

국내산 낙엽송집성재의 지압특성*¹

김 건 호*² · 홍 순 일*^{2†}

Bearing Properties of Domestic Larix Glulam*¹

Keon-Ho Kim*² · Soon-Il Hong*^{2†}

요 약

하중방향(섬유평행방향, 섬유직교방향)과 접합구(볼트, 드립트 핀) · 적층면방향(평행, 수직)에 따른 국내산 낙엽송집성재의 지압강도시험을 실시하였다. 지압시편은 5 ply의 집성재를 사용하였고, 접합구의 직경은 12, 16, 20 mm를 사용하였다. 시험결과는 다음과 같다.

- 1) 볼트와 드립트 핀의 각 직경에 따른 평균최대지압강도는 섬유평행하중방향의 경우 비슷한 경향을 보였으며, 섬유평행하중방향의 평균최대지압강도가 섬유직교방향보다 1.50~2.31배 높게 나타났다. 평균지압강도의 경우 섬유평행하중방향시편은 직경 16 mm에서 20 mm로 증가할 때 20% 감소하였으며, 섬유직교방향은 뚜렷한 경향이 없었다.
- 2) 평균지압초기강성의 경우 섬유평행하중방향은 직경 16 mm일 때 가장 크게 나타났다. 드립트 핀 접합부의 전단강도실험 시 초기강성과 평균지압초기강성은 직경이 증가할수록 비슷한 경향을 보였다.
- 3) 지압강도시험 시 섬유평행방향시편의 파괴형상은 직경이 작을수록 활렬파단을 보였다. 섬유직교방향의 시편은 대부분이 섬유평행방향으로 활렬파단이 일어났으며 볼트가 드립트 핀 시편보다 더 많이 나타났다.
- 4) 지압강도예측식을 통해 구한 예측지압강도와 실제 5% 유사항복지압강도를 비교하였을 경우 섬유평행방향은 KBCS, NDS의 예측지압강도와 비슷하게 나타났으나, 섬유직교방향은 NDS에서 제안한 예측식이 잘 적용되는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Bearing strength test was investigated to determine the bearing properties of domestic larix glulam according to the load direction (in parallel to grain and in perpendicular to grain), the

*¹ 접수 2008년 3월 28일, 채택 2008년 5월 8일

*² 강원대학교 산림환경과학대학 임산공학과, Department of Wood Science & Engineering, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

† 주저자(corresponding author) : 홍순일(e-mail : hongsi@kangwon.ac.kr)

fastener (bolt and drift-pin), and the direction of laminae. The specimen was 5 ply glulam. The diameters of fastener are 12, 16 and 20 mm. The results were as follows.

- 1) In according to the diameter of bolt and drift-pin, the average of maximum bearing strength in parallel to grain loading was similar to that in perpendicular to grain loading. The average of maximum bearing strength was 1.50~2.31 times higher in parallel to grain loading than in perpendicular to grain loading. The average of maximum bearing strength in parallel to grain loading was lowered by 20% with increasing the diameter from 16 mm to 20 mm, but that in perpendicular to grain loading didn't show a clear tendency.
- 2) The average of bearing stiffness in parallel to grain loading was the highest at 16 mm in diameter. The average of bearing stiffness is similar to the shearing stiffness in drift-pin connection with increasing diameter.
- 3) In parallel to grain loading, the failure mode of specimens was the splitting along the grain in decreasing diameter. The failure mode in perpendicular to grain loading was the splitting along the grain. In this case, split occurred more in specimens using bolt than in those using drift-pin.
- 4) The 5% offset yield strength in parallel to grain loading was similar to the predicted bearing strength of KBCS, NDS. In perpendicular to grain loading, the NDS's equation can be applied to predict the bearing strength.

