

# 황마섬유 보강 열경화성 복합재료의 기계적 특성

이창훈\*·송재은\*\*·남원상\*·변준형\*·김병선\*·황병선\*

## Mechanical Properties of Jute Fiber Reinforced Thermosetting Composites

C-H Lee, J-E Song, W-S Nam, J-H Byun, B-S Kim and B-S Hwang

### Abstract

Recently, natural fibers draw much interests in composite industry due to low cost, light weight, and environment-friendly characteristics compared with glass fibers. In this study, mechanical properties were evaluated for two extreme cases of jute fiber orientations, i.e. the unidirectional yarn composites and the felt fabric composites. Samples of jute fiber composites were fabricated by RTM process using epoxy resin, and tensile, compression, and shear tests were conducted. As can be expected, unidirectional fiber specimens in longitudinal direction showed the highest strength and modulus. Compared with glass/epoxy composites of the similar fabric architecture and fiber volume fraction, the tensile strength and modulus of jute felt/epoxy composites reached only 40% and 50% levels. However, the specific tensile strength and modulus increased to 80% and 90% of the glass/epoxy composites. The main reason for the poor mechanical properties of jute composites is associated with the weak interfacial bonding between fiber and matrix. The effect of surface treatment of jute fibers on the interfacial bonding will be examined in the future work.

**Key Words:** Jute, RTM, Mechanical property, Unidirectional, Felt.

### 1. 서 론

유리섬유, 탄소섬유 등이 주로 사용되는 섬유 강화복합재료는 일반적인 재료에 비해 비강도, 비강성이 높기 때문에 구조물이나 비구조물에 폭 넓게 응용되고 있다.[1] 그러나 이러한 섬유는 가격이 높고, 인공적으로 제조되어 투입되는 에너지 소모가 크고 재활용이 어렵기 때문에 환경에 부담을 주게 된다. 그러므로 환경의식이 고취되고 있는 현 시점에서, 자연 순환을 따르는 새로운 재료 체계를 개발할 필요가 있다.

자연섬유는 낮은 가격의 고갈되지 않는 천연자원이므로, 경제적이며, 환경친화적인 새로운 재료로 각광받고 있다. 또한, 자연섬유 강화 복합재료는 일반적으로 인공섬유에 비해 구조적 성능은

다소 떨어지나, 밀도가 낮고 전기저항과 파괴인성이 높으며, 단열과 소음차폐 성능이 우수하다.[2]

본 연구에서는 획득성이 좋고 가격이 저렴하며 우수한 특성을 가지는 황마섬유(jute)를 사용한 예폭시계 복합재료의 기계적 특성을 평가함으로써, 기존의 구조용 복합재료로 광범위하게 사용되고 있는 일반적인 유리섬유 복합재료와의 물성치 비교를 하였다. 다른 자연섬유와 마찬가지로 황마섬유는 연속적인 길이를 가지지 않기 때문에 보강재로 사용되는 일반적인 형태는 단섬유가 불규칙하게 배열된 펠트(felt)형태이다. 펠트구조는 섬유체적율을 높게 할 수 없기 때문에 기계적인 특성은 떨어질 수 있으나, 섬유방향성이 없기 때문에 등방성질을 갖는다는 것이 이점이라고 볼 수 있다. 이것과 대조적인 구조는 단섬유를 twist한 형태인, 연속적인 yarn으로 제작된 일방향 복합재료이다. 이러한 일방향 복합재료는 길이 방향으로 우수한 특성은 가지나 폭방향으로는 매우 낮

\* 한국기계연구원 복합재료그룹

\*\* 창원기능대학, 기계과

다.

따라서 본 연구에서는 구조적으로 대조되는 일방향 복합재료와 펠트 복합재료의 기계적인 특성을 구함으로써 자연섬유 복합재료 구조물 설계에 필요한 데이터를 제공하고, 한편으로는 기존에 많이 사용하고 있는 유리섬유 복합재료와의 물성치 비교를 통하여 자연섬유 복합재료의 대체가능성 및 적용범위를 확인하고자 한다.

