

연륜경사각이 가문비나무 직교형적층재의 정적 휨 강도성능에 미치는 영향¹

성 은 종² · 권 창 배² · 류 현 수² · 변 희 섭² · 박 한 민^{2,†}

Effect of Annual Ring Angles on Static Bending Strength Performances of Cross-Laminated Woods Made with Spruce¹

Eun-Jong Sung² · Chang-Bae Kwon² · Hyun-Soo Ryu² · Hee-Seop Byeon² · Han-Min Park^{2,†}

요 약

이 연구에서는 가문비나무를 이용하여 직교형적층재를 제작하였고, 섬유직각방향라미나의 연륜경사각이 직교형적층재의 정적 휨 강도성능에 미치는 영향을 조사하였다. 3층 모두가 섬유직각방향라미나로 구성된 평행형적층재(P_⊥ 타입)의 휨 강도성능은 연륜경사각 90° > 0° > 45°의 순이었고, 연륜경사각 45°에서 휨 탄성계수는 0.0989 GPa, 휨 강도는 3.25 MPa로 가장 적은 값을 나타내었다. P_⊥ 타입의 중층에 섬유방향라미나를 배열하는 것에 의해 휨 강도성능은 현저히 향상되었다. 표층이 섬유직각방향라미나로 구성된 직교형적층재(C_⊥ 타입)의 경우, 휨 강도성능은 연륜경사각 90° > 0° > 45°의 순이었으나, 연륜경사각에 의한 차이는 평행형적층재에 비해 감소하였다. 중층에 섬유직각방향라미나를 배열한 직교형적층재(C_∥ 타입)의 경우, 휨 강도성능은 P_⊥ 타입 및 C_⊥ 타입과 다르게 45° > 90° > 0°의 순으로 연륜경사각 45°에서 휨 탄성계수는 12.0 GPa, 휨 강도는 55.8 MPa로 가장 높은 값을 나타내는 것이 확인되었다.

ABSTRACT

In this study, cross-laminated woods were made with spruce wood and the effects of annual ring angles of perpendicular direction laminae on static bending strength performance were investigated. Static bending strength performances of parallel laminated woods with all layers composed of laminae perpendicular to the grain (P_⊥ type) were in the order of 90° > 0° > 45°. The MOE and MOR for the 45° annual ring angle were 0.0989 GPa and 3.25 MPa, and it showed the lowest values. By placing longitudinal-direction laminae in the core of P_⊥ type, the strength performances were markedly improved. In the case of cross-laminated woods with perpendicular-direction laminae in the faces (C_⊥ type), the bending strength performances were in the order of 90° > 0° > 45°, but the differences among annual ring angles were less than those of the parallel-laminated woods. In the case of cross-laminated woods with perpendicular-direction

¹ Date Received September 27, 2013, Date Accepted March 6, 2014

² 경상대학교 환경재료과학과, 농업생명과학연구원, Department of Environmental Science, Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea.

[†] 교신저자(Corresponding author): 박한민(e-mail: phm0691@gnu.ac.kr)

laminae in the core (C_{\parallel} type), the bending strength performances were in the order of $45^{\circ} > 90^{\circ} > 0^{\circ}$ unlike P_{\perp} type and C_{\perp} type. The MOE and MOR for the 45° annual ring angle were 12.0 GPa and 55.8 MPa, and it showed the highest values.

Keywords : Spruce wood, cross-laminated woods, annual ring angle, MOE, MOR

1. 서 론

근년 우리나라는 국민의 소득증대와 의식수준의 향상에 따라 환경 및 인체친화성 재료인 목재에 대한 관심은 점점 높아지고 있고, 지속적인 목재축적량의 증가와 함께 목재이용확대 및 효율적인 목재이용 기술의 개발이 요구되고 있다.

집성재에 관한 연구는 집성재 라미나의 배치, 강도 및 접착성능, 타 재료와의 복합 등 다양한 연구가 행해져 왔다(Keenan *et al.* 1985; Hayashi and Miyatake 1991; Cha 1996; Kim *et al.* 2007; Jang *et al.* 2009; Park *et al.* 2009a, 2009b; Park *et al.* 2009a, 2009b). 그러나 대부분이 집성재를 구성하는 개개의 라미나의 목리를 섬유방향으로 평행하게 적층한 평행형적층재에 대한 연구가 대부분이다. 개개의 집성재라미나의 목리를 직교시켜서 목재의 섬유직각방향의 약한 강도특성을 보완하며, 광폭의 두꺼운 패널형태로 제작되어 조립식패널구조의 구조재료 그 사용이 증대되고 있는 직교형적층재에 관한 연구는 그 축적량이 적다.

선행연구에서는 삼나무를 이용한 직교형적층재(Park *et al.* 2001, 2002, 2005, 2006a) 및 삼나무, 편백나무의 침엽수재와 오동나무, 계수나무, 너도밤나무의 활엽수재를 혼합적층한 직교형적층재(Park *et al.* 2003, 2006b, 2009)의 정적 휨 강도성능 및 휨 크리프 특성에 대한 연구를 수행하였고, 라미나의 연륜경사각, 밀도, 전단탄성률이 직교형적층재의 휨 강도성능 및 휨 크리프성능에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 직교형적층재는 표층뿐만 아니라 중층에 배열한 섬유직각방향라미나의 연륜경사각, 밀도 및 전단탄성률의 영향을 현저히 받는 것이 확인되었다. 특히, 횡단면 전단탄성률이 낮은 수준의 섬유직각방향 라미나를 직교형적층재의 중층에 배열했을 때, 전단

력에 의한 처짐에 의한 강도성능의 감소가 현저하게 나타났고, 연륜경사각 45° 의 섬유직각방향라미나를 중층에 배열할 경우, 다른 연륜경사각보다 현저히 적은 전단력에 의한 처짐의 영향이 나타나 강도성능의 감소가 적은 것이 확인되었다.

