

리기다소나무의 구조용 집성재 이용기술 개발*¹ - 낙엽송 층재와의 혼합 구성을 통한 집성재의 휨성능 향상 -

김 광 모*² · 심 국 보*^{2†} · 박 주 생*² · 김 운 섭*² · 임 진 아*² · 여 환 명*³

Development of Pitch Pine Glued Laminated Timber for Structural Use*¹

- Improvement of Bending Capacity of Pitch Pine Glulam by Using Domestic Larch Laminars -

Kwang-Mo Kim*² · Kug-Bo Shim*^{2†} · Joo-Saeng Park*² ·
Wun-Sub Kim*² · Jin-Ah Lim*² · Hwanmyeong Yeo*³

요 약

주요 조림수종으로 도입 식재된 리기다소나무의 고부가가치 이용을 위한 구조용 집성재 이용 가능성을 검토하고, 이에 적합한 기술을 개발하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 국산 리기다소나무 제재목의 기계응력등급은 대부분 E7에서 E9등급으로 집성재 제조에는 다소 불량한 것으로 나타났다. 반면 단일수종 및 혼합수종 구조용 집성재 제조에 필수적인 리기다소나무 및 낙엽송 판재의 접착성을 평가한 결과 전단접착력, 목파율, 침지 및 삶음박리율 모두 KS기준 이상으로 나타났다. 리기다소나무 단일수종 집성재의 휨성능을 측정해본 결과 휨강도는 KS의 집성재 강도등급에 따른 휨성능 합격기준을 만족한 반면 휨 탄성계수는 기준에 다소 못 미치는 결과를 나타내었다. 그러나 낙엽송 층재와의 혼합구성을 통해 리기다소나무 집성재의 휨성능(휨강도와 휨탄성계수)을 20% 향상시킬 수 있었으며, 층재 구성방법에 있어서는 판재의 탄성계수가 높고 품질이 우수한 낙엽송 층재를 외층에 배치하는 방법이 보다 효과적인 것으로 확인되었다. 결론적으로 리기다소나무의 부가가치 증진을 위한 구조용 집성재 이용은 그 가능성이 매우 컸다.

*¹ 접수 2007년 7월 12일, 채택 2007년 8월 6일

*² 국립산림과학원 임산공학부 목재성능과, Div. of Wood Performance, Dept. of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

*³ 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부, Dept. of Forest Sciences, College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

† 주저자(corresponding author) : 심국보(e-mail: kbshim@foa.go.kr)

ABSTRACT

This study was carried out to scrutinize possibility of manufacturing pitch pine (*Pinus rigida*) glued laminated timber in order to add values of pitch pine trees. Also, it was investigated to improve bending performance of pitch pine glulam. Pitch pine was imported as one of major plantation species in Korean peninsula. Machine stress rated grades of pitch pine lumber mostly ranged between E7 and E9, which grades were more or less inferior to producing high quality glulam. However, the adhesive properties between pitch pine and pitch pine, and between pitch pine and Japanese larch (*Larix kaempferi* Carr.), such as shear bond strength, wood failure rate and delamination rate of bonded layer submerged in cold and boiling water, were higher than Korean Standard criteria. These properties are essential for manufacturing glulam with single species or multiple species. The modulus of rupture (MOR) of pitch pine glulam exceeded the criterion of Korean Standard for glulam strength grade but modulus of elasticity (MOE) was lower than the criterion. On the other hand, the bending performances (MOR and MOE) were improved 20 percent by mixing with Japanese larch laminar. It is effective to arrange higher quality Japanese larch laminar at the outer layer of glulam for improving bending performances. In conclusion, it is possible to use low quality pitch pine as laminar of structural glulam for adding values of pitch pine.

Keywords: pitch pine, Japanese larch, glulam, MOR, MOE, adhesive properties

1. 서 론

리기다소나무는 송충이 피해에 대한 내성이 크고 척박지에 조림하여도 활착이 잘 된다는 장점 때문에 황폐지 복구조림을 위하여 1911년에 처음 도입되었다. 그 후 산림녹화를 위한 조림정책을 통해 우리나라 전역의 사방 및 연료림용 수종으로 조림되었으며, 산림자원 조성에 크게 기여하였다(배와 이, 2006). 조림 후 30~40년이 지나 벌기령에 도달한 리기다소나무는 조림 당시에 용재로 조림하지 않았기 때문에 간벌, 가지치기 등의 적절한 육림작업이 실시되지 못하여 직경이 작고 옹이가 많은 등 용재로서의 이용가치가 낮다.

