

고속 직기용 탄소 섬유 에폭시 복합재료 헬드 프레임의 설계

Design of Heald Frames for High Speed Looms with Carbon / Epoxy Composite Materials

이창섭*, 정광섭**, 오재훈*, 이대길*

* 한국과학기술원 기계공학과

** 영남대학교 섬유학부

서론

직물은 예로부터 여러 가닥의 경사 (warp) 사이로 위사 (weft) 를 엮어 만들어 왔다. 직기 (loom) 가 개발되고 자동화되면서 직물을 제작하는 방법이 현대화 되었고, 무복직기 (shuttleless loom) 로 직물을 제작하기에 이르렀다 [1]. 헬드 프레임은 수천 가닥의 경사를 잡아주고, 아래 위로 움직여 위사의 위입 공간을 만들어 주는 직기의 핵심 부품이다.

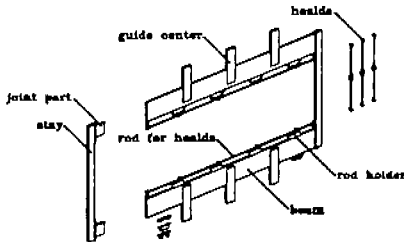


Figure 1. Configuration of a heald frame.

Figure 1 은 헬드 프레임의 기본 구조를 보여준다. 헬드 프레임은 사각 단면을 가진 쌍의 수평 부재로 구성되어 있으며, 상부빔 (upper beam) 과 하부빔 (lower beam) 을 고정시키기 위한 한 쌍의 스테이 (stay) 가 양 쪽에 각각 조인트 (joint) 로 고정되어 있다.

섬유 기계업계에서는 최근 무복직기 전용의 빠르고 능동적인 움직임을 가지는 고속 래피어 직기 (high speed rapier loom) 를

개발하였다 [2]. 과거에는 타벳트 캠 장치 (tappet cam system) 를 이용하여 4 개의 헬드 프레임을 200 rpm 의 속도에서 구동하였으나, 최근에는 최대 20 개의 헬드 프레임을 동시에 사용하고 600 rpm 이상의 속도로 구동하게 되었다. 이러한 제작 환경의 변화에 따른 고속화, 다양화와 고밀도 제작이 최근의 개발의 주된 추세이다. 직기의 구동 속도가 고속화됨에 따라 헬드 프레임의 운동에 의한 가속도 및 감속도가 증가하게 되었고 이로 인하여 헬드 프레임의 관성에 의한 하중이 배가되고 수명은 단축되었다. 그러므로 헬드 프레임의 비굽힘강도 (specific flexural strength) 를 개선할 필요가 있다.

탄소 섬유 강화 에폭시 복합재료 (carbon / epoxy composite materials) 와 같은 섬유 강화 고분자 기지 복합재료는 기존의 금속 재료에 비하여 높은 비강성 (specific stiffness, E/ρ) 및 높은 비강도 (specific strength, S/ρ) 를 나타내기 때문에 항공기, 자동차, 로봇 등 경량화가 요구되는 구조물의 제작에 사용되고 있다 [3-6]. 또한, 고분자 기지재의 점탄성 성질과 섬유와 기지재 사이의 불균질성 등으로 인하여, 기존의 금속 재료에 비하여 약 10 배 이상의 높은 감쇠능을 갖는다 [7]. 이러한 특성은 구조물의 소음 및 진동을 흡수하기에 유리할 뿐만 아니라, 공진 현상 및 진동하는 구조물의 정정시간 (settling time) 을 감소시키며 피로수명 (fatigue life) 등을 향상시킬 수 있

다. 그리고, 장섬유 강화 고분자 복합재료는 섬유 배열각도 및 플라이 (ply) 의 적층 방법 (stacking sequence) 에 따라 재료의 물성을 조절할 수 있기 때문에 구조물의 사용 목적에 최적의 물성을 갖도록 제조할 수 있다 [8]. 이러한 고분자 복합재료의 장점을 이용하기 위하여 기존의 금속 구조물을 섬유강화 고분자 복합재료 구조물로 대체하려는 일련의 노력들이 여러 산업 분야에서 진행되어 왔다 [9-11].

본 연구에서는 헬드 프레임의 피로 수명 평가를 위해서 실제 하중 이력을 구하였으며, 팡그렌-마이너 법칙 (Palmgren-Miner rule) 을 적용하여 기존의 알루미늄 헬드 프레임의 피로 수명을 평가하였다. 또한 FEM 을 이용해 새로운 복합재료 헬드 프레임의 단면 형상 및 적층각을 제시하였으며, 기존의 복합재료 적층판의 이론을 복합재료 헬드 프레임의 세부 사항에 적용하여 설계하였다.