이 연구에서는 상기의 연구에 부가하여 목조건축, 특히 조립식패널 구조의 구조재료 그 사용량이 증가되고 있는 직교형적층재를 국내 사용량이 많은 가문비나무를 이용하여 제작하였고, 정적 휨 시험을 실시하여 휨 강도성능에 미치는 섬유직각방향 라미나의 연륜경사각의 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험편

본 연구에서 채택된 공시수종은 가문비나무(밀도 0.43 Mg/m^3)로 하였다. 적층재시험편의 제작법은 다음과 같다. 가문비나무 판재로부터 7.5 mm (두께) \times 20 mm (폭) \times 360 mm (길이) 및 6.7 mm (두께) \times 20 mm (폭) \times 360 mm (길이)의 2종류의 엘리먼트를 제작하였다. 여기서 엘리먼트의 연륜주향을 나타내기 위하여 횡단면의 장축과 연륜이 이루는 각도를 연륜경사각으로 했다. 연륜경사각은 휨 변형에 있어서 들보의 섬유직각방향 라미나에 발생하는 인장응력 및 압축응력의 방향과 연륜이 이루는 각도에 상당한다. Fig. 1에 나타내는 섬유직각방향라미나의 제작에는 횡단면의 연륜경사각 0° (판목판), 45° (추정목판), 90° (정목판)의 3종류로 하여, 상기에 나타낸 전자의 엘리먼트 7.5 mm (두께) \times 20 mm (폭) \times 360 mm (길이) 형태로 제작하였다. 3종류의 엘리먼트를 각각 밀도순으로 18개씩 밀도가 낮은 그룹에서 높은 그룹으로 6 그룹으로 나누었고, 각 그룹별로 클램프하여 24시간

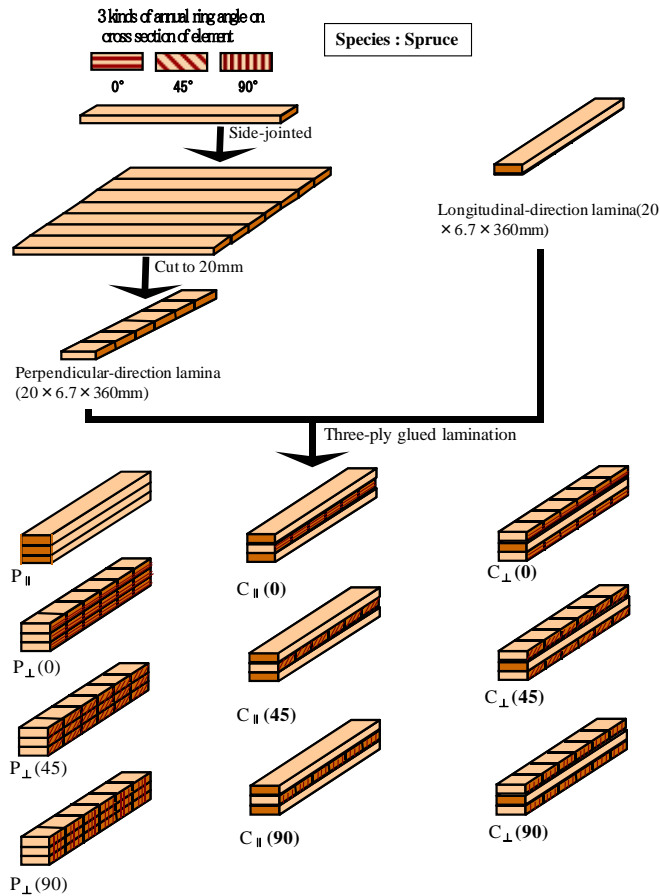


Fig. 1. Schematic diagram of parallel- and cross-laminated wood specimens made with spruce.

* 0, 45, 90 : Annual ring angles.

압제하여 폭접합한 후, 섬유직각방향으로 200 mm씩 절단하였다. 그리고 두께 6.7 mm, 길이 360 mm로 최종 다듬질하여 섬유직각방향 라미나로 사용하였다. 후자의 6.7 mm (두께) × 20 mm (폭) × 360 mm (길이) 엘리먼트를 섬유방향 라미나(라미나의 장축이 섬유방향으로 섬유방향의 강도성능은 연륜경사각의 영향을 받지 않기 때문에 연륜경사각을 모두 90°로 하였다)로 하였다. 적층접착하기 전에 라미나의 휨 탄성계수를 스펠 300 mm의 3등분 4점하중 방식으로 측정하였다. 섬유방향 및 각 연륜경사각의 섬유직각방향 라미나를 각각 휨 탄성계수의 순으로 3그룹으로 나누었다. 각 타입의 하나의 적층재에는 가능한

휨 탄성계수가 비슷한 순으로 라미나를 분류하였고, 또한, 각 타입 적층재 라미나의 휨 탄성계수의 값이 낮은 그룹에서 높은 그룹까지 타입에 따라 가능한 편차가 적게 분류하였다. 이들 2종류의 라미나를 조합하여 적층접착하여 Fig. 1에 나타난 것 같이, 크게 4종류의 형태로 3층 구성 적층재(20 × 20 × 340 mm) 10타입을 제작하였다. 압제는 볼트와 너트를 이용한 목재 적층틀 및 금속제 프레임에서 실시하였고, 압제 압력은 0.34 MPa로 상정하여 토크렌치를 이용하여 압력을 계산하였다. 압제시간은 24시간으로 하였고, 압제후 1주일 이상 양생하여 시험편으로 사용하였다. 시험편의 개수는 각 타입당 3개씩 총 30개로 하였다.

