목재공학 38(4): 306~315, 2010
Mokchae Konghak 38(4): 306~315, 2010

방부처리 리기다소나무 응력적층재의 휨거동 특성*1

김 광 모*2† · 심 국 보*2 · 김 병 남*2

Bending Behavior of Preservative Treated Pitch Pine Stress-Laminated Timber*1

Kwang-Mo Kim*2† · Kug-Bo Shim*2 · Byoung-Nam Kim*2

요 약

상대적으로 단면이 작은 부재를 현장에서 조립하는 응력적층 방식은 방부처리 및 운반, 설치 등에 장점을 가지고 있어 경간이 짧고 통행빈도가 낮으면서 현장접근이 불리한 휴양림 진입로나 임도 등의 목조교량에 활용가능성이 높다. 따라서 본 논문에서는 응력적층재를 이용한 차량용 교량의 구조설계기술 개발의 일환으로 방부처리된 국산 리기다소나무로 제작된 응력적층재의 거동 특성을 실험실적으로 분석하였다. 먼저 방부처리에 의한 리기다소나무의 횡압축 성능 변화와 응력적층재 제작과정에서 요구되는 중앙천공이 제재목의 휨성능에 미치는 영향을 분석하였다. 다음으로 응력적층재의 설계시에 고려되어야 할 것으로 판단되는 프리스트레스 압체력, 볼트간격, 층재개수, 평삭가공 여부가 휨성능에 미치는 영향을 확인하였다. 연구결과 응력적층재 제작과정에서 제재목의 평삭가공은 불필요하며, 3.0 kg/cm^2 이상의 프리스트레스 압체력에서 부재의 휨강성이 기준의 80% 수준으로 유지됨이 확인되었다. 볼트간격과 층재개수의 영향에 대해서는 추후 현장실험 등을 통해 보다 넓은 범위에서의 검토가 요구된다. 본 연구결과는 국내 차량용 목조교량을 도입하기 위한 구조해석 및 설계절차를 확립하는데 있어서 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

The stress laminated timber, which could be manufactured by small dimension lumber on construction site, has high possibilities for bridges in remote area, such as recreation forest or forest road, because those bridges may be short span and low frequency in use. The stress laminated timber has merits of easiness for preservative treatment and transportation because it is

* 1 접수 2010년 4월 16일, 채택 2010년 6월 1일
* 2 국립산림과학원 녹색자원이용부. Department of Forest Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea
† 교신저자(corresponding author) : 김광모(e-mail: lovewood@forest.go.kr)

manufactured with small dimension lumber. This study was carried out to analyze performances of stress laminated timber manufactured with preservative treated domestic pitch pine for developing structural design data for stress laminated timber bridges for vehicular traffic. Perpendicular to grain compressive performance by preservative treatment and bending performance by bored holes of pitch pine lumber was analyzed. Then, the effects of bending performance by pre-stress pressure, distance of bolts, number of laminations and planning were analyzed. Conclusively, planning of lumber was not necessary for manufacturing stress laminated timber, and 80% of bending stiffness criteria was maintained as pre-stress pressure was higher than 3.0 kg/cm^2. However, further researches are needed to define the effects of bolt distances and number of laminations. The results of this research would be basic data for design stress laminated timber bridges for vehicular traffic in Korea.

Keywords: Stress-laminated timber, pitch pine, prestress, bending behavior, preservative treatment

1. 서 론

응력적층재는 Fig. 1에서와 같이 넓은 재면이 맞닿도록 연속적으로 배치된 층재에 횡방향 프리스트레스를 가하여 층재 사이의 하중 전달이 접착제(구조용 집성재)나 접합철물(못적층재, nail-laminated lumber)에 의해 유도되는 전단력에 의하는 것이 아니라 프리스트레스에 의해 발생하는 압축력과 마찰력에 의하는 특징을 가지고 있다(AASHTO, 2008). 이러한 방식은 1976년 캐나다 온타리오에서 못적층재를 상판으로 이용한 교량의 보수과정에서 층재 사이의 결합력을 보강하는 방법으로 처음 시도되었으며, 이후 북미지역을 중심으로 기존 교량의 보수뿐만 아니라 새로운 교량의 신축에도 적용되고 있다(Ritter, 1990; Ritter *et al.*, 1995; 1996). 최근에는 제재목을 층재로 하여 교량의 상판부재로 사용할 뿐만 아니라 트러스나 단면이 큰 집성재를 응력적층하여 차량용 교량의 상부구조(superstructure)를 구성하는 방식 등으로 다양하게 시도되고 있다(Dagher *et al.*, 2000; 2001a; 2001b; Waker, 2004).

