

# FRP 보강적층판의 접착성능 및 파괴인성평가<sup>1</sup>

정 홍 주<sup>2</sup> · 홍 순 일<sup>2,†</sup>

## Adhesive Performance and Fracture Toughness Evaluation of FRP-Reinforced Laminated Plate<sup>1</sup>

Hong-Ju Jung<sup>2</sup> · Soon-Il Hong<sup>2,†</sup>

### 요 약

목구조물 접합부에 기존의 슬릿(slit)형 강판을 대체하기 위해서 FRP (Fiber Reinforced Plastic) 보강적층판을 제작하였다. 보강재, 접착제 종류에 따라 총 4가지 타입의 FRP 보강적층판을 제작하였으며, 접합부 적용 전 KSF 3021과 KSF 2160에 의거한 박리실험과 ASTM D5045-99에서 제안한 Compact Tension (CT)형 파괴인성 시험을 실시하였다. 접착성능 시험결과 GFRP textile, GFRP sheet, GFRP Textile-Sheet 타입의 FRP 보강적층판은 침지 및 내수침지박리 시험에서 모두 KS 기준인 박리율 5% 이하를 만족하였다. 그러나 Aramid 타입의 시험편은 침지박리율 4.8%로 기준을 만족하였으나 내수침지박리율 70%로 합격기준을 만족하지 못하였다. 파괴인성 시험결과 단판만을 교차적층 시킨 대조군시험편보다 목재 대비 보강재 체적비를 23%로 함으로서 FRP 보강적층판의 내력이 2~4배 증가하였다. 그중에서도 GFRP Textile-Sheet 타입의 시험편이 하중 평행방향의 유리섬유 배열로 인해 할렬파단을 억제하면서 대조군 대비 응력확대계수 비가 61% 증가되어 파괴를 가장 크게 억제하는 것으로 확인되었다. FRP 보강적층판과 비금속 dowels를 사용한 접합부의 인장형 전단내력은 금속접합에 비해 약 12% 낮은 내력이 측정되었다.

### ABSTRACT

In order to replace existing slit type steel plate on the wooden structure joint, the FRP-reinforced laminated plates were produced. Four types of FRP-reinforced laminated plates were produced according to the type of reinforcement and adhesive, and before applying to the joint, the adhesion performance test according to KSF 3021 and KSF 2160 and the Compact Tension (CT) type fracture toughness test specified in ASTM D5045-99 were carried out. As a result of adhesion performance test, all GFRP textile, GFRP sheet, and GFRP Textile-Sheet type FRP-reinforced laminated plates satisfied the requirement of soaking delamination percentage with smaller than 5% based on KS standard. However, aramid type specimen satisfied the standard as the soaking delamination percentage of 4.8% but it did not satisfied the standard as the water proof soaking delamination percentage of 70%. As a result of fracture toughness

<sup>1</sup> Date Received August 10, 2015, Date Accepted November 9, 2015

<sup>2</sup> 강원대학교 산림환경과학대학 산림바이오소재공학과. Department of Forest Biomaterials Engineering, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

<sup>†</sup> 교신저자(Corresponding author): 홍순일(e-mail: hongsi@kangwon.ac.kr)

test, the volume ratio of reinforcement to timber became 23% so that the strength of FRP-reinforced laminated plates increased by two to four times in comparison to the control specimen. It was confirmed that the GFRP Textile-Sheet type specimen was most resistant to the fracture most since the ratio of stress intensity factor compared with that of the control increased to 61% owing to the parallel arrangement of glass fiber to the load. As a result of tensile shear strength test using FRP-reinforced laminated plates and nonmetal dowels, it is about 12% lower than metal connectors.

**Keywords :** adhesive, veneer, fiber reinforced plastic, soaking delamination, fracture toughness, joints

## 1. 서 론

기존의 슬릿(slit)형 강판 및 금속 접합물을 이용한 접합부는 목재와 금속의 강도 차이로 인해 목재의 섬유방향 하중 시 할렬파단이 일어나며 이는 취성과 파괴로 이어져 접합부의 강도를 감소시키는 취약점으로 작용한다. 또한 금속철물의 부식과 미관상 부조화의 문제점을 가지고 있다.

