

이수종 구조용집성재의 전단접착력 및 접착내구성 평가*¹

심 상 로*² · 여 환 명*^{2†} · 심 국 보*²

Evaluation of Shear Bond Strength and Adhesive Bond Durability of Mixed Species Structural Glued Laminated Timber*¹

Sangro Shim*² · Hwanmyeong Yeo*^{2†} · Kugbo Shim*²

요 약

본 연구에서는 국산재의 구조용집성재 라미나로의 이용을 위해 국산 소나무, 잣나무와 낙엽송 공시판재에 대하여 육안품질을 평가한 후, 레조르시놀수지와 수성고분자 이소시아네이트수지 접착제로 접착하여 제조한 단일수종 및 이수종 혼합 구조용집성재의 전단접착력과 접착내구성을 평가하였다.

국산재의 구조용집성재 라미나로의 이용을 위해 공시판재에 대한 육안품질등급 구분을 실시한 결과, 소나무, 잣나무 및 낙엽송의 육안품질 종합등급은 재내 잔존하는 크고 많은 옹이와 함께 큰 목리경사각으로 인해 낮은 등급의 판재 비율이 상당히 높게 나타났다. 좀더 높은 등급의 판재를 생산하기 위하여 가지치기 등의 육림작업과 할렐 및 비틀림 등의 결함을 줄이기 위한 제재 및 건조공정 개발이 필요할 것으로 판단되었다.

레조르시놀 수지 접착제와 수성고분자 이소시아네이트 수지 접착제로 제조된 단일수종 및 이수종 혼합 집성재의 전단강도는 $7.9\sim 9.9\text{ N/mm}^2$ ($80.9\sim 101.3\text{ kgf/cm}^2$) 범위 내에 있어 A수종군의 KS규격 전단강도인 7.1 N/mm^2 (72 kgf/cm^2)을 훨씬 상회하는 우수한 접착력을 나타내어 사용된 두 접착제 모두 강도적인 문제는 발생치 않을 것으로 판단되었다.

또한 레조르시놀 수지 접착제를 사용하여 제조한 단일수종 집성재와 이수종 혼합집성재의 침지 및 삶음박리시험 결과 모든 시험편이 KS 기준을 상회하여 접착내구성에도 역시 문제가 없음을 보여주었다. 그러나 수성고분자 이소시아네이트 수지 접착제로 제조된 단일수종 및 이수종 혼합 집성재의 침지와 삶음 박리율은 매우 높아 이 접착제를 구조용집성재용 접착제로 사용할 경우는 집성재의 사용환경을 신중히 고려하여야 할 필요가 있었다.

본 연구결과는 국산 소나무, 잣나무 및 낙엽송 단일수종 구조용집성재와 이수종 혼합집성재 제조를 위한 기초 자료 제공 및 품질 향상에 사용될 수 있으리라 기대된다.

*¹ 접수 2004년 11월 30일, 채택 2005년 1월 11일

*² 국립산림과학원 임산공학부 Forest Products Engineering, Korea Forest Research Institute

† 주저자(corresponding author) : 여환명(e-mail: hyeo0802@foa.go.kr)

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate the shear bond strength and adhesive bond durability of structural glued laminated timber (glulam) manufactured with mixed species lumber of Korean red pine, Korean pine and Japanese larch, using resorcinol adhesive and water-based polymeric-isocyanate adhesive (WPI).

Each board used as a glulam lamina was graded by visual inspection. The visual lumber grade of the all species was very low due to the large size and number of knots and the steep slope of grain. In view of the results, appropriate pruning, sawing and drying processes might be needed to produce high grade lamina lumber with small knot size and drying defect free.

Shear bond strength of every tested glulam specimen ranged between 7.9 and 9.9 N/mm², and much higher than the Korean Standard (KS) for glulam shear bond strength, 7.1 N/mm². There was not much shear bond strength difference between wood/resorcinol and wood/WPI.

The resorcinol adhesive bond durability exceeded KS requirements. However, delamination on the end-grain surfaces of WPI glulam submerged in both room temperature and boiling water severely occurred, and its durability did not meet KS requirements. Further investigations may be required, and special care should be taken, to ensure long service life of WPI glulam used for exterior application.

Results of this study are expected to be useful for improvement of mechanical properties and structural performance of mixed species glulam.

Keywords: Korean red pine, Korean pine, Japanese larch, shear bond strength, adhesive bond durability

1. 서 론

미국과 일본 등 목재산업 선진국에서는 구조용집성재용 적정 접착제 및 제조조건에 관한 연구(Vick and Rowell 1990, Zahn and Rammer 1995, 日本合板検査會 1996)와 구조용집성재의 강도적 성능 평가와 예측기술 및 실용화 기술에 관한 연구(Canadian Wood Council 1995, 三橋博三 等 1996, Moody and Hernandez 1997, 日本住宅·木材技術センター 1997, 城井秀幸 1998, USDA Forest Service 1999, Dansoh et al. 2002) 결과가 산업체 현장에 널리 보급되어 있으며, 목재의 효율적 이용을 위한 이수종 혼합집성에 관한 연구(本谷山紀 等 1996)와 강도향상을 위한 이종재료 복합집성에 관한 연구(林知行 等 1992, Falk and Coling 1995, Hernandez et al. 1997, Lopez-Anido et al. 2000, Kasal and Heiduschke, 2004) 등이 활발하게 진행되고 있다. 국내 구조용집성재 제조기술 확립을 통한 구조용집성재 생산기반 마련과 활

용기술 보급은 국산재의 효율적 이용과 고부가가치 창출이라는 국내 임산공학 분야의 당면목표를 달성해 나갈 수 있는 해법 중의 하나가 될 수 있다고 사료된다.

