

페놀레조시놀공축합수지로 접착된 국산 잣나무의 목리방향별 전단성능평가¹

박 선 향² · 김 광 모² · 방 성 준² · 공 진 혁² · 이 상 준^{2,†}

Evaluation of Shear Strength by Direction of Wood Grain for Korean Pine Using PRF Adhesive¹

Sun-Hyang Park² · Kwang-Mo Kim² · Sung-Jun Pang² · Jin Hyuk Kong² · Sang-Joon Lee^{2,†}

요 약

본 연구는 국산 잣나무를 활용한 구조용집성판(cross laminated timber; CLT) 제조 기술 확립을 위한 일환으로 구조용집성판 제작 시 접착조건을 구명하기 위해 수행되었다. 페놀레조시놀공축합수지(phenol resorcinol formaldehyde; PRF) 접착제를 적용하여 도포량과 압제압력 조건을 달리하여 목리가 수직 또는 수평한 경우의 전단시험에 의해 접착강도를 확인하였다.

실험결과, 적정 접착조건은 도포량 250 g/m², 압제압력 0.8 MPa로 결정하였다. 목리방향별 접착력에 있어서는 목리를 수직방향으로 접착할 때 평행하게 접착된 경우보다 낮은 값을 보였다. 이는 목리를 수직방향으로 접착한 시험편의 경우 다수가 롤링전단에 의해 파괴된 것과 연관이 있는 것으로 판단되었다. 한편 목리가 수평한 방향으로 접착된 경우, 국내의 기준에서 제시하고 있는 전단접착 강도 기준을 만족하였으며 목리가 수직한 방향으로 접착한 경우 국외 기준에 제시된 기준을 만족하였다.

본 연구에서 도출된 최적 접착조건을 적용하여 국산 잣나무 구조용집성판 제조 시 국내의 기준에 준하는 접착성능 확보가 가능할 것이며, 또한 도출 데이터는 구조용집성판 및 구조용집성재 제조 시 참고 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

This study was performed to find out the optimum adhesive conditions on manufacturing a cross-laminated timber (hereinafter CLT) with using domestic Korean Pine (*Pinus koraiensis*). The adhesive conditions including a applied amount of the glue and a Pressure are the one of the most important key factors on establishing CLT production process. The shear strength was examined with differing the adhesive conditions while using Phenol Resorcinol Formaldehyde Resin Adhesive (PRF resin).

The optimum adhesive conditions was confirmed to be: glue spread of 250 g/m² and Pressure of 0.8 MPa

¹ Date Received November 18, 2016, Date Accepted February 21, 2017

² 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, National Institute of Forest Science, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 이상준(e-mail: lsjoon@korea.kr)

respectively. The grain directions of glued specimens were also considered, perpendicularly bonded and parallelly bonded groups. Shear strength of the former group showed lower values than the latter group which is considered to be the effect of a rolling shear. Meanwhile the shear strength of both group satisfied the Korean Standard (KS F 3021) and the European Standard (EN 14080 and EN 16351).

The results derived from this study can be used as the basic data for manufacturing the CLT with domestic Korean Pine. And additional researches for the other species including domestic Korean Larch and Pitch Pine is also now being performed.

Keywords : Korean pine, glue spread, pressure, shear strength

1. 서 론

새로운 공학목재인 구조용집성판은 북미, 유럽 등에서 콘크리트, 철강의 대체 구조재로 각광받고 있으며, 전단벽이나 바닥 등의 다양한 구조로 사용되고 있다.

2015년 노르웨이는 집성재 550 m³와, 구조용집성판 385 m³를 사용하여 14층 공동주택인 Treet (the Tree)를 완공하였다. 캐나다에서는 철골과 구조용집성판을 이용하여 18층 높이(53.5 m)의 대학기술사(Brock Commons)를 2017년에 완공할 예정이다.

최근 구조용집성판이 국내에 도입되어 제조 기술 및 성능 평가 등 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 구조용집성판은 라미나의 목리방향을 직교로 적층한 새로운 공학목재로서 목재의 이방성을 감소시키고 치수안정성을 증가시킨 재료이다. 이와 관련하여 열기건조 중 라미나의 변형억제를 통한 구조용집성판의 제조수율 향상(Han, 2016)에 관한 연구, 국산 소나무 구조용집성판의 전단성능평가(Kim, 2013) 등 구조용집성판의 제작에 관한 연구가 이루어져 왔다.