하중 이력 측정

고속 래피어 직기 (high speed rapier loom) 는 확동 캠 기구 (positive cam system) 를 사용하여, 서로 다른 2 개의 주축에 각각 캠이 설치되어 요동 운동을 발생시키는 구조로 되어있다. 캠의 요동 운동으로 발생하는 헬드 프레임의 가속도 측정을 통해 하중 이력을 구하였다. 헬드 프레임에 응력을 유발하는 인자는 헬드 프레임의 자중, 경사 (warp) 의 장력과 헬드 (heald) 의 하중 그리고 헬드 프레임의 구동 가속도에 의한 관성력 등이 있으며, 이 중에서 헬드 프레임의 관성력이 가장 큰 값을 가진다.

압전소자 (piezo-electric) 형의 가속도계를 헬드 프레임에 부착하여 350 rpm, 450 rpm, 550 rpm 에서 헬드 프레임의 상하 운동 가속도를 측정하였다. Figure 2 는 가속도 측정 장치를 나타낸 것이다.

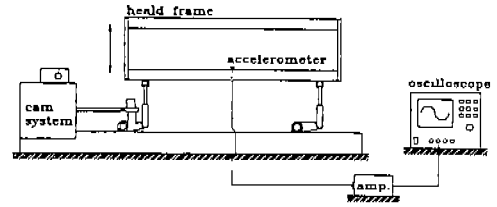


Figure 2. Acceleration measurement setup.

가속도 신호는 여러 종류의 신호를 포함하며, 헬드 프레임의 급격한 움직임에 의한 충격파와 부품간의 유격, 프로그램된 여러 개의 헬드 프레임의 동시 동작 등이 그 원인이 된다. Figure 3 은 가속도 측정 데이터의 한 예이다.

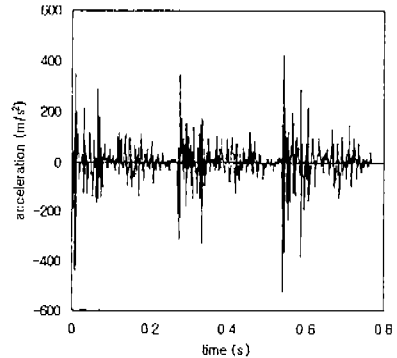


Figure 3. Measured acceleration data.

가속도 측정 결과, 헬드 프레임이 구동시에 불규칙 변동 하중이 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 측정된 가속도 데이터에 레인 플로우 카운팅 법 (rainflow counting method) 과 팡그렌-마이너 법칙 (Palmgren-Miner rule) [12] 을 적용하여 알루미늄 헬드 프레임의 수명을 평가하였다.

유한 요소 해석 및 수명 평가

가속도 측정 데이터를 이용하여 피로 수명을 평가하기 위하여 먼저 가속도와 응력 사이의 관계를 알아야 한다. 헬드 프레임에 작용하는 응력 분포를 파악하고 설계

에 응용하기 위하여 유한 요소 해석을 수행하였다.

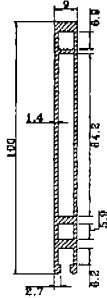


Figure 4. Cross-sectional shape of the heald frame.

통상적으로 사용되는 헬드 프레임은 길이 2000 mm, 높이 100 mm, 폭 9 mm 의 Figure 4 의 단면을 가지는 한 쌍의 빔과 이들을 고정시키기 위한 길이 560 mm 의 스테이가 양 쪽에 각각 조인트로 고정되어 있다. 이러한 구조적인 특성으로 경계 조건을 설정하기가 어려우므로 조인트와 스테이를 모델링에 포함시켰다. 헬드 프레임의 전체 구조는 크게 좌우, 상하 대칭으로 간주할 수 있으므로 유한 요소 모델은 전체의 1/4 만을 설정하였다.

헬드 프레임의 중앙부는 좌우 대칭, 스테이는 상하 대칭 조건을 적용하였으며, 헬드 프레임과 조인트 사이의 접촉면은 굽힘이 일어나는 경우에 실제로 접촉하는 부분과 접촉하지 않는 부분으로 나뉜다. 이러한 부분에서 절점에서의 힘을 관찰하여 접촉하고 있는 부분만을 커플링시켜 같은 변위를 가지는 것으로 설정하였다 [13]. 조인트와 스테이의 접촉면은 완전히 접촉되어 있는 것으로 간주하고 절점을 커플링하여 같은 변위를 가지는 것으로 경계 조건을 결정하였다. 헬드 프레임은 알루미늄의 물성을 이용하여 등방성으로 설정하였다. 이와 같은 유한 요소 모델은 경계 조건이 명확하지 못하기 때문에 시험을 통하여 해석 결과가 실제 결과와 잘 일치하는가를 검증하였다.