우리나라에서는 1997년 국립산림과학원 산림과학관 축조용으로 길이 15.6 m, 두께 65 cm의 국산 낙엽송 대단면 구조용집성재가 국내기술로 최초로 제조된 이후 구조용집성재의 생산량이 매년 꾸준히 증가하여 2002년도에는 약 2000 m³의 구조용집성재가 생산되었으며 그 수요는 증가 추세에 있다. 현재 국산 주요 침엽수종 중에서 낙엽송재가 구조용집성재 용재로 주로 사용되고 있는데 그 이유는 소나무의 경우 우리나라 국민이 가장 선호하는 수종으로 문화재 보수용이라는 고부가가치 수요가 있어 구조용 집성재 용재로 많이 이용되지 않고 있으며 낙엽송재의 강도적 성능이 잣나무와 리기다소나무에 비해 우수하기 때문이다. 구조용 집성재의 생산기술을 선진화하기 위해서는 국산 수종의 재질 및 강도성능에 대한 적절한 평

가, 집성재 제조수율 향상(심상로 2004), 제재 및 건조기술 향상, 사용 환경에 알맞은 접착제의 선택, 강도 성능 및 신뢰성을 향상시킬 수 있는 접착조건 구명(박상범 등 1988) 등에 대한 다양한 연구가 지속적으로 뒷받침되어야 할 것이다. 본 연구에서는 국산 주요 침엽수종인 소나무, 잣나무, 낙엽송재의 재질을 평가하고 단일수종 및 이수종 혼합 구조용집성재를 제조한 후 접착력과 접착내구성을 분석하여 이수종 구조용집성재의 사용 환경에 적합한 접착제의 선택과 강도성능 향상을 가능케 함으로써 국산재의 효율적 이용 및 고부가가치 창출 가능성을 제고하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

공시수종은 국산 소나무(Korean Red pine, *Pinus densiflora*), 잣나무(Korean pine, *Pinus koraiensis*) 및 낙엽송(Japanese larch, *Larix leptolepis*)으로서 제재소에서 일반적으로 제재하고 있는 직경 20~30 cm의 원목을 무작위로 제재하여 사용하였다. 소나무는 인제, 잣나무는 가평, 낙엽송은 홍천산으로 각 수종당 230매를 공시판재로 사용하였다. 판재의 제재 치수는 두께 27 mm, 폭 150 mm, 길이 3.6 m였으며, 함수율 12% 이하로 인공건조한 후 양생 조습하였다. 건조판재를 두께 20 mm, 폭 140 mm로 대패 가공한 후, 각 판재에 대하여 육안 등급 구분과 기계 응력 등급 구분을 한 후 집성재를 제조하였다. 공시접착제로는 레조르시놀(Resorcinol)수지 접착제(DEERNOL NO.40, OSHIKA SHINKO CO., LTD)와 수성고분자 이소시아네이트(Water-based polymer-isocyanate, WPI) 접착제(KR134, KOYO-SANGYO CO., LTD, 光洋産業株式會社)를 사용하였다. 레조르시놀 수지에는 동사 제품인 레조르시놀 수지 전용 파우더형 경화제를 주재 대비 15 part를 첨가하여 사용하였고, poly-vinyl alcohol (PVA)/styren-butadiene-co-emulsion polymer (SBR)/calcium carboante를 base resin으로 이용하고 polymeric methylene diphenyl diisocyanate (pMDI)를 crosslinking agent로 이용하여 개

발된 제품인 수성고분자 이소시아네이트 접착제에는 동사 제품인 JA-1 경화제를 주재 대비 20 part를 첨가하여 사용하였다.

2.2. 구조용집성재 성능평가

2.2.1. 집성재 제조용 판재의 품질평가 및 등급 구분

대패 가공한 판재의 육안등급구분은 한국산업규격 KS F3021 구조용집성재에 의하여 실시하였다. 판재의 기계응력등급 구분은 MSR 응력등급 구분기(마이크레이더 90 M KAWASAKI 기공(주))를 사용하여 힘탄성계수를 측정하고, KS F3021 구조용집성재에 의하여 실시하였다.

2.2.2. 집성재의 제조

집성재는 소나무, 잣나무 및 낙엽송의 단일수종 집성재 3종류와 소나무와 잣나무 혼합, 소나무와 낙엽송 혼합, 잣나무와 낙엽송 혼합 집성재 3종류, 총 6가지의 집성재를 제조하였다. 단일수종 집성재 라미나 구성은 힘탄성계수가 높은 판재를 외측에 배열하였고, 이수종 혼합집성재는 이수종을 교호로 배열하여, 각 구성조건별로 4층 라미나 구조용집성재를 10개씩 제조하였다. 예비실험을 통해 구명한 적정제조조건인 접착제 도포량 300 g/m²로 한면을 도포하였고, 압체 압력 12 kgf/cm²으로 24시간 압체하였으며, 클램프로부터 제거 후 약 7일간 공장 내에서 양생, 조습하였다. 제조한 집성재의 치수는 두께 80 mm, 폭 140 mm, 길이 3.6 m였으며, 집성재의 폭방향을 대패 가공하여 폭을 130 mm로 가공하였다. 집성재의 기건밀도는 대패가공한 두께 80 mm, 폭 130 mm, 길이 3.6 m의 실대 집성재의 치수 및 중량을 측정하여 산출하였으며, 함수율은 두께 80 mm, 폭 130 mm, 길이 30 mm의 시험편을 채취하여 진진법으로 측정하였다.