Keywords: Bearing strength, Glulam, bearing stiffness

1. 서 론

일반적으로 대단면집성재를 이용한 목구조물에 많이 사용되어지는 접합구는 볼트와 드리프트 핀이다. 볼트, 드리프트핀 접합부의 기준허용내력은 EYM (European Yield Model)을 사용하고 있으며, 이 모델은 Johansen (1949)에 의해 하중부과 시 접합구의 휨강도와 접합부에 발생하는 목재의 지압강도에 기초를 두고 있다. K. Hwang (2002)은 공학용 목재의 이방성구조가 지압강도에 영향을 미친다고 보고하였다. NDS (NFPA 1986)는 못과 같은 직경이 작은 접합구는 하중방향에 따른 지압강도가 차이가 없지만, 볼트와 같은 직경이 큰 접합구는 하중방향에 따라 지압강도가 달라진다고 보고하였고, Soltis 등 (1987)은 접합구 직경과 비중의 관계를 통해 하중방향의 차이에 따라 변하지 않는 지압강도를 보고하였다. Rammer (2001)와 Wilkinson (1991)은 목재의

함수율, 밀도를 통해 지압강도를 예측할 수 있다고 보고하였다. 그러나 이상의 보고는 소재의 지압강도를 언급하고 있으며 현재 구조용 목질재료로서 집성재의 지압강도자료는 미비한 상태이다. 또한 접합부 설계 시 사용되어지는 지압강도예측식은 소재에 대한 예측지압강도로서 집성재의 경우 접착면 방향에 따라 수직집성재와 수평집성재의 지압강도성능이 달라진다. 따라서 각 나라와 연구자가 제안한 지압강도예측식이 낙엽송집성재의 지압강도예측 적용의 타당성 검토가 필요하다.

본 논문에서는 지압방향과 섬유방향, 그리고 접합구방향과 적층면방향에 따른 지압강도성능평가와 접합구종류(볼트, 드리프트 핀)와 직경(12, 16, 20 mm)에 따라 지압강도를 비교하였다. 또한 각 조건에 따른 유사항복하중(5% 항복지압강도)을 비교하였다. 실험에 의해 측정된 5% 항복지압강도와 예측 지압강도를 비교 검토하였다.

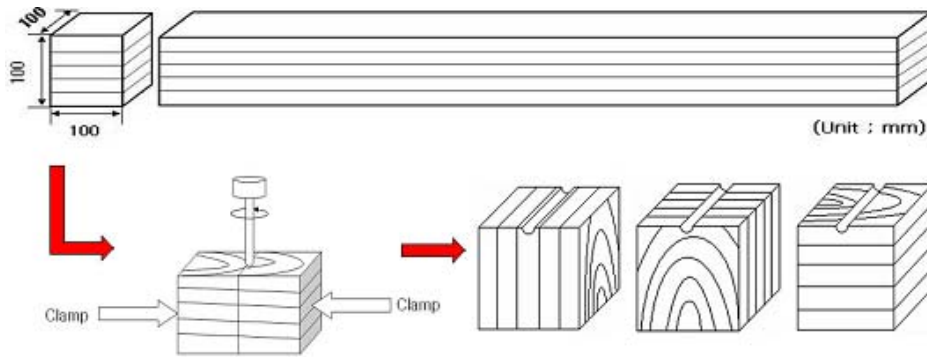


Fig. 1. Method of producing a specimen with semicircular groove.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

집성재 제작용 라미나는 무중접합 제재판으로서 100 mm × 20 mm × 3600 mm의 국내산 일본잎갈나무(낙엽송 : *Larix kaempferi* Carr.)를 사용하였다. 라미나용 제재판의 평균함수율은 8%, 평균기건비중은 0.54이었다.

2.2. 시험체 제작

지압시험을 제작하기 위해 5 ply 집성재를 4분 제작하였으며, 조건에 따른 지압강도성능을 비교하기 위해 라미나를 영계수로 등급선별하여 집성재의 조합형태를 균일하게 제작하였다.

제작된 집성재는 길이방향 100 mm로 절단하여 평행육면시험체를 제작하였다. 절단된 시험체는 클램프를 이용하여 시험체 두개를 고정시키고 목공용 드릴을 이용하여 각각의 시험체의 한 재면을 가로지르는 접합구멍을 제작하였다. 이는 접합구멍의 깊이를 접합구 직경의 반지름만큼 제작하기 위함이다(KS F 2156). 지압시험에 사용된 접합구는 볼트와 드리프트 핀이며 접합구의 직경은 12 mm, 16 mm, 20 mm이었다. CH시험의 접합구멍은 접합구의 축

방향과 라미나의 적층면이 평행방향이며 하중방향이 섬유평행방향이 되도록 제작하였다. CV시험은 접합구의 축방향과 접착면방향이 직교방향이며 섬유평행하중방향으로 제작하였다. RV시험은 접합구의 축방향과 접착면이 평행방향이며 섬유직교하중방향으로 제작하였다(Fig. 1). 지압시험은 각 시험을 5회 반복하여 실시하였으며, 시험의 개수는 총 90개를 제작하였다.