구조용집성판은 라미나의 등급에 따라 층재를 배치하고 목리방향을 직교로 적층시킨 재료이다. 선형 부재로서 생산되었던 구조용집성재와 달리, 구조용집성판은 판상부재로 생산되는 제품으로써 판재의 전체 접착면적에 균일한 도포와 압체를 유지하는 것이 매우 중요하다. 따라서 제조 공정시 최적접착 조건을 발현할 수 있는 접착제의 종류 및 도포량, 압체압력 등을 결정해야 한다. 또한 구조용집성판으로 제작될 경우 3층뿐 아니라 5층 등 다양한 구성으로 제작할 수 있는바, 직교 접착뿐 아니라 평행하게

접착하는 조건에 대해서도 검토가 필요하다(CLT Handbook, 2011).

국산 잣나무는 기둥, 보 구조의 중목 구조용집성재로 사용하기에는 용이가 많고 비교적 비중과 강도가 낮다(Chong, 2008; Song, 2015). 국산 잣나무를 구조용집성판에 이용한다면 이러한 단점을 보완하여 재료의 가치를 높일 수 있을 것으로 생각된다. 현재 잣나무는 건축의 내장재나 가구, 포장 등에 일부 이용되고 있으나 향후 국내 주요 공학목재로서 부가가치를 높일 수 있는 재료로 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

현재 국내에서 목재 접착에 주로 사용되는 접착제로써 요소수지, 우레탄수지, 이소시아네이트, 페놀레조시놀 등이 사용되고 있다. 페놀레조시놀공축합수지의 경우 상온경화형 접착제로써 목재용 접착제 중에서 가장 우수한 접착성능을 발휘하여 국내에서 구조용집성재 생산에 많이 사용되고 있다(Roh, 1993).

본 연구는 잣나무 구조용집성판을 제조하기 위한 기초연구로써, 구조용집성재에 흔히 사용되는 페놀레조시놀공축합수지 접착제를 이용하여 목리와 수직 또는 평행하게 접착하는 경우의 접착성능을 확인하고, 이를 바탕으로 구조용집성판 생산에 적합한 접착 조건을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

공시수종은 경기도 가평군에서 벌채된 잣나무(Korean Pine, *Pinus koraiensis*)로서 여주 산림조합

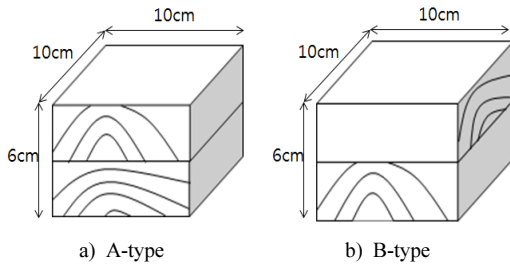


Fig. 1. Specimen type and size.

중앙회 목재유통센터에서 제재하였다. 제재 후 용이와 등근모 등을 제외한 무결점 부위를 선별하여 두께 30 mm, 폭 100 mm, 길이 100 mm로 시험편을 제작하였다. 한국산업규격(KS)에 따라 측정된 시험편의 기본밀도(전건중량/생재부피)는 $0.36 (\pm 0.02) \text{ g/cm}^3$, 전건밀도 $0.41 (\pm 0.02) \text{ g/cm}^3$ 함수율 $11.5 (\pm 0.56)\%$ 였다(한국산업규격 F2198, 한국산업규격 F2199).

공시 접착제로는 북미, 유럽, 일본 등에서 집성판, 합판 등 목재 집성시 많이 사용되는 상온경화형인 페놀레조시놀공축합수지(D-40, Oshika corporation, 일본)를 사용하였다. 접착에 앞서 동사제품인 전용 파우더형 경화제를 주제 대비 15 part 첨가하였다.

2.2. 시험편 제작

시험편은 각 조건별로 목리에 따라 평행한 방향으로 접착한 A-type과 목리가 직교하도록 접착한 B-type으로 나누어 제작하였다(Fig. 1).