국내에서는 매년 천개 이상의 차량용 교량이 신설되고 있으나, 이 중 주요 구조부가 목재로 된 교량은 찾아보기 힘들다. 이는 한국전쟁 이후 급속한 경제성장 과정에서 건설재료의 선택이 효율성과 경제성에만 초점 맞춰져 왔기 때문으로 판단된다. 근래 들어

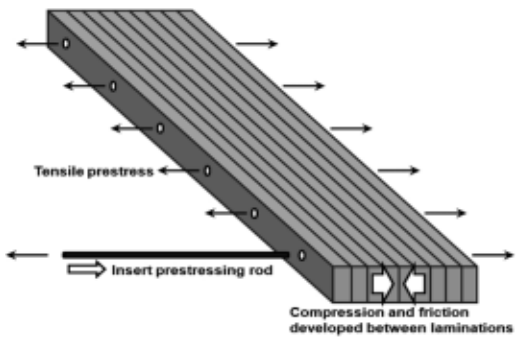


Fig. 1. Schematic diagram of stress-laminated timber.

목재의 친환경성과 우수한 품질이 알려지면서 건축이나 생활용품 등에 목재의 이용이 점차 확대되고 있다. 그러나 교량에서는 보도교의 일부 장식적인 부분에만 목재가 이용되고 있을 뿐 여전히 목재를 주요 구조부로 활용하는 사례는 찾아보기 힘들다. 이는 목재의 구조성능과 내구성에 대한 부정적 인식에 기인하며, 더 근본적으로는 차량의 보급과 이에 따른 도로의 확충과정에서 목재이용이 배제됨에 따른 경험부족에서 그 원인을 찾을 수 있다(김 등, 2010).

이에 국립산림과학원 녹색자원이용부에서는 지난 2009년부터 차량용 목조교량의 국내 도입과 보급을 위하여 '하이브리드 공법을 이용한 목조교량 기술 개발' 과제를 수행하고 있다. 과제 수행과정에서 상대적으로

단면이 작은 부재를 현장에서 조립하는 응력적층 방식이 방부처리 및 운반, 설치 등에 장점을 가지고 있어 경간이 짧고 통행빈도가 낮으면서 현장접근이 불리한 휴양림 진입로나 임도 등에 활용 가능성이 높을 것으로 판단되었다. 따라서 본 논문에서는 응력적층재를 이용한 차량용 교량의 구조설계기술을 개발하기 위한 연구의 일환으로 응력적층재의 거동 특성을 실험실적으로 분석한 결과를 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 연구의 공시수종으로는 국내 입목축적량에 비해 활용가치가 낮게 평가되고 있으며, 비교적 방부처리가 용이한 리기다소나무(Pitch pine, *Pinus rigida* Mill.)를 선정하였다. 경기도 양평군 양동면 금왕리 소재의 국유림에서 흉고직경 27 cm 이상의 입목을 벌채한 후에 길이 3.6 m로 절동 하였으며, 단면크기 50 × 150 mm로 수피가 포함되지 않도록 제재하였다. 제재 후에는 열기건조기를 이용하여 목표함수율 15%로 건조하였는데, 건조 후에 측정한 함수율관 전건비중은 각각 13.3 ± 0.77%와 0.52 ± 0.015로 나타났다.

건조가 완료된 후에 구리 · 아졸화합물계의 수용성 목재방부제인 Cuaz-2를 이용하여 사용환경 H3기준으로 방부처리 하였다(국립산림과학원 고시 2009-07호). H3사용환경은 '야외에서 눈비를 맞는 곳에 사용하는 목재로 내구성이 요구되며 부후 · 흰개미 피해의 우려가 있는 조건'에서 사용되며, Cuaz-2 방부제를 사용할 경우에는 흡수량 80%, 침윤도 1.0 kg/m^3 이상을 요구한다. 따라서 처리가 완료된 후에 방부품질을 평가하였는데 변재부의 경우에는 흡수량 85.5%, 침윤도 1.61 kg/m^{3}로 기준을 만족하였으나, 심재부의 경우에는 방부약제가 거의 주입되지 않은 것으로 확인되었다. 방부처리 후에 양생을 위하여 재건조 하였으며, 충분한 조습기간을 거친 후에 확인한 최종 함수율은 10.9 ± 0.35%로 무처리재에 비해 다소 낮은 것으로 확인되었다.

2.2. 방부처리 리기다소나무의 물성측정

응력적층재가 교량의 상판이나 거더로 사용되는 경우에 기본적으로 휨응력이 작용하며, 프리스트레스를 가하는 과정에서 부재에는 횡방향 압축력이 작용한다. 따라서 응력적층재를 이용한 교량을 구조설계 하기 위해서는 부재의 휨과 횡압축 성능이 가장 기본적인 입력변수로 요구될 것으로 판단하고, 응력적층재 제작에 앞서 횡압축 및 휨실험을 통해 방부처리에 의한 리기다소나무의 각 성능 변화를 확인하였다.

2.2.1. 횡압축 성능 측정

방부처리에 의한 횡압축 강도 변화를 확인하기 위하여 방부처리가 용이한 변재부에서 20 × 20 × 50 mm 크기의 무결점 시편을 처리 전후로 각 10개씩 제작하였다. KS F2206의 '섬유직각방향 압축시험' 방법에 따라 실험을 진행하였고, 압축 비례한도응력과 탄성계수를 동 기준에 따라 계산하여 비교하였다. 측정에는 만능강도시험기(Instron 5585, 200 kN)를 이용하였으며, cross-head의 속도는 분당 0.1 mm를 적용하였다.