2.2.3. 전단접착력 및 접착내구성

전단접착력 및 목과율은 KS F3021 구조용집성재 블록전단시험 방법에 의해 측정하였고, 접착내구성은

Table 1. Physical and mechanical properties and lumber grades of Korean red pine (*Pinus densiflora*), Korean pine (*Pinus koraiensis*), and Japanese larch (*Larix leptolepis*)

		<i>Pinus densiflora</i>	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	
Moisture content (%)		11.6 (2.61) ¹	13.3 (1.94)	11.5 (2.91)	
Air-dry density (g/cm ³)		0.50 (0.05)	0.50 (0.03)	0.60 (0.06)	
Air-dry specific gravity		0.45 (0.05)	0.44 (0.05)	0.54 (0.05)	
Ratio of center knot radius to lumber width (%)		50.3	45.0	35.0	
Knots	Center knot Lumber yield (%)	No.1	3.1	3.0	8.2
		No.2	6.3	9.0	26.3
		No.3	14.4	21.5	35.3
		No.4	25.1	30.5	20.3
		Etc.	51.1	36.1	9.9
Ratio of edge knot radius to lumber width (%)		17.6	15.3	9.5	
Knots	Edge knot Lumber yield (%)	No.1	56.1	61.8	81.0
		No.2	17.0	17.6	11.6
		No.3	12.6	12.5	5.6
		No.4	12.6	6.9	1.7
		Etc.	1.8	1.3	0
Width/length of check (mm)		0.8/112.4	0.6/80.2	0.8/90.0	
Check-developed lumber rate (%)		12.6	29.2	31.5	
Checks	Lumber yield (%)	No.1	87.4	70.8	68.5
		No.2	2.7	7.3	3.0
		No.3	5.4	15.0	19.8
		No.4	3.6	6.4	8.6
		Etc.	0.9	0.4	0
Warp	Bow (mm)	2.8	2.1	2.6	
	Crook (mm)	3.8	2.5	1.5	
	Twist (mm)	8.0	-6.3(Z-direction)	8.2	
Modulus of elasticity (N/mm ²)		9594 (2050)	11084 (1497)	12074 (2104)	
Lumber stress grade	Machine-graded lumber yield (%)	E18 (>18,000 N/mm ²)	0	0	0.9 No.1
		E16	0.5 No.1	0	4.7 No.1
		E14	5.8 No.1	5.6 No.1	16.8 No.1
		E12	5.4 No.1	17.2 No.1	21.6 No.2
		E11	13.5 No.2	34.3 No.1	28.5 No.3
		E10	13.5 No.3	23.2 No.1	15.1
		E9	22.0	12.5 No.2	8.2
		E8	20.6	7.2 No.3	3.5
		E7	15.3	0	0.7
		E6	3.4	0	0
Lumber grade	Graded lumber yield (%)	No.1	0.5	2.2	3.0
		No.2	1.4	5.6	12.5
		No.3	7.7	14.6	32.3
		No.4	19.4	25.8	26.3
		Etc.	69.4	51.9	25.9

¹: standard deviation

KS F3021 구조용집성재 침지박리 및 삶음박리 시험을 통해 평가하였다. 침지박리시험은 상온에서 물 속에 24시간 시험편을 침지시킨 후 70°C의 항온건조기에 넣어 24시간 이상 건조하여 건조 후의 함수율이 시험 전의 함수율 이하가 되도록 하여 실시하였고, 삶음박리시험은 끓는 물 속에 시험편을 4시간 동안 침지시키고 다시 상온의 물 속에 1시간 침지시킨 후 70°C의 항온건조기에 넣어 24시간 이상 건조하여 건조 후의 함수율이 시험 전의 함수율 이하가 되도록 하여 실시하였다. 침지 및 삶음 박리시험 모두 11사이클을 실시하였으며, 각 사이클별로 박리율(양쪽횡단면의 접착층 길이의 합에 대한 양쪽횡단면에 발생한 박리 길이의 합의 비율)을 측정하였다. 또한 시험편을 실내방치와 옥외폭로하여 박리시험을 실시하였다. 시험편의 양 횡단면 중 1개의 횡단면은 무처리 상태로, 다른 1개의 횡단면에는 오스모컬러 3101 CLEAR NORMAL을 2회 도포하여 1개월 간격으로 박리율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건조판재의 품질 평가

소나무, 잣나무 및 낙엽송 건조판재에 대한 집중절경비, 채연부절경비, 할렬, 굽음 및 비틀림 등 육안등급 및 기계응력등급을 구분한 결과는 Table 1과 같았다.

함수율 및 비중: 소나무와 낙엽송 판재의 함수율은 11.6%와 11.5%로 거의 동일한 반면 잣나무는 13.3%로 타 수종에 비하여 약간 높은 함수율을 나타내었다. 위 함수율 조건에서 판재의 기건밀도를 측정 한 결과 소나무와 잣나무는 0.50 g/cm³이었고 낙엽송은 0.60 g/cm³이었으며, 기건비중은 소나무, 잣나무, 낙엽송 각각 0.45, 0.44, 0.54이었다.