Blaß *et al.* (2011)은 cross laminated timber (CLT) 또는 plywood, punched metal plate, nail plate, screws를 사용하여 접합부를 보강하였으며, 그 결과 지압응력이 향상하였고 접합부의 연성이 증가하였다고 하였다. Santos *et al.* (2013)은 목재 표면에 CFRP를 에폭시 접착제를 사용하여 접착하거나, 접합구 구멍에 새로운 보강철물을 이용하여 접합부를 보강하였으며, 지압응력 시험을 통해 강도성능 향상을 확인하였다. 또한 CFRP 보강이 목재의 취성과파괴를 제거하는데 효과적이라 하였다. 과거에는 보강재로 철판이나 알루미늄과 같은 금속재료가 사용되었으나 그 후 금속재료보다 경량화 되고 우수한 강도특성을 지닌 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced Plastic; FRP)이 보급되면서 유리섬유강화플라스틱(GFRP), 탄소섬유강화플라스틱(CFRP), 아라미드섬유강화플라스틱(AFRP) 등에 대한 연구가 증가하고 있다.

종래의 목구조물의 접합부위 보강방법은 대부분이 보강철물을 통한 방법으로 접합구를 증가시키거나 보강강판을 사용하고 있는데, 이러한 방법은 목재 접합부의 근본적인 취약점인 할렬파단을 보강하지 못한다. 또한 FRP를 이용한 목재보강에 대한 연구는 부재 전체를 보강하거나 목재 표면에 부착시킴으로써 보강재가 상대적으로 많이 사용되거나 목재 표면

을 오염시키는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 FRP 보강적층판을 제작하였고 비금속 접합구와의 적용을 통해 기존의 슬릿형 강판과 금속 접합물을 이용한 접합부를 대체하고자 하였다. FRP-목재 복합소재에 대한 접착력 검토를 위해 4가지 타입의 FRP 보강적층판에 대하여 KS F 3021과 KS F 2160에 의거한 박리시험을 진행하였으며, FRP-목재의 일체성 및 보강재 조합에 따른 파괴인성 성능을 알아보기 위해 ASTM D5045-99에서 제안한 Compact Tension (CT)형 파괴인성 시험을 실시하였다. 최종적으로 FRP 보강적층판-비금속 dowels 접합부의 인장형 전단내력 성능시험을 통해 강판-금속 dowels 접합부와 접합성능을 비교, 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

실험에 사용된 단판의 수종은 라디에타소나무(*Pinus radiata* D. Don)로 단판의 평균 함수율은 8.5%, 평균비중은 0.53이었다. 보강재는 총 4가지 타입을 사용하였으며 시트형태의 GFRP (이하, GFRP sheet), 직물형태의 GFRP (이하, GFRP textile), 직물형태의 Aramid 섬유, 직물형태와 시트형태가 혼합된 GFRP (이하, GFRP Textile-Sheet)를 사용하였다 (Fig. 1).

GFRP sheet는 유리섬유를 동일한 방향으로 성형하여 판의 형태로 가공한 형태로 두께는 1.2 mm이다(Fig. 1-a). GFRP textile은 5 mm의 섬유다발이 격자 모양으로 평직 배열된 상태이며 두께는 0.4 mm

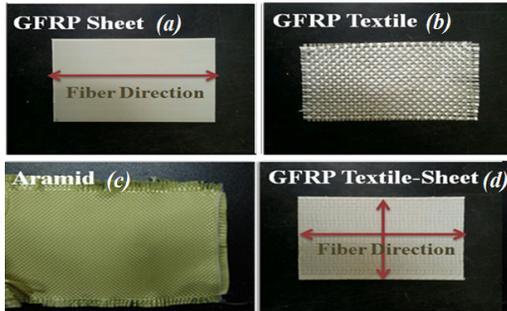


Fig. 1. Materials of reinforcement.

이다(Fig. 1-b). Aramid는 직물형태로 폭 1.5 mm의 섬유다발이 평직으로 배열되어 있으며 두께는 0.4 mm이다(Fig. 1-c). GFRP Textile-Sheet는 직물형태의 GFRP를 불포화 폴리에스테르 수지를 사용하여 판의 형태로 가공한 것으로 두께는 1.2 mm이다(Fig. 1-d).