헬드 프레임을 실제와 가깝게 조인트,

스테이와 조립한 후, 받침에 15 mm 깊이의 홈을 파서 스테이가 고정단 지지의 조건을 가지도록 억지 끼워 맞춤을 하였다. 이러한 경계 조건을 설정한 후, 직경 25.4 mm 의 크로스헤드 (crosshead) 로 5 kN 까지 하중을 가하여 변형률을 측정하였다. 또한 시험 조건과 동일한 유한 요소 모델을 설정하고 해석을 통하여 그 결과를 비교하였다. Figure 5 와 같이 세 지점에서 측정된 변형률과 같은 지점에서의 해석 값을 비교하여 Table 1 에 나타내었다.

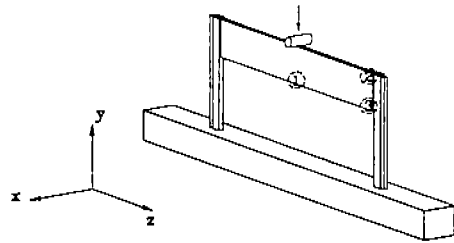


Figure 5. Verification test setup.

Table 1. Strain comparison data.

position	measured	calculated
center (ϵ_{1z})	227 μ S	236 μ S
center (ϵ_{1y})	-76 μ S	-79 μ S
upper end part (ϵ_{2z})	5 μ S	2 μ S
lower end part (ϵ_{3z})	38 μ S	31 μ S

시험 결과와 해석 결과가 오차 4 % 정도로 잘 일치 하였으며, 해석에서 설정한 경계 조건이 타당함을 알 수 있었다. 이러한 경계 조건을 가진 유한 요소 모델에 측정된 최대 가속도 817 m/s² 을 적용하여 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2 에 나타내었다.

Table 2. Maximum stress of each component

component	stress (MPa)
beam	51.4
joint	12.6
stay	42.0

헬드 프레임에 나타난 응력 분포를 살펴보면 관성력에 의한 굽힘 응력 분포의 형태가 나타났고 헬드 프레임의 중앙부에서 가장 큰 응력을 받는 것으로 나타났다. 조인트에서는 헬드 프레임과 맞닿은 부분에서 응력 집중 현상이 나타났으며, 스테이에서는 조인트가 고정된 끝 부분에서 응력 집중 현상이 나타났다.

Al6061-T6 의 S-N 곡선을 이용하여 캠이 350 rpm, 450 rpm, 550 rpm 의 속도로 구동할 때의 알루미늄 헬드 프레임의 수명을 평가하였고 그 결과를 Table 3 에 나타내었다.

Table 3. The estimated lives of the heald frame with respect to the angular velocity of the cam.

angular velocity of the cam	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}

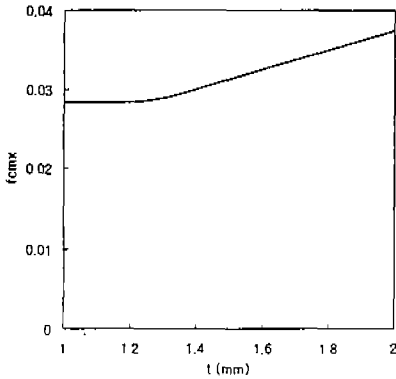
헬드 프레임의 수명은 550 rpm 으로 구동 시에 5 개월 정도로 예측되었으며 실제로 6~12 개월 사용한 후 파괴가 일어나므로 실제 현상과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 헬드 프레임이 파괴되면 약 2000 개의 헬드에 각각 경사를 삽입하여 헬드 프레임에 장착하는 작업이 필요하다. 헬드 프레임을 교체하는 동안 기계의 가동이 중단되어 작업 능률이 저하되고 제작된 작품의 품질 저하를 수반하는 등의 손실을 가져온다. 탄소 섬유 에폭시 복합재료는 비피로특성이 우수하므로 복합재료를 이용하여 헬드 프레임을 제작하였다.