2.2.1. 압체압력에 따른 시험편 제작

접착제 도포량이 250 g/m^2 로 일정할 때, 압체압력을 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 MPa로 변화시키면서 시험편을 제작하였다. 각 압체압력 조건에 따라 5개의 시험편을 제작하였다. 만능재료시험기(Instron, 최대하중 20 ton)를 이용하여 균일한 압체압력으로 4시간 동안 압체 후 12시간 이상 양생하였다. 양생 후 온도 23°C , 습도 66% 항온항습실에서 48시간 동안 조습하였다.



Fig. 2. Glue spread measurement and specimen press.

2.2.2. 도포량에 따른 시험편 제작

압체압력 실험 결과에 따라 결정된 조건을 적용하여 도포량 150, 200, 250, 300, 350 g/m^2 에 따라 5개의 시험편을 제작하였다(Fig. 2). 압체 조건은 2.2.1과 동일하게 실행하였다.

2.3. 접착강도평가

접착강도 평가를 위해 국내 구조용집성재 기준(KS F3021)에 따라 블록전단시험을 수행하였다. 각 조건에 따라 제작된 5개의 시험편에서 각 2개씩 총 10개의 전단시험편을 제작하여 실험하였다. 전단강도 측정은 만능재료시험기(Instron 5585, 최대하중 20 ton)를 이용하였고 예비실험을 통해 하중속도는 1 mm/min 으로 적용하여 측정하였다. 전단강도 측정 후 목파울은 시험체의 전단면에 0.5 mm 격자를 적용하여 ASTM D 5266-99에 따라 측정하였다. 양쪽 두면의 전단면을 측정하여 평균값을 적용하여 ASTM D 5266-99에 따라 산출하였다.

A-type의 경우에는 국내(KS F3021)와 유럽(EN14080)의 구조용집성재 기준, B-type의 경우에는 아직 국내 구조용집성판 기준이 마련되지 않아 유럽기준(EN 16351)과 비교하여 기준충족여부를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 압체압력

접착제 도포량이 250 g/m^2 로 일정할 때, 압체압력에 따른 전단강도 측정결과를 Table 1과 Table 2

Table 1. Shear strength in both type by pressure

Glue Spread (g/m ²)	Pressure (MPa)	A-type				B-type			
		Average	Max.	Min.	N/A	Average	Max.	Min.	N/A
250	0.7	11.20 (± 4.08)	16.55	5.44	2	6.34 (± 2.09)	9.98	3.87	-
	0.8	12.47 (± 2.18)	14.79	7.96	-	5.73 (± 0.88)	6.92	4.01	-
	0.9	11.89 (± 2.26)	13.58	7.06	-	6.14 (± 0.99)	7.61	4.44	-
	1.0	10.59 (± 3.90)	16.16	5.31	1	5.45 (± 1.59)	8.32	3.27	-
Average		11.54 (± 3.18)				5.93 (± 1.46)			

* N/A: number of Not Acceptable

Table 2. Wood failure in adhesive bonded joints in both type by pressure

Glue spread (g/m ²)	Pressure (MPa)	A-type				B-type			
		Average	Max.	Min.	N/A	Average	Max.	Min.	N/A
250	0.7	99.5 (± 0.88)	100	98	-	99.4 (± 0.97)	100	98	-
	0.8	98.4 (± 2.63)	100	92	-	98.0 (± 2.58)	100	95	-
	0.9	99.0 (± 2.254)	100	92	-	99.6 (± 1.26)	100	96	-
	1.0	99.8 (± 0.63)	100	98	-	96.6 (± 4.81)	100	88	-

* N/A: number of Not Acceptable

에 제시하였다.

A-type의 경우, 모든 조건의 전체 평균값 11.54 (± 3.18) MPa로 국내 구조용집성재 기준(KS F3021)에 제시된 잣나무의 블록전단 시험기준인 5.9 MPa와 수종에 무관하게 제시되어 있는 유럽기준(EN 14080) 6.0 MPa에 상회하는 값을 확인하였으나 압체압력 조건 0.7 MPa과 1.0 MPa의 일부 시험편에서 미달하였다(Table 1). 목파율은 모든 시험편에서 국내기준(65% 이상)과 유럽기준(90% 이상)을 만족하였다(Table 2).

