

# 낙엽송 블록접착집성재의 접착 및 휨 강도 성능<sup>1</sup>

이 인 환<sup>2</sup> · 홍 순 일<sup>2,†</sup>

## Bending and Bonding Strength Performances of Larix Block-glued Glulam<sup>1</sup>

In-Hwan Lee<sup>2</sup> · Soon-Il Hong<sup>2,†</sup>

### 요 약

2개 이상의 보부재 집성재 요소들의 측면접착으로 제작된 “블록접착집성재”는 대단면 목조건축물의 건축부재로 활용 가능한 구조용재다. 블록접착집성재의 측면은 접착제의 종류와 도포량 및 압체압력을 각기 다른 조합으로 접착하여 박리시험과 전단블록시험으로 접착성능을 검토하였다. 실험결과 레조시놀접착제 500 g/m<sup>2</sup>을 도포하고 압체압력 1.5 MPa의 조건으로 제작된 블록접착집성재의 측면접착성능이 가장 양호하였다.

양호한 측면접착조건으로 제작된 블록접착집성재는 동일단면계수의 대조군 집성재와 휨 강도 성능을 비교 검토하였다. 블록접착집성재의 휨 탄성계수는 대조군 집성재와 유사하였으며, 파괴계수는 대조군집성재 보다 27% 향상되었다. 할렬은 대조군집성재 보다 블록접착집성재에서 다량 발생하였으며, 블록접착집성재의 측면접착층에서 계면파괴나 응집파괴는 관찰되지 않았다.

### ABSTRACT

Block-glued glulam is a structural material that can be used as a construction member of a large-section wooden building, which is produced by edgewise bonding of two or more glulam beam elements. The edgewise bonding performance of the block-glued glulam was examined through delamination test and block shear strength test. According to the test results, the block-glued glulam that was manufactured with 1.5 MPa of compressive pressure after applying 500 g/m<sup>2</sup> of Resorcinol adhesive showed the best edgewise bonding performance.

The block-glued glulam produced in a good edgewise bonding condition was compared with a control glulam with the same section modulus for bending strength performance. The modulus of elasticity (MOE) in bending was similar to that of the control glulam. The modulus of rupture (MOR) of the block-glued glulam was higher by 27% than that of the control glulam. No interfacial failure or cohesive failure were observed in the edgewise bonding layer.

<sup>1</sup> Date Received March 31, 2016, Date Accepted May 17, 2016

<sup>2</sup> 강원대학교 산림환경과학대학 산림응용공학부 산림바이오소재공학전공. Division of Forest Material Science & Engineering, Program 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)

**Keywords :** Bending strength, block-glued glulam, delamination test, edgewise glued, modulus of elasticity, modulus of rupture

## 1. 서 론

해외에서는 집성재를 활용하여 철근 콘크리트 건축물처럼 대형 목조건축물 제작을 위한 연구가 지속되어왔다. 2개 이상의 집성재요소들을 측면 방향으로 추가 접착하여 제작한 “블록접착집성재(이하 블록집성재)”는 대형 건축 부재로 이용 가능하다. 블록집성재로 제작된 건축물은 1989년 독일에서 “Otto-Munz-Steg” 자전거 목교건설과 함께 처음 건축되었다. 블록집성재는 독일과 스칸디나비아 반도에서 지속적으로 연구되어 왔으며 제작 규격은 2004년 독일의 DIN 1052:2004로 처음 등재되었다. 최근에는 유럽 제품 규격의 14080 EN: 2013으로 블록집성재의 제작 규격이 등재되었다. Frank 등(2012)은 블록집성재의 측면 접착 시 일반 집성재의 적층 압체압력 보다 2배 높은 압력을 가하였다. 또한 대형 목조 교량에 블록집성재의 측면접착 공법이 증가될 것이라 예측하였다. Simon 등(2014)은 블록집성재 제작 시 접착층의 두께가 접착강도에 큰 영향을 끼친다고 보고하였으며, 측면접착의 접착층 두께는 2 mm, 레조시놀접착제 또는 멜라민접착제가 적합하다고 추천하였다. 블록집성재의 측면접착은 도포량은  $400 \text{ g/m}^2$  이상 압체압력은 0.6 MPa 이상으로 제작해야 우수한 강도 성능이 발휘된다고 보고하였다. 유럽에서는 대단면 아치 블록집성재, 대형 변단면 블록집성재, I형 블록집성재 등 다양한 블록집성재의 활용방안이 제시 및 시공되고 있다. 하지만 국내에서 블록집성재에 관한 연구는 여전히 미비한 실정이다.