목재 이용 선진국에서는 집성재와 같은 구조용 공학목재를 개발·이용함으로써 목재의 부가가치를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히 최근 세계적으로 이용 가능한 고품질의 원목이 감소하면서 저급 목재를 활용한 공학목재 개발을 위한 연구가 진행되고 있다(Hallstrom and Grenstedt,

1997; Hernandez *et al.*, 1997). 우리나라에서도 지난 1990년대부터 구조용 집성재에 관한 연구를 본격적으로 시작하여 낙엽송, 소나무, 잣나무 등 국산 침엽수재를 이용한 구조용 집성재 제조 및 이용기술을 개발하였다(심 등, 2005; 이와 김, 2000; 이 등, 2003; Lee *et al.*, 2005). 이러한 연구의 결과로 현재는 비교적 원목이 통직하며, 강도성능과 내구성 등이 우수한 낙엽송이 구조용 집성재 원료로 이용되고 있다.

리기다소나무를 고부가가치 용도로 사용하기 위하여 80년대 후반부터 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 재내의 다량의 송진, 높은 잔용이 균집성, 청변, 건조불량, 틀어짐 등이 문제점으로 제기되어져 왔다(박과 정, 1987; 박 등, 1988, 1989; 심과 여, 2004; 여와 심, 2004; 이 등, 1985). 이로 인해 현재는 대부분 펄프 및 보드류의 원료 등 저급 용도로만 활용되고 있으며, 고부가가치 용도 개발을 통한 산업적 활용이 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 리기다소나무의 결함을 극복하고 고부가가치제인 구조용 집성재로서 이용하

기 위한 기술을 개발하고자 하였다. 특히 리기다소나무의 결점을 극복하기 위한 방안으로 집성재 단면을 낙엽송 층재와 혼합하여 구성하는 방안을 검토하였다. 이를 위해 먼저 리기다소나무의 접착성을 평가하고, 적정 집성재 제조조건을 확인하였다. 다음으로 단면의 수종구성에 따른 휨성능을 확인함으로써 적절한 층재배열 방법을 제안하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

공시수종으로 리기다소나무(*Pinus rigida*)와 낙엽송(*Larix kaempferi* Carr.)을 사용하였다. 리기다소나무는 수원 국유림 관리소에서 말구지름이 25 cm 이상이고 길이가 3.6 m인 원목 89본을 분양받아 단면치수가 38 × 140 mm인 판재를 생산하기 위하여 제재 후에 건조하였다. 낙엽송은 산림조합 여주 목재유통센터에서 단면치수 38 × 140 mm, 길이 3.6 m인 건조된 판재를 총 200개 구입하여 사용하였다. 리기다소나무와 낙엽송 층재의 평균 함수율은 9.9%와 12%, 기건밀도는 0.51과 0.52 g/cm³이었다.

집성재 제조용 접착제로는 상온경화형 레조시놀 접착제(Deernol No. 40, Oshika Shinko Co., Ltd.)를 사용하였다.

2.2. 집성재 제조용 층재의 등급구분

층재의 품질을 평가하기 위하여 동적탄성계수에 의한 기계응력 등급구분을 실시하였다. 동적탄성계수는 초음파가 층재의 길이방향으로 3.4 m의 거리를 이동하는 속도와 층재의 기건밀도를 이용하여 식(1)을 통해 계산하였다. 초음파 전달시간 측정에는 초음파 비파괴 측정장비인 PUNDIT (CNS Farnell)를 이용하였다. 각각의 층재에 대해서 동적탄성계수가 구해지면 KS F 3021에 따라 기계응력 등급을 구분하였다.

$$MOE_D = V^2 \times \rho \quad (1)$$

여기서, V = 초음파 전달속도,

ρ = 기건밀도를 각각 의미한다.