2.2.2. 휨탄성계수 측정

휨탄성계수 측정은 응력적층재 제작에 사용될 35개의 제재목을 대상으로 진행하였으며, 특히 응력적층 과정에서 요구되는 제재목 중앙 천공에 의한 영향을 확인하기 위하여 천공 전후를 각각 측정하여 비교하였다. 측정에는 국립산림과학원에서 자체 개발한 휨탄성계수 측정장치((주)건조기술 제작)를 이용하였다. 장치는 제재목의 좁은재면을 대상으로 중앙 집중하중 방식으로 휨하중을 가하며, 5 mm의 중앙점 변위에 대응하는 하중변화를 측정하여 휨탄성계수를 계산하였다. 지간은 3,300 mm (시편길이 3,600 mm)를 적용하였으며, 시편에 측정방향을 표시하여 천공 전후에 동일한 방향에서 측정한 결과가 비교될 수 있도록 하였다.

2.2.3. 휨강도 측정

휨강도 측정 또한 중앙 천공에 의한 영향을 확인하기

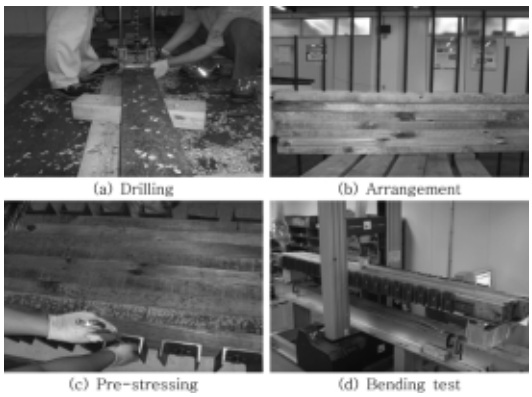


Fig. 2. Manufacturing process of stress-laminated timber.

위하여 진행하였으며, 중앙 천공된 35개의 제재목 중에서 임의로 7개를 선정하여 측정하였다. 동일 제재목에서 천공 전후의 휨강도 비교는 불가능하기 때문에 부재가 파괴된 이후에 파괴모드 관찰을 통하여 중앙 천공의 영향을 확인하였다. 측정에는 만능강도시험기(Instron 5585, 200 kN)를 이용하였으며, 좁은 재면에 중앙 집중하중 방식으로 휨응력을 가하여 파괴시의 하중을 측정하고 파괴모드를 관찰하였다. 지간은 3,300 mm (시편길이 3,600 mm)를 적용하였으며, cross-head의 속도는 분당 10 mm로 하였다.

2.3. 응력적층재 제작

응력적층재 제작을 위해 먼저 총 35개의 제재목을 임의로 선정하고, 각 제재목의 폭 중앙에 150 mm 간격으로 지름 22 mm의 볼트구멍을 총 24개 천공하였다(Fig. 2a). 볼트구멍이 천공된 제재목 중에서 임의로 9개를 선정하여 넓은 재면이 서로 맞닿도록 무작위로 배치하고(Fig. 2b), 지름 17 mm, 길이 500 mm의 전산볼트를 볼트구멍에 삽입하여 프리스트레스를 가하였다. 전산볼트의 양측에는 균일한 압력분포를 유도하기 위하여 목재와 접촉하는 면의 크기가 100 × 150 mm인 5 mm 두께의 'ㄷ'자 형강과 와셔를 넣었으며, 너트를 2중으로 조여 시험과정에서 볼트가 풀리는 것을 방지하고자 하였다(Fig. 2c). 이상과 같은 방법으로 총 3개의 응력적층재를 제작하여 휨거동 특성 분석을 위한 시험편으로 사용하였다.

2.4. 응력적층재 휨성능 평가

2.4.1. 기준 설정

횡방향 프리스트레스에 의해 층재 사이의 하중전달이 완전하게 이루어진다면 이론적으로 응력적층재의 휨탄성계수는 제재목의 좁은 재면 휨탄성계수 평균과 동일할 것으로 판단된다. 따라서 응력적층재의 휨성능 평가에 앞서 사용된 제재목의 평균 휨탄성계수를 바탕으로 가력점이 10 mm 변형되는데 요구되는 하중을 식 (2)와 같이 계산하였다. 식 (2)는 단순보의 중앙 한 점을 가력하는 경우의 휨탄성계수 계산식인 식 (1)로부터 유도하였다(정, 1986). 이후 연구에서 응력적층재의 휨강성은 식 (2)의 계산 값에 대한 실험을 통해 측정한 값의 비율로 제시하였다.

$$E = \frac{1}{4} \times \frac{PL^3}{\triangle bh^3} \quad (1)$$

$$P_{10} = \frac{4 \times 10 \times bh^3 E_e}{L^3} \quad (2)$$

여기서, $\triangle$ = 응력적층재의 중앙부 처짐량(mm)
b = 응력적층재의 폭(층재 두께의 합, mm)
h = 응력적층재의 두께(층재 폭의 평균, mm)
L = 휨시험의 지간(= 3,300 mm)
E_e = 층재의 평균 좁은 재면 휨탄성계수(N/mm^2)
P_{10} = 응력적층재 중앙점의 10 mm 휨변형에 요구되는 하중(N)을 각각 의미한다.