본 연구에서는 국내산 낙엽송재로 제작된 블록집성재의 측면접착성능 및 휨 강도성능을 대조군 집성재와 비교 검토하였다. 휨 강도시험에 사용된 블록집성재는 측면접착성능 시험에서 양호한 접착조건으로 제작하였다. 블록집성재의 측면접착성능은 박리시험과 전단블록시험으로 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 블록집성재 접착성능 시험편 제작 및 시험방법

#### 2.1.1. 블록집성재 제작

집성재 제작에 사용된 낙엽송(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carriere) 층재는 평균함수율 12%, 평균기건비중 0.52였다. 블록집성재의 각 요소 집성재는 Fig. 1-a와 같이 두께 30 mm, 폭 60 mm의 낙엽송 층재에 레조시놀접착제를  $300 \text{ g/m}^2$  도포한 뒤 압체압력 1 MPa의 조건으로 3층 적층한 후 상온 24시간 경화한 형상이다. 이러한 접착방법은 블록전단강도와 박리시험에서 모두 합격기준을 만족한 조건이다(Park et al., 2008). 집성재의 적층 형태는 최외곽층에 상대적으로 높은 탄성계수의 층재와 중층에 상대적으로 낮은 탄성계수의 층재를 구성하였으며 중양을 기준으로 위아래 대칭이다. 블록집성재는 완성된 2개의 집성재요소들을 측면 방향으로 접착하여 제작하였다(Fig. 1-b). 박리시험편과 블록전단강도시험편에 사용될 블록집성재의 측면방향 접착은 레조시놀(NeoLite MD-3040)과 폴리우레탄(Dacheung-DU-610) 두 가지 접착제를 사용하였다. 접착제 도포량은  $300 \text{ g/m}^2$ ,  $400 \text{ g/m}^2$ ,  $500 \text{ g/m}^2$ ,  $600 \text{ g/m}^2$ 으로 다르게 구분하였으며, 압체압력은 1 MPa과 1.5 MPa로 구분하였다. 제작된 블록집성재는 Table 1과 같이 16종류로 제작하였다.

대조군 집성재는 두께 30 mm, 폭 120 mm의 낙엽송 층재를 블록집성재의 각 요소집성재와 동일한 조건으로 3층 적층하여, 블록집성재와 동일한 단면계수로 제작하였다.

#### 2.1.2. 블록전단강도시험

블록전단강도시험편은 블록집성재의 측면접착층을 중심으로 제작하였다. 대조군 시험편은 집성재의

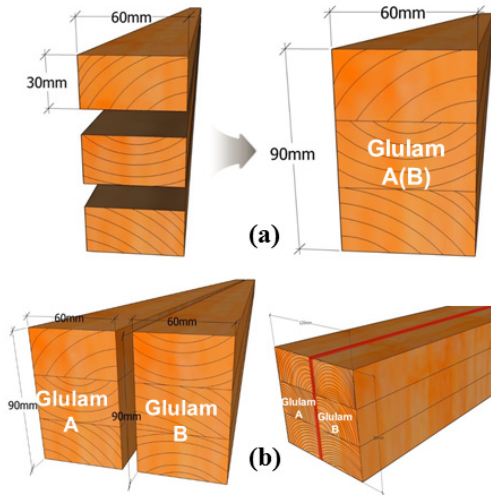


Fig. 1. Schematic diagram of block-glued glulam.

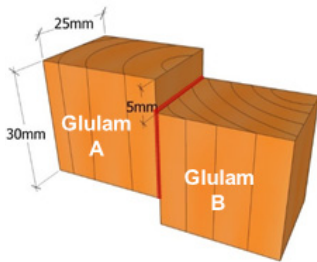


Fig. 2. Schematic diagram of block shear strength specimen.