용이: 판재폭 대비 집중된 용이 지름의 비율을 나타내는 집중절경비는 소나무가 50.3%로 가장 높았으며, 잣나무는 45%, 낙엽송은 35%이었다. 판재폭 대비 채연부에 위치한 용이 지름의 비율을 나타내는 채연부절경비도 집중절경비와 같이 소나무가 가장 높고

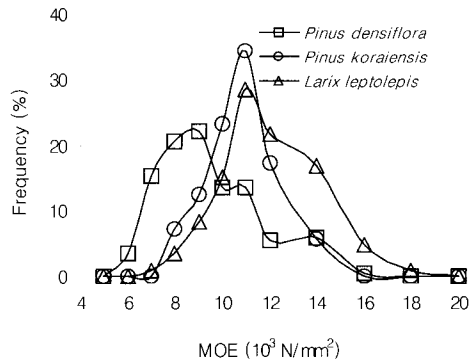


Fig. 1. Modulus of elasticity of Korean red pine (*Pinus densiflora*), Korean pine (*Pinus koraiensis*), and Japanese larch (*Larix leptolepis*).

낙엽송이 가장 낮은 비율을 나타내어 절경비에 따른 품질은 3수종 중 낙엽송이 가장 우수하였다.

할렬: 목재의 성장응력이나 부적합한 건조조건 및 원목 별체 시 물리적 충격 등에 의하여 발생하는 할렬은 목재 이용에 있어서 가공수율을 저하시키며, 각종 강도를 저하시킨다. 판재표면에 발생한 할렬 폭은 소나무와 낙엽송이 0.8 mm로서 잣나무의 0.6 mm보다 약간 넓었다. 할렬 길이는 잣나무와 낙엽송 판재는 각각 약 80 mm와 90 mm였으며, 소나무는 112 mm로서 잣나무나 낙엽송보다 약간 길었다. 판재 중 할렬이 발생한 비율은 낙엽송이 31.5%로 높았으며, 잣나무와 소나무는 각각 29.2%와 12.6%였다.

굽음 및 비틀림: 길이굽음은 2.1~2.8 mm로 수종별로 큰 차가 없었으나, 측면굽음의 경우는 낙엽송의 경우 1.5 mm로 가장 적게 굽은 반면 잣나무는 2.5 mm였으며, 소나무의 경우는 낙엽송의 2배 이상인 3.8 mm의 굽음을 나타냈다. 비틀림의 경우 소나무와 낙엽송은 S방향 비틀림으로 각각 8.0 mm, 8.2 mm로 거의 동등한 굽음을 나타냈다. 그러나 잣나무의 경우는 수종 특성에 따라 Z방향의 비틀림을 나타냈으며, 소나무나 낙엽송보다 약간 적은 6.3 mm의 비틀림을 나타냈다.

기계 응력 등급: KS에서는 구조용집성재에 사용되는 수종군을 A, B, C, D군의 4가지로 분류하고 소나무는 B군, 잣나무는 C군, 낙엽송은 A군으로 분류

Table 2. Shear strength of adhesive bonds between wood

	Resorcinol			WPI		
	Shear bond strength (N/mm ²)	Wood failure (%)	MC (%)	Shear bond strength (N/mm ²)	Wood failure (%)	MC (%)
① <i>Pinus densiflora</i>	8.1	96.7	11.3	8.0	96.3	10.8
② <i>Pinus koraiensis</i>	8.5	97.0	11.3	8.4	99.7	10.5
③ <i>Larix leptolepis</i>	9.9	94.0	10.7	9.8	95.0	10.4
① + ②	8.7	98.0	10.4	8.8	99.7	10.5
① + ③	9.3	94.3	10.5	9.6	94.7	10.7
② + ③	7.9	97.7	10.3	8.9	96.0	10.3

하고 있다. KS에서 규정한 구조용집성재 제조를 위한 판재의 수종군 분류를 고려하여 기계응력등급 1급 판재가 각 수종별 전체 판재에서 차지하는 비율을 평가해본 결과 소나무는 11.7%, 잣나무는 80.3%, 낙엽송은 22.4%였으며, 기계응력등급 3급까지의 비율은 소나무는 38.7%, 잣나무는 100%, 낙엽송은 72.5%였다. 잣나무의 경우 3급 이상의 비율이 100%로 높은 것은 잣나무가 소나무나 낙엽송보다 휘탄성계수가 높은 것이 아니라, 잣나무는 소나무나 낙엽송보다 낮은 등급의 수종군에 속하기 때문이다.

종합 품질 등급: 판재의 종합품질등급을 평가해본 결과, 소나무, 잣나무 및 낙엽송 각 수종의 1등급 판재의 비율은 각각 0.5, 2.2, 3.0%였고, 2등급 판재의 비율은 각각 1.4, 5.6, 12.5%로 낙엽송이 잣나무와 소나무에 비해 높았다. 낙엽송의 경우는 3등급 비율이 가장 높고 소나무와 잣나무의 경우는 등외의 비율이 가장 높아 국산재를 구조용집성재 용재로 이용하기 위해서는 적기의 간벌, 가지치기 등의 육림작업 실시와 함께 섬유경사각, 할랄 및 비틀림 등의 제재 및 건조결함을 최소화시키기 위한 연구가 절실히 요구되었다. 또한 1등급과 2등급제는 최외층이나 외층용재로 사용되어 집성재의 표면품질과 강도성능에 직접적으로 영향하기 때문에 1등급판재비율 향상을 위한 노력이 요구된다. 특히 소나무의 경우는 적기에 가지치기를 실시하여 죽은 옹이의 크기와 수량을 줄일 필요가 있었으며, 잣나무는 조기에 가지치기를 실시하여 옹이의 크기를 줄이는 것이 필요하였다.