2.4.2. 휨강성 측정

휨강성 측정은 응력적층재의 넓은 재면이 하중방향과 수직하도록 지간 3,300 mm 단순보 형태로 지점을 설치한 상태에서 재면의 정중앙에 점하중(하중면적 50 × 50 mm)을 가하였으며, cross-head의 10 mm 변위에 대응하는 하중(N)을 측정하여 기록하였다. 측정에는 만능강도시험기(Instron 5585, 200 kN)를 이용하였으며, cross-head의 속도는 분당 2 mm로 하였다(Fig. 2d).

Table 1. Effects of Cuaz-2 preservative treatment on compression properties in perpendicular to grain direction of pitch pine

	Moisture contents	Apparent density	Yield strength			Compressive young's modulus	
	%	g/cm^3	N/mm^2	kg/cm^2	%	N/mm^2	%
Control	13.3	0.56	3.05	31.1	100	138	100
Cuaz-2	10.9	0.61	4.75	48.5	156	168	122

횡방향 프리스트레스 압체력에 따른 휨강성 변화를 확인하기 위하여 압체력을 0에서 10.5 kg/cm^{2}사이에서 변화시키면서 휨강성을 측정하였다. 정확한 압체력을 가하기 위하여 디지털 토크렌치(Tohnichi CEN90N2, 90 Nm)를 이용하였으며, 응력적층재의 제작에 앞서 별도의 로드셀(Instech SM-10, 20T)을 이용하여 볼트에 가해지는 토크와 프리스트레스 사이의 관계를 측정하여 적용하였다.

볼트간격에 따른 휨강성 변화를 확인하기 위하여 동일한 응력적층재를 대상으로 중간의 볼트를 하나씩 제거하는 방법으로 볼트 간격을 150, 300, 450, 600 mm로 변화시키면서 휨강성을 측정하여 비교하였다. 시험장치에 설치 가능한 부재 폭의 제한(약 500 mm)으로 인하여 600 mm를 넘는 볼트 간격은 의미가 적다고 판단하고 600 mm 이하의 볼트간격을 대상으로 측정을 진행하였다. 미국의 도로교설계기준인 AASHTO (2008)에서는 응력적층재에 요구되는 최소 압체력을 40 psi 정하고, 시간경과에 따른 압체력 완화를 고려하여 최소 압체력의 2.5배인 100 psi의 프리스트레스 압체력을 초기에 가하도록 제안하고 있다. 따라서 응력적층재의 압체력을 3.0 kg/cm^2 (= 43 psi)과 7.5 kg/cm^2 (= 107 psi)의 두 가지 조건으로 유지시킨 상태에서 볼트간격에 따른 휨강성 변화를 비교하였다.

층재개수에 따른 휨강성 변화를 확인하기 위하여 동일한 응력적층재를 대상으로 볼트간격은 300 mm, 압체력은 3.0과 7.5 kg/cm^{2}의 두 가지로 유지시킨 상태에서, 최외층의 양 층재를 하나씩 제거하면서 중앙층재 하나만 남을 때까지 휨강성 측정을 진행하였다. 층재를 제거하는 경우에 층재의 평균 좁은재면 휨탄성계수가 변화되기 때문에 남은 층재를 대상으로 매회 응력적층재의 기준 휨강성(식 (1))을 다시 계산하였다.

제재목의 평각가공 여부가 응력적층재의 휨강성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 세 개의 응력적층재 중에서 하나를 선택하여 층재를 모두 평각가공한 후에 압체력에 따른 휨강성 변화를 다시 측정하였으며, 그 결과를 평각가공 전과 비교하였다. 평각가공 두께는 평균 6.3 mm (49.2 mm → 42.9 mm)로 확인되었으며, 평각 후에 각 층재의 두께와 좁은재면 휨탄성계수를 다시 측정하여 기준 휨강성(식 (1))을 다시 계산하였다.

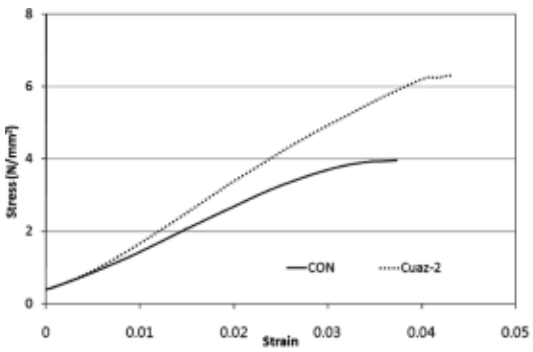


Fig. 3. Stress-strain curves of compression in perpendicular to grain direction of pitch pine.