2.3. 지압강도실험

KS F 2156에 따라 지압 시험을 실시하였다. 지압강도 측정은 Instron-4482를 사용하였으며, 시험 시작 후 60 ± 30초 이내에 최대 하중이 도달하거나 목재의 변형이 접합구의 반지름에 달할 때까지 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시험형태에 따른 최대지압강도 비교

지압강도는 실험을 통해 측정된 단위면적당의 지압최대하중을 뜻하며 식 (1)과 같이 구하였다.

$$\text{Bearing strength (MPa)} = \frac{P_y}{(L \times D)} \quad (1)$$

P_y : 5% 유사항복하중(N)

Table 1. Bearing properties

Fastener	Diameter (mm)	Specimens	Average bearing strength	Average stiffness
			(MPa)	(kN/mm)
Bolt	12	b12ch	48.2 (4.65) ¹⁾	20.5 (5.80)
		b12cv	45.7 (5.16)	18.5 (12.80)
		b12rv	25.0 (6.44)	10.8 (14.91)
	16	b16ch	44.7 (1.54)	26.8 (2.57)
		b16cv	47.6 (3.13)	26.2 (5.69)
		b16rv	22.5 (6.36)	12.6 (11.35)
	20	b20ch	39.9 (3.81)	20.0 (7.60)
		b20cv	38.8 (3.76)	20.7 (7.05)
		b20rv	17.3 (10.64)	10.9 (16.88)
Drift-pin	12	p12ch	51.2 (2.85)	33.6 (25.77)
		p12cv	48.7 (5.30)	32.2 (22.67)
		p12rv	26.4 (14.62)	20.0 (17.25)
	16	p16ch	49.1 (3.71)	53.4 (7.00)
		p16cv	49.4 (0.32)	50.4 (14.56)
		p16rv	23.1 (10.17)	19.0 (26.74)
	20	p20ch	37.1 (5.57)	24.9 (4.94)
		p20cv	39.0 (1.00)	29.8 (20.07)
		p20rv	24.6 (14.76)	17.8 (43.76)

¹⁾ CV = Coefficient of Variation

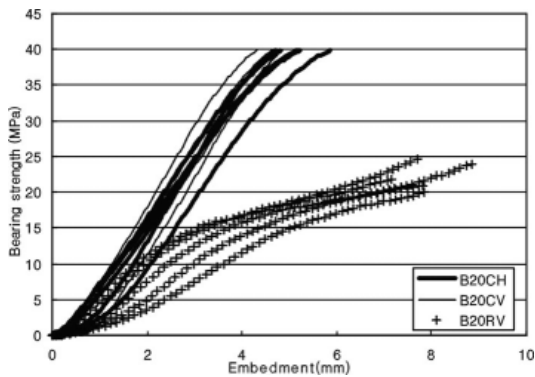


Fig. 2. Typical load-displacement curves.

L : 집성재의 폭(mm)

D : 볼트, 드리프트 핀의 직경(mm)

12 mm의 CH시편은 평균최대강도는 CV시편과 비

슷하게 나타났으며, 드리프트 핀의 평균최대지압강도가 볼트보다 크게 나타났고 RV의 경우 19% 크게 나타났다. 16 mm의 평균최대강도도 12 mm와 비슷한 경향을 보였으며, RV의 경우 3% 정도 크게 나타났다. 20 mm의 경우 Fig. 2와 같이 볼트와 드리프트 핀 시편의 평균최대지압강도는 비슷하게 나타났으며, RV의 경우 8% 크게 나타났다.

볼트의 경우 CH와 CV의 지압강도는 직경이 16 mm에서 20 mm로 증가할 때 약 20% 정도로 가장 많이 감소하는 것을 보였으며, RV는 역시 약 15% 정도 감소하는 것을 보였다. 드리프트 핀도 볼트와 비슷하게 직경 16 mm에서 20 mm로 증가할 때 약 21~27% 정도 감소하는 것을 보였다.

지압초기강성의 경우 각 시편에 따라 CH와 CV의 경향은 비슷하게 나타났으며 직경 16 mm에서 가장 크게 나타났다. RV는 뚜렷한 경향을 찾지 못하였다.