3.2. 단일수종 집성재 및 이수종 혼합 집성재의 접착성능

3.2.1. 접착력

구조용집성재의 KS 규격에서는 구조용집성재 제조 시 이수종을 혼합집성하기 위해서는 그 접착성과 접착내구성을 검증한 후에 사용하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국산재의 효율적 이용을 위하여 소나무, 잣나무 및 낙엽송 각각의 단일수종 집성재, 소나무와 잣나무, 소나무와 낙엽송, 잣나무와 낙엽송 혼합집성재를 제조하여 접착성능을 평가하였다. 제조된 집성재의 전단접착력, 목파율 및 함수율은 Table 2와 같았다.

집성재를 제조하여 약 1개월간 양생한 집성재의 함수율은 10.3~11.3%였다. 레조르시놀 수지 접착제와 수성고분자 이소시아네이트수지 양 접착제를 사용하여 제조된 단일수종 집성재 및 이수종 혼합집성재의 블록전단시험의 전단강도는 7.9~9.9 N/mm² (80.9 ~ 101.3 kgf/cm²) 범위 내에 있어 A수종군의 KS규격 전단강도인 7.1 N/mm² (72 kgf/cm²)을 훨씬 상회하는 우수한 접착력을 나타냈으며, 단일수종 집성재와 이수종 혼합집성재 간의 접착력의 차이는 나타나지 않았다. 집성재의 목파율은 94~99.7%로서 KS 기준인 65%에 비해 매우 높았으며, 접착제간이나 동일수종과 이수종간에도 차이가 거의 없었다. 이상의 접착력과 목파율 결과로부터 소나무, 잣나무 및 낙엽송은 혼합 집성하여도 집성재의 접착력에는 문제가 없을

Table 3. Delamination on the end-grain surfaces of glulam submerged in room temperature water, %

Adhesive	Resorcinol								WPI								
	No. of cycle	1	2	3	4	5	7	9	11	1	2	3	4	5	7	9	11
① <i>Pinus densiflora</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	1.0	5.7	6.7	7.2	8.4	10.2	12.4	13.3
② <i>Pinus koraiensis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.9	2.4	2.9	3.0	3.1	3.5	4.3	4.8
③ <i>Larix leptolepis</i>	0	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.8	1.0	1.2	3.0	4.1	4.3	4.7	5.2	6.2	6.9	
① + ②	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	2.4	3.7	5.1	5.4	5.6	6.2	7.0	7.5	
① + ③	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0	8.3	8.4	9.8	10.9	12.2	14.6	16.2	
② + ③	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	2.7	7.2	8.1	8.4	8.9	9.9	11.9	12.7	

것으로 사료되며, 비틀림 방향이 낙엽송과 소나무와 반대인 잣나무는 낙엽송 또는 소나무와의 혼합집성에 의하여 비틀림이 억제될 것으로 사료된다.

3.2.2. 접착 내구성

침지박리율: 침지박리 시험편을 상온 수중에 24시간 침지한 후, 열풍순환식 건조기 내에서 침지 전의 중량에 달할 때까지 70°C 조건에서 건조하는 것을 1사이클로 하였다. 박리시험은 1사이클부터 11사이클까지 실시하였으며, 레조르시놀수지와 수성고분자 이소시아네이트수지 접착 집성재의 침지 박리시험 결과는 Table 3과 같았다.

레조르시놀수지 접착 집성재의 경우 1사이클 처리 후 단일수종 집성재는 물론 이수종 혼합집성재 모두 박리가 발생하지 않았다. 소나무와 잣나무 단일수종 집성재는 9사이클과 11사이클에서 박리가 발생하기 시작하였으나, 시험종료 시 두 수종 모두 0.1% 이하의 극히 낮은 박리율을 나타냈다. 낙엽송 집성재는 2사이클부터 약간의 박리가 발생하기 시작하여 11사이클 후 1.0%의 박리율을 나타내어 타 수종보다 약간 높은 박리율을 나타냈다. 한편 잣나무와 낙엽송 혼합집성재는 2사이클부터, 소나무와 잣나무 혼합집성재 및 소나무와 낙엽송 혼합집성재는 4사이클부터 박리가 발생하기 시작하여 11사이클 후에는 0.4~0.6%의 박리율을 나타내어 단일수종 집성재보다는 약간 높은 경향을 나타냈다. 레조르시놀수지 접착제로 접착한 모든 집성재에서 KS기준 박리율인 5%보다 낮은 박

리율을 나타냄과 동시에 KS기준 박리길이인 접착층 길이의 1/4보다 긴 박리가 전혀 발견되지 않음으로써 레조르시놀수지 접착제로 접착할 경우 접착내구성에 문제가 없을 것으로 사료된다.