횡방향 접착층을 중심으로 제작하였다(Fig. 2). 시험편의 수는 대조군까지 17종류로 각 종류 당 10개씩 총 170개를 제작하였다.

블록전단강도시험은 만능 재료 시험기(Instron 4482)에 시험편을 고정한 후 9,800 N/mm의 속도로 시험편이 파괴될 때까지 하중을 가하였다. 블록전단강도와 목파율은 식 (1)과 식 (2)로 산출하였다.

$$\text{블록전단강도} = \frac{P}{A} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (1)$$

P : 하중(N)

A : 접착면적(mm<sup>2</sup>)

Table 1. Nomenclature of block-glued glulam

Specimen names	Adhesive	Clamping pressure (MPa)	Adhesive amount (g/m <sup>2</sup> )
R1-3	Resorcinol	1	300
R1.5-3		1.5	
R1-4		1	400
R1.5-4		1.5	
R1-5		1	500
R1.5-5			
R1.5-6		1.5	600
R1.5-7		700	
U1-3	Poly Urethane	1	300
U1.5-3		1.5	
U1-4		1	400
U1.5-4		1.5	
U1-5		1	500
U1.5-5			
U1.5-6		1.5	600
U1.5-7		700	

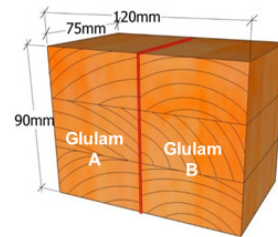


Fig. 3. Schematic diagram of soaking delamination block-glued glulam.

$$\text{목파율} (\%) = \frac{\text{목재파괴단면적} (mm^2)}{\text{전체 접착면적} (mm^2)} \times 100 \dots (2)$$

### 2.1.3. 블록집성재 박리시험

침지박리 및 삶음박리시험편은 제작된 블록집성재와 대조군집성재로 제작하였다. 박리시험편은 대조군까지 17종류로 각 종류 당 침지박리 5개, 삶음박리 5개 포함 170개를 제작하였다. 침지박리시험과 삶음박리시험은 KS F 3021 (2013)에 의거하여 실시하였다. 블록집성재의 박리율은 Fig. 3과 같이 측면접착층을 기준으로 측정하였다(식 3). 건조나 용이 등에 의한 시험편의 할렬은 측정에서 제외하였다.

**Table 2.** Block shear strength test result of block-glued glulam

Specimens	Shear strength (N/mm <sup>2</sup> )		Wood failure (%)
	Average	Ratio of KS strength*	Average
Control	12.5	1.76	89.9
R1-3	6.1	0.86	97.4
R1-4	7.9	1.23	93.1
R1-5	10.2	1.44	97.2
U1-3	7.1	1.00	75.4
U1-4	7.8	1.10	73.5
U1-5	9.6	1.35	94.7
R1.5-3	9.4	1.54	93.0
R1.5-4	10.5	1.48	93.1
R1.5-5	12.1	1.70	92.7
U1.5-3	7.9	1.30	43.4
U1.5-4	8.4	1.18	97.3
U1.5-5	10.1	1.42	90.7

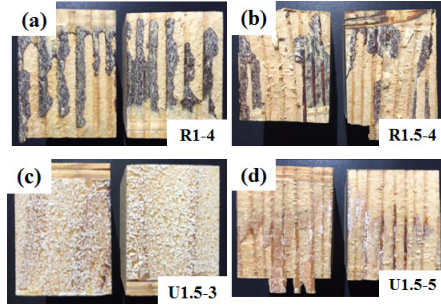
\*KS F 3021 - shear strength 7.1 MPa, wood failure 65%

$$\text{박리율}(\%) = \frac{\text{양쪽 횡단면 측면접착층 박리 길이의 합}}{\text{양쪽 횡단면 측면접착층 길이의 합}} \times 100 \dots (3)$$

## 2.2. 휨 강도시험편 제작 및 시험방법

블록집성재 제작에 사용된 요소집성재의 적층 형태는 중층을 KS F 3021 기준 E10, E11 층재로 구성하였으며, 최외곽층에 E13, E14 층재로 구성하였다. 블록 집성재는 길이 2400 mm, 폭 60 mm, 두께 120 mm의 4층 요소 집성재 2개를 측면접착하여 제작되었다. 대조군 집성재의 적층형태는 블록집성재와 마찬가지로 중층을 KS F 3021 기준 E10, E11 층재로 구성하고, 최외곽층에 E13, E14 층재로 구성하였다. 대조군 집성재는 길이 2400 mm, 두께 30 mm, 폭 120 mm의 층재를 사용하여 블록집성재와 동일한 단면계수로 제작하였다. 블록집성재는 박리시험과 블록전단강도시험에서 검증된 양호한 측면접착조건으로 제작되었다.