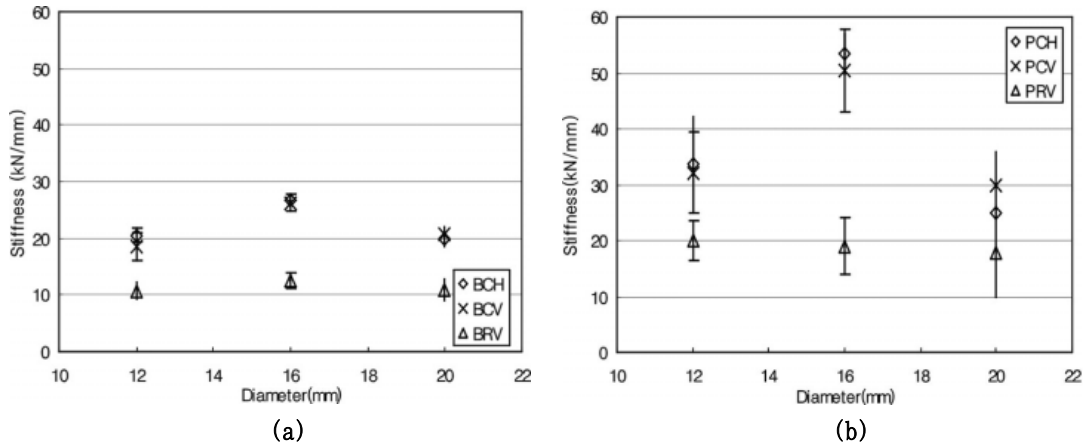


Fig. 3. Relationship between stiffness and diameter (a-bolt, b-pin).

따라서 Fig. 3과 같이 볼트와 드리프트 핀 모두 직경 16 mm일 때 가장 좋은 지압강도성능을 보였다.

국내산 낙엽송 집성재의 강관삽입형 볼트, 드리프트 핀 접합부 전단강도실험 시 측정된 초기강성은 볼트의 경우 16 mm가 12, 20 mm보다 각각 45%, 48% 크게 나타났으며, 드리프트 핀의 경우 직경이 증가할수록 초기강성이 증가하는 것으로 보고 되었다(김, 2008). 볼트, 드리프트 핀 접합부는 접합부 형식에 따라 파괴형상이 달라진다. 강관삽입형 접합부의 경우 초기하중 시 Mode I (EYM)과 같이 접합구의 휨변형보다 집성재 자체의 지압에 의한 파괴가 일어나게 된다.

Fig. 4와 같이 볼트의 경우 12 mm와 16 mm는 같은 경향을 보였으나 20 mm의 초기강성은 다른 경향을 보였다. 따라서 초기하중 시 볼트보다 드리프트 핀의 경우 직경이 증가할수록 집성재의 지압초기강성이 접합부의 초기강성에 큰 영향을 미친다고 생각되어진다.

볼트, 드리프트 핀 직경 20 mm의 지압초기강성은 접합부의 초기강성과 거의 비슷한 값이며, 이는 직경이 증가할수록 초기하중부과 시 접합구의 변형보다는 집성재의 지압에 의한 변형이 크기 때문으로 생각된다.

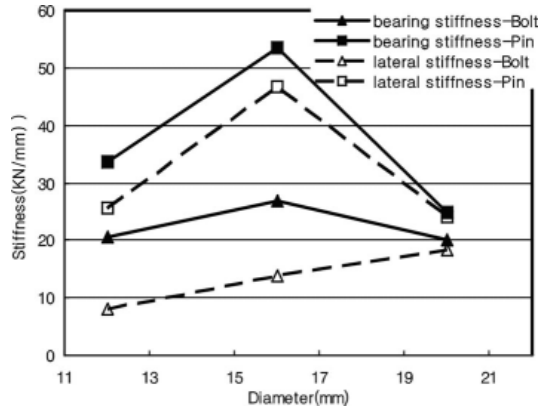


Fig. 4. Relationship between stiffness and diameter (▲ : Bolt-bearing stiffness, ■ : Pin-bearing stiffness, △ : Bolt-lateral stiffness, □ : Pin-lateral stiffness).