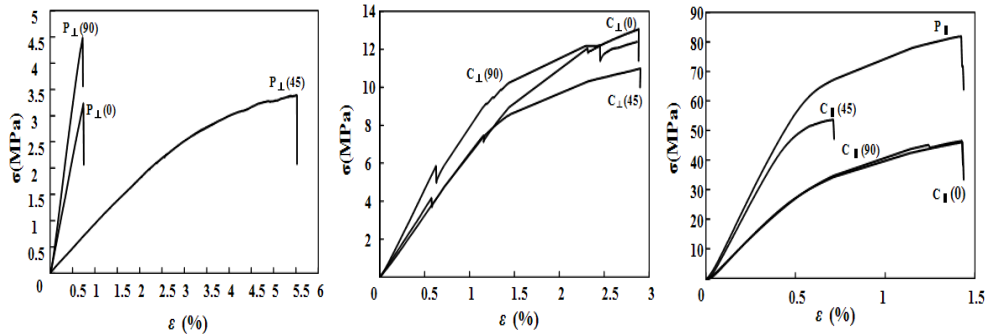


Fig. 2. Typical examples of stress and strain curves of P_{\perp} type parallel-laminated woods and C_{\perp} and C_{\parallel} type cross-laminated woods..

* 0, 45, 90: Annual ring angles.

Fig. 1의 모식도에서 나타난 것처럼, P_{\parallel} 타입은 3층 모두가 섬유방향 라미나로 된 적층재, P_{\perp} 타입은 3층 모두가 섬유직각방향 라미나로 된 적층재($P_{\perp}(0)$, $P_{\perp}(45)$, $P_{\perp}(90)$)이고, C_{\parallel} 타입은 표층이 섬유방향 라미나이고, 중층이 섬유직각방향 라미나로 된 적층재 ($C_{\parallel}(0)$, $C_{\parallel}(45)$, $C_{\parallel}(90)$), C_{\perp} 타입은 표층이 섬유직각방향 라미나이고, 중층이 섬유방향 라미나로 된 적층재($C_{\perp}(0)$, $C_{\perp}(45)$, $C_{\perp}(90)$)이다. P_{\parallel} 타입 시험편은 평행형적층재의 섬유방향 휨 강도성능을 측정하기 위한 것이고, P_{\perp} 타입 시험편은 평행형적층재의 섬유직각방향 휨 강도성능을 측정하기 위한 것이다. C_{\parallel} 타입 시험편은 직교형적층재의 표층 섬유방향 휨 강도성능을 측정하기 위한 것이고, C_{\perp} 타입 시험편은 직교형적층재의 표층 섬유직각방향 휨 강도성능을 측정하기 위한 것이다. 접착제는 비포름알데히드계 접착제인 수성비닐우레탄(MPU-500, 주제 100부에 경화제 15부 첨가)을 사용하였고, 도포량은 양면 도포로 약 300 g/m^2 로 하였다.

2. 2. 시험방법

2.2.1. 정적 휨 시험

정적 휨 시험은 스펠 300 mm, 하중점과 지점간거리 100 mm (3등분점), 하중속도 5 mm/min의 4점하중 방식으로 만능재료시험기(Instron 4466)를 이용하여 실시하였다. 재료시험기의 하중과 크로스헤드 변

위를 측정하여 하중-변위곡선을 그렸고, 식 (1)을 이용하여 휨 탄성계수(E)를 구하였다. 또한 각 라미나의 휨 탄성계수로부터 적층접착후의 휨 탄성계수의 예측치를 다음 식 (2)의 등가단면법에 의해 계산하였고, 실측치와 비교하였다.

$$E = Pa(3l^2 - 4a^2) / 4bh^3y / 4bh^3y \dots\dots\dots (1)$$

여기서, P : 하중, a : 하중점과 지점사이의 거리, l : 스펠, b : 시험편의 폭, h : 시험편의 두께, y : 처짐.

$$E_c = (E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3) / I \dots\dots\dots (2)$$

여기서, E_1, E_2, E_3 는 적층재의 각층라미나의 휨 탄성계수(E_1, E_3 는 표층, E_2 는 중층), I_1, I_2, I_3 는 단면의 중립축에 대한 각층라미나의 단면 2차모멘트, I 는 전단면 2차모멘트.

3. 결과 및 고찰

3.1. 적층재의 응력-변형률곡선

적층재의 응력-변형률곡선을 Fig. 2에 나타낸다. P_{\perp} 타입의 경우, 응력-변형률곡선은 곡선적 변화를 거의 나타내지 않고 파괴되었다. 또한, 연륜경사각 45°는 0°나 90°에 비해 비례영역의 기울기는 매우 적으나,

Table 1. Results of static bending test of parallel-laminated woods and cross-laminated woods made with spruce