휨 강도시험은 집성재 및 블록집성재를 3등분 4점 하중이 되도록 설치한 후 10 mm/min의 하중속도로 실시하였다. 파괴계수(MOR)와 휨 탄성계수(MOE)는



**Fig. 4.** Photographs of wood failure.

식 4와 식 5로 산출하였다.

$$MOR = \frac{3P(l-s)}{2bh^2} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (4)$$

$$MOE = \frac{\Delta Pa(3l^2 - 4a^2)}{4\Delta ybh^3} \text{ (GPa)} \dots\dots\dots (5)$$

- $P$ : 최대하중(N)
- $l$ : 경간(mm)
- $a$ : 하중과 지점간의 간격(mm)
- $b$ : 집성재의 너비(mm)
- $h$ : 집성재의 두께(mm)
- $\Delta P$ : 비례한도 최대하중(N)
- $\Delta y$ : 비례한도 변형량(mm)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 블록집성재의 블록전단강도

Table 2는 각 종류별 블록전단강도시험 결과이다. R1-3 시험편을 제외한 모든 블록전단시험편의 블록 전단강도가 7.1 MPa보다 우수하여 KS 규격을 만족하였다. U1.5-3 시험편을 제외한 모든 종류 시험편의 평균 목파율이 65%보다 양호하여 KS 규격에 부합하였다. 모든 시험편의 전단강도는 접착제의 도포량이 증가할수록 소폭 향상되는 경향이 관찰되었다. R1-3, R1-4, U1-3, U1-4, U1-5 시험편들은 클램프의 압제 압력이 부족하여 접착층과 목재사이의 계면에서 목재의 섬유질만 뜯겼고(Fig. 4-a), R1.5-3, U1.5-3 시험편들은 접착제 도포량 부족으로 접착층에서 응집과

**Table 3.** Resistance to water soaking delamination block-glued glulam

Specimens	Delamination after water soaking (%)	Delamination after water soaking Stan. (%)
	Control	3.8
R1-3	47.0	15.6
R1-4	12.4	18.9
R1-5	11.1	12.4
U1-3	73.7	28.7
U1-4	61.5	10.8
U1-5	51.9	23.1
R1.5-3	39.9	5.1
R1.5-4	4.4	7.3
R1.5-5	2.8	12.4
R1.5-6	2.8	2.6
R1.5-7	3.1	2.3
U1.5-3	32.5	41.5
U1.5-4	8.7	14.1
U1.5-5	3.7	9.1
U1.5-6	3.0	4.1
U1.5-7	3.5	3.1

\*KS F 3021 - 5%

괴가 발생(Fig 4-c)하는 경향이 관찰되었다. 하지만 많은 접착제 도포량과 1.5 MPa의 압체압력으로 제작된 R1.5-4, R1-5, R1.5-5, U1.5-4, U1.5-5 시험편들은 접착력이 양호하여 평균 목파율이 90% 이상 발생하였다(Fig. 4-b, 4-d).

### 3.2. 블록집성재의 침지박리율

Table 3은 블록집성재 측면접착층의 침지박리 실험 결과이다. 접착제의 종류와 도포량에 관계없이 압체압력 1 MPa로 제작된 시험편들은 KS 규격의 박리율 합격기준 5%를 만족하지 못하였다.