3.2. 파괴형상 비교

지압강도 실험 시 파괴형상은 집성재와 접합구가 접촉한 부위가 압입되는 형상과 섬유평행방향으로 집성재가 활렬파단이 일어나는 형상으로 나타났다. CH의 경우 12 mm 시편의 파괴형상은 모두 섬유평행방향으로 활렬파단이 일어났고 16 mm, 20 mm의 경우 약 35% 활렬파단이 일어났다(Fig. 5). CV의 시

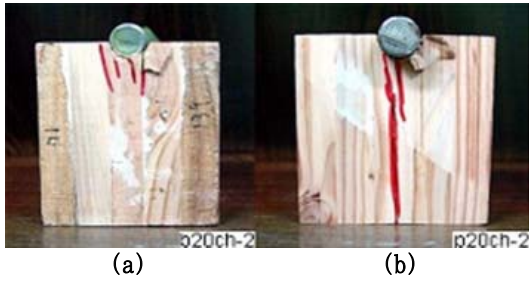


Fig. 5. Picture of splitting Failure (a-B20CH-2, b-P20CH-2).

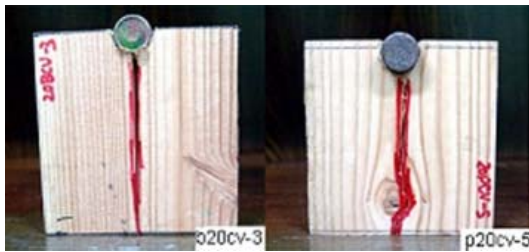


Fig. 6. Picture of splitting Failure (B20CV-3, P20CV-5).

편도 역시 12 mm 시편의 약 90%가 할렬파단이 일어났으며, 16 mm, 20 mm의 경우 20%의 할렬파단을 보였다(Fig. 6). RV의 경우 Fig. 7과 같이 볼트시편은 하중방향의 수직인 섬유평행방향으로 모두 할렬파단이 일어났으며, 드리프트 핀의 경우 67% 정도 할렬파단이 일어났다.

따라서 직경이 증가함에 따라 집성재 자체의 지압에 의한 파괴(Fig. 5-a)가 할렬파단(Fig. 5-b)보다 더 많이 나타나며, RV시편의 경우 직경보다는 접합구에 따라 볼트가 드리프트 핀보다 할렬파단이 더 많이 나타나는 것을 알 수 있었다.

3.3. 실측지압강도(5% 유사항복지압강도)와 예측지압하중 비교

접합부의 항복하중은 하중-변형 곡선의 초기 직선 영역을 나타내는 직선과 접합구 직경의 5% 만큼을

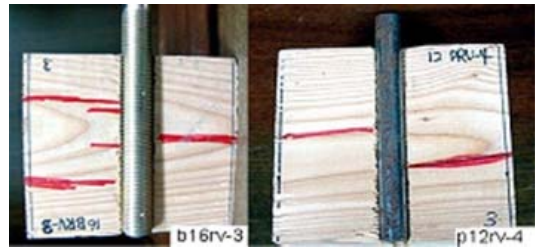


Fig. 7. Picture of splitting Failure (B26RV-3, P12RV-4).

횡축의 정방향으로 평행 이동시킨 직선과 하중-변형 곡선의 교점의 하중으로 구하였다. 그러나 본 실험에서 항복점에서 최대하중이 일어날 때까지의 변형이 적은 경우 하중-변형곡선에서는 5% 유사항복하중을 구할 수 없기 때문에 직경의 2% 만큼을 횡축의 정방향으로 평행 이동시켜 2% 유사항복하중을 구하여 비교하였다.

대체로 볼트 20 mm와 드리프트 핀 16 mm의 경우 순간적인 파단에 의하여 5% 유사항복하중을 구하지 못하였다. 5% 유사항복하중의 경우 CH시편은 최대하중의 98~93% 정도, CV시편은 92%~99%였으며 RV시편의 경우 77%~90%였다. 2% 유사항복하중은 CH시편은 최대하중의 87~98%, CV는 85~94%, RV는 67~84%였다. 5%와 2% 유사항복하중의 비는 1.04~1.16이었다(Table 2).

지압강도를 예측하는 실험식은 많은 연구자들과 설계기준에 의해 제안되어지고 있다. 대부분의 예측실험식은 소재를 통한 실험식으로서 비중(G)과 직경(D)으로 표현되어져있다. 예측 식에 의해 제안된 예측지압강도는 하중방향이 섬유 방향일 때와 섬유직교 방향일 때로 나뉘며, 본 실험에서 섬유평행방향일 경우의 시편은 CH, CV가 속하고 섬유직교방향은 RV가 속한다. 우리나라의 경우 건축설계기준²⁾(KBCS)은 하중방향이 섬유 평행일 때와 섬유 직교일 때 식 1) 과 2)로 제안하고 있다.