Type	Annual ring angle (°)	ρ (Mg/m ³)	E_s (GPa)	σ_{PLST} (MPa)	σ (MPa)	SE_s (GPa)	$S\sigma$ (MPa)	ε (%)
P _∥	-	0.466	12.7	42.0	73.3	27.1	157	1.10
		(4.8)	(5.8)	(5.9)	(10.0)	(6.7)	(5.7)	(27.4)
P _⊥	0	0.450	0.458	3.00	4.07	1.02	9.04	0.97
		(2.7)	(2.5)	(4.3)	(9.3)	(2.9)	(7.3)	(8.3)
	45	0.454	0.0989	1.15	3.25	0.218	7.15	5.31
		(1.3)	(5.2)	(32.7)	(6.2)	(5.0)	(6.1)	(8.6)
90	0.455	0.742	3.51	5.16	1.63	11.3	0.79	
	(0.9)	(6.3)	(5.5)	(6.9)	(5.7)	(6.5)	(18.5)	
C _∥	0	0.467	6.41	20.0	50.2	13.7	108	1.80
		(2.6)	(1.4)	(3.6)	(3.4)	(3.0)	(2.8)	(8.4)
	45	0.468	12.0	39.9	55.8	25.7	119	1.07
		(2.4)	(3.7)	(2.3)	(6.9)	(1.6)	(5.1)	(48.2)
	90	0.451	6.56	21.5	46.9	14.5	104	1.43
		(0.2)	(5.5)	(5.7)	(6.3)	(5.6)	(6.1)	(27.0)
C _⊥	0	0.467	0.830	4.78	11.0	1.78	23.7	2.36
		(2.1)	(9.4)	(11.8)	(26.8)	(11.3)	(26.5)	(26.0)
	45	0.465	0.622	5.99	11.5	1.34	24.7	4.36
		(2.6)	(13.9)	(7.1)	(1.7)	(16.2)	(4.0)	(4.0)
	90	0.448	1.11	6.19	12.4	2.48	27.6	2.50
		(2.1)	(11.4)	(9.0)	(2.4)	(13.5)	(2.0)	(12.6)

* ρ : Density, E_s : Modulus of elasticity (MOE), σ_{PLST} : Proportional limit stress, σ : Modulus of rupture (MOR), SE_s : Specific modulus of elasticity (SMOE), $S\sigma$: Specific modulus of rupture (SMOR), ε : Strain at maximum load. Each value is the average of three measurements, and each value in parentheses is the coefficient of variation (%).

파괴변형률은 5배 정도의 높은 값을 나타내었다. C_⊥ 타입의 경우, 중층에 섬유방향 라미나를 배열하는 것에 의해 연륜경사각이 응력-변형률곡선에 미치는 영향은 현저히 감소하였다. 연륜경사각 0°와 90°에서는 P_⊥ 타입에 비해 파괴변형률이 현저히 증가하였지만, 비례한도를 넘어서면서 여러 번의 표층파괴를 일으켰고, 응력의 증감을 나타내면서 전체적인 파괴에 도달하였다.

한편, C_∥ 타입의 경우, P_⊥ 타입이나 C_⊥ 타입과 역으로 연륜경사각 45°가 비례역의 기울기가 크고, 파괴변형률이 적은 값을 나타내었다. 연륜경사각 0°

와 90°의 경우 비례한도 내에서는 거의 같은 양의 변형률을 나타내었지만, 비례한도를 넘어서면서부터 0°의 경우 긴 곡선역을 나타내면서 파괴되었고, C_∥ 타입 중에서 가장 많은 변형률을 나타내었다.

3.2. 적층재의 휨 탄성계수

3.2.1. 휨 탄성계수

평행형 및 직교형적층재의 정적 휨 시험의 결과를 Table 1에 나타낸다. 적층재의 휨 탄성계수와 연륜경

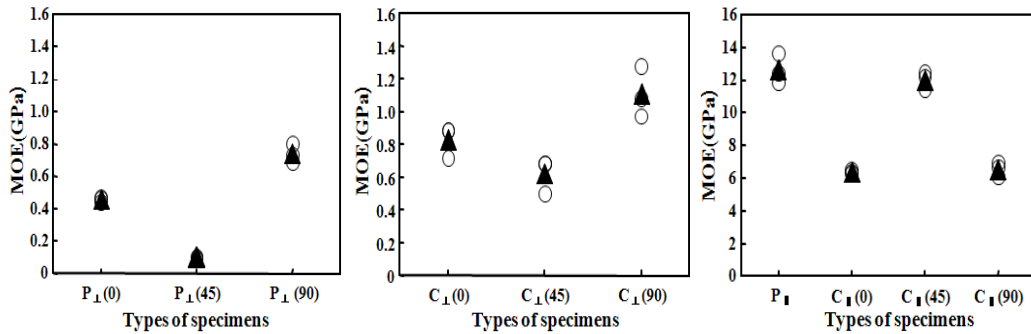


Fig. 3. Effects of annual ring angles on MOE for P_⊥ type, C_⊥ type and C_∥ type specimens.

* 0, 45, 90: Annual ring angles. * Legend: ▲: Average MOE.

사각과의 관계를 Fig. 3에 나타낸다.

3층 모두가 섬유직각방향 라미나로 구성된 P_⊥ 타입의 경우, 연륜경사각 90°가 0.742 GPa의 값으로 가장 높은 휨 탄성계수를 나타내었고, 연륜경사각 45°가 0.0989 GPa으로 가장 낮은 값을 나타내었다. 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 비는 1 : 0.220 : 1.62로 연륜경사각에 의한 차이를 뚜렷이 나타내었다. 이 값은 P_∥ 타입보다 약 17배(90°)~128배(45°)의 낮은 값을 나타내는 것이 확인되었다.

표층이 섬유직각방향이고, 중층이 섬유방향 라미나로 구성된 C_⊥ 타입의 경우, P_⊥ 타입과 같이 휨 탄성계수의 크기는 90° > 0° > 45°의 순이었고, 연륜경사각 90°는 1.11 GPa로 가장 높은 값을 나타내었다. 중층에 섬유방향 라미나를 배열하는 것에 의해 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 휨 탄성계수의 비는 1 : 0.749 : 1.34가 되어, 연륜경사각이 적층재의 휨 탄성계수에 미치는 영향은 P_⊥타입에 비해 현저히 감소하였다. 이것은 중층의 섬유방향라미나의 높은 휨 탄성계수의 기여에 따른 것으로 생각되고, 선행연구(Park *et al.* 2003, 2006)의 결과와 일치하였다.