2.3. 접착력 및 접착내구성 평가

리기다소나무 및 리기다소나무와 낙엽송 이수종 사이의 접착성을 평가하였다. 접착제로는 레조시놀 수지 접착제를 사용하였으며, 접착제 도포량과 압제 압력 조건은 Table 2와 같다. 접착력 측정을 위하여 KS F 3021에 따라 블록 전단 시험을 수행하고, 전단 강도와 목파율을 측정하였다. 또한 접착내구성 평가를 위하여 동일 기준을 적용하여 침지 및 삶음 박리 시험을 수행하였다. 침지 및 삶음 처리는 각각 4회 반복하였으며, 각 단계에서의 박리율을 측정하여 기록하였다.

2.4. 집성재 제조

집성재 제조에 앞서 두께가 34 mm가 되도록 층재의 넓은 면을 대패가공하였다. 탄성계수 11,000 N/mm²의 집성재 제조를 목표로 하여 동적탄성계수에 의한 기계응력 등급을 기준으로 8개의 층재를 수평으로 배치하였다. 리기다소나무 단일수종 집성재(P-type)와 낙엽송과 리기다소나무 층재를 혼합 구성한 이수종 집성재를 제조하였는데, 이수종 집성재는 층재 배열방법에 따른 다시 2종류로 구분하였다. 먼저 외층에 각각 2개씩의 낙엽송 층재를 배치하고 내층에 4개의 리기다소나무 층재를 배치하는 방법(LP-type)과 동적탄성계수를 기준으로 수종에 상관없이 무작위로 배치하는 방법(RA-type)을 적용하였다. 집성재 제조 수량은 단일수종 집성재는 3개, 이수종 집성재는 type 별로 각각 5개의 집성재를 제조하였다. 제조된 집성재는 폭이 135 mm가 되도록 대패가공하여, 최종 집성재 치수는 두께 272 mm, 폭 135 mm, 길이는 층재의 길이와 동일한 3.6 m였다.

Table 1. Ratio of laminar grades rated by dynamic MOE (%)

Species	Off-grade	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E14	E16
Pitch pine	3.1	7.0	13.2	23.7	18.9	17.5	8.8	4.8	2.6	0.4	0.0
Japanese larch	0.0	0.0	3.0	15.1	22.3	22.3	18.1	10.2	7.8	0.6	0.6

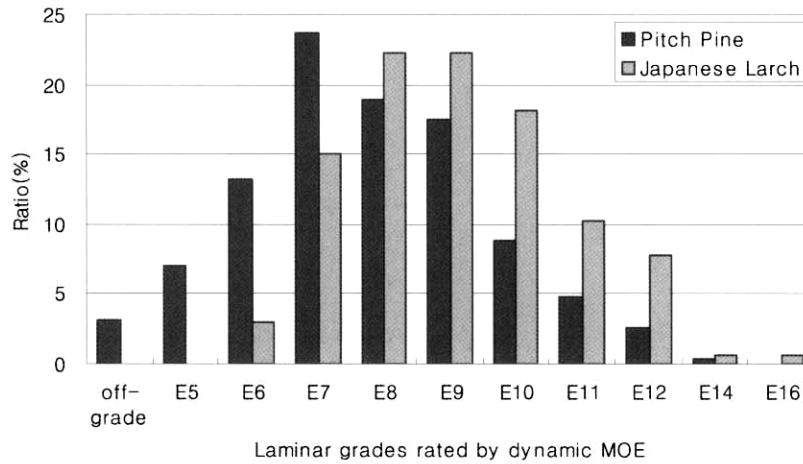


Fig. 1. Ratio of laminar grades rated by dynamic MOE.

2.5. 휨성능평가

집성재의 휨성능을 평가하기 위하여 만능강도시험기(Instron5585, 최대하중 20 ton)를 이용하여 휨하중 하에서의 파괴시험을 수행하고, 휨 탄성계수와 휨강도를 계산하였다. 가력방법은 3등분점 4점하중 방식을 적용하였으며, 시간거리는 3.3 m 하중속도는 5 mm/min로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 집성재 제조용 층재의 등급구분

전체 층재에 대한 동적탄성계수에 의한 등급구분 결과를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 전반적으로 낙엽송(9,600 N/mm²)에 비해 리기다소나무(8,310 N/mm²)의 동적탄성계수가 낮았다. KS F 3021에서는 다른 등급 구성 집성재의 인장축 최외층재로 사용 가능한 등급을 낙엽송(수종군 A)은 E12등급 이

상, 리기다소나무(수종군 B)는 E11등급 이상으로 규정하고 있는데, 이에 해당하는 층재의 비율은 낙엽송 9.0%, 리기다소나무 7.8%로 두 수종 모두 비교적 낮게 나타났으며, 최외층재 등급이 1등급인 판재(낙엽송 E18등급, 리기다소나무 E16등급)는 없었다.