레조시놀접착제를 사용하여 도포량 300 g/m<sup>2</sup>과 압체압력 1.5 MPa의 조건으로 제작된 시험편들의 평균 박리율은 39.9%로 합격기준을 만족하지 못하였지만, 도포량 400 g/m<sup>2</sup>, 500 g/m<sup>2</sup>, 600 g/m<sup>2</sup>, 700 g/m<sup>2</sup>으로 측면접착된 시험편들의 박리율은 4.4%,

**Table 4.** Resistance to water soaking delamination after boiling on block-glued glulam

Specimens	Delamination after boiling water soaking (%)	
	Ave.	S.D.
Control	1.6	2.1
R1.5-4	6.8	2.1
R1.5-5	0.6	1.4
R1.5-6	0.8	0.8
R1.5-7	0.5	1.1
U1.5-5	25.7	10.5
U1.5-6	8.9	3.1
U1.5-7	29.6	2.3

\*KS F 3021 - 5%

2.8%, 2.8%, 3.1%로 합격기준을 만족하였다.

폴리우레탄접착제를 300 g/m<sup>2</sup>이나 400 g/m<sup>2</sup>만큼 도포한 후 압체압력 1.5 MPa로 제작한 시험편들의 박리율은 각각 32.5%, 8.7%로 KS 합격 기준에 미달되었다. 그러나 폴리우레탄접착제를 500 g/m<sup>2</sup>, 600 g/m<sup>2</sup>, 700 g/m<sup>2</sup>을 도포하고 압체압력 1.5 MPa로 측면접착한 시험편들의 박리율은 3.7%, 3.0%, 3.5%로 KS의 박리율 합격기준을 만족하였다.

모든 시험편들은 접착제 도포량이 증가할수록 박리율이 감소하였으며, 접착제의 종류와 도포량에 관계없이 압체압력 1.5 MPa로 제작한 시험편들은 압체압력 1 MPa로 제작한 시험편들보다 양호한 측면접착강도가 관찰되었다.

압체압력 1.5 MPa로 측면접착한 시험편들의 침지박리율은 레조시놀접착제의 경우 접착제 도포량이 400 g/m<sup>2</sup> 이상, 폴리우레탄 시험편의 경우 도포량 500 g/m<sup>2</sup> 이상의 조건에서 KS 규격을 만족하였다.

### 3.3. 블록집성재의 삶음 박리율

삶음 박리시험은 침지박리시험에서 KS 규격에 부합한 조건(레조시놀접착제 도포량 400 g/m<sup>2</sup> 이상, 폴리우레탄접착제 도포량 500 g/m<sup>2</sup> 이상, 압체압력 1.5 MP)으로 측면접착하여 시험편을 제작하였다. Table 4는 삶음박리시험 결과다. 폴리우레탄접착제로 제작

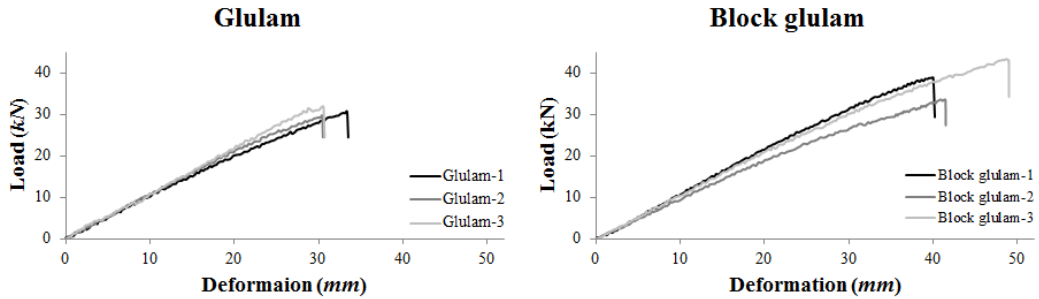


Fig. 5. Load-deformation curves of the glulam and block-glued glulam specimens.

한 시험편들의 삶은 박리율은 KS 합격 기준을 만족하지 못하였다. 레조시놀접착제로 제작한 시험편들의 삶은 박리율은 도포량  $500 \text{ g/m}^2$  이상에서 측면접착강도가 침지박리율 보다 양호하게 측정되었다.

국내산 낙엽송 집성재의 측면접착성능은 레조시놀접착제 도포량  $500 \text{ g/m}^2$  이상, 압체압력 1.5 MPa의 조건으로 제작할 때 양호하였다. 이후 제작된 블록집성재의 측면접착은 경제성을 고려하여 레조시놀접착제 도포량  $500 \text{ g/m}^2$ , 압체압력 1.5 MPa의 조건으로 제작하였다.