목리를 직교로 접착한 구조용집성판에 대한 국내 기준은 아직 마련되지 않아 유럽의 기준(EN16351)을 적용하여 평가하였다. B-type의 경우 모든 조건의 전체 평균값 5.93 (± 1.46) MPa로 유럽기준에 제시된 구조용집성판 블록전단 시험기준인 1 MPa에 크게 상회하는 값을 확인하였다(Table 1). 유럽 기준에는 목파율에 대한 별도의 기준을 제시하고 있지 않지만 실험결과 98.4% 이상으로 높은 값을 보였다(Table 2).

A-type에서 압체압력 0.8 MPa일 때 가장 높은 전단강도 값 12.47 MPa으로 측정되었다. 압체압력이 가장 높은 1.0 MPa의 압체압력 조건에서 가장 낮은 전단강도 10.59 MPa 값을 보였다.

B-type의 경우 압체압력에 따른 전단강도의 차이가 크게 나타나지 않았으나 0.8 MPa과 0.9 MPa의 압체압력 조건에 비해 0.7 MPa과 1.0 MPa의 압체압력 조건에서 편차가 크게 나타남으로써 0.8 MPa과 0.9 MPa의 압체압력 조건이 적정함을 확인하였다. 또한 0.9 MPa의 압체압력 조건보다 0.8 MPa일 때 편차가 적은 값으로 나타났다.

접착제를 분산시키기에 충분한 압체압력이 가해지지 않은 경우에는 국부적으로 접착제의 양이 부족한 부분에서 파괴가 유도되어 접착성능의 변이가 크게 나타날 수 있다. 반면에 과도한 압체압력이 가해지면 표면이 평활하지 못한 경우 일부 돌출된 부분에서 접착제가 옆으로 밀려나면서 접착제의 양이 부족한 부분이 발생될 수 있다. 이로 인하여 압체압력이 부족한 경우와 유사하게 접착성능의 변이가 증가하는

Table 3. Shear strength in both type by glue spread

Glue Spread (g/m ²)	Pressure (MPa)	A-type				B-type			
		Average	Max.	Min.	N/A	Average	Max.	Min.	N/A
150	0.8	9.10 (± 2.50)	13.83	5.44	1	5.30 (± 0.71)	6.28	4.34	-
200		10.29 (± 2.10)	13.7	7.93	-	5.53 (± 0.61)	6.64	4.89	-
250		10.63 (± 1.57)	12.67	8.49	-	6.07 (± 0.83)	7.07	5.07	-
300		9.78 (± 2.46)	13.59	5.47	1	5.06 (± 0.66)	6.29	3.88	-
350		9.72 (± 2.32)	13.07	5.46	1	5.43 (± 1.49)	7.84	3.5	-
Average		9.90 (± 2.28)				5.47 (± 0.96)			

* N/A: number of Not Acceptable

Table 4. Wood failure in adhesive bonded joints in both type by glue spread

Glue Spread (g/m ²)	Pressure (MPa)	A-type				B-type			
		Average	Max.	Min.	N/A	Average	Max.	Min.	N/A
150	0.8	99.7 (± 0.67)	100	98	-	99.5 (± 0.53)	100	99	-
200		99.8 (± 0.63)	100	98	-	99.0 (± 1.33)	100	96	-
250		97.2 (± 0.47)	100	76	-	96.0 (± 5.08)	100	86	-
300		99.8 (± 0.42)	100	99	-	99.0 (± 0.82)	100	98	-
350		99.1 (± 1.36)	100	96	-	99.7 (± 0.48)	100	99	-

* N/A: number of Not Acceptable

것으로 판단된다.