3. 결과 및 고찰

3.1. 방부처리 리기다소나무 물성

3.1.1. 횡압축 성능

방부처리 유무에 따른 리기다소나무 횡압축 비례한도 응력 및 탄성계수 측정결과의 평균과 각 경우의 대표적인 응력-변형률 곡선을 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다. 실제 응력적층재 제작에 사용된 프리스트레스 압체력과의 비교를 쉽게 하기 위하여 단위를 kg/cm^{2}로 환산한 결과를 표에 함께 나타내었다.

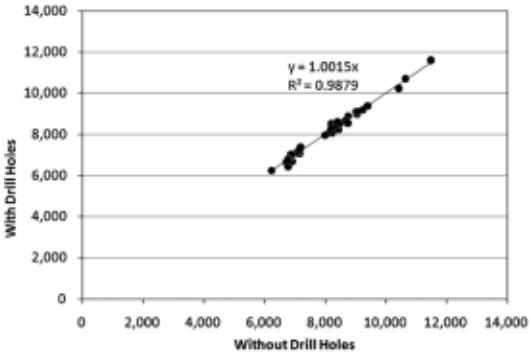


Fig. 4. Effect of bolt hole on the bending MOE (N/mm^2) of preservative treated pitch pine lumber.

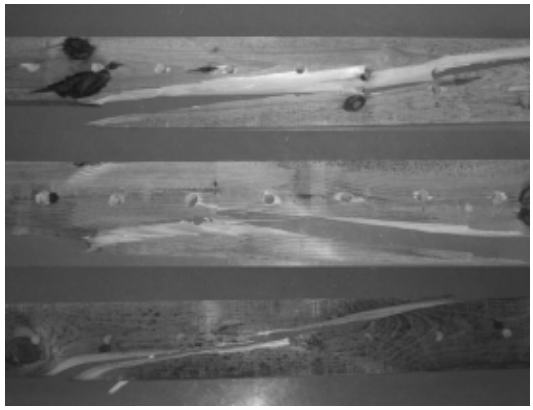


Fig. 5. Bending failure examples of bored pitch pine lumbers.

방부 처리된 제재목의 횡압축 성능이 무처리재에 비하여 크게 증가하였는데, 이는 방부처리에 따른 목재의 흡습성 저하로 인한 연성감소와 함께 처리과정에서 구리 등의 금속성분이 목재의 세포 내강에 침투됨에 따른 밀도증가에 기인하는 것으로 생각된다. Table 1에는 방부처리 유무에 따른 함수율과 겉보기밀도 측정결과를 함께 나타내었는데, 방부처리에 의하여 평형함수율이 2% 이상 감소하였음에도 불구하고 겉보기밀도가 10% 이상 증가한 것을 알 수 있다. 이물질의 세포내강 침투에 의한 영향은 상대적으로 공극이 차지하는 비중이 높은 횡방향(섬유직각방향)에서 더 크게 나타날 것으로 생각된다.

방부처리하지 않은 리기다소나무의 최소 횡압축 비례한도 응력은 20.1 kg/cm^2였으며, 방부처리한 경우에는 43.3 kg/cm^2으로 무처리에 비해 두 배 이상 높게 나타났다. 본 연구에서는 이상의 결과와 하중지속시간에 따른 영향을 함께 고려하여 응력적층재의 프리스트레스 압체력을 최소 비례한도 응력의 약 50% (10.5 kg/cm^2)까지만 적용하였다.

3.1.2. 휨탄성계수

35개의 방부 처리된 제재목을 대상으로 볼트구멍 천공 전후에 측정한 휨탄성계수를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 평균 휨탄성계수는 약 8,200 N/mm^2으로 이전 연구에서 동일 수종의 무처리 제재목을 대상으로 측정한 결과(평균 8,400~8,600 N/mm^2)와 거의 유사하게 나타났다(김 등, 2007). 또한 천공 전후를 비교하였을 때 Y = X의 회귀직선에 대하여 R^2값이 0.99로 거의 같은 값을 나타냄에 따라, 중앙천공이 제재목의 휨탄성계수에 미치는 영향은 매우 경미한 것으로 확인되었다.

3.1.3. 휨강도

중앙천공된 7개 제재목을 대상으로 휨파괴실험을 실시하고 파괴모드를 관찰한 결과, 대부분의 파괴가 제재목의 하부(인장측)에 위치하는 옹이에서 유도되었으며 볼트구멍이 제재목의 휨성능에 미치는 영향은 경미한 것으로 판단되었다(Fig. 5). 7개 제재목의 평균 휨강도는 33.9 N/mm^2이었다.

3.2. 응력적층재 휨강성

3.2.1. 층재 휨강성 및 응력적층재 기준

응력적층재 제작에 사용된 모든 층재의 휨강성과 이를 바탕으로 휨응력 아래에서 응력적층재의 중앙이 10 mm 변형하는데 요구되는 하중을 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다. 계산된 하중은 응력적층재의 휨강성을 제시하기 위한 기준값으로 사용되었다.