FRP 보강적층판 제작에 사용된 접착제는 레조시놀수지, 초산비닐수지, 폴리우레탄수지를 사용하였다.

## 2.2. FRP 보강적층판 제작

FRP 보강적층판은 라디에타소나무 단판과 각 타입의 보강재를 조합하여 제작하였다. 단판은 각층의 섬유 방향이 서로 직교되게 적층하였으며, 각 타입의 보강재를 단판과 단판 사이에 삽입하여 적층하였다. 대조군 시험체는 단판만으로 구성된 시편으로 레조시놀수지를 사용하여 접착하였으며, 단판과 보강재의 접착에는 선행 연구된 접착성능 실험결과를 토대로 각각의 보강재에 적합한 접착제를 선정하여 사용하였다(Park *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011). 압체압력 1.96 N/mm<sup>2</sup>, 온도 100℃로 1시간 동안 열압 하였으며, 완성된 보강적층판의 보강재 체적비는 23%로 동일하게 하였다(Fig. 2).

## 2.3. FRP 보강적층판의 접착성능 시험

KS F 3021과 KS F 2160에 의거하여 침지박리 시험과 내수 침지박리 시험을 진행하여 접착성능 시험

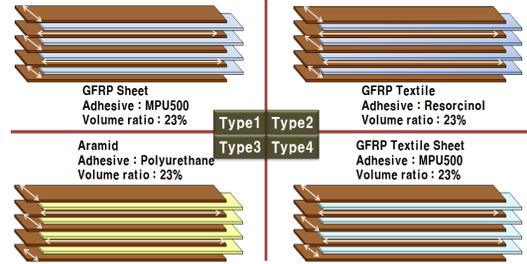


Fig. 2. FRP-reinforced laminated plates in accordance with combination of the veneer and the reinforcement.

을 실시하였다. 침지박리 시험은 시험편을 상온(약 20℃)의 물속에 24시간 침지시킨 후 60 ± 3℃의 항온 건조기에 습기가 차지 않도록 하며 24시간 이상 건조하여 건조 후의 함수율이 시험 전의 함수율 이하가 되도록 하였다. 시험편의 양쪽 끝 단면에 나타나는 접착층의 박리 중에서 길이 3 mm 이상인 것의 길이를 측정하고 건조나 용이 등에 의한 목재의 갈라짐은 측정에서 제외하였다. 내수 침지 박리 시험은 시험편을 끓는 물에서 4시간 삶은 후 1시간 동안 상온의 물속에 침지시킨 후 60 ± 3℃에서 24시간 이상 건조하여 건조 후의 함수율이 시험 전의 함수율 이하가 되도록 하였고, 침지박리 시험과 동일하게 박리율을 측정하였다.

## 2.4. FRP 보강적층판의 파괴인성 시험

제작된 보강적층판을 ASTM D5045-99에서 제안한 Compact Tension (CT)형 파괴인성 시험편으로 제작하였다. Fig. 3과 같이 시험편의 길이는 볼트구멍에서 시편끝단까지의 거리인 끝면거리(7D)에서 볼트직경의 반지름을 뺀 리가먼트(ligament)길이와 노치(notch)길이를 합하여 산정하였다. 노치길이는 모든 시편이 동일하게 70 + 46 mm로 설정하였으며 리가먼트길이는 볼트직경(12 mm)의 7D로 하였다. 시험편은 인장하중을 가하기 위하여 직경 20 mm의 구멍을 선공하였다. 볼트를 통해 인장하중이 가해지는 볼트 구멍 2개로 이루어진 고정부는 시험편의 고정 구멍에 삽입된 볼트에 의해 축 주변을 상하로 회전

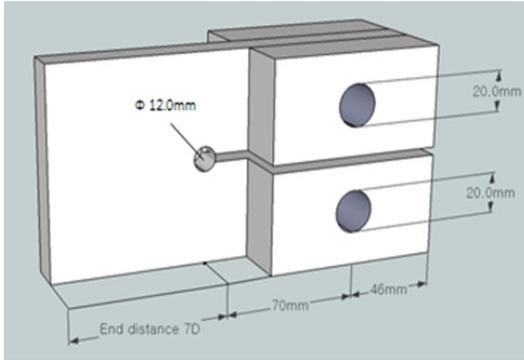


Fig. 3. Configuration of compact-tension test specimens.