그러나 수성고분자 이소시아네이트수지 접착제는 레조르시놀수지 접착제와는 달리 1사이클부터 모든 집성조건인 집성재에서 박리가 발생하기 시작하였다. 일반적으로 접착성이 다소 불량한 수종으로 알려진 소나무의 경우는 2사이클부터 KS기준에 미달하는 5.7%의 높은 박리율을 나타냈고, 낙엽송 집성재는 7사이클에서 KS기준에 미달하는 5.2%의 박리율을 나타냈으며, 잣나무 집성재의 경우는 11사이클 후 KS기준치에 접근한 4.8%의 박리율을 나타내었다. 한편 이수종 혼합 집성재의 경우는 2~3사이클부터 KS기준에 미달하는 5% 이상의 박리율을 나타냈는데, 특히 낙엽송과 타수종을 접착시킨 혼합 집성재의 내구성이 낮았다.

이상의 결과로부터 수성고분자 이소시아네이트수지로 접착한 집성재 내구성이 크게 요구되는 곳에 사용하는 경우 사용환경을 신중히 고려하여야 할 필요가 있었다. Vick and Rowell (1990)은 아세틸화시킨 목재를 수성고분자 이소시아네이트수지를 사용하여 집성한 시험편의 침지 후 접착력이 무처리 집성재의 침지 후 접착력에 비해 크다는 것을 보고하였다. 수성고분자 이소시아네이트수지를 사용하여 제조한 집성재를 비 또는 눈에 노출시켜 사용할 경우에는 목재와 물분자간의 수소결합을 방해하여 수분에 대한 안정성을 높이는 아세틸화 등의 처리를 통해 접착내

Table 4. Delamination on the end-grain surfaces of glulam submerged in boiling water, %

Adhesive No. of cycle	Resorcinol								WPI							
	1	2	3	4	5	7	9	11	1	2	3	4	5	7	9	11
① <i>Pinus densiflora</i>	0	0.1	0.2	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	6.5	9.1	12.0	12.9	13.8	14.6	15.6	16.8
② <i>Pinus koraiensis</i>	0	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.3	2.4	3.2	4.0	4.4	4.6	5.4	5.9	6.6
③ <i>Larix leptolepis</i>	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.6	0.8	0.8	6.1	8.7	10.4	11.0	11.9	12.3	13.4	14.4
① + ②	0	0	0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	5.4	6.8	7.5	7.9	8.7	9.9	10.4	11.0
① + ③	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	9.2	13.5	15.3	16.5	18.6	18.9	20.0	22.0
② + ③	0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	7.1	12.4	13.9	15.3	16.7	17.3	18.0	19.4

Table 5. The increased weight rate, moisture content, absorption rate, and drying time of glulam submerged in boiling water after soaking-drying cycles

Classification No. of cycle	Rate of increased weight (%)				MC (%)				Absorption rate (%MC/hr)				Drying time (hrs.)			
	1	2	3	5	1	2	3	5	1	2	3	5	1	2	3	5
① <i>Pinus densiflora</i>	59.3	96.3	107.1	118.0	78.7	120.2	132.4	144.6	13.3	21.6	24.0	26.5	22	32	39	49
② <i>Pinus koraiensis</i>	52.4	93.2	102.5	115.7	69.8	115.3	125.7	140.4	11.7	20.8	22.9	25.9	24	43	48	55
③ <i>Larix leptolepis</i>	39.9	64.4	65.4	68.2	55.8	83.1	84.3	87.4	8.9	14.4	14.6	15.2	18	31	34	42
① + ②	53.1	87.1	100.2	112.8	70.8	108.7	123.3	137.4	11.8	19.4	22.3	25.1	22	38	48	53
① + ③	51.2	88.3	95.6	108.4	68.7	110.0	118.2	132.5	11.4	19.7	21.3	24.2	22	37	41	47
② + ③	34.3	65.0	71.5	76.5	49.3	83.5	90.7	96.3	7.7	14.5	16.0	17.1	20	36	39	46

구성을 증가시키는 방안이 필요하다.

삶음박리율: 레조르시놀수지와 수성고분자 이소시아네이트수지 접착 집성재의 삶음박리시험 결과는 Table 4와 같았다. 레조르시놀수지를 사용한 경우 1사이클 후 소나무와 낙엽송 혼합집성재를 제외한 모든 집성재는 침지박리율 결과와 같이 박리가 전혀 없는 우수한 접착내구성을 나타냈다. 또한 11사이클 후에도 모든 집성재의 박리율이 0.3~0.8%로서 KS 기준 5%보다 매우 낮은 우수한 접착 내구성을 나타냈다. 따라서 레조르시놀 수지는 단일수종 집성재는 물론 이수종 혼합집성용 접착제로 이용하여도 접착 내구성에는 전혀 문제가 없을 것으로 사료된다.

반면 수성고분자 이소시아네이트수지 접착제로 집성한 경우 대부분의 집성재가 1사이클 후의 박리율이 5% 이상 발생하였으며, 11사이클 후 모든 집성재의 박리율이 KS기준에 미달하는 6.6~22%로 불량하였다. 따라서 전술한 바와 같이 수성고분자 이소시아네이트수지로 접착한 집성재를 외부 수분에 노출된 부

위, 특히 온도변화가 극심한 장소에 사용할 경우 사용환경의 신중한 고려와 함께 표면도장 등 흡탈습 역할을 위한 처리가 필요하다.