3.2. 접착력 및 접착내구성

3.2.1. 전단접착력과 목파울

블록 전단 시험에 의한 전단접착력과 목파울 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 비교를 위하여 이전의 연구에서 동일한 접착제를 사용하여 국산 침엽수재 및 이수종 사이의 접착력을 측정된 결과(심 등, 2005)와 KS F 3021의 합격기준을 함께 제시하였다. 측정 결과 모든 조건에서 KS기준을 상회하는 결과를 나타냄으로써 리기다소나무를 이용하여 집성재를 제조하여도 접착력에 있어서는 문제가 없는 것으로 확인되었다.

Table 2. Shear bond strength and wood failure depend on the species

Species*	Amount of applied adhesive (g/m ²)	Pressing pressure (kgf/cm ²)	Shear bond strength (N/mm ²)	Wood failure (%)	Remark
P	250	10	7.1	93	Measured
		12	7.6	93	
	300	10	8.2	94	
		12	8.3	96	
P + L	300	8	10.0	95	
		10	10.3	98	
KRP	300	12	8.1	97	Shim <i>et al.</i> , 2005
KP			8.5	97	
L			9.9	94	
KRP + KP			8.7	98	
KRP + L			9.3	94	
KP + L			7.9	98	
Standard			-	-	

* P : Pitch Pine, KRP : Korean red Pine, KP : Korean pine, L : Japanese larch

리기다소나무만을 사용한 접착층의 경우 압체압력에 따른 접착력 차이는 미미하였으나, 접착제 도포량이 250 g/m²에서 300 g/m²으로 증가함에 따라 전단접착력이 10% 이상 증가하였다. 또한 이전 연구에서 얻어진 다른 수종의 결과와 비교하였을 때 접착력이 다소 낮게 나타났다. 이는 리기다소나무의 단점인 다량의 재내 송진 및 잔용이 균집성에 기인하는 것으로 생각된다. 리기다소나무의 접착성에 관한 이전의 연구에서 용이를 포함하는 판재의 전단접착력이 그렇지 않은 경우에 비해 15% 정도 낮다고 보고된 바 있다(국립산림과학원, 2004).

리기다소나무와 낙엽송 이수종 사이 접착층의 경우에는 다른 경우에 비해 낮은 압체압력이 적용되었음에도 불구하고 매우 높은 접착력을 나타내었다. 그 원인은 명확하게 확인되지 않았지만, 본 연구에서는 레조시놀 수지 접착제를 이용하여 이수종 간에 KS기준 이상의 접착력을 얻을 수 있음을 확인하는 것으로 연구의 범위를 한정하고 이후 집성재 성능에 관한 연구를 진행하였다. 실제 집성재 제조시에는 제조 원가의 절감을 고려하여 250 g/m²의 접착제 도포량을 적용하였으며, 이에 따른 접착력 감소를 보

완하기 위하여 압체압력은 12 kgf/cm²로 하였다.

3.2.2. 접착내구성(침지 및 삶음박리율)

4차에 걸친 침지 및 삶음 처리 과정에서 측정된 박리율 결과는 Table 3과 같이 1% 이내로 KS기준(5% 이내) 이상이였다. 이상의 결과를 토대로 리기다소나무 집성재 제조 및 리기다소나무와 낙엽송 판재의 혼합집성이 가능함을 확인할 수 있었다.

3.3. 리기다소나무 집성재 제조 및 성능 평가

3.3.1. 리기다소나무 집성재 단면 구성

탄성계수 11,000 N/mm²의 집성재의 제조를 목표로 하여 동적탄성계수를 기준으로 리기다소나무 층재를 배치한 결과를 Table 4에 나타내었다. 표에는 KS F 3021의 비대칭 다른 등급 구성 집성재 강도 등급 중에서 인장축 최외층재에 E14등급이 사용되는 11S-31B 등급과 E12등급이 사용되는 10S-28B 등급의 집성재 제조를 위해 요구되는 각 층재의 최소 등