할 수 있게 제작하였다. 또한 시험 중 시험편 고정부에서 파괴되는 것을 방지하기 위해서 두께 20 mm, 길이 100 mm의 라미나(lamina)를 양쪽에 덧대어 접착해주었다. 본 실험은 볼트구멍에서 발생하는 할렬에 의한 파괴인성을 실험하기 위한 것으로 시험편 끝단에서 7D 위치에 직경 12 mm로 선공하였으며, 인위적인 노치(notch)는 두께 4 mm의 둥근톱을 이용하여 생성하였다.

파괴인성실험은 CT시험편을 Fig. 4와 같이 만능강도시험기(Instron 4482)의 상단 로드셀과 하단의 고정바 사이에 고정시키며 시험편 인장하중에 의해 회전할 수 있도록 지그와 핀(직경 20 mm)으로 고정하였다. 이때 CT시험편과 지그 사이에 유격을 최소화하여 설치하였으며 시험 전 압축이나 인장하중이 걸리지 않도록 주의하였다. 하중과 개구변위(Crack Tip Opening Displacement; CTOD)는 만능강도시험기를 이용하여 측정하였으며 하중속도는 5 mm/min로 설정하여 실험하였다.

Control 시험편과 FRP 보강적층판의 항복하중은 ASTM에 의거하여 5%컴플라이언스법을 사용하였다. FRP 보강적층판의 실제 파괴인성실험을 통해 구해진 하중-변위곡선을 통하여 응력확대계수( $K_Q$ )를 구하고 비교, 검토하였다. 응력확대계수는 Compact Tension 시험편의 형상, 시험편의 물성치, 파괴항복하중을 통해 ASTM에서 제안한  $K_Q$ 는 실험식으로 산출하였다.

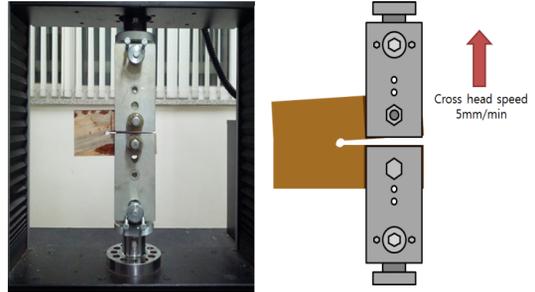


Fig. 4. Setup of fracture test with instron4482.

$$K_Q = \left( \frac{P_Q}{BW^{3/2}} \right) f(x) \dots\dots\dots (1)$$

$$f(0.2 < x < 0.8) = \frac{(2+x)(0.886 + 4.64x - 13.32x^2 + 14.72x^3 - 5.6x^4)}{(1-x)^2}$$

- $P_Q$  = load
- $B$  = specimen thickness
- $W$  = specimen width
- $a$  = crack length
- $x = a/W$

