

소나무재의 효율적 이용을 위한 고부가 가치화 방안(I)^{1*}

-소나무 소경재를 이용한 적층재의 휨 강도 특성-

홍순일², 김남훈²

Effective Utilization of Pine Wood for the Manufacturing of High Valued Product(I)^{1*}

-Bending Strength Properties of Laminated lumber Produced from Small Lumber of *Pinus densiflora*-

Soon-Il Hong² and Nam-Hun Kim²

요 약

본 研究에서는 소나무 소경재를 이용한 적층재의 強度 및 構造材로서의 가능성을 검토하였다. 적층재의 조합은 최외각층에 良質의 라미나를 배치하고, 低質의 라미나를 내층에 配置하여 강도 향상을 꾀하였다. 소경재로부터 제작된 적층재와 비교하기 위하여 같은 단면의 素材도 휨강도 실험을 실시하였다. 적층재에 사용된 라미나의 영계수를 이용한 적층재의 영계수 추정은 실측치가 추정치보다 약간 높은 傾向을 보였다. 제작된 적층재의 휨강도는 673 kgf/cm², 영계수 98,200 kgf/cm²였다. 低質 소경재의 라미나의 적절한 조합에 의해 적층재는 같은 단면의 素材에 버금가는 強度를 나타냈다.

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the strength and technical feasibility of laminated lumber from small-diametered *Pinus densiflora*. Small lumber is currently not used for structural laminated lumber construction, but its properties may be feasible. Laminated beam was designed to improve the bending strength(MOR) and modulus of elasticity(MOE). Twenty specimens were compared with full size beam performance to that solid beam lumber. The MOE values were predicted for each beam from laminae. The results showed that actual beam MOE values exceeded slightly the predicted values. Based on the evaluation and analysis of thirty six *Pinus densiflora* laminated beams, a bending strength of 673 kgf/cm², and MOE of 98,200 kgf/cm² were obtained. It was suggested that this small lumber may be a candidate for structural laminated beam construction to provide the proper combinations of laminae.

Key words : laminated lumber, combinations of laminae

¹ 접수 1999년 8월 3일 Received on August 3, 1999.

² 강원대학교 산림과학대학 임산공학과 Dept. of Wood Science and Technology, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

* 본 연구는 1997년도 학술진흥재단 대학부실연구소 과제 연구비에 의하여 수행되었음.

緒 論

積層材의 특성은 적층수가 적을수록 변이가 크고 强度的 신뢰성 및 치수 안정성이 저하되는 경향이 있다. 건조된 라미나를 2매 또는 3매 적층 시킨 적층재를 구조용 적층재의 범주에 포함시키고 있지 않다. 이런 적층재의 이용은 종래 거의 생각치 않았다. 그러나 건조된 構造材에 대한 수요가 높아지고 製材木보다 乾燥가 용이하고, 치수안정성이 높은 적층재의 이점으로 실용화의 요구가 커질 것으로 예상된다. 적층 가공의 공정에서는 良質의 라미나를 外層에 배치하고, 低質의 라미나를 內層으로 배치하는 것이 일반적이다. 이것은 수평적층 (flatwise) 방향에 휨 하중을 받는 경우 강도적으로 유리한 물리적 의미가 있다. 이와 같이 라미나의 조합을 고려해야하는 이유는 단순히 강도적인 유리함뿐만 아니라 신뢰성 향상의 의미에 있어서도 대단히 중요하다^{1,2,3)}. 선별된 라미나를 적절히 배치하는 것이 제품의 변이를 감소시키기 때문이다. 이러한 이유로 급후 적층재의 실용화의 필요성이 증대되어지고 질의 향상이 요구되는 동시에 경비절감의 필요성 증대되리라 생각된다. 현재 국산 원목 공급은 약 13% (主伐, 間伐) 이며 이것들은 주로 間伐 작업으로 얻어지는 小徑材로 國産材 총생산량의 71%를 차지하며 대부분의 용도가 펄프재료, 갱목, 표고 골목 등에 국한되어 低次加工의 이용이 주체였다. 이러한 低質材의 유효활용을 위해 본 연구에서는 間伐작업으로 출재량이 증가될 것으로 예상되는 소나무 간벌 소경재를 이용하여 採材된 製材板 (라미나)을 중, 횡접합 없이 적층시켜 각 제재판의 결점 분산에 의한 적층 성능을 검토하였다.

