

초산비닐수지계 접착제를 사용한 유리섬유강화플라스틱 복합집성재의 강도 성능 평가

박준철*² · 홍순일*^{2†}

Strength Properties of GFRP Reinforced Glulam Beams Bonded with Polyvinyl Acetate-Based Emulsion Adhesive

Jun-Chul Park*² · Soon-Il Hong*^{2†}

요 약

유리섬유강화플라스틱(GFRP : Glass fiber reinforced plastic) 보강 집성재를 제작한 후 유리섬유강화플라스틱의 체적비에 따른 휨강도 성능을 평가하였다. 집성재 제작에는 평균함수율 8%, 비중 0.54의 국산 낙엽송 (*Larix kaempferi* Carr.) 제재판(2 cm (h) × 10 cm (b) × 360 cm (l))을 7층으로 적층하여 집성재(10 cm (b) × 14 cm (h) × 180 cm (l))를 제작하였다. 유리섬유강화플라스틱은 인장응력을 받는 하층의 최외각층과 윗층 사이에 두께 0.1 cm (체적비 0.7%)와 0.3 cm (체적비 2.1%)로 보강하였다. 유리섬유강화플라스틱을 체적비 0.7% 보강한 집성재의 경우 Control 집성재보다 휨강도가 12% 정도 증가하였으며 체적비 2.1%를 보강한 집성재의 경우 휨강도가 28% 정도 증가하였다. 또한, 유리섬유강화플라스틱 보강층이 파단의 진행을 억제하였으며 파괴되지 않은 부분은 약 90%의 휨강도를 유지하고 있었다. 접착성능 평가 결과 블록 전단 강도는 KS F3021의 합격기준 7.1 N/mm²를 만족하였으며 침지박리시험과 삶음박리시험 결과 박리율 5% 이하로 접착성능도 양호하였다.

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the bending strength properties of the unreinforced glulam beams and the GFRP laminated glulam beams according to the volume ratio of GFRP. The 7-layer glulam beams (10 cm (b) × 14 cm (h) × 180 cm (l)) were manufactured, using Larch (*Larix kaempferi* Carr.) laminae (2 cm (h) × 10 cm (b) × 360 cm (l)), which were dried to the moisture

*¹ 접수 2008년 3월 26일, 채택 2008년 4월 2일

*² 강원대학교 산림환경과학대학 임산공학과. Department of Wood Science & Engineering, College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

† 주저자(corresponding author) : 홍순일(e-mail : hongsi@kangwon.ac.kr)

content of 8% and specific gravity of 0.54. GFRP of 0.1 and 0.3 cm was reinforced between the outmost layer of bottom and next layer. When the glulam beams were reinforced with GFRP at the volume ratio of 0.7% and 2.1%, respectively, the bending strength was increased by 12% and 28%, respectively, in the reinforced beams than in control glulam beams. Also, the GFRP reinforced layer of the glulam beams with GFRP laminations blocked the progression of rupture, and the unbroken part held about 90% of the bending strength. In the results of glue joints test, the block shear strength is higher than 7.1 N/mm^2 , the standard of KS F3021, and in the result of delamination, the adhesive strength is good as the water soaking and boiling delamination was less than 5%.

Keywords: GFRP, reinforced glulam, PVAc adhesive, bending, delamination

1. 서 론

유리섬유 강화집성재에 관한 연구는 오래전부터 시작되었지만, 유리섬유자체가 고가이고 특수 분야에만 사용되었기 때문에 활발한 연구가 행하여 지지 못하였다. 하지만 근래에 들어오면서 유리섬유의 보편화로 인하여 미국을 비롯한 외국에서는 토목이나 건축분야의 구조용 부재의 보강재로 유리섬유 강화집성재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유리섬유의 형상은 크게 직물형태와 스트랜드 형태로 나눌 수 있는데 직물 유리섬유는 재단의 편리성이나 접착면 도포에 용이하지만 스트랜드에 비해 접착 성능면에서 좋지 않기 때문에 본 실험에서는 스트랜드 형태인 유리섬유강화 플라스틱(GFRP)을 사용하였다.