## 2. 복합재료 성형

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 자연섬유

자연섬유는 대부분 섬유소(cellulose), 반섬유소(hemicellulose) 및 목질소(lignin)로 구성되어 있으며 미량의 다른 성분도 포함하고 있다. 자연섬유는 경질의 섬유소가 연질의 목질소에 포함되어 있는 일종의 복합재료이며 고분자계 섬유보다도 더 높은 탄성률을 가지는 경질의 섬유소 골조로 인하여 상당히 높은 강도를 가진다.[3] Table 1은 몇 가지 자연섬유에 대한 성분을 나타내고 있다.

자연섬유는 여러 관점에서 분류될 수 있으나 식물에서 차지하는 부위와 성질에 따르면, 연질 종자섬유(soft seed fiber), 연질 줄기섬유(soft stem fiber), 및 경질 잎섬유(hard leaf fiber)로 나뉜다. 복합재료의 보강재로 사용되는 대부분의 섬유는 연질 줄기섬유와 경질 잎섬유이다. 연질 줄기섬유에는 황마섬유, 아마섬유(flax), 대마섬유(hemp) 등이 있으며, 경질 잎섬유에는 sisal, henequen, pineapple 등이 있다.[4]

Table 1. Chemical compositions of natural fibers

Natural fiber	Cellulose	Hemi-cellulose	Lignin	Others
Jute	71.5	13.4	13.1	2.0
Sisal	73.1	13.3	11.0	2.6
Palm	50-60	24	16-24	-
Bagasse	46	30	15	9.0

본 연구에서 사용한 황마섬유는 방글라데시가 원산지이며, yarn 형태는 국내의 업체를 통하여 수입한 제품(10/bs/1-ply)이며 펠트의 경우 원사를 수입하여 (주)에스케이텍에서 가공하였다. 본

연구에서 사용된 황마섬유의 밀도를 측정된 결과 1.358 g/cm<sup>3</sup>였다.

#### 2.1.2 열경화성 수지

통상적으로 사용되는 액상성형용 수지로는 불포화 폴리에스터, 비닐에스터, 에폭시등이 있으며, RTM용 에폭시 수지의 주요 제조회사는 Ciba-Geigy, Dow Chemical, Shell 등이 있다. 최근에는 국내의 국도화학에서 외국제품의 성능과 유사한 에폭시 수지를 시판하고 있으며, 본 연구에서 사용한 수지는 국도화학의 에폭시(KBR-1729)와 경화제(KBH-1089)를 10:9의 비율로 혼합하여 사용하였다.

#### 2.2 미세조직

Fig. 1은 황마섬유의 SEM 이미지이다. 그림 (a)는 여러 가닥의 섬유 필라멘트를 꼬아놓은 yarn 형태이며, 꼬인 각은 측정결과 약 17도였다. 그림 (b)는 filament로서 섬유 단면적이 원형은 아니며, 직경 또한 일정하지 않음을 볼 수 있다.

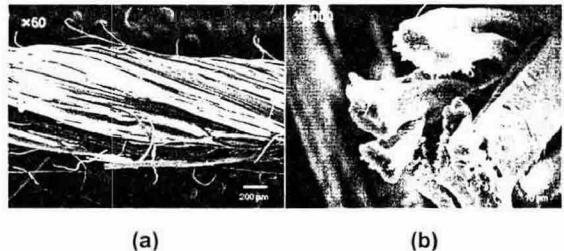


Fig. 1 SEM image of jute (a)yarn and (b)filament.

#### 2.3 성형방법

##### 2.3.1 일방향 복합재료

본 연구에서는 자연섬유 yarn을 이용하여 일방향 복합재료를 제작하였다. 성형방법은 Fig. 2와 같이 평판에 섬유를 원하는 두께까지 와인딩한 후 금형에 넣고 수지를 주입하였다. 제작된 복합재료의 섬유체적율과 섬유무게비율은 각각 약 34 vol%, 47 wt%였다.

##### 2.3.2 펠트 복합재료

Fig. 3은 자연섬유 펠트에 대한 hot-press RTM 성형법이다. Sheet 상태의 펠트를 3장 적층하여 압착 후 금형에 넣고 수지를 주입하였다. 섬유체적율은 일방향 복합재료와 동일하게 하였다.