복합재료 헬드 프레임 설계 및 제작

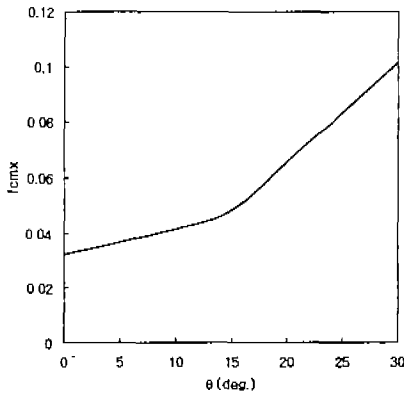
새로운 복합재료 헬드 프레임의 적층판의 두께와 적층각을 결정하기 위하여 유한

요소 해석을 수행하였다. 헬드 프레임은 구동 시에 굽힘 응력을 받기 때문에 질량이 아래 위로 편중되어 있는 구조가 유리하며, 자체 중량을 줄이기 위해 속이 비어있는 구조가 유리하다. 또한 제작 및 이동 시에 형상을 유지하고 취급하기 용이하려면 횡방향으로의 굽힘 강성이 필요하므로 옆면의 벽도 일정한 두께가 필요하다. 헬드 프레임은 정해진 표준 규격은 없으나 장착되는 직기에 따라 통상적인 치수가 존재한다. 본 연구에서는 통상적으로 사용되는 직기에 장착할 수 있고 기존의 알루미늄 헬드 프레임과 비교할 수 있도록 범의 외부 치수를 길이 2000 mm, 높이 100 mm, 폭 9 mm 로 제한하였으며, 스테이는 길이 560 mm, 폭 9 mm 로 제한하였다. 상용 해석 프로그램인 ANSYS 5.3 의 SOLID46 모델에 (주) SK 케미컬의 USN125 프리프레그 (prepreg) 의 물성을 입력하였으며, 복합재료 적층판의 두께와 적층각에 변화를 주어 유한 요소 해석을 수행하였다. 경계 조건은 앞에 해석한 알루미늄 헬드 프레임과 같은 방식으로 설정하였다.

해석 결과는 Figure 6 과 같으며 Tsai-Wu 의 파괴지수 (failure index) 를 두께와 적층각에 따른 변화를 나타내었다. 적층판의 두께가 1.2 mm 이상인 경우 파괴지수가 증가하는 경향을 보였다. 복합재료를 대칭으로 적층하기 위하여 두께는 1 mm 로 결정하였다. 두께를 1 mm 로 고정하고 적층각을 변화시켜 본 결과, 적층각이 $\pm 15^\circ$ 가 넘어가면 파괴지수가 급격히 증가하는 경향을 보인다. 피로특성을 고려해 볼 때, 복합재료의 섬유 방향의 피로한도는 정적 강도의 90 % 에 이르지만 횡 방향의 피로한도는 60 % 이하로 떨어진다 [14]. 따라서 적층각은 약간의 여유를 두어 $\pm 10^\circ$ 로 결정하였다.



(a) with respect to thickness



(b) with respect to laminate angle

Figure 6. Failure index with respect to thickness and laminate angle.

각 부분에서의 응력은 Table 4 와 같고, 알루미늄을 사용한 기존의 헬드 프레임에 비해 응력이 34 % 정도 감소하였고 복합재료가 피로특성이 우수한 것을 고려하여 볼 때 무한 수명을 가지는 것을 알 수 있다.

Table 4. Maximum stress of each component

component	stress (MPa)
beam	34.0
joint	14.5
stay	9.9

이와 같이 두 가지 설계 변수를 결정한 후, 복합재료 헬드 프레임을 Figure 7 과 같은 방법으로 제작하였다. 사각형 빔 형태의

맨드럴 (mandrel) 에 복합재료 프리프레그 (prepreg) 를 감은 후, 맨드럴을 빼내었다. 맨드럴을 빼낸 복합재료 구조물을 진공백성형 (vacuum bag degassing molding) 의 방법으로 외면 금형을 이용하여 경화시켰다. 빔의 중앙부는 $\pm 10^\circ$ 로 적층하였고, 빔의 양 끝단은 구멍에 대한 저항성을 높이기 위하여 $\pm 45^\circ$ 로 적층하였다 [15]. 이런 방법으로 여러 종류의 빔을 만들어 필름 접착제 (film adhesive) 로 접착한 후 겹면에 복합재료를 적층하여 경화시켜 완성하였다.