### 3.4. 블록집성재의 휨 강도

낙엽송 대조군 집성재의 하중-변형 곡선(Fig. 5)은 하중 초기부터 파괴가 될 때까지 거의 탄성에 가까운 거동이 관찰되었다. 모든 대조군 집성재는 최대 하중 측정 직후 최외곽 인장부위에서 파괴가 발생하였다. Glulam-1 시험체는 중앙 하단부위에서 상부 쪽으로 할렬이 발생한 후 횡단면 방향으로 섬유방향을 따라 할렬이 발생하였다. Glulam-2와 Glulam-3 시험체는 인장부위의 옹이 주변부에서 최초 파단이 발생하여 섬유방향을 따라 할렬이 진행되었다. 대조군 집성재의 최대 변형은 평균 31.6 mm 휨 탄성계수는 평균 11.7 GPa, 파괴계수는 평균 38.8 MPa로 측정되었다.

블록집성재의 하중-변형 곡선(Fig. 5)은 하중이 지속됨에 따라 소성영역이 두드러졌다. Block glulam-1 시험체와 Block glulam-3 시험체는 중앙하단부의 최외곽 층에서 수직으로 할렬이 발생한 후 양 횡단면

쪽으로 섬유방향을 따라 할렬이 진행되었다. Block glulam-2 시험체는 인장부위의 옹이에서 최초파단이 발생한 것에 기인하여 타 시험체보다 강도 값이 저하되었다. 블록집성재의 할렬이 발생한 단면을 살펴보면 하나의 할렬이 발생한 대조군 집성재와는 상이하게 2~4개의 할렬이 복합적으로 발생하였다. 블록집성재의 탄성계수는 평균 11.5 GPa로 대조군 집성재와 대등한 값이 관찰되었으나 최대 변형이 대조군 집성재보다 27% 향상되어 파괴계수도 49.2MPa로 27% 향상된 값이 측정되었다(Table 5). 이러한 현상은 목리가 상이한 2개의 집성재를 측면접합하여 내력 및 결함이 분산된 것으로 사료된다. 실사례로 대조군 Glulam-1과 Glulam-3의 단면을 살펴보면 층재의 미성숙재 위주로 할렬이 발생하였으나 블록집성재는 미성숙재 및 옹이 등 결함이 분산된 것을 판단된 중앙 단면에서 확인할 수 있다(Fig. 6). 측면 접착층을 기준으로 연륜이 가장 상이한 Block glulam-3 시험체의 휨 파괴계수가 가장 우수하였으며, 옹이에서 파단이 발생한 Block glulam-2 시험체의 휨 파괴계수 값이 가장 낮게 측정되었다.