섬유강화플라스틱 보강 집성재의 연구는 1990년대에서 섬유와 섬유강화플라스틱을 이용한 보강방법에 대한 연구가 증가하였다. Abdel 등(1994)은 인장면에 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)과 케블라섬유강화플라스틱(KFRP) 보강에 관한 연구를 하였고 Hernandez 등(1997)은 엘로 포플러 집성재의 인장면 또는 인장면과 압축면에 유리섬유강화플라스틱으로 보강하여 강도성능을 평가하였다. 목재와 보강재로 사용된 유리섬유강화플라스틱의 접착은 레소시놀 접착제를 사용하였으며 실제 상용되는 형태의 실대재를 제작하여 실험하였다. 실험결과 유리섬유강화플라스틱으로 3%의 부피 증가로 강성은 18%, 강도는 26%의 증가하였다고 보고하였다. Dagher

등(1996)은 낮은 등급의 Eastern hemlock으로 인장면에 섬유강화플라스틱을 접착한 9개의 집성재와 3개의 표준시편을 사용하여 4점 하중으로 휨강도 시험을 하였다. 집성재는 저급, 중급, 고급 3등급으로 구분하였으며 섬유강화플라스틱의 보강 비율은 0.3~3.1%로 하였다. 실험결과 저급 집성재의 경우 섬유강화플라스틱으로 보강하였을 때 강도는 43%, 강성은 31% 증가하였고 고급 집성재의 경우 강도는 24~27%, 강성은 25~29% 증가하여 강도 향상이 가능하였으며 저급 집성재의 경우 상대적으로 높은 강도 증가를 보였다.

섬유강화플라스틱 복합집성재는 서로 다른 재료를 복합한 것으로 섬유강화플라스틱과 목재의 접착력이 중요하다. 일반적으로 유리섬유강화플라스틱 접착에는 에폭시 수지 접착제가 사용되나 다른 접착제에 비해 가격이 높을 뿐만 아니라 목재와 접착에서는 목재용 접착제보다 접착력이 떨어진다. Gardner 등(1994)은 목재와 섬유강화플라스틱 접착시 레소시놀 접착제가 에폭시 수지 접착제와 EPI(에멀전 폴리머 이소시아네이트계 접착제)보다 접착력이 우수하다고 보고하였다. 본 실험에 앞서 레소시놀 수지 접착제와 초산비닐수지계 접착제(PVAc계, 주제: MPU-500, 경화제: HH-50)의 예비접착성능 평가를 하였다. 예비실험 결과 전단강도에서는 레소시놀 수지 접착제와 초산비닐수지계 접착제가 비슷한 강도를 보였으나 침지박리 시험에서 목재와 유리섬유강화플라스틱의 접착성능이 레소시놀

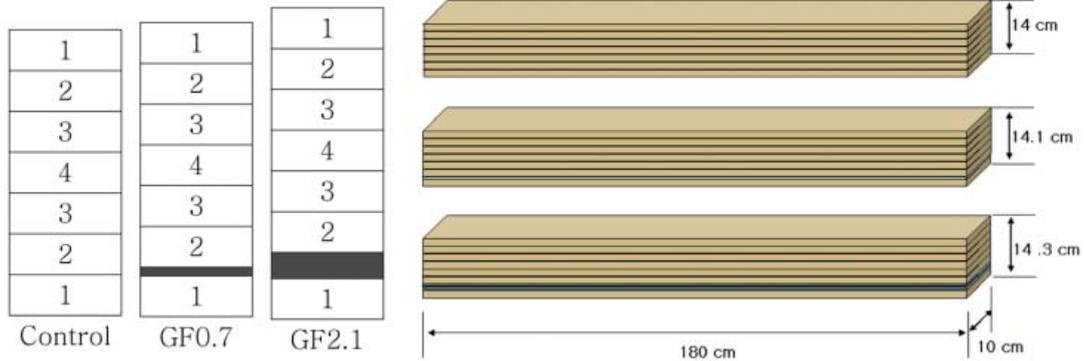


Fig. 1. Illustration of glulam beams with GFRP laminations.