3.2.2. 압체력에 따른 휨강성 변화

세 개의 응력적층재를 대상으로 한 프리스트레스

Table 2. Bending MOEs of each lamina and calculated loads to deflect 10 mm at the center of each stress-laminated timber

	Layer	SL-1	SL-2	SL-3
Bending MOE (N/mm^2)	1	8,550	9,115	6,248
	2	9,385	7,099	6,674
	3	8,997	11,615	7,081
	4	8,223	8,424	6,809
	5	7,274	8,322	8,551
	6	6,689	8,614	7,380
	7	7,021	8,200	6,755
	8	6,457	10,247	8,095
	9	8,897	10,704	9,196
	Average	7,944	9,149	7,421
Calculated load to deflect 10 mm at the center (N)		12,560	14,630	11,740

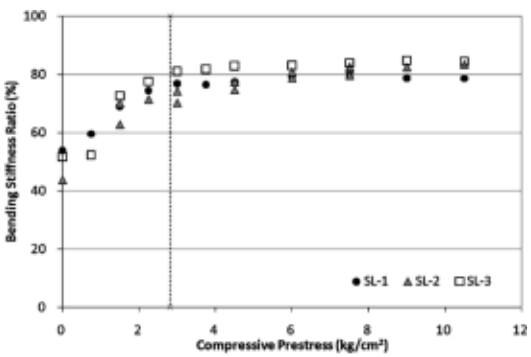
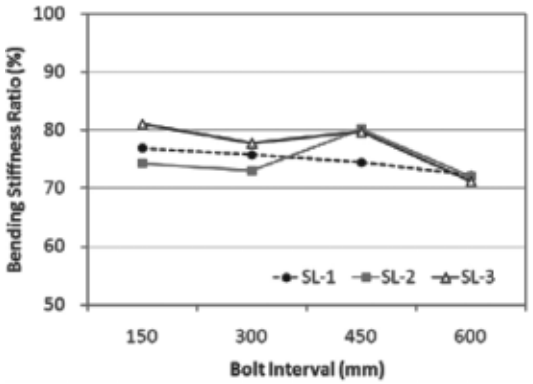


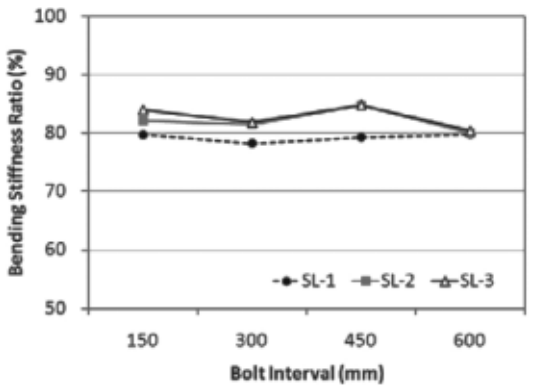
Fig. 6. Bending stiffness of stress-laminated timber by prestress level variation.

압체력 변화에 따른 휨강성 측정결과를 Fig. 6에 나타내었다. 압체력 3.0 kg/cm^2 이하에서는 압체력이 증가함에 따라 휨강성이 직선적으로 증가하여 기준강성의 약 80%까지 도달하나, 이후에는 압체력이 증가하여도 추가적인 강성의 증가 없이 비교적 균일한 강성을 나타내었다. 이를 통해 AASHTO (2008)에서 제시하고 있는 최소 압체력 기준인 40 psi (= 2.82 kg/cm^2, Fig. 6의 점선)의 근거를 확인할 수 있었다.

3.2.3. 볼트간격에 따른 휨강성 변화



(a) Prestress level = 30 kg/cm^2



(b) Prestress level = 7.5 kg/cm^2

Fig. 7. Bending stiffness of stress-laminated timber by bolt intervals.

프리스트레스 볼트 간격을 150~600 mm 범위에서 150 mm 간격으로 변화시키면서 응력적층재의 휨강성을 측정한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 3.0 kg/cm^2의 압체력을 적용한 경우, 볼트간격이 증가함에 따라 휨강성이 다소 감소하여 600 mm 간격에서는 약 72%의 휨강성을 나타내었다. 반면에 7.5 kg/cm^2의 압체력을 적용한 경우에는 약 80%의 수준에서 비교적 균일한 휨강성을 나타내었다.

본 연구에서 압체력을 적용하는 방식이 디지털 토크렌치를 이용하여 토크값을 육안으로 확인하면서 수동으로 압체하는 방식이기 때문에 다소의 오차가 발생하며, 이러한 오차는 항상 목표한 압체력보다 높은 압체력이 적용되는 방식으로 나타난다. 볼트개수가 증가할수록 오차가 중복되어 증가하게 되며, 작은

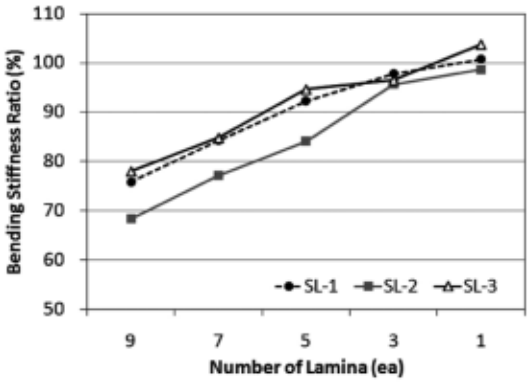
압체력 조건에서는 오차가 차지하는 비중이 커질 것으로 판단된다. 따라서 3.0 kg/cm^{2}의 결과에서 볼트간격 증가에 따른 휨강성 저하는 오차감소에 기인하는 것으로 판단되며, 볼트간격 증가에 따라 시험체 사이의 편차가 감소하는 결과를 통해서는 이러한 사실의 확인이 가능하다. 따라서 작업오차에 의한 영향을 제외시키면 볼트간격 600 mm 이내의 범위에서 볼트간격 증가에 의한 응력적층보의 휨강성 저하는 경미한 것으로 판단되었다.