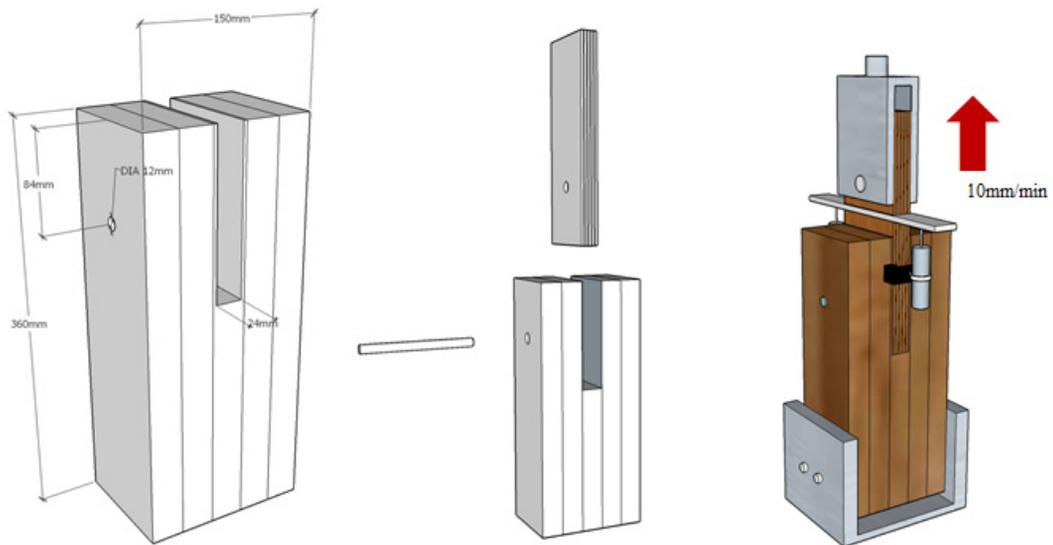
### 2.5. GFRP 보강적층판을 이용한 접합부의 인장형 전단내력 시험

슬릿(slit)형 접합의 주재료로서 평균 함수율 11%, 평균 비중 0.55의 5 ply 낙엽송(*Larix kampferi* Carr.)집성재를 사용하였다. 접합부재는 강판 또는 GFRP 보강적층판(Type-4 GFRP Textile-Sheet)을 사용하였으며, 직경 12 mm 탄소강재질의 드리프트핀(bending MOR: 1580 MPa), 목재핀(*Eucalyptus marginata*, bending MOR: 108 MPa), GFRP rod (bending MOR: 170 MPa)를 사용하였다.

인장형 전단내력 시험편은 접합부재의 종류를 달리하여 3가지 type으로 제작하였다. 대조군 시험편은 강판과 드리프트핀을 사용한 시험편으로 두께 8 mm 슬릿 가공하여 드리프트핀을 단거리 7D (84 mm) 부분에 삽입접합한 시험편이다. type-WA, type-GA는 GFRP 보강적층판 두께만큼 24 mm 슬릿을 가공하

**Table 1.** Resistance to water soaking and boiling water soaking delamination

Type	Water soaking delamination (%)	Boiling water soaking delamination (%)
Control	0	0
Type1 (GFRP Sheet)	2.5	3.4
Type2 (GFRP Textile)	0	0
Type3 (Aramid)	4.8	70
Type4 (GFRP Textile Sheet)	0	0



**Fig. 5.** Test of FRP-reinforced laminated plate joint with wood pin (*Eucalyptus marginata*) and GFRP rod in parallel to the grain loading.

였으며, GFRP 보강적층판을 슬릿 내에 에폭시 수지를 도포하여 접착 후 목재핀(*Eucalyptus marginata*, type-WA) 또는 GFRP rod (type-GA)를 단거리 7D (84 mm)부분에 삽입접합한 시험편이다(Fig. 5).

시험편이 연직 방향에 평행이 되게 한 후 인장하중을 가하여 실험을 실시하였다. 하중에 따른 접합부 변형은 양측에 부착된 2개의 변위계로 측정하여 평균값을 사용하였다. 유압하중장치 및 컴퓨터 제어가 가능한 Data-Logger (TDS303)를 사용하여 하중 및 변형을 측정하였으며 하중속도는 분당 10 mm로 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. FRP 보강적층판의 접착성능

Table 1은 FRP 보강적층판의 침지박리율과 내수 침지박리율을 나타낸 것이다. 레조시놀수지를 사용한 control 타입과 GFRP Textile 타입의 박리는 전혀 발생하지 않았으며 KS의 기준 박리율 5% 이하를 만족하였음을 확인하였다. 초산비닐수지를 사용한 GFRP Sheet 타입과 GFRP Textile Sheet 타입의 박리율은 GFRP Sheet타입에서 침지박리율 2.5%, 내수 침지박리율 3.4% 측정되었으나 GFRP Textile Sheet