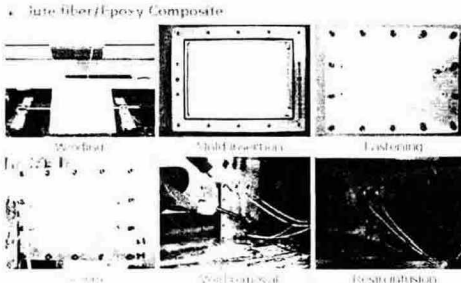


Fig. 2 RTM process of UD composites.

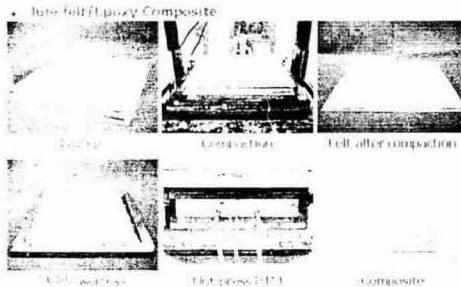


Fig. 3 Hot-press RTM process of felt composites.

### 3. 기계적 특성

#### 3.1 시험방법

본 연구에서는 Table 2와 같이 총 4가지 경우에 대하여 인장, 압축, 전단에 대한 기계적 물성 시험을 하였다. 그러나 에폭시는 등방성 재료이므로 압축강성, 전단강성, 전단강도는 식(1) - (3)의 방법으로 계산하였다. 모든 시험은 ASTM 규격을 참조하였으며, Instron 5567 (3ton) 기계식 장비를 사용하였다.

Table 2. Test matrix

Material code	Type	Orientation		Test
JYL	Yarn	UD	0 degree	Tension Compression Shear
JYT			90 degree	
JFI	Felt	Isotropic		
EPI	Epoxy			

$$E_{tension} = E_{compression} = E \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max}}{2} \quad (3)$$

#### 3.2 시험결과

Table 3-5는 각 시험에 대한 결과이며, 에폭시 시편의 경우 압축강성, 전단강성 및 강도는 계산된 값이다. 자연섬유 자체의 굵기나 직경의 편차가 심함에도 불구하고 인장물성치는 편차가 비교적 작았으며, 압축강성의 경우에는 펠트구조의 편차가 높게 나왔는데 그 이유는, 황마섬유 복합재료의 낮은 강성으로 인한 압축 시 좌굴현상(buckling) 때문이라 판단된다. 또한 전단 강도는 편차가 작았으나, 일방향 복합재료의 전단강성은 편차가 높게 나타났는데, 그 이유는 불균일한 섬유체적율의 분포 때문이라 생각된다.

Table 3. Tensile test results

Case		Strength [MPa]	Modulus [GPa]	Poisson's ratio
JYL	AVE	129.8	14.25	0.407
	COV(%)	6.94	4.52	4.88
JYT	AVE	19.61	4.282	0.113
	COV(%)	6.71	3.15	6.38
JFI	AVE	53.69	5.102	0.339
	COV(%)	5.45	4.64	7.49
EPI	AVE	58.08	3.289	0.355
	COV(%)	8.50	0.27	1.32

Table 4. Compressive test results

Case		Strength [MPa]	Modulus [GPa]
JYL	AVE	151.9	11.31
	COV(%)	4.91	10.00
JYT	AVE	114.8	4.564
	COV(%)	8.10	8.45
JFI	AVE	93.39	3.565
	COV(%)	2.99	15.18
EPI	AVE	123.7	3.289
	COV(%)	2.25	(calculated)

Table 5. Shear test results

Case		Strength [MPa]	Modulus [GPa]
JYL	AVE	52.91	1.667
	COV(%)	7.80	
JYT	AVE	29.13	14.00
	COV(%)	7.24	
JFI	AVE	51.68	1.761
	COV(%)	2.98	
EPI	AVE	29.04	1.214
	COV(%)	(calculated)	

Fig. 4는 인장시험에 대한 응력-변형률 곡선이 다. 지지파괴가 주된 메카니즘인 JYT (90°방향 yarn)와 EPI를 제외한 JYL (0°방향 yarn)과 JFI (felt)의 경우 응력-변형률 곡선에서 재료 비선형성을 미미하게 보이는데, 이는 SEM에서 확인한 것과 같이 황마섬유 자체의 크기와 형태가 일정하지 않기 때문이라고 판단된다.