따라서 접착제 도포량이 고르게 분포하고 층재간 접착층의 균일한 두께를 확보하기 위해서는 적정 범위의 압체압력이 요구된다. 공시 접착제인 페놀레조시놀공축합수지의 제조사에서 제공하는 물질안전보건자료에서 레조시놀계접착제에 대한 사용조건에 대해 1.0~1.3 MPa를 제시하고 있으나 실험결과 제시된 사용조건보다 낮은 0.8 MPa과 0.9 MPa에서도 기준을 만족하는 접착성능을 확인하였다. 구조용집성판의 생산설비 구축 시 주요 설비라 할 수 있는 프레스의 경우, 실대크기의 압체면에 전체적으로 균일하고 일정한 시간 동안 압력을 유지하는 것이 매우 중요하다. 또한 압체공정의 저비용화는 단위 생산당 원가를 낮출 수 있는 효율적인 방법이다. 물질안전보건자료에서 제시된 조건보다 낮지만 생산 공정의 효율성 및 경제성을 고려하여 0.8 MPa이 적정하다고 판단된다.

3.2. 도포량

압체압력은 위의 연구결과에 따라 0.8 MPa으로 고정하고, 도포량에 따른 전단강도 측정결과를 Table 3과 Table 4에 제시하였다.

A-type의 경우 9.90 (± 2.28) MPa로 국내 구조용 집성재 기준(KS F3021)에 제시된 잣나무의 블록전단 시험기준인 5.9 MPa에 도포량 조건 150, 300, 350 g/m²의 각 1개씩 3개의 시험편을 제외하고 상회하는 값을 확인하였다. 유럽기준(EN 14080)에도 3개 시험편을 제외하고 모두 기준을 상회하였다. 목파울은 모든 시험편에서 국내기준(60%)과 유럽기준(90%)을 만족하였다(Table 4).

B-type의 경우 5.47 (± 0.96) MPa로 유럽기준(EN16351)에 제시된 구조용집성판 시험기준인 1 MPa에 상회하는 값을 확인하였다. 목파울의 경우 별도의 기준을 제시하고 있지 않지만 전체시험편 평균 98.6%로 높은 값을 확인하였다.

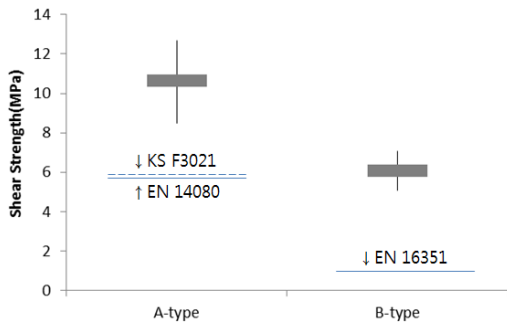


Fig. 3. Shear strength in both type.

구조용집성판은 너비와 폭의 면적이 크기 때문에 생산 시 전체적인 면에 균일한 양을 도포하는 것이 쉽지 않다. 재면에 많은 양의 접착제를 도포할 경우 필요 이상의 접착제를 사용하게 되므로 비경제적이다. 또한 적은 양의 접착제를 도포할 경우 접착성능이 기준에 만족하기 어렵다. 물질안전보건자료에 의하면 레조시놀계접착제에 대한 사용 조건에서는 수중, 재면의 상태에 따라 다를 수 있으나 기본 도포량을 250~350 g/m²으로 범위를 제시하고 있다. 제조사의 자료와 본 연구 결과를 통해 도포량 250 g/m²이 적정하다고 판단된다.

이상과 같은 결과를 통해 페놀레조시놀공축합수지를 이용한 잣나무로 구조용집성판을 제작할 때 도포량 250 g/m², 압체압력 0.8 MPa이 최적 접착조건으로 판단하였다.

3.3. 목리 방향에 따른 접착성능

최적 조건으로 결정된 도포량 250 g/m², 압체압력 0.8 MPa의 조건일 때 목리방향에 따른 전단강도 값을 Fig. 3에 나타내었다. 목리방향을 평행하게 접착한 A-type이 목리방향을 직교하게 접착한 B-type의 비해 높은 전단강도 값을 나타내었다. A-type의 전단면은 목리방향에 따라 파괴가 나타남을 확인하였다. 한편 B-type의 경우에는 대부분 롤링전단에 의한 파괴가 나타났다(Fig. 4). Blass (2008)는 롤링전단의 경우 일반적인 전단에 비해 강도가 1/10 수준임을