한편, 표층이 섬유방향라미나이고 중층이 섬유직각방향 라미나로 된 C_∥ 타입에서는 P_⊥, C_⊥ 타입과 역으로, 연륜경사각 45°의 휨 탄성계수가 12.0 GPa로 가장 높은 값을 나타내었다. 휨 탄성계수의 크기는 연륜경사각 45° > 90° > 0°의 순이었고, 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 비는 1 : 1.87 : 1.02의 값을 나타

내었다. 이 값은 3층 모두가 섬유방향 라미나로 구성된 P_∥ 타입의 휨 탄성계수에 비해 연륜경사각 0°, 45°, 90°에서 각각 0.51배, 0.94배, 0.52배의 값을 나타내었다. 이와 같이 섬유직각방향의 휨 탄성계수가 가장 낮았던 연륜경사각 45°를 중층에 배열한 경우에 오히려 적층재의 휨 탄성계수가 높게 나왔는데, 이것은 선행연구(Park *et al.* 2001)에서도 보고한 바와 같이 연륜경사각 45°의 경우 0°나 90°에 비해 전단탄성률이 월등히 높고, 전단력에 의한 처짐의 영향이 현저히 감소하기 때문으로 생각된다.

직교적층하는 것에 의해 적층재의 표층이 섬유방향에 대한 표층이 섬유직각방향의 휨 탄성계수의 이방성은 1 : 0.008~0.059에서 1 : 0.052~0.169로 현저히 감소하였다.

적층재의 비 휨 탄성계수(휨 탄성계수/비중)는 P_∥ 타입에서는 27.1 GPa, P_⊥타입에서는 0.214 GPa(45°)~1.63 GPa(90°), C_⊥ 타입에서는 1.34 GPa (45°)~2.48 GPa(90°), C_∥ 타입에서는 13.7 GPa(0°)~25.7 GPa(45°)로 휨 탄성계수보다 약 2.1~2.2배 높은 값을 나타내는 것이 확인되었다.

3.2.2. 휨 탄성계수의 계산치와 실측치와의 관계
평행형적층재의 실측치 휨 탄성계수를 적층재라미나의 휨 탄성계수로 가정하여 식(2)의 등가단면법을 이용하여 계산한 직교형적층재의 예측치 휨 탄성계수에 대한 실측치 휨 탄성계수의 비(R_c)를 Fig. 4에

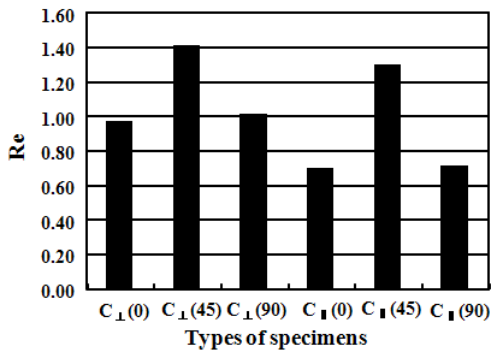


Fig. 4. Re (ratio of measured value of MOE to value calculated from true MOE of laminae) for C_⊥ and C_∥ type cross-laminated wood specimens.

* 0, 45, 90: Annual ring angles.

나타낸다.

표층이 섬유직각방향 라미나이고, 중층이 섬유방향 라미나로 구성된 C_⊥ 타입의 Re 값은 0.97(0°)~1.41(45°)로 연륜경사각 0°와 90°에서는 거의 1에 가까운 값을 나타내어 예측치와 실측치의 차이는 적었으나, 연륜경사각 45°에서는 실측치가 예측치보다 다소 높은 값을 나타내었는데, 이것은 표층 45° 섬유직각방향 라미나의 낮은 휨 탄성계수에 비해 접착층의 높은 휨 탄성계수의 영향이 기여한 것으로 생각된다.

표층이 섬유방향 라미나이고, 중층이 섬유직각방향 라미나로 구성된 C_∥ 타입의 경우, Re 값은 0.70(0°)~1.30(45°)으로 연륜경사각 0°와 90°의 경우, 실측치가 예측치보다 현저히 낮았다. 이것은 다수의 선행연구(Park et al. 2001, 2003, 2004, 2006a)에서도 확인된바와 같이 E/G의 비에 비례하는 전단력에 의한 처짐의 영향으로 판단된다. 선행연구에서는 삼나무의 연륜경사각(Park et al. 2001, 2006a) 및 표중층 라미나의 구성비율을 달리한 직교형적층재(Park et al. 2006a), 침엽수 2수종 및 활엽수 3수종으로 구성된 직교형적층재(Park et al. 2003), 삼나무와 알루미늄을 복합한 복합적층재(Park et al. 2004)의 휨 모멘트에 대한 전단력에 의한 처짐의 영향을 조사한 결과, 16.1%~51.8%의 전단력에 의한 처짐의 영향이 있는 것을 보고하였고, 횡단면 전단탄성률이 적은 침엽수

섬유직각방향 라미나가 중층 라미나로 사용될 경우, 그 영향이 컸고, 연륜경사각 0°와 90°가 45°에 비해 그 영향이 현저히 큰 것이 확인되었다.