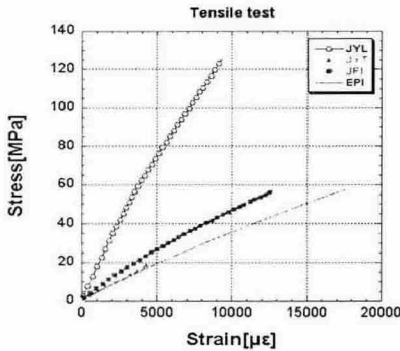


Fig. 4 Tensile stress-strain curves.

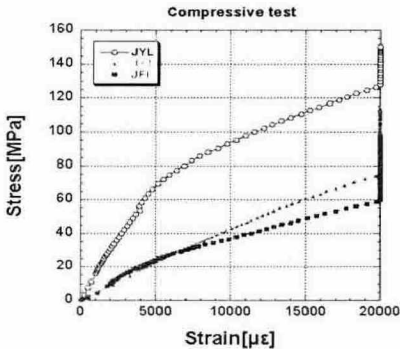


Fig. 5 Compressive stress-strain curves.

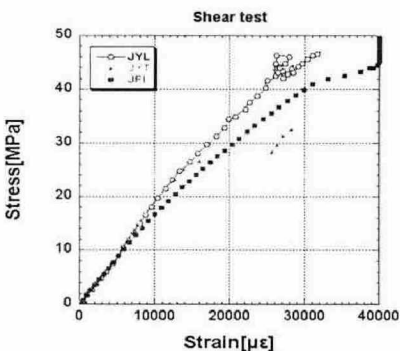


Fig. 6 Shear stress-strain curves.

Fig. 5는 압축시험에 대한 응력-변형률 곡선이 다. 그림에서 보면 20000 $\mu\epsilon$ 이상의 변형률은 측정하지 않았는데, 이는 2000 $\mu\epsilon$ 에서 4000 $\mu\epsilon$ 사이의 탄성구간 내 탄성계수 측정에 필요한 데이터 수를 확보하기 위해 데이터 획득 범위를 줄임으로써, 입력값이 측정범위를 초과하여 파손 변형률까지 데이터를 구하지 못했기 때문이다. 또한, 인장결과보다 응력-변형률 곡선에서 재료 비선형성이 더 크게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 일정하지 않은 황마섬유의 굵기와 직경 등의 영향과 함께 섬유와 수지간의 계면 접착력에 문제가 있기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6의 전단시험의 응력-변형률 곡선을 보면 황마섬유가 강화된 모든 경우에 대하여 약한 비선형성을 보이며 파괴가 발생한 것을 볼 수 있는데, 이는 압축시험의 JYL과 JFI와 마찬가지로 섬유와 기지간의 계면 접착력 취약으로 인하여 하중 전달이 제대로 이루어지지 않았기 때문이라고 판단된다.

### 3.3 결과분석

Fig. 7은 재료 별 각 시험에 대한 강도 변화를 나타낸 그래프다. 그림에서 보면 에폭시의 인장과 압축강도에 비해 황마섬유로 강화된 복합재료의 강도가 큰 폭으로 향상되지 않은 것을 알 수 있다. 오히려 JYT와 JFI의 경우 감소된 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 언급한대로 섬유와 기지간의 계면결합력이 미약하여 기지내 자연섬유가 결합으로 작용했기 때문이라고 생각된다. 유리섬유 복합재료와 기계적특성을 비교하기 위하여 황마섬유 펠트와 구조 및 섬유체적율이 비슷한 Glass SMC/Epoxy(31vol%) 복합재료의 인장강도를 비교하였다. Fig. 7에서 GES로 표기한 유리섬유 복합재에 비하여 황마섬유 복합재료는 약 40%의 강도수준을 보였다.

Fig. 8은 재료 별 각 시험에 대한 강성 변화를 나타낸 그래프다. 강성은 강도보다 계면특성의 영향을 덜 받기 때문에 대체적으로 모든 값들이 EPI에 비해 높게 유지되었다. 강도와 마찬가지로 강성의 경우에도 황마섬유 복합재료는 유리섬유 복합재료에 비하여 약 50% 수준을 보였다. 황마섬유 복합재료의 기계적 특성이 에폭시 특성보다 떨어지는 경우(JYT 및 JFI)나 황마섬유 복합재료의 기계적 특성(JFI)이 유리섬유 복합재료(GES)보

다 낮은 이유는 섬유-기지간 계면접착력이 약하기 때문이며, 추후 이에 대한 연구가 필요하다.