각각의 라미나의 강도적 특성 과 이에 영향을 미치는 인자 (영계수, 집중 절경비)들로 라미나를 4등급으로 선별후 라미나의 적절한 배치로 적층재를 제조하여 강도 특성을 검토하였다.

材料 및 方法

2.1 라미나 선별

실험에 사용된 間伐 소경재 소나무는 함수율

30%까지는 천연건조 시킨후 인공 건조시켜 최종 함수율 11-12%로 하였다. 라미나는 폭 4.5cm, 두께 2cm, 길이 150cm 의 칫수로 마무리 가공된 것을 사용하였다. 본 실험에 앞서 행하여진 라미나의 휨 강도 시험에서 氣乾 比重, 영계수, 섬유경사각, 집중절경비의 여러 因子가 휨 강도에 영향을 미치는 인자이나 특히 집중절경비가 높은 相關關係를 나타냈으므로 집중 절경비에 따른 등급 구분의 유효성을 인정하여, 본 실험에 사용된 라미나는 정적 영계수가 80,000 kgf/cm² 이상으로, 라미나를 길이 방향으로 3등분하여 중앙부분의 15cm 구간내의 집중 절경비에 의한 육안적 등급구분에 의해 Table 1과 같이 4등급으로 구분하여 공시재료로 사용하였다.

Table 1. Grades of *Pinus densiflora* laminae.

Grade	Knot ratio (K)	MOEb (kgf/cm ²)
1	K < 1/8	MOE > 80,000
2	K < 1/8	MOE > 80,000
3	K < 1/8	MOE > 80,000
4	K < 1/8	MOE > 80,000

2.2 라미나 조합 및 적층재 製造

적층재는 Fig. 1과 같이 육안 및 기계적 등급 구분으로 선별된 1-4등급의 라미나를 3층, 5층으로 중, 횡접합 가공을 행하지 않고, 제재된 라미나 만으로 조합하였다. 적층재 제조에 사용된 접착제는 오공본드 제품인 목재집성용 2액형 합성수지 MPU-500/HH-50을 사용, 1면 도포로 도포량 250g/m², 압제압력 10kgf/cm² 로 적층 접착하여 24시간 압제를 계속하였다.

2.3 적층재의 강도 시험

강도 시험은 적층재 및 적층재와 같은 단면의 소재를 스펠 150cm, 하중점간 거리 2등분점 3점 하중에 의해 휨강도 시험을 행하였으며 변형은 스펠 중앙부의 변형을 측정하였다. 하중-중앙부분 변형 곡선으로부터 영계수, 휨 강도를 구하여 서로를 비교하였다.

結果 및 考察

3.1 등급 구분에 의한 조합 효과

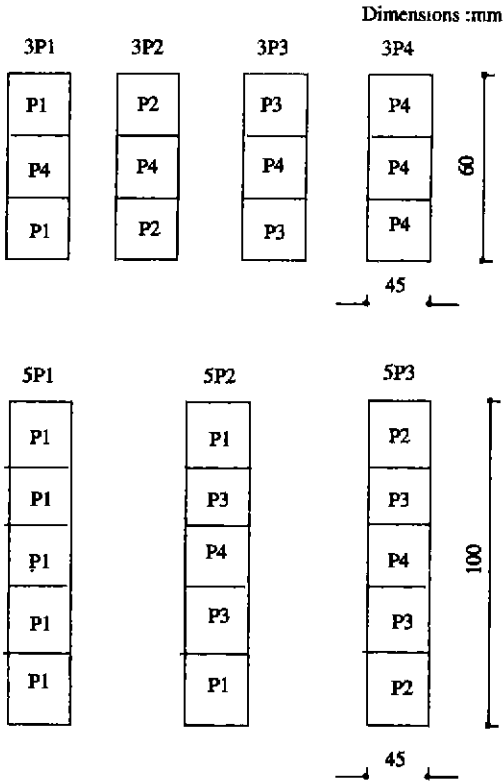


Fig. 1. Types of bending specimens and the cross-sectional composition of laminae. The digit number after P represents the grade of laminae.