4점 휨 하중에 있어서 들보의 처짐(Y_a)은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_a &= Y_m + Y_s \\
 &= \frac{Pl_1(3l^2 - 4l_1^2)}{4bh^3E} + \frac{kPl_1}{2AG} \\
 &= \frac{Pl_1(3l^2 - 4l_1^2)}{4bh^3E} \left[1 + \frac{2.4h^2}{3l^2 - 4l_1^2} \cdot \frac{E}{G} \right] \dots (3)
 \end{aligned}$$

여기서, Y_m은 휨 모멘트에 의한 처짐, Y_s는 전단력에 의한 처짐, E는 진 휨 탄성계수, G는 전단탄성률, P는 하중, b와 h는 들보의 폭 및 두께, l은 스패, l₁은 하중점과 지지점사이의 거리(l/3), k는 들보가 장방형단면의 경우 6/5(Sakai, 1970).

상기 식 (3)에서 알 수 있듯이 들보의 총 처짐은 휨 모멘트에 의한 처짐과 전단력에 의한 처짐으로 나누어지고, 전단력에 의한 처짐은 식 (3)의 우측항의 E/G에 비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 표층이 섬유직각방향 라미나로 된 C_⊥ 타입은 중층 섬유방향 라미나의 높은 전단탄성률에 비해 표층이 섬유직각방향으로 되어 적층재 전체의 휨 탄성계수가 적어 E/G의 비가 적어지고, 예측치와 실측치의 차이가 적어진다. 그러나 C_∥ 타입은 표층이 섬유방향 라미나로 구성되어 적층재의 휨 탄성계수는 커지나, 전단의 영향이 가장 큰 중층이 전단탄성률이 적은 섬유직각방향 라미나로 구성되어 적층재의 전단탄성률은 감소하고 식 (3)의 E/G의 비가 커지기 때문에, 전단력에 의한 처짐의 비율이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 실측치 휨 탄성계수는 예측치 휨 탄성계수보다 적어지고, 양자의 차이가 발생하게 된다. 그러나 연륜경사각 45°의 섬유직각방향 라미나를 중층에 배열할 경우, 전단탄성률은 0°나 90°에 비해 현저히 증가하고, 전단력에 의한 처짐의 영향이 적어짐에 따라 실측치 휨 탄성계수의 값이 예측치와 대등하거나 다소 높게 나온 것으로 판단된다. 그러나 이 연구에서는

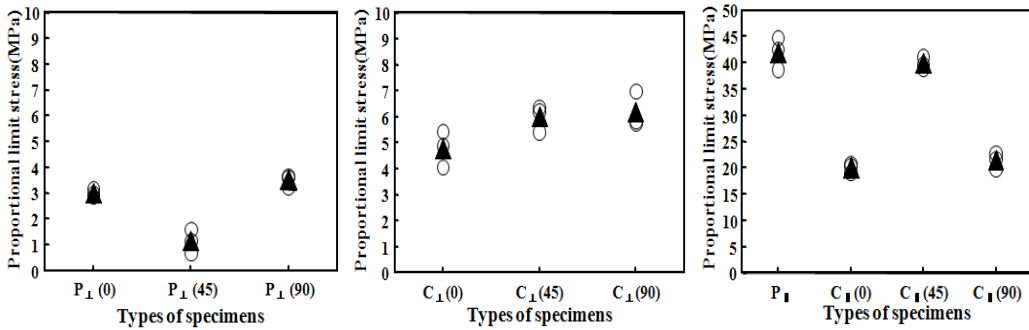


Fig. 5. Effects of annual ring angles on proportional limit stress for P_⊥ type, C_⊥ type and C_∥ type specimens.
 * 0, 45, 90: Annual ring angles. * Legend: ▲: Average proportional limit stress.

연륜경사각 45°의 경우, 예측치에 대한 실측치의 비가 선행연구(Park *et al.* 2001, 2006a)의 결과보다 높은 값을 나타내었는데, 이것은 적층재시험편의 처짐의 측정시 시험편중앙부를 다이얼게이지로 측정할 때 선행연구와 달리 시험기의 크로스헤더의 변위량을 이용해서 휨 탄성계수를 계산했기 때문에 선행연구와 다소 차이를 나타낸 것으로 사료된다.

3.3. 직교형적층재의 비례한도응력

적층재의 휨 비례한도응력과 연륜경사각과의 관계를 Fig. 5에 나타낸다. 단, 비례한도응력은 응력-변형률곡선의 비례역에 평행하게 직선을 그어 응력-변형률곡선의 비례역을 이탈하는 최초의 부분의 5% 이내로 결정하였다.

P_⊥ 타입의 휨 비례한도응력은 연륜경사각 90°가 3.51 MPa로 가장 높았고, 그 다음은 연륜경사각 0°의 3.00 MPa, 그리고 연륜경사각 45°의 1.15 MPa의 순으로 나타났다. 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 휨 비례한도응력의 비는 1 : 0.383 : 1.17이 되어 휨 탄성계수와 같은 순이었지만, 45°와 0°, 90° 사이의 차이는 휨 탄성계수보다 낮았다. 이것은 Table 1에 나타난 것처럼, 연륜경사각 45°의 비례한도 변형률이 0°나 90°보다 약 2배정도 컸기 때문으로 생각된다.

C_⊥ 타입에서는 휨 비례한도응력은 연륜경사각 90°에서 6.19 MPa로 가장 컸고, 그 다음은 연륜경사

각 45°, 그리고 연륜경사각 0°의 순이었고, 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 휨 비례한도응력의 비는 1 : 1.25 : 1.29의 값을 나타내었고, 연륜경사각 45°의 경우, 휨 탄성계수와 다르게 연륜경사각 90°와 비슷한 값을 나타내었다. 직교적층 하는 것에 의해 표층이 섬유직각방향의 휨 비례한도응력은 P_⊥ 타입에 비해 0°에서 1.59배, 45°에서 5.21배, 90°에서 1.76배의 증가를 나타내었다. 한편, C_∥ 타입에서는 연륜경사각 45°가 39.9 MPa로 가장 높은 값을 나타내었고, 그 다음은 연륜경사각 90°, 그리고 0°의 순이었다. 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 휨 비례한도응력의 비는 1 : 2.00 : 1.08의 값을 나타내었고, 그 순서는 휨 탄성계수와 같은 경향을 나타내었다. 이 값은 P_∥ 타입의 그것보다 0.48배~0.95배로 감소하는 것이 확인되었다.