Table 3. Delamination ratio of bonded layer submerged in cold and boiling water, %

Testing methods	Species*	No. of cycle			
		1	2	3	4
Cold water	P	-	0.35	-	-
	P + L	0.03 ± 0.14	0.59 ± 0.61	0.17 ± 0.41	0.13 ± 0.27
Boiling water	P	-	0.48	-	-
	P + L	0.08 ± 0.20	0.28 ± 0.38	0.16 ± 0.34	0.17 ± 0.34

* P : Pitch Pine, L : Japanese larch

Table 4. Lowest laminar grades required for manufacturing 11S-31B and 10S-28B glulam and distribution of dynamic MOE in the cross section of three pitch pine glulams (N/mm²)

	Laminar grade		P-1	P-2	P-3
	11S-31B	10S-28B			
1	E11	E10	11,741	11,740	11,671
2	E10	E9	10,894	10,985	11,063
3	E9	E8	9,742	9,735	9,688
4	E9	E8	9,186	9,597	9,618
5	E9	E8	9,179	9,169	9,153
6	E9	E8	10,188	10,225	10,350
7	E11	E10	10,772	10,747	10,553
8	E14	E12	12,404	12,572	13,359

급기준을 함께 나타내었다.

KS에서 요구하는 각 층재의 기계응력 등급과 실제 배치된 층재의 동적탄성계수를 비교하면, 11S-31B 등급의 경우 1에서 5번 층재까지는 KS에 적합한 층재가 배치되어 있지만 인장측 최외층재 및 중층재로 사용된 층재(7, 8번 층재)의 경우에는 KS기준보다 한 등급 낮은 층재가 배치되었다. 반면에 10S-28B 등급과 비교해 보면, 반대로 7, 8번 층재를 제외하고는 전반적으로 기준보다 1, 2등급 이상 높은 기계응력 등급의 판재가 사용되었다. 이는 연구의 설계 단계에서 KS기준이 제대로 반영되지 못하였기 때문으로, 이 후 집성재에 관한 연구를 설계하는 데 있어서는 KS기준을 먼저 검토하여야 할 것이다. 본 연구에서 제조한 리기다소나무 집성재는 KS 강도등급 11S-31B와 10S-28B 중간의 품질을 가지는 것으로

확인되었다.

3.3.2. 리기다소나무 집성재의 성능평가

리기다소나무 집성재의 휨 파괴시험을 통해 휨 탄성계수와 휨강도를 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. 표에는 층재의 동적탄성계수를 바탕으로 변형단면법(식 (2))을 이용하여 집성재의 휨 탄성계수를 예측한 결과(ASTM D3737)와 KS에서 제시한 11S-31B와 10S-28B 등급의 강도시험 합격기준을 함께 나타내었다.

$$E_G = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n E_L^i [I_L + A(d^i)^2] \quad (2)$$

여기서, E_G = 집성재의 휨 탄성계수,

E_L^i = i 번째 층재의 휨 탄성계수,

I = 전체 보의 단면이차모멘트,

n = 층재수,

I_L = 층재의 단면이차모멘트,

A = i 번째 층재의 횡방향 단면적,

d^i = 집성재와 i 번째 층재 중립축 간의 거리를 각각 의미한다.

집성재의 실측과 예측 휨 탄성계수(MOE) 사이에 25% 정도의 큰 차이를 보였는데, 그 원인 및 집성재 휨 탄성계수의 예측 정확성을 높이는 방법에 관하여는 현재 검토 중에 있으며, 다음 기회에 자세히 고찰하도록 하겠다. 거의 유사한 동적탄성계수를 가지는 층재가 사용되었음에도 불구하고 집성재의 휨성능 변화가 매우 크게 나타났다. 보다 균일하고 신뢰할

Table 5. Mechanical properties of pitch pine glulams measured by bending test

		P-1	P-2	P-3	Average	11S-31B	10S-28B
MOE (10 ³ N/mm ²)	Predicted	11.43	11.49	11.38	11.43	11 (9)*	10 (8)*
	Measured	9.24	7.67	8.79	8.57		
MOR (N/mm ²)		50.17	32.31	42.00	41.49	31	28

* Presented value should be compared with average, and result of each sample must be over the value in parenthesis (KS F 3021)

Table 6. Distribution of dynamic MOE in the cross section of LP-type mixed species glulams (N/mm²)

