

# 유리섬유 보강적층재의 파괴인성 특성<sup>1</sup>

김 건 호<sup>2</sup> · 홍 순 일<sup>3,†</sup>

## Fracture Toughness of Glass Fiber Reinforced Laminated Timbers<sup>1</sup>

Keon-ho Kim<sup>2</sup> · Soon-Il Hong<sup>3,†</sup>

### 요 약

유리섬유 보강적층재의 파괴인성을 평가하기 위하여 Compact tension (CT)형 시험을 실시하였다. 보강재는 직물형 유리섬유와 시트형 유리섬유강화플라스틱을 사용하였으며, 보강적층재는 층재사이에 보강재를 삽입 적층하였다. ASTM D5045에 의거하여 CT형 시험편을 제작하였다. 시험편의 길이는 끝면거리를 고려하여 선정하였으며, 인위적인 노치 끝에 볼트구멍(12 mm, 16 mm, 20 mm)을 선공하였다. 시트형 유리섬유강화플라스틱 보강적층재의 파괴인성하중은 보강하지 않은 적층재보다 최대 33% 증가하였으며, 직물형 유리섬유 보강적층재는 최대 152% 증가하였다. 이중외팔보(Double Cantilever Beam)이론에 의한 응력확대계수는 시트형 유리섬유강화플라스틱 보강적층재의 경우 1.08~1.38이었으며, 직물형 유리섬유 보강적층재는 1.38~1.86이었다. 이는 직물형 유리섬유 보강적층재의 경우 유리섬유와 층재의 섬유배열방향이 직교하여 파괴하중으로 인한 목재의 할렬진행을 억제시켰기 때문이다.

### ABSTRACT

The Compact Tension (CT) type test was performed in order to evaluate the fracture toughness performance of glass fiber-reinforced laminated timber. Glass fiber textile and sheet Glass fiber reinforced plastic were used as reinforcement. The reinforced laminated timber was formed by inserting and laminating the reinforcement between laminated woods. Compact tension samples are produced under ASTM D5045. The sample length was determined by taking account of the end distance of 7D, and bolt holes (12 mm, 16 mm, 20 mm) had been made at the end of artificial notches in advance. The fracture toughness load of sheet fiberglass reinforced plastic reinforced laminated timber was increased 33 % in comparison to unreinforced laminated timber while the glass fiber textile reinforced laminated timber was increased 152 %. According to Double Cantilever Beam theory, the stress intensity factor was 1.08~1.38 for sheet glass fiber reinforced plastic reinforced laminated timber and 1.38~1.86 for glass fiber textile reinforced laminated timber, respectively. That was because, for the glass fiber textile reinforced laminated timber, the fiber array

<sup>1</sup> Date Received June 29, 2015, Date Accepted August 20, 2015

<sup>2</sup> 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 02455, Republic of Korea

<sup>3</sup> 강원대학교 산림환경과학대학. College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

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

direction of glass fiber and laminated wood orthogonal to each other suppressed the split propagation in the wood.

**Keywords :** glass fiber, reinforced laminated timber, fracture toughness, stress intensity factor

## 1. 서 론

목재의 할렬 선단에서의 응력 상태는 응력확대계수(stress intensity factor)에 의해서 결정될 수 있으며 응력확대계수가 임계점에 도달하게 되면 균열이 성장하게 되며, 이때 임계응력확대계수를 파괴인성(fracture toughness)이라고 부르게 된다. 파괴인성은 재료가 파괴에 저항하는 정도를 나타내며 균열의 시작과 성장을 결정하는 재료고유의 상수이다. 파괴인성의 측정은 일정한 크기의 인위적인 할렬을 가진 시험편에 응력을 가하여 파괴를 일으킨 후 응력확대계수식에 적용하여 구한다. Nuno 등(2010)은 이중외팔보(Double cantilever beam: 이하 DCB)이론을 이용하여 목재의 파괴인성실험을 통한 resistance-곡선(R-곡선)이 예측 가능성을 시사하였다. 목재 파괴인성 실험은 KS F 2210의 목재의 갈라짐 시험방법이 있으나 국외에서는 미국재료시험학회(American Society for Testing and Materials: 이하 ASTM)에서 표준 시험법으로 제시된 D5045-99를 추천하고 있다. ASTM에서는 SENB (single-edge-notch bending)시험편과 CT (Compact tension)시험편으로 파괴인성시험을 실시한다. 목질재료의 파괴인성시험에서 파괴인성에 미치는 인자는 목재 자체의 강도특성과 접착제의 인장강도가 있으며 대부분 파괴진행방향은 섬유평행방향으로 할렬파괴가 일어난다. 따라서 이러한 파괴형상의 결점을 보완하기 위하여 보강재를 삽입한 보강집성재의 연구가 필요시 되고 있다. 특히 보강재 선정에 있어서 보강재의 강도특성 중 할렬파괴를 억제하기 위하여 인장강도성능이 양호한 재료가 필요하다. 김과 홍 등(2015)은 직물형 유리섬유로 보강한 집성재로 볼트접합부 전단강도 성능을 실험한 결과 보강하지 않은 집성재, 시트형 유리섬유강화플라스틱 보강집성재보다 할렬억제효과로 인해 양호한 전단성능을 확인하였다고 보고하였다.