Table 5는 각 집성 조건별 시험편에 대하여 삶음과 건조처리를 1사이클부터 5사이클까지 5회 반복 처리하며 각 사이클 후 중량변화를 및 흡수속도 등을 측정 한 결과를 보여주고 있다. 흡수속도를 단위시간당 흡수율변화량으로 정의하고 흡수속도를 비교해 본 결과 소나무와 잣나무의 흡수속도가 낙엽송에 비해 매우 컸음을 알 수 있었다. 1사이클 처리시보다 2사이클 처리시의 흡수속도와 중량증가율이 높았으며, 5사이클 처리 시까지 흡수속도와 중량 증가율은 계속 증가하는 경향을 나타냈다. 이 수종 간의 흡수속도의 차이는 박리율에 영향을 주는 것으로 사료된다. 수종 간 흡수속도의 차이가 크면 클수록 이수종 집성재 내 이수종 접착면에서 응력발생량은 커지고 이와 같이 발생한 내부응력이 박리발생에 영향을 주는 것으로 사료된다. 따라서 흡수성이 상이한 소나무(또는 잣나무)와 낙엽

Table 6. Delamination on the finished and unfinished end-grain surfaces of glulam during outdoor exposure testing, %

Adhesive	Resorcinol						WPI					
	One month		Two months		Three months		One month		Two months		Three months	
Exposure time	Finished	Unfinished	Finished	Unfinished	Finished	Unfinished	Finished	Unfinished	Finished	Unfinished	Finished	Unfinished
① <i>Pinus densiflora</i>	0	0	0	0.1	0	0.1	0	5.0	0	7.5	0	8.2
② <i>Pinus koraiensis</i>	0	0	0	0	0	0	0	3.2	0	5.0	0	5.9
③ <i>Larix leptolepis</i>	0	0	0	0.3	0	0.3	0	0.6	0	1.7	0	1.7
① + ②	0	0	0	0.3	0	0.3	0	3.5	0.2	4.9	0.2	5.3
① + ③	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	8.2	0	13.3	0	13.8
② + ③	0	0	0	0.5	0	0.5	0	7.6	0	10.2	0	10.9

송을 혼합집성한 집성재의 박리 발생 가능성이 흡수성이 유사한 소나무와 잣나무 혼합집성재나 단일수종 집성재의 박리 발생 가능성에 비해 높다고 판단된다.

실내 방치 박리율: 구조용집성재의 양 목구면 중 1개의 목구면에는 오스모컬러 3101을 도포하고, 나머지 반대편 목구면은 도포하지 않은 무처리 상태인 시험편을 14~32°C 온도와 40~85% 상대습도 조건인 실내에 방치한 상태에서 박리율의 변화를 측정한 결과, 레조르시놀수지 접착 집성재의 경우는 단일수종 집성재 및 이수중 혼합 집성재의 도장면은 물론 비도장면에도 박리가 전혀 없었다. 그러나 수성고분자수지 접착 집성재의 경우는 소나무와 잣나무 혼합집성재 및 잣나무와 낙엽송 혼합집성재의 비도장면에 2개월 방치 후 최대박리율 0.3%의 경미한 박리가 발생하였다. 실내 방치에 의하여 박리율이 불합격하는 시험편은 수성고분자수지와 레조르시놀수지 접착 시 모두 없었다.

옥외 폭로 박리율: 실내폭로 박리시험과 같이 한쪽 목구면에는 오스모컬러 3101을 도포하고 다른 1면은 무처리 상태로 제작한 시험편을 2001년 7월부터 옥외에 방치하여 비와 태양광에 노출시킨 상태에서 박리율의 변화를 측정한 결과는 Table 6과 같았다. 레조르시놀수지로 접착시 도장면의 경우는 3개월 옥외폭로 후까지 단일수종 및 이수중 혼합집성재 모두 박리가 전혀 발생하지 않았다. 비도장면은 소나무와 낙엽송 혼합집성재에서 1개월 폭로에서 0.2%의 경미한 박리가 발생하였고 2개월부터는 대부분의 집성재에서 박리가 발생하였으나 박리율이 매우 경미하여

KS기준을 만족하였다. 수성고분자수지 접착 집성재 도장면의 경우 박리 발생이 극히 미미하였다. 그러나 비도장면의 경우는 1개월 폭로 후 모든 집성재에 박리가 발생하였는데, 특히 소나무 집성재, 소나무와 낙엽송 혼합집성재 및 잣나무와 낙엽송 혼합집성재는 박리율이 5% 이상으로 KS기준에 미달되었다. 3개월 폭로 후는 낙엽송 집성재를 제외한 모든 집성재의 박리율이 5% 이상으로 KS기준에 미달되는 높은 박리율을 나타냈다. 이상의 도장처리 옥외 폭로시험을 통해 흡·탈습 방지를 위한 도장처리에 의한 박리발생 억제효과를 밝힐 수 있었으며, 도장처리 없이 수성고분자 이소시아네이트수지 접착 집성재를 옥외에 사용하는 것은 곤란할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국산 소나무, 잣나무와 낙엽송 판재를 레조르시놀수지와 수성고분자 이소시아네이트수지 접착제로 접착하여 제조한 구조용집성재의 전단접착력과 접착내구성이 평가되었다.