	LP-1	LP-2	LP-3	LP-4	LP-5
1	12,220	12,201	12,118	11,880	11,824
2	11,057	11,094	11,136	11,158	11,204
3	9,958	9,821	9,810	9,476	9,421
4	9,264	9,277	9,328	9,336	9,363
5	9,261	9,024	9,001	8,947	8,896
6	9,971	9,994	10,003	10,089	10,152
7	11,042	10,962	10,936	10,908	10,884
8	12,394	12,527	12,877	12,905	12,908

* □: Pitch pine, ■: Japanese Larch

수 있는 성능의 집성재를 제조하기 위해서는 층재의 품질을 정확하게 예측하여 등급을 결정하는 방법에 대한 검토가 요구된다.

KS의 집성재 강도등급에 따른 휨성능 합격기준과 비교하면 휨강도(MOR)의 경우 모든 집성재가 KS 기준을 만족하였으나, 휨 탄성계수는 기준에 못 미치는 결과를 나타내었다. KS의 시험 방법에서는 경간이 두께의 18배 이상이 되도록 요구하고 있으나 본 연구에서 사용된 경간은 두께의 약 12배 정도로 전단에 의한 영향이 측정결과에 크게 포함된 것으로 판단된다. 경간 대 두께의 비를 KS에 적합하도록 실험할 경우에 휨 탄성계수가 향상될 것으로 예상되지만, 그 결과가 KS의 합격기준을 만족할지 여부에 대해서는 실제 실험을 통해 확인되어야 한다. 전단에 의한 영향이 크게 작용하였음에도 불구하고 휨강도가 KS의 합격기준보다 평균 30% 정도 높게 나타남으로써 리기다소나무의 구조용 집성재 이용 가능성이 높은 것으로 생각되었다.

Table 7. Distribution of dynamic MOE in the cross section of RA-type mixed species glulams (N/mm²)

	RA-1	RA-2	RA-3	RA-4	RA-5
1	13,425	13,361	13,249	13,012	11,699
2	11,464	11,465	11,476	11,491	11,678
3	10,545	10,504	10,454	10,423	10,360
4	9,647	9,765	9,773	9,785	9,790
5	9,641	9,640	9,626	9,138	9,045
6	10,553	10,564	10,568	10,595	10,638
7	11,463	11,383	11,379	11,328	11,137
8	13,897	13,904	14,454	14,847	16,779

* □: Pitch pine, ■: Japanese Larch

3.4. 낙엽송 층재와의 혼합구성을 통한 휨성능 향상

3.4.1. 이수종 집성재 단면 구성

LP과 RA-type의 두 가지 단면구성 방법으로 리기다소나무와 낙엽송 이수종 집성재의 층재를 배열한 결과를 각각 Table 6과 7에 나타내었다. 리기다소나무 집성재의 제조에 사용되었던 층재와 유사한 동적탄성계수를 가지는 층재가 배치되도록 노력하였으나, 적당한 품질의 층재가 부족하여 전반적으로 다소 높은 동적탄성계수를 가지는 층재가 배치되었다.

3.4.2. 이수종 집성재의 성능평가

이수종 집성재의 휨강도와 휨 탄성계수 측정결과를 변형단면법에 의한 휨 탄성계수 예측결과와 함께 Table 8에 나타내었다.

이수종 집성재의 휨성능은 리기다소나무만을 사

Table 8. Mechanical properties of mixed species glulams measured by bending test

		LP-1	LP-2	LP-3	LP-4	LP-5	Average	St_dev
MOE (10 ³ N/mm ²)	Predicted	11.63	11.65	11.73	11.65	11.64	11.66	-
	Measured	9.51	10.59	10.74	9.51	9.74	10.02	0.60
MOR (N/mm ²)		47.77	50.87	57.34	49.36	47.83	50.63	3.96
		RA-1	RA-2	RA-3	RA-4	RA-5	Average	St_dev
MOE (10 ³ N/mm ²)	Predicted	12.61	12.58	12.70	12.73	12.84	12.69	-
	Measured	11.31	9.52	10.59	10.51	11.14	10.61	0.70
MOR (N/mm ²)		37.29	50.70	41.85	64.76	56.94	50.31	11.11