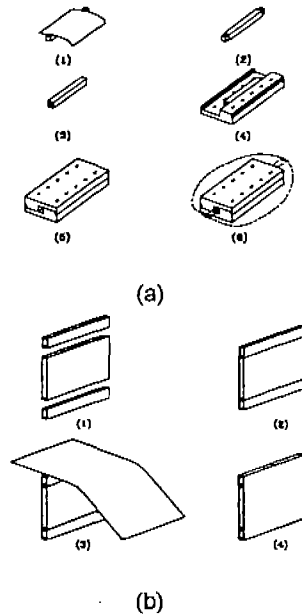


Figure 7. Manufacturing procedure of the composite heald frame.

결론

본 연구에서는 헬드 프레임 구동 시의 하중 이력을 구하여 피로 수명을 평가해 보고, 고속 직기에서 영구히 사용할 수 있는 복합재료 헬드 프레임의 설계 및 제작에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

가속도 측정을 통하여 하중 이력을 구한 결과, 헬드 프레임이 불규칙 변동 하중을 받는 것을 알 수 있었다. 유한 요소 해

석을 통하여 응력 집중 현상이 발생하는 부분과 응력 수준을 파악하여 기존의 헬드 프레임의 피로 수명을 평가하여 수명이 약 6개월임을 확인하였으며, 이전에 유한 요소 해석 검증 시험을 수행하여 유한 요소 모델과 경계 조건의 타당성을 입증하였다.

Tsai-Wu의 파괴지수를 이용하여 복합 재료 헬드 프레임 제작에 필요한 적층판의 두께와 적층각을 결정하였다. 적층판의 두께가 1.2 mm를 넘어서면 파괴지수가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 따라서 적층판의 두께는 복합재료를 대칭으로 적층할 수 있도록 1 mm로 결정하였다. 적층각은 $\pm 15^\circ$ 가 넘으면 파괴지수가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 그러나 피로 특성을 고려하여 적층각은 $\pm 10^\circ$ 로 결정하였고, 범의 양 끝단은 구멍에 대한 저항성을 높이기 위하여 적층각을 $\pm 45^\circ$ 로 하였다. 재료를 비피로강도가 높고 비강성이 높은 복합재료로 대체하였을 경우, 강도와 강성을 유지하며 밀도를 줄일 수 있어 헬드 프레임의 자중도 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법으로 복합재료 헬드 프레임을 설계, 제작할 경우 영구적으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- Hall, A. J., *The standard handbook of textiles. 8th Edition*, Newnes-Butterworths, 1975, pp. 176-182.
- SSANGYONG, *Development of design technology for high speed rapier loom*, K-MOST, 1998.
- Gibson, R. F., *Principles of composite material mechanics*, McGraw-Hill, 1994, Chapter 1.
- Cheon, S. S., Choi, J. H. & Lee, D. G., Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars, *Comp. Struct.*, **32** (1995) 491-499.
- Cho, D. H., Lee, D. G. and Choi, J. H., Manufacturing of One-piece Automotive Driveshafts with Aluminum and Composite Materials, *Comp. Struct.*, **38** (1997) 309-319.
- Lee, D. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., Manufacturing of a Scara Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Materials, *Robotica*, **9** (1991) 219-229.
- Lee, D. G., Jeong, K. S. and Choi, J. H., *Composite materials*, Sigma Press, Seoul, 1998, Chapter 1.
- Jones, R. M., *Mechanics of composite materials*, Scripta Book Co. Wahington, D. C., 1975, Chapter 1.
- Bang, K. K., Choi, J. K., Kim, H. S., Lee, D. G. and Jeon, H. S., Development of the Guide Rollers using Electroplated Carbon Fiber-Epoxy Composite for Thin Polymer Film Processing, *Comp. Struct.*, **38** (1997) 321-328.
- Choi, J. K. and Lee, D. G., Manufacture of a Carbon Fiber-epoxy Composite Spindle-bearing System for a Machine Tool, *Comp. Struct.*, **37** (1997) 241-251.
- Jeong, K. S., Lee, D. G. and Oh, S. H., Development of the Composite Flexspline for a Cycloid Harmonic Drive by Net Shape Manufacturing Method, *Comp. Struct.*, **32** (1995) 557-565.
- Dowling, Norman E., *Mechanical behavior of materials*, Prentice-Hall, 1993, pp. 382-391.
- H. Ho, M. Y. Tsai, J. Morton and G. L. Farley, Numerical Analysis of the Iosipescu Specimen for Composite Materials, *Composites Science and Technology*, **46** (1993) 115-128.
- Leslie N. Phillips, *Design with Advanced Composite Materials*, The Design Council, pp 81-84.
- Oh, J. H., Kim, Y. G. and Lee, D. G., Optimum bolted joints for hybrid composite materials, *Comp. Struct.*, **38** (1997) 329-341.