scara Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Materials," *Robotica*, Vol. 9, pp. 219-229.
- (8) 이대길, 정광섭, 최진호, 1998, *복합재료 역학 및 제조 기술*, 시그마프레스.
- (9) Jones, R. M., 1975, *Mechanics of Composite Materials*, Scripta Book Co.
- (10) 정광섭, 오세훈, 이대길, 1995, "동시경화 접착법에 의한 하모닉 드라이브용 복합재료 플라스틱 플라인의 제조 및 특성 평가," *대한기계학회논문집*, 제 19 권, 제 12 호, pp. 3308-3316.
- (11) Bang, K. K., Choi, J. K., Kim, H. S., Lee, D. G. and Jeon, H. S., 1997, "Development of the Guide Rollers Using Electroplated Carbon Fiber-Epoxy Composite for Thin Polymer Film Processing," *Composite Structures*, Vol. 38, pp. 321-328.
- (12) Choi, J. K. and Lee, D. G., 1997, "Manufacturing of a Carbon Fiber Epoxy Composite Spindle-Bearing System for a Machine Tool," *Composite Structures*, Vol. 37, pp. 241-251.
- (13) Ha, K. H., 1992, "Exact Analysis of Bending and Overall Buckling of Sandwich Beam Systems," *Computers and Structures*, Vol. 45, pp. 31-40.
- (14) Hwu, C. and Hsieh, C. H., "The Effect of Transverse Shear Stress on the Buckling of the Delaminated Composite Sandwich Beams," *ACCM-1*, October 7-9, Osaka, Japan, pp. 303_1-303_4.
- (15) Yeh, W. N. and Wu, Y. E., "Enhancement of Buckling Characteristics for Sandwich Structure with Fiber Reinforced Composite Skins and Core Made of Aluminum Honeycomb and Polyurethane Foam," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 15, pp. 63-74.
- (16) American Society for Testing and Material E1049-85, 1996, "Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis."
- (17) Dowling, N. E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall.
- (18) ASM International, 1990, *Metal Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*.
- (19) ASM International, 1988, *Engineered Materials Handbook: Engineering Plastics*.
- (20) Swanson Analysis Systems, 1995, *ANSYS User's Manual*, ANSYS, Inc.
- (21) Ho, H., Tsai, M. Y., Morton, J. and Farley, G. L., 1993, "Numerical Analysis of the Iosipescu Specimen for Composite Materials," *Composite Science and Technology*, Vol. 46, pp. 115-128.
- (22) Henry, S. D., Dragolich, K. S. and DiMatteo, N. D., 1995, *Fatigue Data Book : Light Structural Alloys*, ASM International.
- (23) Vinson, J. R., 1999, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Technomic Publishing, Co., INC.
- (24) American Society for Testing and Material D2344-84, 1995, "Standard Test Method for Apparent Interlaminar Shear Strength of Parallel Fiber Composites by the Short-Beam Method."
- (25) American Society for Testing and Material D4457-85, 1990, "Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods by the Short-Beam Method."
- (26) Mallick, P. K., 1988, *Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design*, Marcel Dekker, INC.
- (27) 최진호, 이대길, 1992, "접착제의 두께와 열 응력에 따른 조인트의 토크 특성," *대한기계학회 논문집*, 제 16 권, 제 10 호, pp. 1841-1852.
- (28) Awerbuch, J. and Hahn, H. T., 1981, "Off-Axis Fatigue of Graphite/Epoxy Composite," *Fatigue of Fibrous, Composite Materials, ASTM STP 723*, pp. 243-273.