국산재의 구조용집성재 라미나로의 이용을 위해 공시판재에 대한 육안품질등급 구분을 실시한 결과 소나무, 잣나무 및 낙엽송의 육안품질 종합등급은 1등급의 비율이 0.5~3.0%로 매우 낮은 반면 4등급 이하의 비율이 소나무는 88.8%, 잣나무 77.7%, 낙엽송은 52.2%로 높아 국산 주요 침엽수재의 구조용집성재 이용을 위해서는 가지치기 등의 육림작업과 할렐 및 비틀림 등의 결함을 줄이기 위한 가공공정에 대한 연

구의 필요성이 제기되었다.

단일수종 및 이수종 혼합 집성재의 전단강도는 7.9~9.9 N/mm² (80.9~101.3 kgf/cm²) 범위 내에 있어 A수종군의 KS규격 전단강도인 7.1 N/mm² (72 kgf/cm²)을 훨씬 상회하는 우수한 접착력을 나타냈다. 또한 레조르시놀 수지 접착제와 수성고분자 이소시아네이트 수지 접착제의 접착제에 따른 접착력의 차이는 발견되지 않았다.

레조르시놀 수지 접착제를 사용하여 제조한 단일수종 집성재와 이수종 혼합집성재의 침지 및 삶음박리 시험 결과 KS 기준을 상회하여 이수종 혼합 집성 이용 가능성을 높였다. 그러나 수성고분자 이소시아네이트 수지 접착제는 단일수종 및 이수종 혼합 집성재의 침지와 삶음 박리율이 매우 높아 외부 수분에 노출된 부위, 특히 온습도변화가 극심한 장소에 사용할 경우 표면도장 등 흡탈습 억제제를 위한 처리를 하거나 레조르시놀 수지 접착제로 대체하여 사용할 필요가 있었다.

참 고 문 헌

1. 한국표준협회. 2003. 한국산업규격 구조용집성재. KS F 3021. 33pp.
2. 박상범, 공영보, 조재명. 1988. 리기다소나무 관재의 접착조건이 집성재의 접착성능에 미치는 영향. 목재공학. 16(4): 48~53.
3. 심상로, 여환명. 2004. 리기다소나무 원목형질 조사 및 구조용집성재 제조 수율 평가. 목재공학. 32(2): 90~95.
4. Canadian Wood Council. 1995. Wood Reference Handbook. Canadian Wood Council, Ottawa, Ontario, Canada. 562pp.
5. Dansoh, A. B., K. Ueda, and T. Hira. 2002. Bending Strength and Stiffness Analysis of Butt-Jointed Glulam Beam for Residential Construction. Forest Products J. 52(9): 82~87.
6. Falk, R. H. and F. Coling. 1995. Laminating Effects in Glued-Laminated Timber Beam. Journal of Structural Engineering. 1995 Dec.: 1857~1863.
7. Hernandez, R., J. F. Davalos, S. S. Sonti, Y. Kim, and R. C. Moody. 1997. Strength and Stiffness of Rainforced Yellow-Popular Glued-Laminated Beams. USDA Forest Service. FPL-RP-554: 1~28.
8. Kasal, B. and A. Heiduschke. 2004. Radial Reinforcement of Curved Glue Laminated Wood Beams with Composite Materials. Forest Products J. 54(1): 74~79.
9. Lopez-Anido, R., D. J. Gaedner, and J. L. Hensley. 2000. Adhesive Bonding of Eastern Hemlock Glulam Panels with E-Glase/Vinyl Ester Reinforcement. Forest Products J. 50(11/12): 43~47.
10. Moody R. C. and R. Hernandez. 1997. Glued-Laminated Timber. Chapter 1. in Smulski, Stephen, ed., Engineered Wood Products-A Guide for Specifiers, Designers and Users. ISBN-096556736-0-X. Madison, WI. PFS Resaerch Foundation: 1~39.
11. USDA Forest Service. 1999. Wood Handbook. Forest Products Society, Madison, WI, USA.
12. Vick, C. B. and R. M. Rowell. 1990. Adhesive Bonding of Acetylated Wood. Intl. J. Adhesion and Adhesive. 10(4): 263~272.
13. Zahn, J. J. and D. R. Rammer. 1995. Design of Glued Laminated Timber Columns. Journal of Structural Engineering/December: 1789~1794.
14. 本谷由紀, 中野隆人, 長谷川祐, 平林靖. 1996. 同一樹種積層材と異樹種積層材の接着性能の比較. 林産試験月報10(3): 9~145.
15. 三橋博三, 板垣直行, 伊藤彦紀, 鈴木藤. 1996. スギ集成材の力學的性能設計のための解析モデル(第1報)-積層による補強効果及び塑性領域を考慮した集成材の曲げ破壊予測モデル-. 木材學會誌. 42(2): 122~129.
16. 城井秀幸, 河野貴可. 1998. 大分縣産スギ材による構造用集成材の研究 (1)-原木とラミナのヤング係數-. 日本木材學會大會 研究發表要旨集. 48: 118pp.
17. 林知行, 宮武 敦, 星 通. 1992. スギ複合集成材の強度特性(第2報)-フィンガージョイントされた低質ラミナとLVLから構成されたスギ複合集成材の曲げおよび引張強度-. 木材學會誌. 38(3): 247~255.
18. 財團法人 日本合板検査會. 1996. JAS 構造用集成材の日本農林規格 (農林水産省告示第111号). 49pp.
19. 財團法人 日本住宅・木材技術センター. 1997. 大規模木造建築物の保守管理マニュアル. 238pp.