수지 접착제보다 초산비닐수지계 접착제의 접착 성능이 우수하여 본 실험에서는 초산비닐수지계 접착제를 사용하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 공시재료

집성재 제작에는 평균함수율 8%, 비중 0.54의 2 cm (h) × 10 cm (b) × 360 cm (l) 국산 낙엽송 (*Larix kaempferi* Carr.) 제재판을 사용하였다. 보강재로는 목재에 비해 인장강도와 휨강도가 우수하고 변형이 적은 두께 0.1 cm와 0.3 cm의 유리섬유강화플라스틱(GFRP : Glass fiber reinforced plastic) 시트를 사용하였다. 실험에 사용된 유리섬유강화플라스틱의 인장강도는 1,632 N/mm², 휨강도는 2,500 N/mm² 이었다.

2.2. 집성재 제작

제재판의 영계수는 종진동의 고유진동수를 이용한 탄성계수에 따라 4등급으로 구분하여 타입별 집성재의 조합이 동일하게 제작하였다. 제재판 등급은 준비된 제재판의 개수에 따라 11,7000 kgf/cm² 이상은 1등급으로 90,000 kgf/cm² 이하는 4등급으로 임

의 구분하여 선별하였다. 집성재는 7층으로 적층하여 10 cm (b) × 14 cm (h) × 180 cm (l) 크기로 제작하였다. 집성재의 조합은 최외각층에 상대적으로 탄성계수가 높은 1등급($E \geq 117,000 \text{ kgf/cm}^2$)의 제재판을 적층 시키고 중간층은 2등급($11,7000 \geq E > 100,000 \text{ kgf/cm}^2$)과 3등급($10,0000 \geq E > 90,000 \text{ kgf/cm}^2$), 내층은 응력등급이 가장 낮은 4등급($90,000 \text{ kgf/cm}^2 \geq E$)의 제재판을 적층시켰다. 유리섬유강화플라스틱 복합 집성재는 인장응력을 받는 하층의 최외곽층과 윗층 사이에 두께 0.1 cm와 0.3 cm의 유리섬유강화플라스틱으로 보강하였다. 유리섬유강화플라스틱은 접착성을 높이기 위하여 표면을 사포로 샌딩하였다. 집성재 제작에 사용된 접착제는 초산비닐수지계 접착제((주)오공, 주재: MPU-500, 경화제: HH-50)를 사용하였다. 초산비닐수지계 접착제는 수지율 48%, 점도 6,300~7,500 CPS, pH 7~8이었다. 주재와 경화제를 10:1의 비율로 혼합하여 제조하였으며 접착제 도포는 양면 도포로 라미나의 한 면 도포량을 300 g/m²로 하였다. 집성재 제작의 압제압력은 단위면적당 10 kgf를 가하였다. 집성재는 다음과 같이 유리섬유강화플라스틱의 보강비에 따라 유리섬유강화플라스틱을 보강하지 않은 Control재와 두께 0.1 cm의 유리섬유강화플라스틱으로 체적비 0.7 % 보강한 GF0.7, 두께 0.3 cm 유리섬유강화플라스틱으로 체적비 2.1 % 보강한 GF2.1로 3가지 타입으로 제작하였다.

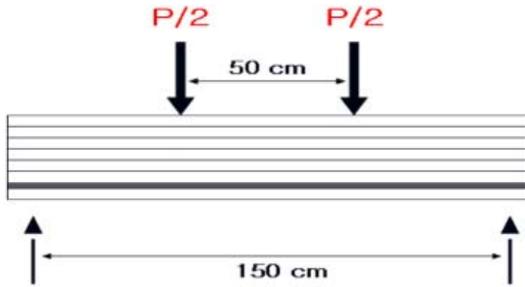


Fig. 2. Bending test.

2.3. 휨강도 시험

제작된 집성재의 강도적 성능을 평가하기 위하여 KS 3021에 따라 3등분 4점 하중법으로 실험을 실시하였다. 지점간 거리를 150 cm로 하여 하중의 부하에 따른 변형을 측정하고 휨탄성계수(MOE)와 휨강도(MOR)를 구하였다.