양질의 라미나를 外層에 配置하고, 低質의 라미나를 內層에 配置하여 강도 향상을 꾀하였다. 3층 적층재의 경우 5층 적층재에 비하여 소성 영역에서도 급격한 곡선을 그리며 최대하중에 달하여 파괴되어 비례한계점이 명확치 않았다. Fig. 2와 같은 라미나 조합과 단면계수의 증가에 따른 최대 휨 모멘트의 증가는 3층 적층재의 경우 적층전 라미나와 비교하면 약 7배, 5층 적층재의 경우 16배 이상 최대 휨 모멘트가 증가되었으며, 2층 증가로 3층 적층재보다 2배 이상 휨 모멘트가 증가됨을 보여주고 있다. 단면 치수 및 라미나의 조합에 따른 적층재 강도의 차이가 명확히 나타나고 있다. 低質 소경재의 라미나의 적절한 조합에 의해 적층재는 동일 단면의 素材에 버금가는 強度를 나타냈다.

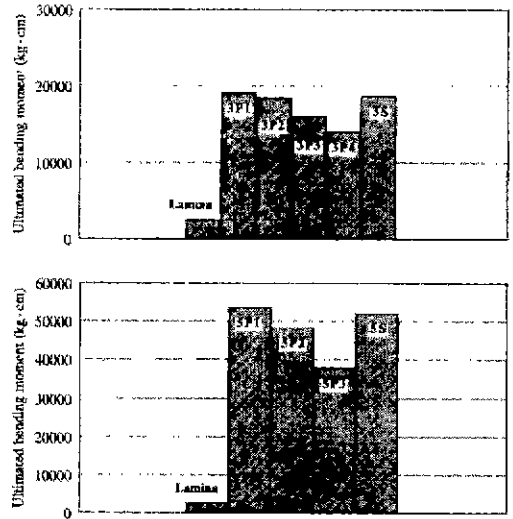


Fig. 2. Ultimated bending moment for laminated beam.

3.2 적층재의 强度 및 剛性

라미나, 적층재 및 소재의 휨 강도 시험의 결과는 Table 2와 같다. 휨 강도와 영계수가 정규분포 한다고 假定하면 적층재의 표준편차가 감소하여 5% 下限値가 상승함을 알 수 있고 변이계수도 2배 이상 감소되어 신뢰성이 향상됨을 알 수 있다. 휨 강도는 中徑材 素材의 5% 下限値가 가장 높은 값을 나타내었다. 적층수가 증가함에 따라 변이계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 휨강도 변이계수는 라미나의 경우는 34%이나 적층재의 경우는 17-19%

Table 2. Bending test for lamina, laminated beam and solid wood.

Property	Lamina	3-Lam	5-Lam	Solid wood
Sample size	81	21	15	20
Moisture content(%)	12	12	12	12
Normal distribution				
Average MOR (kgf/cm)	575	555	608	626
COV of MOR (%)	34	19	17	13
5th percentile (75% tolerance limit)	233	401	436	504
Average MOE (kgf/cm)	92800	96700	96600	93000
COV of MOE (%)	28	24	26	22

COV : coefficient of variation

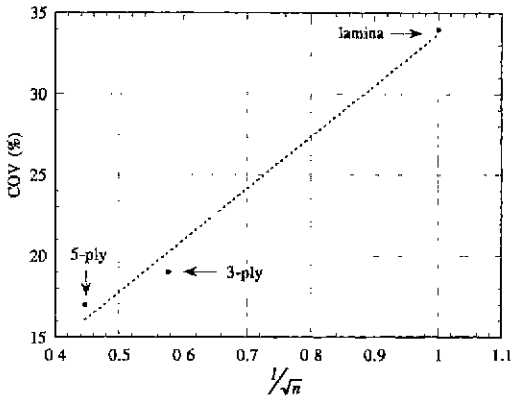


Fig. 3. Relationship between COV and $1/\sqrt{n}$
 n : n -ply laminated beam.

로 명확한 적층 효과가 나타났다. 이 변이계수와 적층수의 평방근의 역수와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 3개의 변이계수는 거의 직선상에 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 n 층의 적층재의 변이계수는 원재료의 $1/\sqrt{n}$ 가 된다는 적층효과의 확률이론⁴⁾이 성립됨을 확인할 수 있었다. 적층재 부재의 구조설계를 위한 장기허용 응력도는⁵⁾

$$f_b = Fb - 30 \times \frac{3}{4} \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \dots\dots\dots (1)$$

의 유도식에 의해 계산하였다.