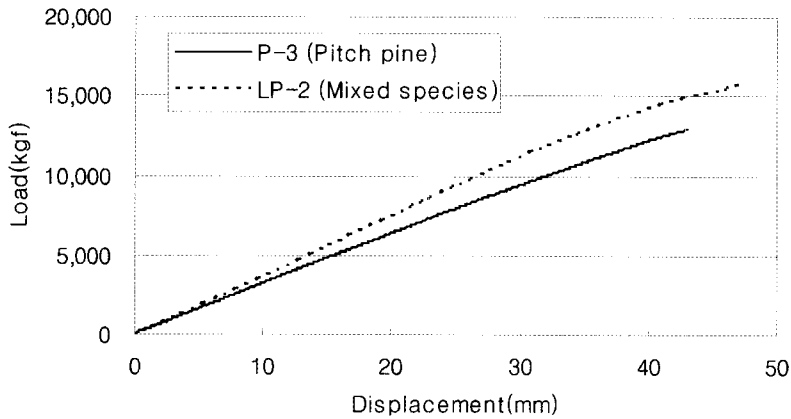


Fig. 2. Load-displacement curves of structural glulams.

용하였을 경우에 비해 휨강도와 휨 탄성계수 모두 20% 정도의 뚜렷한 향상효과를 나타내었다. Fig. 2에는 실험을 통해 얻은 리기다소나무 집성재와 이수종 집성재 하중-변형곡선의 예를 함께 나타내었다. 리기다소나무의 경우 대부분 탄성구간에서 하중이 증가함에 따라 변형이 직선적으로 증가하다가 항복점이 거의 나타나지 않은 상태에서 파괴가 발생하였으나, 이수종 집성재의 경우에는 항복점 이후에 소성구간이 보다 명확하게 나타났다. 이러한 원인은 층재에 존재하는 용이의 정도에 기인하며, 이러한 이유로 이수종 집성재의 휨강도가 리기다소나무 집성재에 비해 향상된 것으로 생각되었다.

유사한 동적탄성계수의 층재가 사용됨에 따라 리기다소나무 집성재와 이수종 집성재의 예측 휨 탄성계수는 거의 유사하였음에도 불구하고 실측 휨 탄성계수에서는 큰 차이를 나타내었는데, 이 부분에 대

해서도 다음 기회에 집성재의 휨 탄성계수 예측 정확성을 향상시키는 방법과 함께 자세히 고찰하도록 하겠다.

이수종 집성재의 단면구성 방법에 따른 휨성능 차이를 살펴보면, RA-type의 경우 전반적으로 높은 동적탄성계수를 가지는 층재가 사용되어 휨 탄성계수가 LP-type에 비해 1,000 N/mm² 정도 높게 예측되었음에도 불구하고 실제 측정을 통해 얻은 휨강도와 휨 탄성계수의 평균은 거의 유사하였으며, 표준편차는 오히려 LP-type 집성재가 작게 나타났다. 이는 집성재의 외층에 리기다소나무 층재가 사용되는 경우에 전체적인 집성재의 성능은 품질이 비교적 낮은 리기다소나무 층재에 크게 좌우되기 때문인 것으로 판단되었다.

구조용 집성재와 같은 구조재의 설계값은 주로 평균이 아닌 하한값(예를 들어 5% 하한치)을 기준으로

로 결정되기 때문에 성능의 편차를 줄여야만 부재를 보다 효율적으로 사용할 수 있다. 따라서 낙엽송과 리기다소나무 이수종 집성재를 제조하는 데 있어서 두 수종의 층재를 무작위로 배치하는 것보다는 낙엽송 층재를 외층에 배치하는 것이 보다 효과적인 것으로 확인되었다.

이수종 집성재의 휨성능 측정 결과를 KS의 집성재 강도등급에 따른 휨성능 합격기준과 비교하면 두 type 모두 10S-28B 강도등급의 기준을 만족시키는 것으로 확인되었다. 반면에 11S-31B 강도등급의 기준과 비교하면, 휨 탄성계수의 하한값과 휨강도는 기준을 만족하였으나 휨 탄성계수의 평균값은 기준인 11,000 N/mm²에 다소 못 미치는 것으로 나타났다. 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 실험방법에서 경간 대 두께의 비율을 KS에 제시된 방법에 비해 낮게 적용함으로써 전단력에 의한 영향이 크게 작용하였기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