3.4. 직교형적층재의 휨 강도

적층재의 휨 강도와 연륜경사각과의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. 또한, 각 적층재의 변형률을 Table 1에 나타낸다. P_⊥ 타입의 휨 강도는 연륜경사각 90°가 5.16 MPa로 가장 높았고, 그 다음은 연륜경사각 0°의 4.07 MPa, 그리고 연륜경사각 45°의 3.25 MPa의 순으로 나타났다. 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 휨 강도의 비는 1 : 0.799 : 1.27로 연륜경사각에 의한 차이는 휨 탄성계수에 비해 매우 적었다. 이것은 연륜경사각 45°의 변형률이 0°나 90°에 비해 현저히 컸기

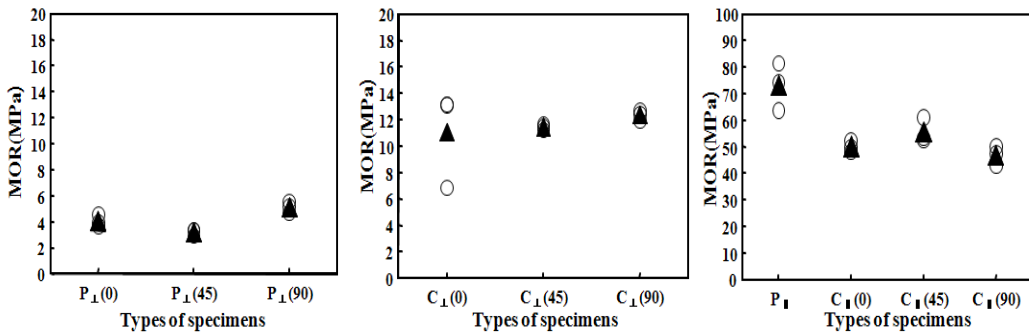


Fig. 6. Effects of annual ring angles on MOR for P_⊥ type, C_⊥ type and C_∥ type specimens.

* 0, 45, 90: Annual ring angles. * Legend: ▲: Average MOR.

때문으로 생각된다.

C_⊥ 타입에서의 휨 강도는 연륜경사각 90°에서 12.4 MPa로 가장 컸고, 그 다음은 연륜경사각 45°, 그리고 연륜경사각 0°의 순이었고, 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 휨 강도의 비는 1 : 1.05 : 1.08의 값을 나타내었고, 연륜경사각 45°의 경우, 휨 탄성계수와 다르게 연륜경사각 0° 및 90°와 비슷한 값을 나타내었다. 직교적층하는 것에 의해 표층이 섬유직각방향의 휨 강도는 P_⊥타입에 비해 0°에서 2.70배, 45°에서 3.54배, 90°에서 2.40배의 증가를 나타내었다. 휨 강도가 연륜경사각에 의한 차이가 적은 것은 파괴에 도달하는 과정에서 최초로 인장축의 섬유직각방향 라미나에 귀열이 발생하고, 변형이 증가하면서 중층에서도 파괴가 일어남에 따라 C_⊥타입의 휨 강도는 중층 섬유방향 라미나의 휨 강도에 의존했기 때문으로 생각된다.

한편, C_∥ 타입에서는 연륜경사각 45°가 55.8 MPa로 가장 높은 값을 나타내었고, 그 다음은 연륜경사각 0°, 그리고 90°의 순이었다. 연륜경사각 0°, 45°, 90°의 휨 강도의 비는 1 : 1.11 : 0.841의 값을 나타내었고, 연륜경사각에 의한 차이는 휨 탄성계수에 비해 현저히 적었다. 이것은 변형률이 연륜경사각 45°에 비해 0°와 90°에서 현저히 큰 것에 기인하는 것으로 생각되고, 선행연구(Park *et al.*, 2001)와 비슷한 경향을 나타내었다. 직교적층하는 것에 의해 표층이 섬유방향의 휨 강도는 P_∥ 타입에 비해 0.64배(90°

~0.76(45°)배로 감소하는 것이 확인되었다.

적층재의 표층이 섬유방향에 대한 표층이 섬유직각방향의 휨 강도의 이방성은 직교적층하는 것에 의해 1 : 0.044~0.070에서 1 : 0.206~0.264로 현저히 감소하였다.

적층재의 비 휨 강도(휨 강도/비중)는 Table 1에 나타내는 것처럼, P_∥ 타입에서는 157 MPa, P_⊥ 타입에서는 7.15 MPa(0°)~11.3 MPa(90°), C_∥ 타입에서는 104 MPa(90°)~119 MPa(45°), C_⊥ 타입에서는 23.7 MPa(0°)~27.6 MPa(90°)로 휨 강도에 비해 2.1~2.2배의 높은 값을 나타내는 것이 확인되었다.