$Fb-30$ 은 두께 30cm 의 적층재의 휨 강도 평균치, $3/4$ 은 변동계수 15%, 危險率 5% 경우의 統計的 下限, $2/3$ 은 비례한도 계수, $1/2$ 은 長期荷重 換算 係數이다. 특히 휨강도는 두께에 의해 변화하기 때문에 두께 30cm 이외의 휨강도는 치수 조정계수 $C_f = (\frac{30}{h})^k$ 를 이용하여 조정했다. Table 3은 3층, 5층 적층재의 휨 강도를 이 조정계수로 환산하여 구해진 정규분포의 결과를 나타내고 있다. 5%의 통계적 하한치를 구하여 비례한도계수와 장기하중 환산계수를 곱하여 계산된 소나무 소경재 적층재의 장기허용 응력도는 147 kgf/cm², 소재는 표2의 5% 하한치 값을 強度로 이용하면 168 kgf/cm²임을 알 수 있다. 이 결과를 보면 용이 등의 결점이 많아 집성재와 같이 중점합을 하면 상당 부분을 제거하여 경제적 가치가 저하되는 소나무 소경재를 중점합 없이 적절한 라미나의 조합에 의해 중경재 이상의 素材에 버금가는

Table 3. Adjusted laminated beam bending strength.

Property	Result
Sample size	36
Average MOR (kgf/cm ²)	673
COV of MOR (%)	20
5th percentile (75% tolerance limit)	439

Data adjusted to volume effect factor (C_f)
 $C_f = (30/h)^{1/3}$

강도를 지닌 제품을 디자인할 수 있음을 확인할 수 있다. 용이가 많고 低質材인 소경재 일지라도 적층에 의해 결점 분산이 이루어진다면 영계수 및 파괴 힘계수의 5% 下限値가 향상되는 것을 확인하였다.

3.3 치수 효과

최대 휨 모멘트와 적층재 체적과의 치수 효과의 관계를 다음 실험식으로 나타내면

$$C_v = \frac{M}{M_0} = \left[\frac{V}{V_0} \right]^k \dots\dots\dots (2)$$

C_v = volume effect factor

M_0 = ultimate bending moment of standard volume (2×4.5×150 cm)

M = ultimate bending moment of actual beam

V_0 = standard volume

V = volume of actual beam

k = exponent that represent of volume effect

k 는 치수 효과를 나타내는 정수이다. 이 값이 클수록 좌변의 값이 크게되고 치수 효과가 큼을 알 수 있다. 식의 양변에 대수를 취하면

$$\log\left(\frac{M}{M_0}\right) = k \cdot \log\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

따라서 y 축에 $\log M$, x 축에 $\log(\frac{V}{V_0})$ 를 취해 측정치를 최소자승법에 의해 회귀직선을 구하면 직선의 기울기가 k 가 된다. 본 실험의 사용된 적층재 및 素材의 측정치를 회귀직선으로 해석한 것이 그림4 이다 회귀식에서 구해진 k 의 값은 1.793, 1.869로 (2)식에 대입하여 나타낸 것이 Fig. 5이다.

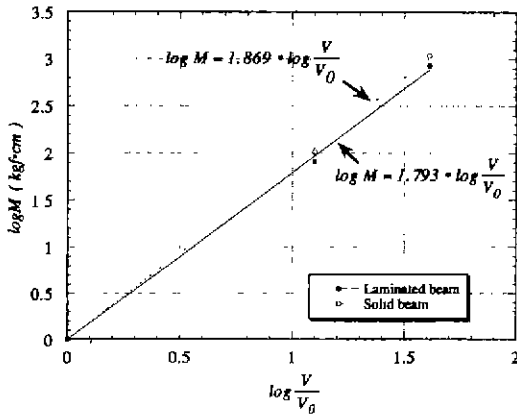


Fig. 4. Relationship between volume and ultimate bending moment.