**Table 2.** Results of fracture toughness test

Type	Initial stiffness (N/mm)	Ave. $P_{max}$ (N)	$P_{max}$ ratio (Type / control)	Coefficient of variation	$K_Q$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )
Control	435.4	2262.8 (391)*	1.0	0.173	3.64
Type1 (GFRP Sheet)	1822.0	6486.7 (700)*	2.9	0.108	4.86
Type2 (GFRP Textile)	1172.8	5268.3 (525)*	2.3	0.100	4.23
Type3 (Aramid)	937.5	5283.8 (663)*	2.3	0.125	4.18
Type4 (GFRP Textile Sheet)	1455.8	8443.5 (740)*	3.7	0.088	5.86

( )\* standard deviation

타입은 박리가 전혀 발생하지 않았다. 폴리우레탄수지를 사용한 Aramid 타입의 침지박리율은 4.8%로 KS를 만족하였으나, 내수침지박리율은 70%로 목재와 Aramid 보강재간 접착이 불량한 것을 확인하였다. Aramid 타입을 제외한 모든 타입이 KS기준의 박리율 5% 이하를 만족하였음을 확인하였다. 추후 목재와 Aramid보강재 접착에 대한 접착제 선별 검토가 요구된다.

### 3.2. FRP 보강적층판의 파괴인성성능

Table 2는 FRP 보강적층판 시험편의 파괴인성 시험 결과이다. Control 시험편의 평균최대하중은 2262.8 N, 초기강성 435.4 N/mm, 응력확대계수 3.64 MPa · m<sup>1/2</sup>가 측정되었다. 시험편의 고정부위에 인장하중이 가해지면서 노치와 연결된 볼트구멍 부위에서 순간적인 할렬이 발생하며 시험이 종료되었다. GFRP Sheet 시험편의 평균최대하중은 Control 시험편보다 2.9배 높은 값이 측정되었으며 가장 높은 초기 강성이 측정되었다. 그래프와 파괴형상을 통해 취성 파괴가 나타난 것을 확인하였으며, 이는 하중방향에 수직인 길이방향의 유리섬유 배열로 인한 것으로 사료된다. GFRP Textile 시험편은 GFRP Sheet 시험편과 비교하여 약 19% 낮은 최대하중과 약 36% 낮은 초기강성이 측정되었다. 하지만 하중방향에 평행한 보강재 배열에 의해 보강적층판의 파괴가 억제되는 것을 확인하였으며, 접착층에서 최종적으로 파괴가 발생하였다. Aramid 시험편은 GFRP Textile 시험편과 비슷한 내력이 측정되었으며, 단판과 보강재 사

이의 접착층 파괴가 우선적으로 발생하였다. GFRP Textile-Sheet 시험편은 Control 시험편보다 최대하중이 3.7배 높게, 응력확대계수는 61% 높게 측정되며 파괴를 가장 크게 억제하는 것으로 확인되었다. 또한 파괴형상을 통해 하중방향에 평행한 보강재 배열에 의해 파괴가 억제되는 것과 접착 층 분리 없이 보강적층판의 측면이 하중을 받으며 찌그러지는 형상이 관찰되었다(Fig. 6).

### 3.3. GFRP 보강적층판을 이용한 접합부의 인장형 전단내력성능 평가

GFRP 보강적층판을 이용한 접합부의 인장형 전단내력시험 결과 강판과 드리프트 핀을 사용한 대조군 시험편의 최대전단내력은 40.18 kN이 측정되었으며, 드리프트 핀에 의해 전단력이 발생하면서 집성재의 끝단면으로 취성파괴가 발생하며 내력이 저하되었다. Type-WA (FRP-reinforced laminated plates; Type-4 GFRP Textile Sheet + Wood Pin; *Eucalyptus marginata* + Epoxy)의 최대전단내력은 35.55 kN이 측정되었으며, 집성재 슬릿부와 FRP 보강적층판 간의 접착력에 의해 GFRP 보강적층판 최외층의 단판이 떨어지며 하중이 저하하였다. 또한 목재 핀에 의한 집성재 압입이 발생하며 목재 핀이 파괴되었으나, 집성재 끝단면으로의 파괴는 발생하지 않았다. Type-GA (FRP-reinforced laminated plates; Type-4 GFRP Textile Sheet + GFRP rod + Epoxy)의 최대전단내력은 34.77 kN이 측정되었으며, 집성재 슬릿부와 FRP 보강적층판 간의 접착력에 의해 GFRP 보강



Fig. 6. Failure mode of FRP-reinforced laminated plates.

적층판의 최외층의 단판이 떨어지며 하중이 저하되었다. 또한 GFRP rod의 전단력에 의해 집성재 끝단면으로 취성파괴가 발생하였다.

금속접합과 비교하였을 때 GFRP 보강적층판을 사용한 시험편이 약 12% 낮은 내력이 측정되었다.

#### 4. 결 론

목재와 보강재의 접착성능시험결과 레조시놀수지를 사용한 GFRP textile 시험편과 초산비닐수지를 사용한 GFRP Sheet와 GFRP Textile-Sheet 시험편은 KS의 침지박리시험의 합격기준을 만족하였다. 그러나 폴리우레탄수지를 사용한 Aramid 시험편은 침지박리율 4.8%로 기준을 만족하였으나 내수침지박리율은 70%의 박리율을 보이며 합격기준을 만족하지 못하였다. Aramid 섬유와 목재 접착 시 높은 내열성을 갖고 목재와 보강재를 일체화 시킬 수 있는 접착제 검토가 필요하다.

FRP 보강적층판의 파괴인성시험결과 보강재 체적비를 23%로 함으로 인해서 보강적층판의 내력이 2

~4배 증가하였다. 그중에서도 GFRP Textile-Sheet 타입이 직교형태의 유리섬유 배열로 인해 할렬파단을 억제하면서 Control재 대비 응력확대계수 비가 61% 증가되어 파괴를 가장 크게 억제하는 것으로 확인되었다. 하지만 직물형태의 보강재를 사용한 GFRP Textile과 Aramid 시험편의 경우 목재와 보강재 사이의 접착층에서 계면 파괴가 발생하였으며, 이는 하중방향의 섬유 배열에도 불구하고 낮은 내력이 측정된 요인으로 작용하였다.

GFRP 보강적층판을 이용한 접합부의 인장형 전단 내력 시험결과 GFRP 보강적층판과 목재핀(*Eucalyptus marginata*)을 사용함으로 인해서 집성재 끝단면으로의 취성파괴가 발생하지 않고 GFRP 보강적층판의 최외층 단판이 파괴되는 것을 확인하였다. 또한 드리프트 핀(bending MOR: 1580 MPa)에 비해 약 14배 낮은 휨강도의 목재 핀(*Eucalyptus marginata*, bending MOR: 108 MPa)을 사용함에도 불구하고, 강판과 드리프트 핀을 이용한 시험편과 비교하여 약 88%의 접합내력을 보이는 것을 확인하였다.

## 사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1A1A2011524).

## REFERENCES

- ASTM D 5045-99. Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, 2007.
- Blaß, H.J., Schädle, P. 2011. Ductility aspects of reinforced and non-reinforced timber joints. *Engineering Structures* 33(11): 3018-3026.
- Kim, K.H., Hong, S.I. 2011. Bonding Performance of Glulam Reinforced with Textile Type of Glass-and Aramid-Fiber, GFRP and CFRP. *Journal of The Korean wood science and technology* 39(2): 156-162.
- KS F 2160. 2008. Determination of resistance to soaking delamination for adhesive-bonded wood products.
- KS F 3021. 2013. Structural glued laminated timber.
- Park, J.C., Hong, S.I. 2008. Strength Properties of GFRP Reinforced Glulam Beams Bonded with Polyvinyl Acetate-Based Emulsion Adhesive. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 36(4): 19-25.
- Park, J.C., Shin, Y.J., Hong, S.I. 2009. Bonding Performance of Glulam Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Plastics. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 37(4): 357-363.
- Rafferty, G.M., Harte, A.M., Rodd, P.D. 2009. Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29(2): 101-110.
- Santos, C.L., de Jesus, A.M., Morais, J.J., Fontoura, B.F. 2013. An experimental comparison of strengthening solutions for dowel-type wood connections. *Construction and Building Materials* 46: 114-127.