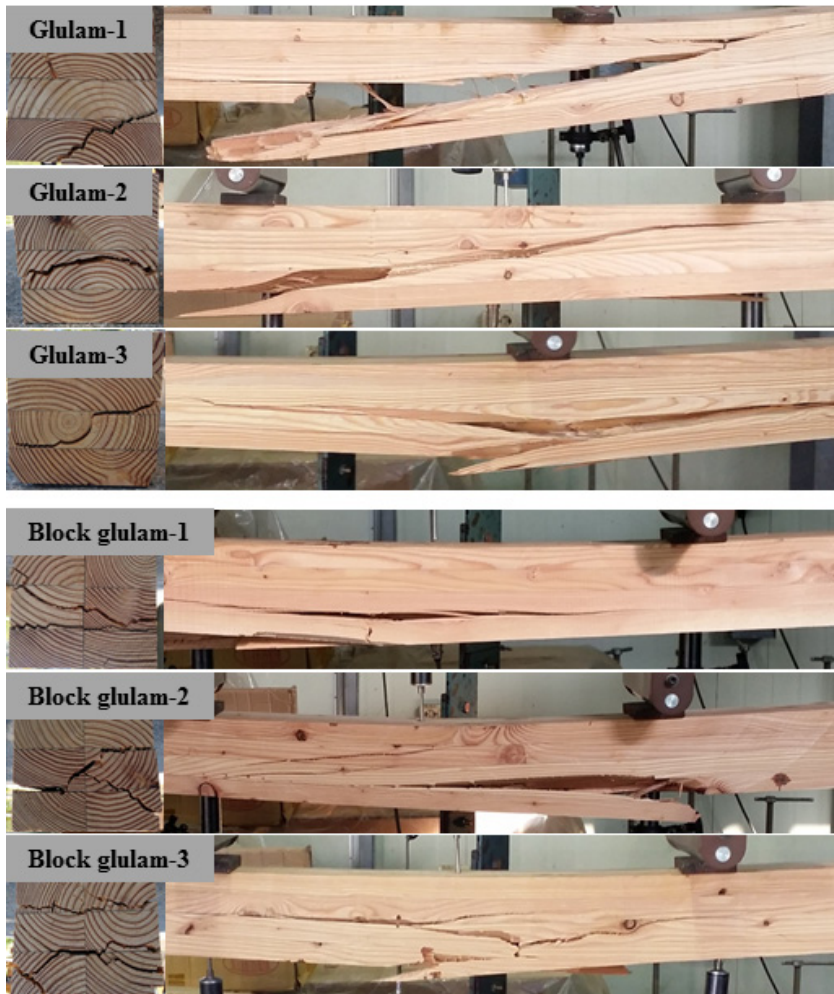
## 4. 결 론

접착제의 종류와 도포량 및 압체압력의 조건을 다르게 측면접착한 블록집성재의 박리 및 블록전단강도 성능과, 블록집성재와 일반집성재의 휨 강도성능을 비교분석하였다.

집성재의 측면방향 접착 성능은 레조시놀접착제가 폴리우레탄접착제보다 양호하였고 접착제의 도포량

**Table 5.** Evaluation results of the bending specimens

Specimens	Deformation <sub>max</sub>		MOE (GPa)		MOR (MPa)	
	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
Glulam-1	33.5		11.3		39.2	
Glulam-2	30.5	31.6	11.7	11.7	37.9	0.7
Glulam-3	30.7		12.1		39.2	
Block glulam-1	40.2		12.2		49.5	
Block glulam-2	41.5	43.6	10.5	11.5	42.9	6.2
Block glulam-3	49		11.6		55.3	



**Fig. 6.** Failure mode of glulam and block-glued glulam.

이 증가할수록 향상되었다. 또한 접착제의 종류와 도포량과는 관계없이 1 MPa로 측면접착된 시험편들은 KS기준을 만족하지 못하였다. 따라서 국내산 낙엽송 집성재의 측면접착성능은 레조시놀접착제 도포량 500 g/m<sup>2</sup>, 압제압력 1.5 MPa의 조건이 가장 적합하였다.

블록집성재의 휨 탄성계수는 대조군 집성재와 상응하였으며, 파괴계수는 대조군 집성재 보다 27% 향상된 값이 측정되었다. 이러한 내력 향상은 목리가 다른 2개의 집성재를 측면접착하여 내력 및 결합이 분산된 것으로 사료된다.

## 사 사

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

## REFERENCES

- Broughton, J. G., & Hutchinson, A. R. 2001. Adhesive systems for structural connections in timber. *International journal of adhesion and adhesives*, 21(3), 177-186.
- DIN EN 14080. 2013. Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements.
- DIN EN 15416-5. 2006. Adhesives for load bearing timber structures other than phenolic and amino-plastic - Test methods - Part 5: Determination of conventional pressing time.
- Frank, M., Dominik, N. 2012. New timber bridges-inventive design by block-gluing.
- Gerhard, D. L., Simon, A., Wolfgang, B. 2005. Reflection measurements at timber glue-lines by means of ultrasound shear waves. *Otto-Graf-Journal* Vol. 16: 273-284.
- KS F 2160. 2013. 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. *J. Korean Wood Sci. Tech.* 36(4): 19-25.
- Park, J. C., Shin, Y. J., Hong, S. I. 2009. Bonding performance of glulam reinforced with glass fiber-reinforced plastics. *J. Korean Wood Sci. Tech.* 37(4): 357-363.
- Simon, A., Gordian, S. 2014. Block glued glulam - bridges, beams and arches. WCTE. 2014. Quebec city canada August 10-14.