섬유평행 하중 방향일 때
 $F_e = 79 G$

1)

Table 2. Comparison of 5% bearing yielding strength and calculated bearing yielding strength

Specimens	Average 5% offset yielding load	Average 2% offset yielding load	K ¹⁾ /A ²⁾	N ³⁾ /A	H ⁴⁾ /A	E ⁵⁾ /A	
	(kN)	(kN)					
CH	Bolt b12ch	568	542	0.87	0.85	0.78	0.79
	Bolt b16ch	702	701	0.94	0.92	0.84	0.82
	Bolt b20ch	-	75.4	1.03	1.00	0.90	0.85
	Drift-pin p12ch	603	547	0.82	0.8	0.73	0.75
	Drift-pin p16ch	-	723	0.91	0.89	0.82	0.80
	Drift-pin p20ch	728	729	1.06	1.04	0.93	0.88
CV	Bolt b12cv	539	498	0.95	0.93	0.86	0.87
	Bolt b16cv	748	720	0.92	0.9	0.83	0.8
	Bolt b20cv	-	-	-	-	-	-
	Drift-pin p12cv	574	509	0.9	0.88	0.81	0.82
	Drift-pin p16cv	776	726	0.88	0.86	0.8	0.77
	Drift-pin p20cv	767	690	1.17	1.15	1.07	0.97
RV	Bolt b12rv	295	266	0.35	1.09	0.58	1.52
	Bolt b16rv	353	305	0.35	1.09	0.59	1.58
	Bolt b20rv	339	293	0.37	1.15	0.66	1.74
	Drift-pin p12rv	311	277	0.36	1.12	0.58	1.53
	Drift-pin p16rv	363	327	0.35	1.07	0.58	1.54
	Drift-pin p20rv	484	45.0	0.25	0.77	0.45	1.18

¹⁾ K:KBCS, ²⁾ A:Actual bearing yield strength (=5% yield load or 2% yield load/projected area)
³⁾ N:NDS, ⁴⁾ H:Hirai's, ⁵⁾ E:Eurocode5

섬유직교 하중 방향일 때

$$F_e = \frac{216 G^{1.45}}{\sqrt{D}} \quad 2)$$

또한 NDS³⁾(National Design Specification)는 식 3)과 4)를 사용하며 이 식은 Soltis 등에 의해 제안되어졌다.

섬유평행 하중 방향일 때

$$F_e = 77.25 G \quad 3)$$

섬유직교 하중 방향일 때

$$F_e = 212 G^{1.45} D^{-0.5} \quad 4)$$

Eurocode5⁴⁾에서 채택된 예측 식 5), 6)은 Whale과 Smith에 의해 제안되었다.

섬유평행 하중 방향일 때

$$F_e = 82(1 - 0.01d) G \quad 5)$$

섬유직교 하중 방향일 때

$$F_e = \frac{82(1 - 0.01d) G}{(0.9 + 0.015d)} \quad 6)$$

Hirai⁵⁾의 식은 식 7), 8)과 같이 목재의 비중이 0.38~0.55인 시편으로 제안된 예측식이다. 직경(d)는 볼트의 직경으로서 mm로 표현한다.

섬유평행 하중 방향일 때

$$F_e = 91.44 G - 11.16 \quad 7)$$

섬유직교 하중 방향일 때

$$F_e = (25.04 G + 1.35) \left(\frac{d}{10}\right)^{-0.4} \quad 8)$$

실험에 의해 얻어진 5% 항복지압강도와 각 설계기준과 연구자가 제안한 예측 식에 의해 얻어진 항복지압강도를 비교해 보았다(Table 2).

하중방향이 섬유평행방향인 CH, CV의 경우 KBCS에서 제안한 예측지압강도와 실제항복지압강도의 비는 0.82~1.17이었다. NDS기준에서 제안한 예측지압강도비는 0.80~1.15이었고, Eurocode 5의 예측지압강도비는 0.77~0.97이었다. Hirai식의 예측지압강도비는 0.73~1.07이었다.

하중방향이 섬유직교방향인 RV의 경우 한국건축설계기준에서 제안한 예측지압강도비는 0.25~0.37이며, NDS의 예측지압강도비는 0.77~1.12이었다. Eurocode 5의 예측지압강도비는 1.18~1.58이며, Hirai의 예측지압강도비는 0.45~0.59이었다.