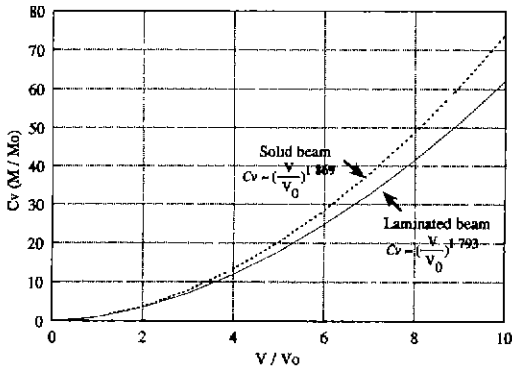


Fig. 5. Variation in ultimate bending moment with beam volume showing a line approximating an exponent of 1.793 and 1.869 for Equation (2).

3.4 적층재의 剛性

적층재의 강도를 예측할 수 있는 인자로서 여러 가지 방법들이 제안되고있지만^{6,7)}, 그 대표적인 것이 휨 영계수를 사용하는 것이다. 實人材의 강도 실험의 결과 용이 등 결점이 많은 재는 그렇지 않은 재에 비교하여 낮은 영계수

Table 4. Actual and predicted MOE values based on actual lamina properties.

Lamination	Actual MOE (A) kgf/cm ²	Predicted MOE (P) kgf/cm ²	Ratio of A/P
3 - Lam	98200	95400	1.03
5 - Lam	98700	91100	1.08

가 얻어진다. 보의 제작에 사용된 라미나의 영계수 값을 이용한 적층재 보의 영계수 추정은 아래식⁷⁾을 이용하여 추정하였다. 실측치와 계산치의 비교를 Table 4에 나타냈다. 추정치와 실측치가 잘 일치됨을 확인할 수 있었다.

$$E = 0.95 \frac{\sum_{i=1}^n E_i I_i}{I} \dots\dots\dots (3)$$

E = modulus of elasticity(MOE) of laminated beam

E_i = MOE of the ith lamination of a laminated beam, based on the span flatwise bending MOE of the lamina used to manufacture the laminations

I = moment of inertia of the beam

I_i = moment of inertia of the ith lamination in relation to the cenroidal axis of the transformed section

이 식을 이용하여 강도 강성이 다른 라미나를 합리적으로 배치하면 완성품에 요구되는 강성의 설계를 제작 단계에서 설계가 가능하다.

結 論

적층재의 영계수는 적층재 제작에 사용된 라미나의 영계수를 이용하여 추정할 수 있고, 적층재와 같은 단면의 素材는 적층재보다 다소 높은 휨 강도값을 나타내었으나 좋은 등급의 라미나를 용력이 집중되는 외각부에 사용했을 경우는 소재와 거의 같은 값을 나타내었다. 이결과를 보면 용이 등의 결점이 많아 집성재와 같이 종접합을 하면 상당 부분을 제거하여 경제적 가치가 저하되는 소나무 소경재를 이용하는 경우 적층에 의한 下限値의 향상 정도가 의문시 되었으나 종접합 없이 적절한 라미나의 조합에 의해 중경재 이상의 素材에 비금가는 강도를 지닌 제품을 디자인할 수 있음을 확인할 수 있었다. 휨 강도의 변이계수는 적층수가 증가함에 따라 감소하였으며, 그 감소정도는 적층효과와 理論値와 일치하였다.

引用文獻

1. 林 知行, 1989. 確率モデルによる集成加工材料の性能豫測(1報). 日本木材學會誌 35(11):1048-1057.

2. 林 知行. 1990. 確率モデルによる集成加工材料の性能豫測(4報). 日本木材學會誌 36(10):812-818.
3. 林 知行. 1993. 集成加工材料の強度特性に及ぼす缺點分散の影響. 木材工業48(10):472-476.
4. 林 知行, 宮武 敦. 1996. 2, 3, 4ゾライ積層材の實大壓縮強度特性. 木材工業51(1):18-21.
5. 日本建築學會. 1988. 木構造 設計基準 同解説. 93-97pp.
6. Moody, R.C. 1997. Improved utilization of lumber in glued laminated beams. FPL292.
7. Moody, R.C. and J.K. Little. 1988. Variation in stiffness of horizontally laminated glulam timber beam. Forest Prod. J. 38(10):39-45.