Fig. 9는 거의 동일한 프리폼 구조를 가지는 JFI와 GES에 대한 비강도(강도/밀도)와 비강성(강성/밀도)을 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 황마섬유의 밀도가 유리섬유보다 낮기 때문에 단순히 강도와 강성을 비교한 결과보다 낮은 격차를 보였으며, 비강도 및 비강성은 유리섬유의 약 80% 및 90% 수준에 근접하고 있다. 따라서 부품의 경량화가 많이 요구되는 분야에 자연 섬유 복합재료가 앞으로 활발하게 적용될 수 있을 것이다.

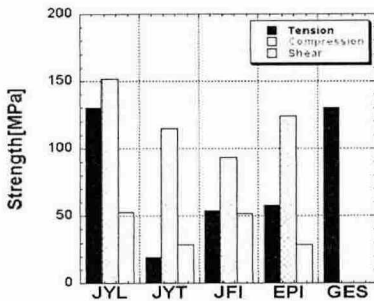


Fig. 7 Strength comparison.

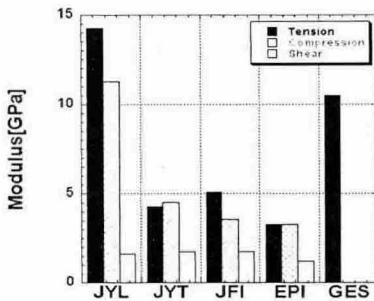


Fig. 8 Modulus comparison.

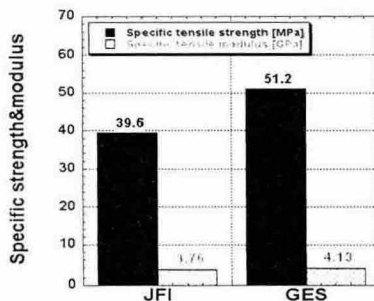


Fig. 9 Comparison of specific properties.

#### 4. 결 론

본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사용한 황마섬유의 밀도는  $1.358 \text{ g/cm}^3$ 이었으며, 일방향 복합재료에 사용된 yarn의 경우 그 꼬인 각은 약  $17^\circ$ 였다. RTM 공정을 이용하여 일방향 복합재 및 펠트 복합재를 제조하였으며, 섬유 체적율은 약 34%였다.
- (2) 모든 시험에 나타난 재료 비선형성은 황마섬유 자체의 불균일성과 섬유-기지간 결합특성의 저하로 인한 것이라고 볼 수 있다.
- (3) 황마섬유 펠트와 거의 동일한 구조의 유리섬유 복합재료의 물성을 비교하면, 강도는 약 40%, 강성은 약 50% 수준이었고, 비강도와 비강성은 황마섬유의 낮은 밀도로 인하여 각각 그보다 높은 약 80%, 90%였다.
- (4) 황마섬유와 기지간의 결합특성을 향상시키기 위한 섬유 전처리에 대한 연구가 반드시 필요하며, 추후 이에 대한 연구를 진행할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 핵심연구개발사업 및 21C 프론티어 사업(차세대 소재성형 기술 개발사업)과 산업자원의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) T. J. Reinhart(Eds), "Composite", ASM International, Vol. 1, 1987, pp.27~42.
- (2) T. Munikenche Gowda, A.C.B. Naidu, Rajput Chhaya, "Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites", Composite part A, 30, 1999, pp. 277~284.
- (3) Alexander Bismarck, Ibon Aranberri-Askargorta and Jurgen Springer, "Surface Characterization of Flax, Hemp and Cellulose Fibers; Surface Properties and the Water Uptake Behavior", Polymer Composites, Vol.23, No.5, 2002, pp. 872~894.
- (4) 변준형, "자연섬유를 이용한 복합재료 기술", 기계와 재료, 8권, 2호, 1996, pp. 62~70.