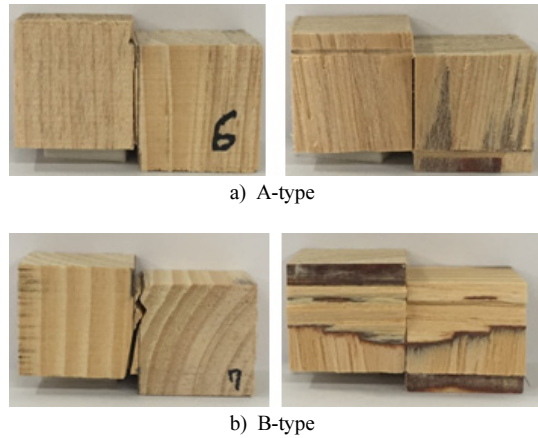


Fig. 4. Failure modes of specimen.

보고하였다. 목리에 수직인 적층은 강도차이 및 롤링에 의한 영향으로 작용하여 전단강도를 감소시키는 요인으로 작용한다. 롤링전단은 구조용집성판의 강도성능을 평가할 때 주요 파괴양상으로 작용하기 때문에 향후 롤링전단에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

잣나무의 목리방향에 따른 전단강도 성능평가를 통해 적정접착조건은 높은 전단강도와 균일한 편차를 만족하는 도포량 250 g/m², 압체압력 0.8 MPa의 조건에서 결정되었다. 목리가 직교하도록 접착한 B-type의 경우 롤링에 의한 영향이 작용하여 목리에 따라 평행한 방향으로 접착한 A-type에 비해 낮은 전단강도 값을 확인하였다. 그러나 B-type이 유럽기준(EN16351)에 제시된 기준에 상회하는 값을 나타남에 따라 본 실험 결과를 구조용집성판 제작에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

국산 잣나무의 목리방향별 접착조건을 구명한 결과를 바탕으로 실대 구조용집성판을 제작하여, 성능평가를 진행 중에 있다. 향후 국산 구조용집성판의 생산 및 상용화를 위한 기초 자료로 이용될 수 있으며, 이를 토대로 국내 구조용집성판 기준 마련에 활용될 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 국립산림과학원 석·박사연구원십의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2005. D5266-99. Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints.
- Blass, H.J., Grolacher, R. 2000. Rolling Shear in structural bonded timber elements. Proceedings of International Conferences on Wood and Wood Fiber Composites. Stuttgart, Germany. pp. 327-337.
- Chong, S.H., Park, B.S. 2008. Wood properties of the useful tree species grown in Korea. Korea forestry research institute. Seoul, Republic of Korea. pp. 208-228.
- European Committee for Standardization. 2013. BS EN 14080. Timber structures-Glued laminated timber and glued solid timber-Requirements.
- European Committee for Standardization. 2015. BS EN 16351. Timber structures-Cross laminated timber-Requirements.
- FPIinnovations. 2011. CLT Handbook. Canada.
- Han, Y., Park, J.H., Chang, Y.S., Park, Y., Oh, J.K., Hong, J.P., Lee, J.J., Yeo, H. 2016. The effect of controlling the drying distortion of laminas on the production yield of cross-laminated timber (CLT) using *Larix kaempferi* wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 74(4): 519-526.
- Kim, H.K., Oh, J.K., Jeong, G.Y., Yeo, H., Lee, J.J. 2013. Shear Performance of PUR Adhesive in Cross Laminated of RED Pine. *Journal of Korean Wood Science and Technology* 41(2): 158-163.
- Korean Standard. 2013. KS F3021. Structural Glued laminated timber.
- Korean Standard. 2016. KS F2199. Determination of moisture content of wood.
- Korean Standard. 2016. KS F2198. Determination of density and specific gravity of wood.
- Osika Co. Ltd. 2003. Deernol D-40 Resorcinol adhesives.
- Roh, J.K. 1993. Synthesis and Bonding Properties of Phenols · Resorcinol · Formaldehyde Resin Adhesives. *Journal of Wood Science and Technology* 21(1): 51-58.
- Song, Y.J., Jung, H.J., Lee, I.H., Hong, S.I. 2015. Performance Evaluation of Bending Strength of Curved Composite Glulams Made of Korean White Pine. *Journal of Korean Wood Science and Technology* 34(4): 463-469.