4. 결 론

볼트와 드리프트 핀의 직경에 따른 평균최대지압강도는 CH와 CV의 경우 비슷한 경향을 보였으며, RV의 평균최대지압강도는 CH보다 1.61~1.89배 크게 나타났다.

접합구의 직경에 따른 지압강도는 직경 20 mm에서 16 mm로 감소할 때 CH와 CV의 경우 가장 큰 증가량을 나타내었으며 RV의 경우 직경이 증가함에 따라 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 초기강성의 경우 CH와 CV는 직경 16 mm가 직경 12, 20 mm보다 크게 나타났으며 RV의 경우 뚜렷한 경향을 찾지 못했다.

지압초기강성은 직경이 16 mm시편에서 가장 크게 나타났다. CH의 시편의 경우 볼트접합부의 전단강도실험을 통해 측정된 초기강성과 지압초기강성은 비슷한 경향을 나타냈으며, 직경 20 mm시편의 경우 거의 비슷한 값을 보여주었다. 지압시편의 파괴형상은 직경이 증가함에 따라 할렬과단보다 집성재 자체의 지압에 의한 파괴가 더 많이 나타나며, RV시편의 경우 직경보다는 접합구에 따라 볼트가 드리프트 핀보다 할렬과단이 더 많이 나타나는 것을 알 수 있었다.

따라서 지압초기강성이 접합부의 초기강성에 영향을 미치며 직경이 증가하면 접합구의 휨변형보다 지압으로 인한 파괴가 큼을 알 수 있었다.

CH와 CV시편의 경우 측정된 5% 항복지압강도는 KBCS와 NDS에서 제안한 예측지압강도가 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 그러나 RV시편의 경우 NDS가 KBCS보다 잘 일치 하는 것을 알 수 있었다. 따라서 국내산 낙엽송 집성재의 볼트, 드리프트 핀의 하중방향에 따른 항복지압강도는 NDS에서 제안한 지압강도예측식으로 예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김건호, 홍순일. 2008. 낙엽송집성재의 bolt, drift pin 접합부의 전단강도 성능 평가. 목재공학. 36(1): 69~78.
2. 건축구조 설계기준. 2005. 대한건축학회.
3. America Society of Civil Engineer. 1997. National Design and Specification for Timber Construction of U.S.A.S.C.E. New York.
4. Eurocode 5. 1995. Design of timber structures European pre-standard ENV 1995-1-1: general rules and rules for building, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
5. Hirai T. 1989. Basic properties of mechanical wood-joints properties of wood under a bolt. Res. bull. The College Experiment Forest, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 46(4):967-988
6. Johansen, K. W. 1949. Theory of timber connec-

- tions. International Association for Bridge and Structural Engineering. 9: 249~262.
7. Korea Standard Association. 2002. KS F 2156. Method of dowel-bearing strength test for wood and wood-based products.
 8. Hwang, K. and K. Komatsu. 2002. Bearing properties of engineered wood products I : effects of dowel diameter and loading direction. J wood Sci. 48: 295~301.
 9. Kawamoto N, K. Komatsu and M. Harada. 1993. Lateral strengths of drift-pin in perpendicular to the grain loadings 3: estimation of yield loads by european yield theory (in Japanese). Mokuzai Gakkaishi 39:1386~1392.
 10. NFPA 1986. National design specification. National Forest Product Association, 1250 Connecticut Avenue, NW., Washington, DC.
 11. Rammer, D. R. and S. G. Winistorfer, 2001. Effect of Moisture Content on Dowel-Bearing Strength. Wood and Fiber Science. 33(1): 126~139.
 12. Soltis, L. A., S. Karnasudirdja, and J. K. Little, 1987. Angle to grain strength of dowel-type fasteners. Wood and Fiber Science. 19(1): 68~80.
 13. Takuro H. 1984. Effect of loading direction on the bearing characteristics of wood under a bolt. 木材學會誌. 30(12): 959~964.
 14. Whale LRS and I. Smith. 1986. The derivation of design values for nailed and bolted joints in EUROCODE 5. Working Commission 18, Timber Struct., Meeting 19. Int. Council for Build. Research Studies and Documentation.
 15. Wilkinson T. L. 1991. Dowel bearing strength. Res. Pap. FPL-RP-505 Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory.