

국내산 목재의 연륜경사에 따른 전단강도 및 나사못 유지력 영향*1

차재경*2†

Effect of the Withdrawal Strength of Wood Screws in Domestic Wood by Shear Strength with Different Growth Ring Orientation*1

Jae Kyung Cha*2†

요 약

연륜경사에 따른 전단강도 실험이 국내에서 생산되는 목재에 대해 실시됐다. 연륜경사는 전단강도에 영향을 주었고, 경사진 연륜에서 최대였다. 전단강도는 나사못 유지력을 예측하기 위한 식에 포함됐다. 나사못 유지력의 예측식은 No. 8 나사못의 실험결과와 비교하여 25 mm와 30 mm 길이에서 8% 이내로 작게 예측되었으나 18 mm와 38 mm에서는 큰 값을 보였다. 전단강도를 사용한 나사못 유지력의 예측값과 실험값 사이에는 연륜경사에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

ABSTRACT

Shear tests parallel to the grain were conducted on domestic wood samples with different growth ring orientations. Shear strength was dependent on the angles between the direction of growth ring orientation and the applied force. The maximum shear strength showed at the intermediate growth ring orientations. Results of shear tests were also used to modify the formula which had previously been developed to predict the withdrawal strength of screw on the face of lumber. Predicted equations were fitted to the results of previous study with different length

*1 접수 2012년 7월 14일, 채택 2012년 11월 26일

본 연구는 국민대학교 교내연구비(2012) 지원에 의해 수행되었음.

*2 국민대학교 임산생명공학과, Dept. of Forest Products and Life Science, College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 136-702

† 교신저자(corresponding author) : 차재경(e-mail: jcha@kookmin.ac.kr)

of No. 8 screw. Predicted equation was under-predicted the withdrawal strength of 25 and 30 mm length of screw within 8% and over-predicted withdrawal strength of 18 and 38 mm length of screw. A little differences between the predicted by shear strength with different growth ring orientation and observed values was existed.

Keywords: wood screw withdrawal load, screw diameter, effective depth of penetration, shear strength, growth ring orientation and domestic wood

1. 서 론

목재는 선사시대 이전부터 구조용 재료로 사용되어 왔으며, 품질이 좋은 목재가 고갈되지 않을 것으로 생각되어 정밀한 설계는 중요하지 않았다. 하지만 오늘날 구조용으로 이용되고 있는 목재의 품질은 예전에 사용됐던 것들과 크게 다르다. 품질이 저하된 목재는 모든 가능한 목제품들에 이용될 필요가 있다. 이러한 환경변화는 목재로 만든 목제품의 사용에도 많은 주의를 하게 한다. 특히 구조물의 설계는 작용하는 하중에 대한 목재의 거동에 대한 이해가 요구되고, 전단강도는 보의 하중 지지력을 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 구조에서 전단하중이 가해지는 경우는 드물지만 길이가 짧고 두꺼운 보는 인장이나 압축강도보다 전단강도에 영향을 받는다.

우리나라는 대표적 조림수종인 잣나무, 낙엽송 및 소나무로부터 간벌에 의해 주로 목재를 생산하고 있다. 이들 목재는 예전에 천연림으로부터 생산되던 성숙재와 다르게 상대적으로 어린 나무로부터 생산되어 품질을 저하시키는 미숙재를 많이 포함하고 있다. 따라서 이들 목재에 대한 효율적인 용도개발이 필요하며, 국산 소경재의 더 나은 이용을 위해 많은 연구가 필요하다. 특히 이들 소경재는 가구 뼈대와 건물 내장재 등의 이용에 관심이 크게 증가하고 있어 다양한 용도를 위한 적합성 등을 명확하게 할 필요가 있다. 목재는 물리적·기계적 성질과 함께 결합부에 대한 특성들이 가구 뼈대 등과 같은 부재의 하중을 결정하는데 매우 중요하다. 목재부재들을 연결하는 데는 볼트, 못, 나사못 등이 사용되고 있다. 특히 나사못은 대부분의 지역에서 가구제작자들이 목재를 결합하고자 했을 때 고대 그리스시대부터 널리 사용되

어 왔다. 나사못 유지력은 나사못의 직경과 관입길이(depth of penetration) 및 목재의 기계적인 성질들의 함수로 예측하려는 연구들(USDA, 1985; Eckelman, 1975; 1978)이 있었다. Wood handbook (1985)은 목조건물에 사용되는 나사못의 유지력에 대한 식을 나사못의 직경, 관입길이 및 목재비중으로 나타냈다. 하지만 Wood handbook의 식은 유효 관입길이 대신 관입길이의 사용으로 가구제작에 적용하기에는 부족함이 있다. Eckelman (1975; 1978)은 활엽수목재의 경우 비중보다 전단강도가 나사못 유지력의 예측인자로 더 적합함을 보였다. 이와 같이 나사못 유지력에 대한 연구들이 많이 시행되어 비중이나 전단강도에 대한 함수로 나타내고 있지만 국내에서 생산되는 목재에 대한 연구(차, 2002; 2003; 2011)는 매우 미흡한 실정이다.

전단강도는 목재 보의 하중지지 능력을 결정하는 데 중요하지만 나사못 등 기계적 쥘쇄의 유지력 및 접착조인트 강도를 결정하는 데도 중요하다(Eckelman, 1978). 목재는 연륜경사에 따른 특성들도 매우 중요하다. 연륜경사에 따른 전단강도의 영향에 대한 자료가 부족하여 접선면과 방사면에 대한 강도의 평균이 일반적으로 보고되고 있지만 대부분의 목재는 완전한 연륜경사로 사용되지 않으며 두 방향 사이에는 차이가 있어 연륜경사를 명시할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 연륜경사에 따른 전단강도의 거동에 대해 알아보았다. 또한 본 연구는 나사못의 직경, 유효 관입길이 및 목재 전단강도의 함수로 나사못 유지력에 대한 예측 식을 유도하여 평가하고자 했다.

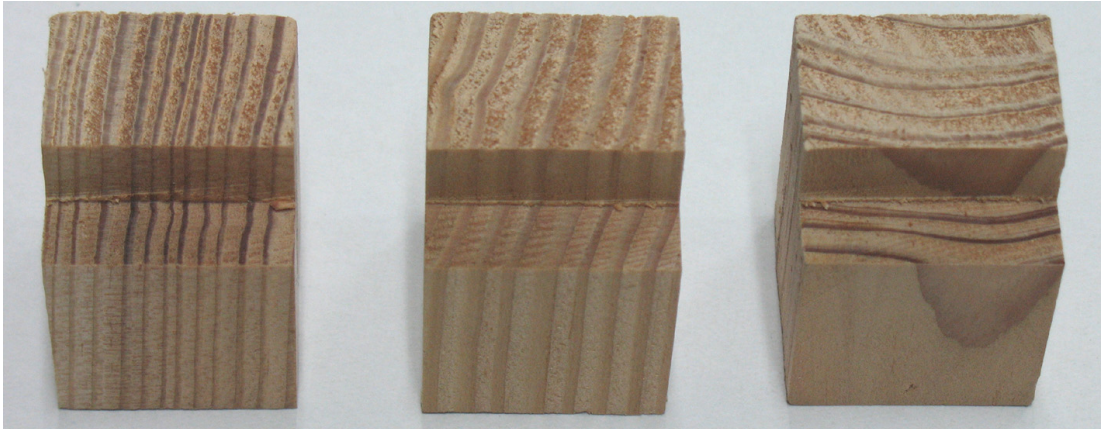


Fig. 1. Test specimens with different orientations of growth rings: A) Radial section; B) intermediate section; C) Tangential section.

2. 재료 및 실험방법

목재로 된 보 등의 설계에 중요한 전단강도의 거동을 알아보기 위해 연륜경사에 따른 전단강도실험을 실시했다. 전단강도실험은 나사못의 직경, 유효 관입길이 및 목재 전단강도의 함수로 나사못 유지력에 대한 예측식을 위해서도 필요했다.

2.1. 나사못 유지력 실험

나사못 유지력은 표준 실험방법(ASTM D1761)에 의해 실험했던 차(2011)의 자료를 사용했다. 차는 길이가 25 mm와 30 mm인 No. 8의 나사못을 같은 목재 시편에 사용하였다. 30 mm 나사못은 나삿나가 시편 두께를 완전히 관통하여 끝 부분이 튀어나오게 했고, 25 mm 나사못은 끝이 다른 표면에는 튀어나오지 않았지만 두께에 완전히 관입했다. 또한 나사못 유지력에 대한 직경의 영향을 보기 위해 같은 방법으로 3종류의 나사못 직경(No. 6, 8 및 10)을 사용했다.

2.2. 전단강도실험

전단강도실험은 표준 실험방법(KS F 2209)에 의해 실험했다. 전단강도시편은 나사못 유지력실험에 사용됐던 소나무, 잣나무, 낙엽송의 목재와 같은 시

기에 제작된 제재목들로부터 선별하였다. 모든 시편들은 35 × 35 mm로 웅이 등 결점이 없는 제재목으로부터 선별하였다. 특히 목리가 목재의 성질에 미치는 영향이 크기 때문에 웅이와 교주목리 등이 없는 무결점 부위를 선택하였다. 선별된 목재는 횡단면을 30 × 30 mm로 연마한 다음 방사면과 접선면의 전단실험을 위해 연륜과 직각 및 평행이 되도록 30 × 30 × 40 mm로 절단한 다음 높이가 30 mm가 되도록 Fig. 1과 같이 파내 30 × 30 mm 면이 파괴되도록 했다. 경사진 연륜에 대한 전단실험을 위해서도 횡단면에서 연륜이 측면과 경사진 목재를 선별하여 방사면과 접선면의 전단실험 시편과 같은 방법으로 제작하였다. 실험 전에 모든 시편들은 전단면의 실질 치수를 측정했다. 모든 실험은 Hounsfield 만능시험기를 이용했다. 하중은 횡단면에 분당 0.6 mm로 목섬유를 따라 파괴될 때까지 가했다.

2.3. 함수율 및 비중 측정

목재의 함수율이 전단강도의 크기에 영향하므로 모든 시편들을 온도 21°C와 상대습도 65%인 항온항습기에서 조습 처리하였다. 조습 처리한 목재는 함수율 측정을 위해 무게를 측정했다. 전단실험을 모두 마친 다음 함수율과 실험에 사용된 시편의 비중을 계산하기 위해 모든 시편의 전건무게를 측정하였다. 전

Table 1. Average specific gravities and moisture contents used for shear tests

Species	Moisture content (%)	Specific Gravity
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	10.6 (0.81*)	0.40 (0.03)
<i>Pinus densiflora</i> Sieb. et Zucc	10.8 (0.90)	0.53 (0.03)
<i>Larix leptolepis</i> Sieb. et Zucc	11.8 (0.46)	0.52 (0.06)

* Standard deviation



Fig. 2. Failure mode loaded by radial face for *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc

건무게는 온도가 103°C인 전기오븐에서 일정한 무게로 건조됐을 때 측정하여 함수율과 비중 계산에 사용했다.

3. 결과 및 고찰

전단강도실험에 사용된 목재시편의 물리적 성질들은 Table 1과 같다. 평균함수율은 10.6~11.8%였다. 비중의 평균은 차(2011)의 나사못 유지력 실험에 사용됐던 시편들과 비교하여 낙엽송목재는 0.52로 같은 값을 보였고, 잣나무목재가 0.40으로 0.38보다 약간 컸지만 가장 작았다. 또한 소나무목재의 비중은 0.53으로 0.50이었던 것에 비해 약간 크고, 가장 큰 값을 보였다. 이는 나사못 유지력 실험에 사용되었던 차(2011)의 시편에 대한 함수율과 비교하여 잣나무와 소나무 목재의 함수율이 약간 작았던 것도 한 원인으로 샘플링 방법과 조습 처리에 더 세심한 주의가

필요했던 것으로 판단된다.

3.1. 전단강도

잣나무, 소나무 및 낙엽송의 무결점재로 제작된 시편의 전단강도에 대한 실험결과는 Table 2와 같다. 잣나무와 낙엽송 목재는 접선단면에서 전단강도가 방사단면의 전단강도보다 작게 나타났다. 하지만 소나무 목재는 접선단면에서 전단강도의 평균이 방사단면에서의 전단강도보다 크게 나타났다. 이는 잣나무와 낙엽송 목재에서 강도가 작은 춘재의 영향보다는 방사조직의 영향이 컸기 때문으로 판단된다. 하지만 소나무 목재는 반대로 춘재가 방사조직과 함께 전단강도에 크게 기여했기 때문으로 판단된다. 횡방향에서 일반적인 파괴형태는 방사방향으로 하중이 가해지면 춘재에서 일어나며 접선방향으로 하중이 가해지면 방사조직을 통해 연륜을 따라 일어난다. 하지만 소나무 목재는 일부에서 춘재와 함께 방사조직을 따라 톱니 모양의 파괴 모습을 보여 주었다(Fig. 2). 모든 수종에서 전단응력은 접선단면과 방사단면이 아닌 연륜과 각을 이루는 단면에서 가장 크게 나타났다. 이론적으로 가장 큰 전단응력은 약 45°에서 일어나지만 여러 세포 유형, 방사조직, 춘재와 추재 등 목재의 구조가 응력이 가해지는 부재 축과 60~70°면에 발생한다.

전단강도실험에서 파괴는 주로 섬유방향으로 하중 방향을 따라 이루어졌다. 하지만 연륜에 비스듬한 전단강도 실험에서 파괴 면은 얼마간 연륜직각방향 따라 갑작스런 변화와 함께 춘추재 연결부를 따라 톱니 모양으로 찢어진 모습을 보여주었다. 특히 소나무에서 연륜과 직각으로 방사조직을 따라 파괴가 일어난 다음 춘재와 추재의 연결부위 등 약한 부위에서 일어

Table 2. Summary of characteristics of shear strength with different growth ring orientations

Characteristics (species/growth ring)	growth ring orientation (°)	shear strength (kgf/cm ²)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	radial section	90.0 (0.0*)
	intermediate section	66.1 (9.6)
	tangential section	0.0 (0.0)
<i>Pinus densiflora</i> Sieb. et Zucc	radial section	85.0 (4.5)
	intermediate section	60.5 (7.3)
	tangential section	3.3 (2.6)
<i>Larix leptolepis</i> Sieb. et Zucc	radial section	86.2 (3.8)
	intermediate section	47.2 (16.6)
	tangential section	0.0 (0.0)
Overall	radial section	87.1 (3.9)
	intermediate section	58.2 (14.0)
	tangential section	1.1 (2.1)

* Standard deviation

났다(Fig. 3). 이는 건조된 통나무 원판이 방사조직을 따라 매끄럽게 갈라지는 다른 수종의 원판과 달리 톱니모양으로 갈라지는 모습과 비슷하다. 위와 같은 파괴 경향은 소나무 목재에서 전단강도가 잣나무와 낙엽송 목재보다 연륜과 각을 이루는 면에서 다른 면보다 약간 큰 값을 보인 원인으로 판단된다.

3.2. 나사못 유지력의 예측

USDA(1985)는 목재에 대한 나사못 유지력을 식 (1)과 같이 나타내고 있다. 하지만 나사못 유지력은 나사못의 관입길로부터 나사못 직경을 뺀 유효 관입길이가 사용돼야 한다. 따라서 차(2011)는 Wood Handbook에 제시된 식 (1)을 식 (2)과 같이 표현하였다.

$$F = aG^2DL \quad (1)$$

여기서 a : 상수

D : 나사못대 지름(shank diameter)

L : 나사못의 관입길이

G : 비중

$$F_e = aG^\gamma D^\beta (L - \alpha D) \quad (2)$$

여기서 a, α , β , γ : 회귀상수

D : 나사못대 지름(shank diameter)

L : 나사못의 관입길이

G : 비중

본 연구에서는 식 (1) 및 (2)와 같이 나사못 유지력 예측을 위한 식을 비중의 함수로 나타내는 대신에 전단강도의 함수로 나타내고자 하였다. 이를 위해 유효 관입길이는 예전의 연구(2011)에서 구하였던 위의 식들 사이에 비 $\frac{F_e}{F} = \frac{L - \alpha D}{L}$ 로부터 α 에 대한 식은

$$\left(1 - \frac{F_e}{F}\right) \left(\frac{L}{D}\right)$$

로, 전체 시편에 대한 No 6, No 8, No 10의 α 는 0.79, 0.82 및 0.88로 각각 나타났다. 이 결과는 나사못이 모두 관입되었을 때 Eckelman의 식

Table 3. Differences between predicted and actual wood withdrawal loads by different screw length

Species	Difference (%)							
	18 mm		25 mm		30 mm		38 mm	
	intermediate	overall	intermediate	overall	intermediate	overall	intermediate	overall
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	34.0	27.1	15.3	9.5	13.4	7.6	7.5	2.0
<i>Pinus densiflora</i> Sieb. et Zucc	16.4	21.0	-13.5	-10.1	-17.5	-14.3	8.4	12.6
<i>Larix leptolepis</i> Sieb. et Zucc	12.6	12.5	-12.8	-12.9	-15.0	-15.1	11.1	10.9
Overall Mean difference (%)	21.0	20.2	-3.7	-4.5	-6.4	-7.3	9.0	8.5
by shear strength								
by SG	-	7.4	-	-5.0	-	-4.2	-	10.5

(1975)과 같이 $\alpha = 1.0$ 을 대입하여 대 직경의 크기 만큼 감소시키면 유효관입길이의 더 큰 감소가 이루어질 것이다.

차(2011)는 관입길이와 같은 방법으로 나사나 대 직경에 대한 영향을 나타내기 위해 $\frac{F_e}{F} = \frac{D_e}{D}$ 로 사용했다. No 6에 대해 No 8과 No 10의 직경 비는 각각 1.08과 1.31이고 각각의 나사못에 대한 유지력의 비($\frac{F_e}{F}$)는 1.186와 1.252로 평균값을 사용한 $\frac{F_e}{F} = \left(\frac{D_e}{D}\right)^\beta$ 로 회귀분석에 의해 구한 $\beta = 0.73$ 으로 $R^2 = 0.75$ 였다. 본 연구는 차(2011)에서 구한 α , β 값과 함께 비중 대신에 전단강도의 나사못 유지력에 대한 영향을 알아보기 위해 $\frac{F_e}{F} = \left(\frac{S_x}{S}\right)^\gamma$ 을 이용한 회귀분석에 의해 γ 를 구하였다. 각 방향에서의 γ 와 R^2 은 각각 방사방향 0.61과 0.98, 중간방향 0.95와 1.0, 접선방향 0.51과 0.76으로 방향에 따라 γ 값이 다르게 나타났다. 또한 방향에 관계없이 모든 실험결과를 사용했을 때 γ 와 R^2 은 0.72와 0.97이었다. 하지만 Eckelman (1978)의 활엽수 목재에 대한 예측식과 같이 선형($\gamma = 1.0$)일 때 R^2 은 중간방향과 모

든 방향에서 0.78과 0.83으로 좋은 상관관계를 보였다. 마지막으로 상수 a를 구하기 위해 $F_e = aS^\gamma D^\beta (L - \alpha D)$ 의 식에 α 와 β 및 γ 를 대입하여 구한 $S^\gamma D^\beta (L - \alpha D)$ 에 대해 F_e 와 회귀분석을 통해 a를 구하였다. α 값은 차(2011)의 연구에서 No. 8에 대해 구했던 0.82를 사용했다. 또한 γ 는 모든 방향에서 좋은 상관관계를 보인 선형관계($\gamma = 1.0$)도 사용했다.

위의 분석결과를 종합하면 나사못 유지력 $F = a S^\gamma D^{0.73} (L - \alpha D)$, D와 L의 단위는 mm이다. 전단강도를 이용한 예측식을 구하기 위해 차(2011)의 나사못 길이에 따른 tip효과의 평가를 위한 실험은 나사못이 No 8로 길이가 18, 25, 30 및 38 mm로 실험한 결과를 사용하였다. 실험결과들은 예측식에 의한 정확도를 평가하기 위해 예측 식에 의한 값(y')과 실험에 의한 값(y) 사이에 차이는 $\frac{y' - y}{y} \times 100(\%)$ 로 계산하였다. Table 3은 예측식에 의해 구한 나사못 유지력과 실험결과 사이에 차이를 보여주고 있다. 수종에 따른 실험결과와 예측식 사이에 차이는 비중이 작은 잣나무 목재는 모든 길이 및 각도에서 큰 값이 예측되었다. 하지만 비중이 큰 소나무와 낙엽송 목재는 25 mm와 30 mm에서 작은 값을 보였으나 18 mm와 38 mm에서는 큰 값이 예측되었다. 또한 모든 수종에 대한

예측 값을 구하기 위해 $\gamma = 1.0$ 을 중간각도와 모든 방향에서의 전단강도에 각각 사용했을 때 그 차이는 각도에 따라 약간의 차이가 있었지만 중간 각도에서 25 mm와 30 mm에서는 -3.7%와 -6.4% 및 전체 시편에 대해 -4.5%와 -7.3%로 작은 값을 보였지만 18 mm와 38 mm에서는 21.0과 20.2% 및 9.0과 8.5%로 큰 차이를 보였다. 이는 실험하는 동안 길이가 38 mm인 나사못의 머리가 찌그러지는 영향과 함께 tip의 효과를 고려한 유효 관입길이의 영향으로 판단된다. 따라서 나사못 길이에 따른 α 값의 적절한 한계가 필요한 것으로 판단된다. Table 3은 비중에 의해 예측된 값과 실험값과의 차이를 또한 보여주고 있다. 전단강도를 사용하여 예측된 값은 비중에 의해 예측된 값보다 25 mm를 제외하고 약간 큰 값을 보여주고 있다. 또한 연륜경사에 따른 전단강도는 나사못 유지력 예측에 큰 차이를 보이지 않았다. 전단강도에 의한 나사못의 유지력 예측을 위해서는 더 다양한 수종과 함께 많은 실험이 요구된다.

4. 결 론

국내산에 대한 전단강도는 하중방향과 연륜이 이루는 각에 따라 영향을 받았다. 전단강도는 접선단면과 방사단면보다 하중방향과 경사를 이루는 면에서 가장 큰 값을 보였다. 비중 대신에 전단강도의 실험 결과는 차의 연구(2011)에서 유도했던 나사못 유지력의 예측 식에 비중 대신에 사용하였다. 그 결과로 나사못의 직경, 관입길이 및 전단강도의 함수로 나타

낸 나사못 유지력의 예측 식은 실험결과와 사이에 나사못 길이가 25 mm와 30 mm에서는 약간 작은 값을 보여주었고, 18 mm와 38 mm에서 큰 값을 보였다. 또한 연륜경사에 따른 전단강도는 나사못 유지력 예측에 큰 차이를 보이지 않았다.

참 고 문 헌

1. American Society for Testing and Materials. 1986. Standard test method of testing mechanical fasteners in wood. ASTM D 1761. ASTM, Philadelphia, PA.
2. Eckelman, C. A. 1975. Screwholding performance in hardwoods and particleboard. Forest Prod. J. 25(6): 30~36.
3. Eckelman, C. A. 1978. Predicting withdrawal strength of sheet metal-type screws in selected hardwoods. Forest Prod. J. 28(8): 25~28.
4. U. S. Dept. of Agri. 1985. Wood handbook 72. Govt. print. off. Washington, D. C.
5. 차재경. 2000. 연륜방향에 따른 횡방향의 강도 거동. 산림과학 12: 109~117.
6. 차재경. 2002. 국산소경제의 나사못뽑기 강도. 한국임학회지 91(5): 637~641.
7. 차재경. 2003. 국산소경제에 대한 못과 나사못 뽑기 거동 비교 연구. 산림과학 15: 85~91.
8. 차재경. 2011. 국내산 목재에 대한 나사못 직경, 관입길이 및 목재비중에 따른 나사못 예측. 목재공학 39(3): 252~257.
9. 한국표준협회 2004. KS F 2209 목재의 전단 시험 방법.