3.2.2.절의 압체력에 따른 휨강성 측정결과(Fig. 6)에서와 달리 3.0 kg/cm^{2}의 압체력에서 휨강성이 72% 수준으로 안정화되는 80%에 다소 못 미치게 나타났는데, 이는 압체력에 따른 휨강성 변화를 측정하는 과정에서 150 mm의 볼트간격이 적용됨에 따라 작업오차에 의한 영향이 과도하게 포함되었기 때문으로 생각된다. 따라서 응력적층재의 휨성능을 충분히 확보하기 위해서는 현재 AASHTO (2008)에서 제안하는 40 psi (= 2.82 kg/cm^2) 보다 높은 최소 압체력 조건을 적용하는 것이 바람직할 것으로 생각되었다.

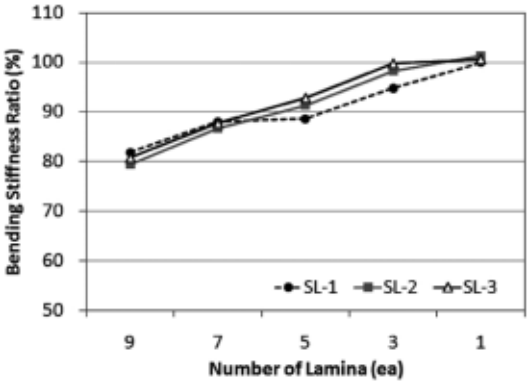
3.2.4. 층재개수에 따른 휨강성 변화

응력적층재의 층재 개수(응력적층재의 폭)를 9~1개 범위에서 2개 간격으로 감소시키면서 휨강성을 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 프리스트레스 압체력에 상관없이 두 경우 모두 층재의 개수가 감소함에 따라 휨감성이 거의 직선적으로 증가하였다. 층재의 개수가 9를 초과하여 증가하는 경우에도 계속 직선적인 관계를 나타내는지 여부에 대한 확인이 요구되었으나, 본 연구에서는 실험장치의 제약으로 인하여 측정에서 제외하였다. 추후 별도의 실험장치를 설계하거나 현장실험 등을 통하여 확인되어야 하며, 이러한 결과는 차량용 교량을 설계하는데 있어서 부재의 유효폭을 계산하는 중요한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

중앙에 하나의 층재만을 남겨두고 측정한 경우, 예상했던 바와 같이 응력적층재 제작 전에 측정한 휨강성과 거의 동일한 값을 나타내었다. 이는 지금까지 동일한 부재를 대상으로 반복적인 압체와 휨실험을 수행하였음에도 불구하고 제재목에 별다른 손상이



(a) Prestress level = 30 kg/cm^2



(b) Prestress level = 7.5 kg/cm^2

Fig. 8. Bending stiffness of stress-laminated timber by number of lamina.

발생되지 않았으며, 본 연구에서 적용한 프리스트레스 압체력이 목재의 탄성범위 내에 존재함을 의미하는 것으로 해석할 수 있다.

3.2.5. 평삭가공이 휨강성에 미치는 영향

평삭가공이 응력적층재의 휨강성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 평삭가공 전후에 측정한 프리스트레스 압체력에 따른 휨강성 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. 층재를 평삭가공한 경우(Fig. 9의 planed)에 1.0 kg/cm^2 이하의 압체력에서는 층재 사이의 미끄러짐으로 인하여 응력적층재의 휨강성이 낮게 나타났으나, 압체력 1.5 kg/cm^2 이상에서는 약 85% 정도로 평삭가공하지 않은 경우(Fig. 9의 sawn)에 비해

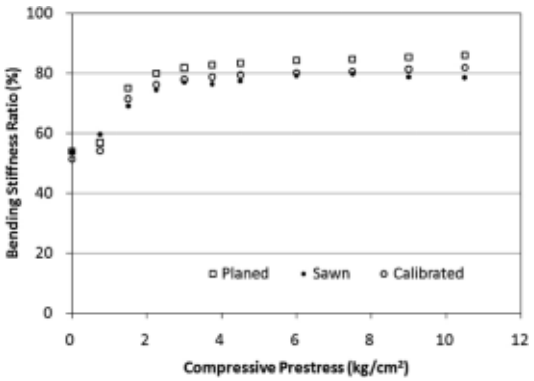


Fig. 9. Effect of lamina planing on bending stiffness of stress-laminated timber.

평균 8%정도 높은 휨강성을 나타내었다.