따라서 유리섬유보강적층재의 파괴인성평가를 실시하여 보강재의 할렬 억제효과를 확인하고 이를 통해 보강집성재 볼트접합부의 전단강도성능예측에 필요한 보정인자를 검토하였다. 보강적층재와 낙엽송적층재의 파괴인성시험은 볼트접합부 강도특성을 반영하여 적층재의 예상 할렬방향을 고려한 Compact Tension형으로 실시하였다. 보강적층재의 파괴인성 시험은 보강집성재의 볼트접합부에서 발생하는 할렬 억제효과를 분석하기 위해 끝면거리 7D (D: 볼트 직경) 위치에 인위적으로 선공하여 균열을 제작하였다. 볼트구멍직경과 보강재종류에 따른 파괴인성은 낙엽송의 역학적 강도특성 결과를 통해 ASTM과 DCB이론에 의한 응력확대계수(Stress intensity factor)를 산출하여 비교, 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

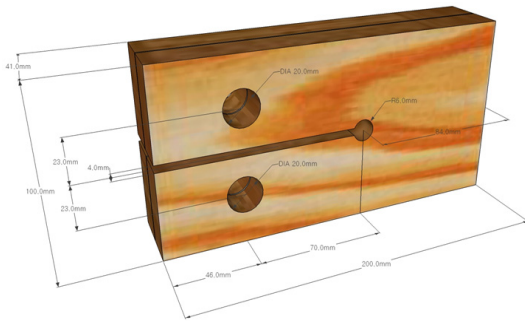
실험에 사용된 층재는 무종접합 국내산 일본잎갈나무(낙엽송: *Larix kaempferi* Carr.)로서 100 mm × 20 mm × 3600 mm이었다. 층재의 평균함수율은 12%, 평균비중은 0.54이었다. 보강적층재의 보강재는 유리섬유를 사용하였으며 유리섬유 배열 형태에 따라 직물형 유리섬유(glass fiber textile: 이하 GT)와 시트형 GFRP (Sheet GFRP: 이하 GS)로 구분하였다.

### 2.2. 시편 제작

파괴인성 시험편을 제작하기 위하여 2 ply의 낙엽송적층재(control laminated timber: 이하 CO)와 보강적층재를 제작하였고, 보강적층재는 층재 사이에 보강재를 삽입하여 적층하였다. 접착제는 접착성능시

**Table 1.** Designation of CT specimens on types

Type	Reinforcement	Diameter of hole (D) (mm)	Length of ligament (L) (mm)	Total length
CO12	Non-reinforced	12	116	L + 7D
CO16		16		
CO20		20		
GS12	Sheet GFRP	12	116	L + 7D
GS16		16		
GS20		20		
GT12	Textile Glass fiber	12	116	L + 7D
GT16		16		
GT20		20		



**Fig. 1.** Configuration of test specimens for the testing of compact-tension.

힘에 의해 CO적층재와 GT보강적층재의 경우 레조 시놀접착제를, GS보강적층재의 경우 PVAc계 접착제인 MPU500/HH60을 사용하였다(Kim and Hong, 2011). 제작된 적층재는 파괴인성 시험편으로 제작하였으며, CT시험편의 길이는 볼트구멍에서 시험편 끝단까지의 거리인 끝면거리(7D)에서 볼트직경의 반지름을 뺀 리가먼트(ligament)길이와 노치(notch)길이를 합하여 산정하였다. Fig. 1과 같이 노치길이는 모든 시험편이 동일하게 70 + 46 mm로 설정하였으며 리가먼트길이는 볼트직경에 따라 6.5 D로 하였다. 절단된 시험편은 인장하중을 가하기 위하여 직경 20 mm의 구멍을 선공하였다. 볼트를 통해 인장하중이 가해지는 볼트 구멍 2개로 이루어진 고정부는 시험편의 고정구멍에 삽입된 볼트에 의해 축주변을 상하

로 회전할 수 있게 제작되었다. 일반적으로 파괴인성 시험은 노치 생성 후 몇 번의 반복하중을 가하여 노치에 선균열(pre-crack)을 생성한 후 실행하게 된다. 그러나 낙엽송의 경우 취성이 강하며 반복하중에 의한 선균열생성이 어렵기 때문에 본 연구에서는 선공된 구멍을 이용하여 파괴인성을 측정하였다. 본 실험은 볼트구멍에서 발생하는 할렬에 의한 파괴인성을 실험하기 위한 것으로 시험편 끝단에서 7D위치에 구멍 직경 12 mm, 16 mm, 20 mm를 섬유직각방향으로 선공하였다. 인위적인 노치(notch)는 두께 4 mm의 회전톱을 이용하여 생성하였다. 파괴인성 시험편은 Table 1과 같이 명명하였으며, 보강적층재의 종류, 볼트구멍 직경에 따라 총 120개를 제작하였다.

### 2.3. 물성 및 파괴인성시험

파괴인성시험은 Compact-Tension형 시험으로 실시하였다. CT형 시험편은 인장하중에 의해 쪼개짐이 발생하여 회전할 수 있도록 지그와 핀(직경 20 mm)으로 만능강도시험기(Instron 4482)의 상단 로드셀과 하단의 고정바사이에 고정하였다. 파괴인성 하중은 섬유수직방향으로 인장하중을 가하였으며, 하중과 개구변위(Crack Tip Opening Displacement; CTOD)는 만능강도시험기를 이용하여 측정하였다. 파괴인성시험은 집성재와 구멍직경에 따라 10개씩

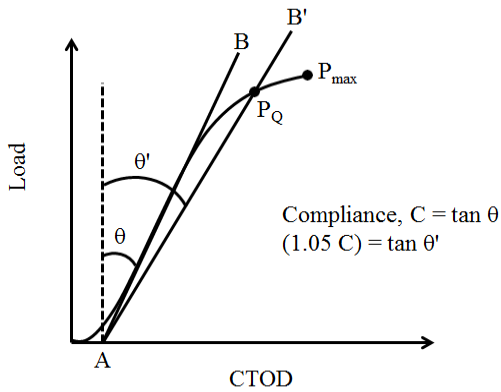


Fig. 2. Determination of Compliance and yield load ( $P_Q$ ).

실험하였으며 하중속도는 파괴형상의 거동을 관찰하기 위해 5 mm/min로 설정하여 실험하였다.

### 2.4. 보강적층재의 응력확대계수 산정

항복 파괴인성하중은 ASTM에 의거하여 5%컴플라이언스(Compliance) 법을 사용하였다. 하중-CTOD 곡선을 통해 초기컴플라이언스를 구하기 위하여 AB 직선을 긋는다. 초기컴플라이언스는 AB직선의 기울기를 의미한다. AB직선의 컴플라이언스에 5%만큼 더 기울여 AB' 직선을 긋는다. 최대하중이 AB직선과 AB' 직선안에서 측정될 경우 최대하중을 항복하중으로 대신하였다. 최대하중이 AB직선과 AB' 직선 밖에서 측정될 경우 하중변형곡선과 AB' 직선의 교차점에 해당하는 하중을 항복하중으로 사용하였다 (Fig. 2).

적층재와 유리섬유 보강적층재의 파괴인성은 실험을 통해 구해진 응력확대계수(Stress intensity factor)를 통해 비교, 검토하였다. 응력확대계수는 Compact Tension시험편의 형상, 시험편의 물성치, 파괴항복하중을 통해 ASTM에서 제안한 식( $K_A$ )과 DCB이론에 의하여 제안된 식( $K_D$ )으로 산출하였다. ASTM에서 제안한 응력확대계수( $K_A$ )는 실험식으로써 식 1)과 같다.

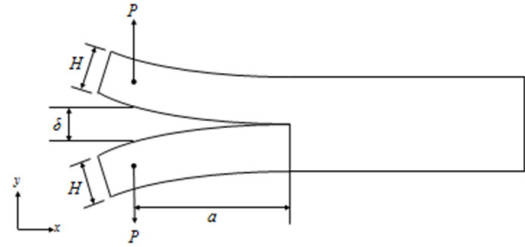


Fig. 3. Schematic diagram of DCB tests.

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

$P_Q$  = 적용하중

$B$  = 시험편의 두께

$W$  = 리가먼트길이와 크랙길이의 합

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

$x = a/W$

$a$  = 크랙길이

DCB이론에 의하여 제안된 식은 횡방향의 전단변형은 무시하고 크랙부위의 변형을 고려하여 보이론에 따라 에너지해방률(energy release rates)을 통해 전개된다. 하중점의 변형  $\delta$ 는 수정된 보이론에 의해 추론되며, 크랙길이보정계수는 Williams와 Hadavinia 모델에 따라 보의 탄성계수들에 의해 계산된다 (Adams *et al.*, 2003, Williams and Hadavinia, 2002, Sih *et al.*, 1965). DCB이론에 의해 제안된 응력확대계수( $K_D$ )는 식 2)로 산출하였다.

$$K_D = \frac{P}{B\sqrt{H}} \left( p \cdot \frac{a}{H} + q \right) \dots\dots\dots 2)$$

$$\begin{cases} p = \sqrt{\frac{12}{\alpha}} \\ q = \chi \sqrt{\frac{12}{\alpha}} \end{cases}$$

$P$  = 적용하중

$B$  = 시험편의 두께

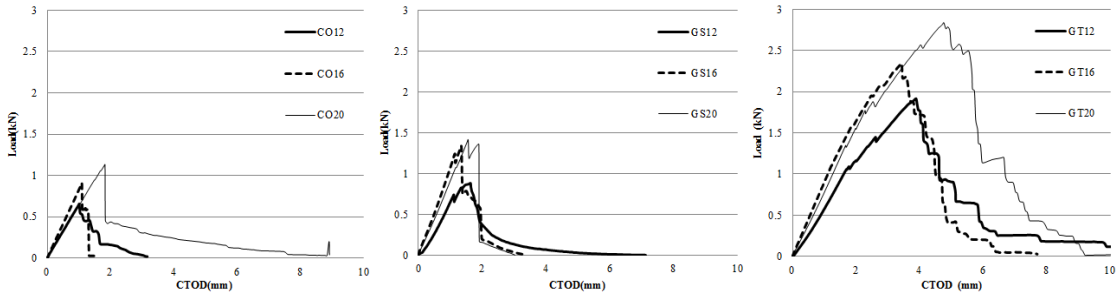


Fig. 4. Typical types of load-CTOD curves on types of laminated timber (a-CO type, b-GS type, c-GT type).

2H = 시험편의 깊이

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} \sqrt{\sqrt{\frac{E_x}{E_y}} + \frac{1}{2} \left( \frac{E_x}{G_{xy}} - 2\mu_{xy} \right)}$$

$\chi$  (크랙길이보정계수)

$$= \sqrt{0.24 \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} + 0.1 \left( \frac{E_x}{G_{xy}} - 2\mu_{xy} \right)}$$

### 3. 결과 및 고찰

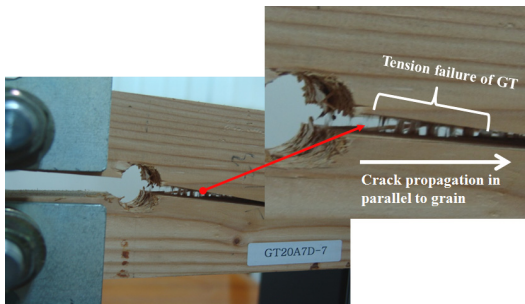
#### 3.1. 낙엽송 적층재의 볼트구멍 직경에 따른 파괴인성하중

볼트구멍 직경 12 mm의 CO시험편(이하 CO12) 평균최대하중은 681.1 N으로 시험편의 고정부위에 인장하중이 가해지면서 노치와 연결된 볼트구멍 부위에서 순간적인 crack이 발생하여 측정되었다. 응력 확대계수를 산정하기 위하여 하중-변위그래프에서 항복하중을 산출하였다. CO12의 평균항복하중은 669.5 N으로 최대하중과 거의 비슷한 값을 보였다 (Fig. 4-a). CO16 시험편의 평균항복하중은 12 mm 시험편보다 약 32% 증가한 886.6 N으로 평균최대하중보다 약 5% 작게 측정되었다. CO20 시험편의 평균최대하중은 CO12, CO16과 비슷한 값이 측정되었고 항복하중은 12 mm 시험편보다 약 61% 증가하였다. CO시험편은 파괴인성시험을 통해 crack 발생 시 모든 볼트직경에 따라 인성이 거의 없음을 알 수 있었다. GS12 시험편의 평균최대하중은 789.5 N으로

노치와 연결된 볼트구멍 부위에서 목재의 할렬이 목재의 섬유방향과 동일한 GFRP로 전이되면서 순간적인 crack이 발생하여 측정되었다. GS시험편의 평균항복하중은 직경에 따라 평균적으로 11~14% 정도 증가한 값을 나타냈다. 파괴형상은 최대하중에 의한 볼트구멍 부위의 순간적인 crack이 발생하였으며, 하중-CTOD 곡선은 cotrol시험편과 같이 인성이 거의 없음을 확인할 수 있었다(Fig. 4-b). GT12 시험편의 평균항복하중은 1010.2 N으로 CO12 시험편보다 약 51% 증가한 것을 확인할 수 있었다. 인장하중으로 인해 노치와 연결된 볼트구멍 부위에서 crack이 발생되었으며 목재가 먼저 할렬이 일어났으나 직물형 유리섬유는 섬유수직방향의 유리섬유로 인해 할렬이 전이되는 것을 억제함으로 하중이 증가하다가 유리섬유가 파괴되면서 하중이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 5 mm 간격으로 배열되어있는 섬유수직방향의 유리섬유 다발이 인장하중에 의해 파괴되면서 최대하중 이후에 하중-CTOD곡선이 완만하게 감소되는 것을 보여주었다(Fig. 4-c). GT16 시험편의 평균최대하중은 2138.6 N으로 측정되었으며 파괴형상은 12 mm 시험편과 비슷한 경향을 보였다. 평균항복하중은 CO16 시험편보다 1.4배 증가한 1238.2 N으로 나타났다. GT20 시험편의 평균최대하중은 2766.6 N으로 측정되었고 항복하중은 CO20 시험편보다 약 88% 증가한 2028.3 N으로 나타났다. Fig. 5와 같이 GT시험편은 보강재의 유리섬유 배열 특성상 섬유수직방향의 유리섬유로 인해 crack 진행을 억제해줌으로써 대부분의 시험편이 양호한 인성을 보여주었으

**Table 2.** Mechanical properties of *Larix kaempferi* Carr.

	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$E_z$ (GPa)	$\mu_{xy}$	$G_{xy}$ (GPa)
<i>Larix kaempferi</i> Carr.	12.6	0.75	1.21	0.54	0.63



**Fig. 5.** Failure mode of glass fiber textile.

며 최대하중 이후에도 완만한 하중감소를 보였다.

### 3.2. 볼트구멍 직경에 따른 응력확대계수

응력확대계수를 산출할 때 사용된 낙엽송재의 탄성계수, 전단계수, 포아송비는 Laser extensometer를 이용하여 실험을 통해 얻어진 역학적 물성치를 Table 2와 같이 대입하였으며, 적용하중은 항복하중과 최대하중으로 나누어 산출하였다.

Control 시험편의  $K_D$ 는 CO12의 경우  $8.40 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 로 CO16은 1.34배, CO20은 1.65배 증가하였다.  $K_A$ 는 CO12의 경우  $12.77 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 로 CO16, CO20의 시험편의 값과 비슷한 경향을 보였다. GS12 시험편의  $K_D$  값이  $9.38 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 로 GS16은 1.65배, GS20은 1.60배 증가한 값을 보였다. GS12의  $K_A$  값은  $14.26 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 로 GS16은 1.25배 증가하였고 GS20은 비슷한 값을 보였다. GT12 시험편의  $K_D$  값은  $12.52 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 로 GT16, GT20 시험편의 경우 각각 1.24, 2.06배 증가한 값을 보였다.  $K_A$  값은  $19.03 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 로 GT16은 비슷한 값을 보였으며 GT20은 1.26배 증가하였다. 각 시험편의  $K_D$ 와  $K_A$  값을 비교해보면 12 mm와 16 mm 시험편의 경우  $K_A$  값이  $K_D$  값보다 각각 1.52, 1.15배로 크게 나타났으

**Table 3.** Factors of fracture toughness on types

Type	Diameter of hole	$K_D^*$	$K_{max}^{**}$
	mm		
CO	12.00	1.00	1.00
GS		1.12	1.13
GT		1.49	2.36
CO	16.00	1.00	1.00
GS		1.38	1.33
GT		1.38	2.29
CO	20.00	1.00	1.00
GS		1.08	1.10
GT		1.86	2.52

\*  $K_D$  is calculated by  $P_Q$

\*\*  $K_{max}$  is calculated by  $P_{max}$

며 20 mm의 경우는  $K_D$  값이  $K_A$  값보다 1.08배 크게 나타났다. Control 시험편의 응력확대계수를 기준으로 GS시험편은 GS12, GS16, GS20의 경우 각각 12%, 38%, 8% 증가한 값을 보였으며 GT시험편은 각각 49%, 38%, 86% 증가한 값을 보였다(Table 3).  $K_A$ 는 구멍직경에 의한 리가먼트 길이 증가에도 불구하고 뚜렷한 경향이 없었으며,  $K_D$ 는 직경이 증가함에 따라 값이 증가하는 보강효과를 보여주었다. Control 시험편에 대한 보강적층재의 응력확대계수를 통해 적층재보다 양호한 파괴인성을 확인하였으며, 이는 GT시험편의 경우 하중평행방향의 유리섬유로 인한 인장응력이 증가함에 따라 할렬억제효과가 나타난 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

낙엽송 적층재의 항복파괴하중과 응력확대계수는 볼트구멍직경이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 직물형 유리섬유 보강적층재의 항복파괴하중과 응력확대계수가 시트형 유리섬유 보강적층재보다 더 큰 것을 확인할 수 있었으며, 낙엽송적층재보다 1.38~1.86배로 파괴인성특성의 강도적 보강효과를 확인할 수 있었다. 이는 볼트구멍직경에 따른 ligament 길이의 증가와 보강재의 섬유배열특성에 따라 응력확대계수에 영향을 미치며 직물형 유리섬유의 경우

부재의 파괴인성을 향상시키는 보강재임을 의미한다. 직물형 유리섬유보강적층재의 파괴형상은 낙엽송적층재와 시트형 GFRP 보강적층재와는 달리 하중방향의 유리섬유가 섬유평행방향의 할렬을 억제하였다. 이는 유리섬유다발가닥이 목재와 일체화되어 인장하중으로 인한 순차적인 인장파괴가 일어났으며 이후 하중이 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 유리섬유 보강적층재의 응력확대계수는 보강재의 보강효과를 의미하며, 이는 보강집성재 볼트접합부 전단내력예측 시 보정인자로 적용이 가능할 것이라 생각된다.

## 사 사

본연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2009-0075285)입니다.

## REFERENCES

- Adams, D.F., Carlsson, L.F., Pipes, R.B. 2003. Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, 3rd ed. CRC Press, Boca Raton.
- ASTM D 5045-99. 1999. Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials. American Society of Testing and Materials. West Conshohocken, PA. United States.
- 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.
- Kim, K.H., Hong, S.I. 2015. Shear performance of glass fiber reinforced glulam bolted connection. Journal of The Korean Wood Science and Technology 43(5): 661-671.
- KS F 2210. 2004. Method of cleavage test for wood. Korean Standards Association.
- Nuno, M.M.D., Marcelo F.S.F., Jose, J.L.M., Manuel A.L.S. 2010. Estimate of resistance-curve in wood through the double cantilever beam test. Holzforschung 64: 119-126.
- Sih, G.C., Paris, P.C., Irwin, G.R. 1965. On cracks in rectilinearly anisotropic bodies. International Journal of Fracture Mechanics 1: 189-203.
- Williams, J.G., Hadavinia, H. 2002. Analytical solutions for cohesive zone models. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 50: 809-825.