휨강도와 휨탄성계수는 다음 식으로 산출하였다.

$$MOR = \frac{3P(l-S)}{2bh^2} \quad (N/mm^2)$$

$$MOE = \frac{\Delta P(l-S)(2l^2 + 2lS - S^2)}{8\Delta ybh^3} \quad (N/mm^2)$$

S : 지점간의 거리 (mm)

l : 스펠 길이 (mm)

b : 집성재의 폭 (mm)

h : 집성재의 두께 (mm)

P : 최대하중

Δy : 변형량 (mm)

ΔP : 하중 (N)

2.4. 접착 성능 평가

2.4.1. 박리시험

접착성능 평가를 위하여 KS F3021에 따라 침지 박리 시험과 삶음 박리 시험을 실시하였다. 침지 박

리 시험은 집성재 휨강도 시험 후 끝에서부터 7.5 cm로 자른 시험편을 상온(약 20°C)에서 물속에 24시간 침지시킨 후 (70 ± 3)°C의 항온 건조기에 넣었다. 삶음 박리 시험은 침지 박리 시험 시험편과 동일하게 제작한 후 시험편을 끓는 물(약 99°C)에서 4시간 침지시킨 후 (70 ± 3)°C의 항온 건조기에 넣었다. 건조기 내에 습기가 차지 않도록 하며 24시간 이상 건조하여 건조 후의 함수율이 시험 전의 함수율 이하가 되도록 하였다. 시험편의 양쪽 횡단면에 나타나는 접착층의 박리 중에서 길이 3 mm 이상인 것의 길이를 측정하고 건조나 응이 등에 의한 목재의 갈라짐은 측정에서 제외하였다.

2.4.2. 블록 전단강도 시험

휨 강도시험에서 사용한 집성재를 KS F 3021의 전단 표준 규격에 맞게 전단블록을 제작하였다(Fig. 3). 전단블록은 제재판과 제재판이 접착된 부분과 제재판과 유리섬유강화플라스틱이 접착된 부분으로 구분하여 제작하였다. 제작된 시험편을 가지고 만능강도 시험 장치인 인스트롱 4482에서 9,800 N/min.의 하중 속도로 시험편이 파괴될 때까지 하중을 가하였다. 전단 강도는 다음 식으로 산출하였다.

$$\text{전단강도}(N/mm^2) = \frac{\text{시험편파괴시의하중}(N)}{\text{접착면적}(mm^2)}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 집성재의 휨강도 시험

Fig. 4는 각 타입별 하중, 변형 곡선을 나타낸 것이다. Control 재의 경우 최대하중이 약 60 kN이었고 0.7% 보강한 GF0.7은 약 70 kN에서 파단되었다. 체적비의 2.1% 보강한 GF2.1의 최대하중은 약 75 kN였다. 탄성영역인 30 kN에서의 처짐을 비교해 보면 Control 재는 9.8 mm 변형되었고 GF0.7은 8.3 mm로 Control 재보다 낮은 처짐을 보였다. GF2.1의

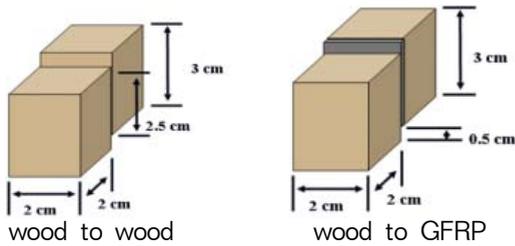


Fig. 3. Shear blocks.

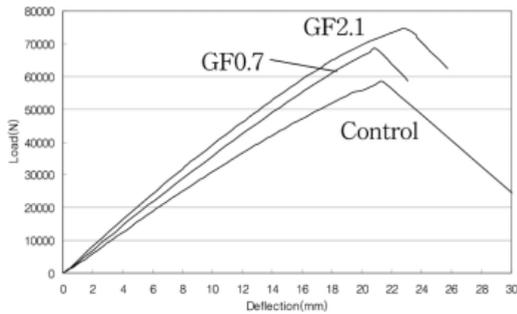


Fig. 4. Load-deflection curve.