4. 결 론

이 연구에서는 목재의 효율적인 이용과 그 이용확대를 목적으로, 가문비나무를 이용하여 직교형적층재를 제작하였고, 정적 휨강도 성능에 미치는 섬유직각방향 라미나의 연륜경사각의 영향을 조사하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 3층 모두가 섬유직각방향 라미나로 구성된 평행형적층재의 경우, 섬유직각방향의 휨 탄성계수, 휨 비레한도응력, 휨 강도는 연륜경사각 45°에서 가장 적은 값을 나타내었다. 중층에 섬유방향 라미나를 배열하는 것에 의해 강도성능은 현저히 향상되었고, 그 정도는 휨 강도특성치의 종류 및 연륜경사각에 따라 다른 것이 확인되었다.

2) 표층에 섬유직각방향 라미나로 구성된 C_{\perp} 타입 직교형적층재의 경우, 휨 탄성계수는 $90^{\circ} > 0^{\circ} > 45^{\circ}$ 의 순으로 연료경사각 45° 에서 가장 적었다. 휨 비례한도 응력과 휨 강도는 $90^{\circ} > 45^{\circ} > 0^{\circ}$ 의 순을 나타내었으나, 연료경사각에 의한 차이는 매우 적었고, 휨 강도특성치의 종류에 따라 연료경사각의 영향의 방식이 다른 것이 확인되었다.

3) 중층에 섬유직각방향 라미나를 배열한 C_{\parallel} 타입 직교형적층재의 경우, 휨 탄성계수와 휨 비례한도 응력은 $45^{\circ} > 90^{\circ} > 0^{\circ}$, 휨 강도는 $45^{\circ} > 0^{\circ} > 90^{\circ}$ 의 순으로 P_{\perp} 및 C_{\perp} 타입과 다르게 연료경사각 45° 에서 가장 높은 값을 나타내었다. 그러나 휨 강도에서는 연료경사각 사이의 차이가 감소하는 것이 확인되었다.

4) 연료경사각 45° 의 섬유직각방향 라미나를 직교형적층재의 표층에 배열할 경우 유연성이 좋아 많은 변위를 발생 시키면서 파괴를 지연시켰고, 중층에 배열할 경우 전단력에 의한 처짐의 영향이 적어져서 휨 강도성능의 향상을 기할 수 있는 것이 확인되어 재료설계에 아주 중요한 요인으로 작용할 것으로 판단되었다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2010-0006417).

REFERENCES

Cha, J.K. 1996. Study on stress waves for development of glulam from domestic small diameter log (I). *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 24(3): 90~100.

Jang, S.S., Kim, Y.H., Jang, Y.I. 2009. Mechanical properties of composite materials composed of structural steel and structural glued laminated timber. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 37(4): 300~309.

Keenan, F.J., Kryla, J., Kyokong, B. 1985. Shear strength of spruce glued-laminated timber beams. *Canadian Journal of Civil Engineering* 12 : 661~672.

Kim, K.M., Shim, K.B., Park, J.S., Kim, W.S., Lim, J.A., Yeo, H.M. 2007. Development of pitch pine glued laminated timber for structural use. - Improvement of bending capacity of pitch pine glulam by using domestic larch laminars. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 35(6): 13~22.

Park, H.M., Kang, D.H., Choi, Y.E., Ahn, S.Y., Ryu, H.S., Byeon, H.S. 2010. Bending creep performances of hybrid laminated woods composed of wood-wood based boards. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 38(1): 1~10.

Park H.M., Fushitani, M. 2006a. Effects of component ratio of the face and core laminae on static bending strength performances of three-ply cross-laminated woods panel made with sugi (*Cryptomeria japonica*). *Wood and Fiber Science* 38: 278~291.

Park H.M., Fushitani, M., Byeon, H.S. 2009. Derivation of an equation for calculating shear modulus of three-ply laminated material beam from shear moduli of individual laminae and its application. *Journal of Wood Science* 55: 181~189.

Park, H.M., Fushitani, M., Sato, K., Kubo, T. 2004. Static bending strength performances of wood-aluminum hybrid laminated material. *Transactions of the Materials Research Society of Japan* 29(5), 2503~2506.

Park H.M., Fushitani, M., Sato, K., Kubo, T., Byeon, H.S. 2003. Static bending strength performances of cross-laminated woods made with five species. *Journal of Wood Science* 49: 411~417.

Park H.M., Fushitani, M., Sato, K., Kubo, T., Byeon, H.S. 2006b. Bending creep performances of

- three-ply cross-laminated woods made with five species. *Journal of Wood Science* 52: 220~229.
- Park, H.M., Fushitani, M., Ohtsuka, T., Nakajima, T., Sato, K., Byeon, H.S. 2001. Effect of annual ring angle on static bending strength performances of cross-laminated woods made with sugi wood. *Mokuzai Gakkaishi* 47(1): 22~32.
- Park H.M., Fushitani, M., Kubo, T., Sato, K., Byeon, H.S. 2002. Bending creep performance of cross-laminated sugi wood. *Mokuzai Gakkaishi* 48(3): 166~177.
- Park, H.M., Moon, S.J., Choi, Y.E., Park, J.W., Byeon, H.S. 2009. Static bending strength performances of hybrid laminated woods composed of wood-wood based boards. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 37(6): 546~555.
- Park, J.C., Shin, Y.J., Hong, S.I. 2009. Bending performance of glulam beams reinforced with carbon fiber-reinforced plastics bonded with polyvinyl acetate-based adhesive. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 37(4): 364~371.
- Park, J.C., Shin, Y.J., Hong, S.I. 2009. Bonding performance of glulam reinforced with glass fiber-reinforced plastics. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 37(4): 357~363.
- Hayashi, T., Miyatake, A. 1991. Strength properties of Sugi composite glulam beams (in Japanese). *Mokuzai Gakkaishi* 37(3): 200~205.
- SAKAI, J. 1970. Strength of structures (in Japanese). Gihodo. Tokyo.p. 77.