그러나 3.2.4.절의 결과를 통해 부재의 폭(층재 개수)이 감소함에 따라 휨강성이 증가함이 확인되었으며, 이를 바탕으로 평삭가공을 통해 감소된 부재의 폭(약 56 mm, 13%)을 고려하여 휨강도 증가율을 계산한 결과 약 5%로 예상되었다. 따라서 평삭가공에 의한 휨강도 향상 효과의 대부분은 부재의 폭 감소에 기인하며, 층재 사이의 균일한 접촉면 확보를 통한 효과는 약 2~3% 정도로 매우 경미한 것으로 판단되었다. 평삭가공 후에 측정한 결과에서 폭 감소에 의한 효과를 보정한 결과를 Fig. 9 (calibrated)에 함께 나타내었다. 평삭가공에 따른 추가적인 작업시간과 경비 소요, 수율 감소 등을 고려할 때 응력적층재 제작에 있어서 층재의 평삭가공은 불필요하다고 결론내렸다.

4. 결 론

국내 차량용 교량에 활용 가능성이 높을 것으로 예산되는 방부처리 리기다소나무 응력적층재의 거동 특성을 분석하기 위하여 수행한 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 방부처리 리기다소나무의 횡압축 성능은 무처리재에 비해 높으며, 성능이 낮은 무처리재의 최소 횡압축 비례한도 응력을 기준으로 10.5 kg/cm^2 이하의 횡방향 프리스트레스 압체력을 적용하였다.

2) 응력적층재 제작과정에서 요구되는 중앙천공이 제재목의 휨성능에 미치는 영향은 매우 경미한 것으로 확인되어, 중앙천공에 의한 부재 설계기준강도의 조정은 불필요하였다.

3) 3.0 kg/cm^2 이하의 프리스트레스 압체력에서는 압체력 증가에 따라 휨강성이 증가하였으나, 3.0 kg/cm^2 이상의 압체력에서는 휨강성의 변화가 거의 나타나지 않았다. 그러나 이 결과에는 작업오차에 의한 영향이 다소 포함되어 있으며, 따라서 응력적층재의 휨성능을 충분히 확보하기 위해서는 3.0 kg/cm^2 보다 높은 최소 압체력 조건을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

4) 볼트간격(600 mm 이하)이 응력적층재의 휨강성에 미치는 영향이 경미하였으며, 층재개수(9개 이하)는 휨강성과 반비례 관계를 나타내었다.

5) 응력적층재에 사용되는 층재의 평삭가공은 휨강성을 다소 향상시키지만, 그 효과가 매우 경미하여 불필요한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 국립산림과학원. 2009. 목재의 방부 · 방충처리 기준. 국립산림과학원 고시 2009-07호.
2. 김광모, 박주생, 조성택, 김운섭, 심국보, 심상로, 여환명. 2007. 리기다소나무의 구조용 집성재 이용기술 개발 및 성능 향상. 국립산림과학원 연구보고 07-07.
3. 김광모, 심상로, 심국보, 한은숙. 2010. 국내 목조교량 사례 연구 (파주 임진각 자유의 다리). 2010 한국목재공학회 학술발표대회 요지집 189~190.
4. 정희석. 1986. 목재이학. 서울대학교 출판부.
5. AASHTO. 2008. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th edition, 2008 Interim Revisions, Section 9: Decks and Deck System. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
6. Dagher, H. J., F. M. Altimore, V. Caccese, and M. A. Ritter. 2000. Field performance of timber bridges-18. Byron stress-laminated truss bridge. Res. Pap. FPL-RP-588. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products laboratory 20p.
7. Dagher, H. J., F. M. Altimore, V. Caccese, and M. A. Ritter. 2001a. Field performance of timber bridges-19. North Yarmouth stress-laminated truss

bridge. Res. Pap. FPL-RP-590. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products laboratory 19p.

8. Dagher, H. J., F. M. Altimore, V. Caccese, M. A. Ritter, and R. Hebert. 2001b. Field performance of timber bridges-20. Gray stress-laminated deck bridge. Res. Pap. FPL-RP-592. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products laboratory 15p.
9. Ritter, M. A. 1990. Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Engineering Staff, EM 7700-8.
10. Ritter, M. A., J. P. Wacker, and S. R. Duwadi. 1995. Field performance of timber bridges on low-volume roads. In: Proceedings of 6th international conference on low volume road; 1995 June 25~29; Minneapolis, M. N. Washington, D.C.: National Academy Press Vol. 2: 347~357.
11. Ritter, M. A., D. Paula, and L. Hilbrich. 1996. Recommended construction practices for stress-laminated wood bridge decks. In: Gopu, Bijaya K. A., ed. Proceedings of the international wood engineering conference; 1996 October 28-31; New Orleans LA. Baton Rouge, LA: Louisiana State University; Vol. 1: 237~344.
12. Waker, J. P. 2004. Field Performance of Stress-Laminated Highway Bridges Constructed with Glued Laminated Timber. In: American Society of Civil Engineers: Proceedings of the ASCE Structures Congress, May 2004, Nashville, Tennessee.