처짐은 7.5 mm였다.

Table 1은 휨강도 실험을 통하여 휨탄성계수와 휨강도를 산출한 것이다. Control 시편의 평균 휨탄성계수는 7,591 N/mm², 유리섬유강화플라스틱을 체적비 0.7% 보강한 시편의 평균값은 8,258 N/mm², 체적비 2.1% 보강한 시편의 평균값은 8,510 N/mm²로 0.7% 보강한 집성체는 9% 증가, 2.1% 보강한 집성체는 12% 증가한 것을 알 수 있었다. 휨강도는 Control의 경우 43.62 N/mm², GF0.7은 48.77 N/mm²로 Control 재보다 12% 증가하였고 체적비 2.1% 보강한 GF2.1은 55.87 N/mm²로 Control 재보다 28% 증가하였다. Hernandez 등(1997)은 유리섬유강화플라스틱으로 3%의 부피 증가로 강성은 18%, 강도는 26%의 증가하였다고 했으며 Dagher등(1996)은 0.3~3.1% 보강하여 강도는 24~27%, 강성은 25~29% 증가한다고 보고하였는데 본 실험 결과 역시 작은 체적비의 보강만으로도 큰 강도 향상을 얻을 수 있었다. 파괴형상을 보면 Control의 경우 최하단부터 상층까지 파단이 계속 진행되어 전체적으로 파단된 것을 볼 수 있었다. 반면, 유리섬유강화플라스틱으

Table 1. Results of bending strength

Specimens	MOE ($\times 10^3$ N/mm ²)	MOR (N/mm ²)	Ratio of strength
Control	7.6 (0.55)	43.62 (10.12)	1
GF0.7	8.3 (0.26)	48.77 (4.15)	1.12
GF2.1	8.5 (0.38)	55.87 (2.88)	1.28



Fig. 5. Photographs of rupture.

로 0.7%, 2.1% 보강한 시험편의 경우 인장응력을 받는 최외각층에서 파단이 일어난 후 유리섬유강화플라스틱으로 보강된 층 이후로는 더 이상 파단이 진행되지 않는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5).

Fig. 6은 유리섬유강화플라스틱 0.7% 보강된 집성체의 하중, 변형 곡선으로 최하중에서 파단된 후

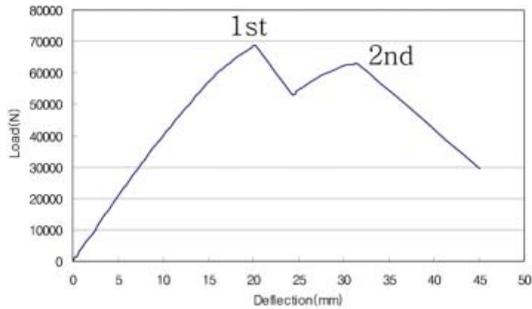


Fig 6. Load-deflection curve.

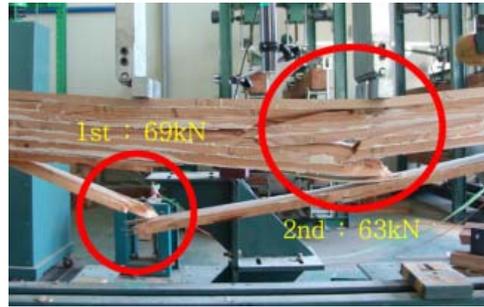


Fig. 7. Photograph of rupture.

Table 2. Ratio of water soaking and boiling delamination

Specimens	Delamination after water soaking (%)	Delamination after boiling (%)	Requirement (KS F3021)
Control	0.28 (0.55)	0.74 (0.72)	
GF0.7	1.08 (1.15)	5.01 (19.4)	5%
GF2.1	1.95 (3.70)	1.40 (1.64)	

Table 3. Results of shear strength

Specimens	Shear strength (N/mm ²)	Requirement (KS F3021)
wood to wood	7.89 (291)	111
wood to GFRP	10.79 (290)	152

계속 하중을 가하여 완전한 파괴가 될 때까지 시험한 것이다. 최대하중 69 kN일 때 1차 파괴가 일어난 후 하중이 약 50 kN까지 떨어졌다가 하중이 가해짐에 따라 다시 증가하여 63 kN에서 2차 파괴가 일어났다. 1차 파단 이후 하중이 증가하였지만 최대하중에는 미치지 못하였다. 파괴형상을 보면 최대하중 69 kN에서 최하단부만 파단되었고 2차 파괴가 된 63 kN에서 유리섬유강화플라스틱으로 보강된 상단 부위가 완전히 파괴된 것을 볼 수 있었다.

집성재 내부에 유리섬유강화플라스틱을 적층시켜 주면 인장부의 파단 진행을 억제되는 효과가 있었으며 1차 파단 후에도 파괴되지 않은 부분은 약 90%의 휨강도가 잔존하는 것을 확인하였다.

3.2. 집성재의 접착성능

박리 시험 결과 Control 시편의 경우 침지 박리율과 삶음 박리율 모두 KS F3021의 5% 이하를 만족하였다(Table 2). 유리섬유강화플라스틱 체적비 0.7% 보강한 집성재는 침지 박리율은 합격기준을 만족하였지만 삶음 박리율은 평균 5.01%로 합격기준을 만족하지 못하였다. 유리섬유강화플라스틱 체적비 2.1% 보강한 집성재는 침지 박리율과 삶음 박리율 모두 KS F3021을 만족하였다.

Table 3은 집성재의 블록 전단 강도 시험 결과로 Control의 경우 7.89 N/mm²였고 유리섬유강화플라스틱 보강한 시편의 경우 10.79 N/mm²로 KS F3021의 합격기준 7.1 N/mm²를 모두 만족하였다.

4. 결 론

유리섬유강화플라스틱으로 집성재를 보강하면 Control 집성재에 비해서 체적비 0.7%를 보강한 집성재의 경우 휨강도가 12%, 체적비 2.1%를 보강한 집성재의 경우 28% 정도 증가하였다. Control 집성재의 경우 인장부위의 하층에서부터 상층으로 파단이 진행되었으나 유리섬유강화플라스틱을 보강한 집성재에서는 인장부위의 하층부근에서 파단이 일어나 유리섬유강화플라스틱으로 보강된 층 위로는 파단이 진행되지 않아 보의 안전성을 높일 수 있었으며 1차 파단 후에도 파괴되지 않은 부분은 약 90%의 휨강도를 보유하고 있었다. 집성재의 접착성능을 평가한 결과 블록 전단 강도 시험과 박리 시험 모두 합격기준을 만족하여 목재와 유리섬유강화플라스틱과의 접착으로 인한 접착력 저하는 크지 않았다.

사 사

본 연구 수행에 있어 많은 도움을 주신 (주)신성소재 신승수 사장님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Dagher, H. J., T. E. Kimball, S. M. Shaler, and B. Abdel-Magid. 1996. Effect of FRP reinforcement on low grade eastern hemlock glulams. Res. Pap. FPL-GTR-94. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 207P.
2. Davids, W. G., H. J. Dagher, and J. M. Breton. 2000. Modeling creep deformation of FRP-reinforced glulam beams. Wood and Fiber Science. 32(4): 426~441.
3. Gardner, D. J., J. F. Davalos, and U. M. Munipalle. 1994. Adhesive bonding of pultruded fiber-reinforced plastic to wood. Forest Products Journal. 44(5): 62~66.
4. Hernandez, R., J. F. Davalos, S. S. Sonti, Y. Kim, and R. C. Moody. 1997. Strength and stiffness of reinforced yellow-poplar glued-laminated beams. Res. Pap. FPL-RP-554. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
5. Moulin, J. M., G. Pluvinage, and P. Jodin. 1990. FGRG: Fiberglass reinforced glulam - A new composite. Wood Sci. Technol. 24: 289~294.
6. Romani, M. and H. J. Blaß. 2001. Design model for FRP reinforced glulam beams. Meeting thirty-four Venice Italy August 2001. 1~10.