리기다소나무의 구조용 집성재 이용 가능성을 확인하고, 이에 적합한 기술을 개발하기 위한 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 국산 리기다소나무 원목을 제재하여 기계응력 등급을 구분한 결과 대부분 E7에서 E9등급으로 집성재 제조에는 다소 불량한 것으로 나타났다.
- 2) 리기다소나무 판재의 접착성 및 이수종 집성재 제조를 위한 리기다소나무와 낙엽송 판재 사이의 접착성을 평가한 결과 전단접착력, 목과율, 침지 및 삶음박리율 모두 KS기준 이상으로 나타남으로써 집성재 제조시에 접착력에 의한 문제는 없을 것으로 확인되었다.
- 3) 리기다소나무 집성재의 휨성능을 측정해본 결과 휨강도는 KS의 집성재 강도등급에 따른 휨성능 합격기준을 만족하였다. 휨 탄성계수는 기준에 못 미치는 결과를 나타내었는데 이는 실험방법의 차이에 의한 것으로 판단되며, 확인을 위한 추가실험이 요구되었다.
- 4) 낙엽송 층재와의 혼합구성을 통해 리기다소나

무 집성재의 휨성능(휨강도와 휨 탄성계수)을 20% 정도 향상시킬 수 있었으며, 층재 구성방법에 있어서는 낙엽송 층재를 외층에 배치하는 방법이 보다 효과적인 것으로 확인되었다.

5) 집성재의 휨 탄성계수를 층재의 동적탄성계수로 예측한 결과와 실제 측정을 통해 얻은 휨 탄성계수 사이에는 큰 차이를 보였는데, 그 원인 및 집성재 휨 탄성계수의 예측 정확성을 높이는 방법에 관하여는 현재 검토 중이며, 다음 기회에 자세히 고찰할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 국립산림과학원. 2004. 2004년도 연구사업 보고서(임산공학분야, 5-2), pp. 41~55.
2. 박문재, 정희석. 1987. 소나무와 리기다소나무 평가재의 고온건조. 목재공학. 15(2): 53~66.
3. 박상범, 공영도, 조재명. 1988. 리기다소나무판재의 접착조건이 집성재의 접착성능에 미치는 영향. 목재공학. 16(4): 48~53.
4. 박상범, 공영도, 조재명. 1989. 리기다소나무 적층재의 제재조건에 따른 물리적성질 및 도장성능. 목재공학. 17(1): 3~11.
5. 배재수, 이기봉. 2006. 우리나라의 산림녹화 성공요인 -가정용 연료재의 대체와 대규모 조림. 국립산림과학원 연구보고 06-17. p. 78.
6. 심상로, 여환명. 2004. 리기다소나무 원목형질 조사 및 구조용집성재 제조 수율 평가. 목재공학. 32(2): 90~95.
7. 심상로, 여환명, 심국보. 2005. 이수종 구조용집성재의 전단접착력 및 접착내구성 평가. 목재공학. 33(1): 87~96.
8. 여환명, 심상로. 2004. 리기다소나무 고온건조. 목재공학. 32(4): 45~51.
9. 이진제, 김광모, 한재수, 김재건. 2003. 집성재 단면구성에 따른 휨성능 평가. 목재공학. 31(5): 65~71.
10. 이진제, 김광철. 2000. 집성재의 강도적 성질 예측에 대한 핑거 조인트와 라미나의 강도의 영향. 목재공학. 28(1): 8~17.
11. 이춘택, 강대현, 정두진, 이용대, 조재명. 1985. 낙엽송, 리기다소나무 간벌재의 1, 2 및 3면 제재이용. 목재공학. 13(3): 41~48.
12. 한국표준협회. 2005. 구조용집성재. 한국산업규격 KS F 3021. p. 29.

13. American Society for Testing and Material. 2005. Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam). ASTM D3737. pp. 463~490.
14. Hallstrom, S. and J. L. Grenestedt. 1997. Failure analysis of laminated timber beams reinforced with glass fibre composites. *Wood Science and Technology*. 31: 17~34.
15. 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. p. 28.
16. Lee, J. J., J. S. Park, K. M. Kim, and J. K. Oh. 2005. Prediction of bending properties for structural glulam using optimized distributions of knot characteristics and laminar MOE. *Journal of Wood Science*. 51: 640~647.