

# 열압밀화 라디에타 소나무재의 압축세트량에 따른 역학적 특성\*1

황성욱\*2† · 이원희\*2†

## The Mechanical Properties of Heat-Compressed Radiata Pine (*Pinus radiata* D.Don) by Compression Set\*1

Sung-Wook Hwang\*2 · Won-Hee Lee\*2†

### 요 약

라디에타 소나무(*Pinus radiata* D.Don)를 압제온도 180°C, 압제시간 60분 조건으로 열압밀화 목재를 제작하여 압축세트량에 따른 종압축강도, 휨강도, 경도, 못뽑기저항을 조사하였다. 압축세트량 60%인 열압밀화 목재의 비중은 1.01로 나타났으며, 대조군의 비중 0.48에 비해 현저히 증가한 값을 나타내었다. 압축세트량의 증가와 함께 모든 역학적 특성도 향상되었다. 그리고 라디에타 소나무의 최대 압축세트량은 약 65%로 확인되었으며, 이는 비중 0.48인 라디에타 소나무의 공극율 68%와 거의 일치하는 결과이다.

### ABSTRACT

The mechanical properties of heat-compressed Radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) by compression set were investigated. Heat-compression condition was temperature at 180°C and press time for 60 minutes. The mechanical properties of heat-compressed wood increased with increasing compression set. Increase of the specific gravity has led to increase in mechanical properties. The maximum compression set of Radiata pine was investigated approximately 65%. It was almost same result with porosity 68% of Radiata pine in specific gravity 0.48.

**Keywords:** Radiata pine, heat-compressed wood, compression set, compressive strength, MOE, MOR, hardness, nail holding power

\*1 접수 2011년 4월 7일, 채택 2011년 6월 7일

\*2 경북대학교 농업생명과학대학 임산공학과, Dept. of Wood Science & Technology, College of Agriculture & Life Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 황성욱(E-mail: swhwang@knu.ac.kr), 이원희(E-mail: leewh@knu.ac.kr)

## 1. 서 론

목재 이용을 위한 가장 중요한 제1의 재질 지표가 비중이다. 무거운 목재와 가벼운 목재의 차이는 결국 일정 용적 내의 공극의 크기, 즉 세포벽 중의 목재실질의 양에 귀착되고, 이것은 목재의 강도나 수축률의 대소에 직결되며, 절삭, 건조 및 접착가공성과도 밀접한 관계를 가지게 된다. 목재의 비중은 목재의 물리 및 역학적 성질을 좌우하는 기초적인 요소이다(강 등, 2008). 이러한 목재의 비중을 증가시켜 목재의 역학적 성질을 극대화 하는 기술이 바로 압밀화 목재이다. 열압공정은 목재의 건조속도, 평형함수율, 흡습성, 치수안정성, 내구성, 표면품질, 파괴계수, 탄성계수, 경도, 표면 마모도, 못 뽑기 강도, 전단계수 등에 영향을 미친다고 알려져 있다(Tabarsa, 1995; Kubojima 등, 2003; Wang 등, 2005).

압밀화 목재의 개발을 위한 많은 연구들이 수행되었는데, Unsal 등(2008)은 압력과 온도에 따른 소나무 열압밀화 목재의 함수율, 내부밀도분포, 경도 등을 연구하였으며, 열전도성, 마모 특성, 휨 및 전단 특성 등이 연구되었다(Asako 등, 2002; Ohtani 등, 2002; Yoshihara 등, 2007). 그리고 열압밀화의 전후 처리로써 열처리, 수증기처리, 마이크로파처리 등의 연구도 이루어졌다. Inoue 등(1993)은 압밀화 목재의 치수안정성에 대한 열처리와 수증기처리의 효과에 대해 연구하여 수증기처리의 높은 치수안정성을 보고하였다. 그리고 이 등(2000)과 Jung 등(2002) 또한 수증기처리에 의한 열압밀화재의 압축고정에 관한 연구를 수행했으며, 김 등(2000)은 수증기처리 열압밀화 목재의 강도적 성질에 관한 연구를 보고하였다. 또한 정 등(1998)은 열압밀화 목재의 역학적 특성과 치수안정성에 대한 마이크로파의 효과에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 목재산업에서 다방면으로 이용되는 주요 수입 침엽수종인 라디에타 소나무(*Pinus radiata* D.Don)를 이용하여 압축세트량에 따른 역학적 특성을 조사하였다. 라디에타 소나무는 저비중 속성수종으로 열압밀화 목재의 목적에 적합한 수종이다. 따라서 라디에타 소나무를 열압밀화 하여 압축세트

량에 따른 압축강도, 휨강도, 브리넬경도, 못뽑기저항을 조사하여 열압밀화 목재 개발을 위한 기초적인 연구 자료 제시를 그 목적으로 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

본 연구에서는 뉴질랜드산 라디에타 소나무(*Pinus radiata* D.Don)를 공시재료로 이용하였다. 실험에 사용된 라디에타 소나무는 1,500 mm (L) × 480 mm (R) × 480 mm (T)의 정각재와 1,500 mm (L) × 140 mm (R) × 24 mm (T)의 판목판재를 양면 대패질하여 이용하였다. 공시재료의 기건함수율은 12.7 (± 0.84)%, 기건비중 0.48 (± 0.04), 평균연륜폭은 10.2 (± 0.15) mm이었다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 목재의 압밀화

열압밀화 시험편의 제작은 기건상태의 시험편을 감압상태로 24시간 동안 물에 침지시킨 다음 70°C의 건조기에서 건조하여 시험편의 함수율이 15%가 되었을 때 열압밀화를 실시하였다. 열판 프레스기를 이용하여 10, 20, 40, 60%의 압축세트량으로 압밀화를 실시하였으며, 모든 시험편은 방사방향으로 압밀화하였다. 압밀화 조건은 압력 65 kgf/cm<sup>2</sup>, 압체온도 180°C, 압체시간 60분이며, 시험편은 각 조건당 5개씩 제작하여, 총 20개의 열압밀화 시험편을 준비하였다. 그리고 압축세트량은 다음의 식으로 계산하였다.

$$\text{Compression Set}(\%) = \frac{l_o - l_c}{l_o} \times 100$$

여기에서  $l_o$ 는 압밀화 전의 방사방향길이(mm),  $l_c$ 는 압밀화 후의 방사방향 길이를 뜻한다.

Table 1. Specific gravity of compressed Radiata pine by compression set

Compression Set (%)	Control	10%	20%	40%	60%
Specific Gravity	0.48 (± 0.04)*	0.51 (± 0.06)	0.65 (± 0.03)	0.71 (± 0.06)	1.01 (± 0.02)

\* Standard Deviation.

### 2.2.2. 종압축강도

모든 역학적 특성의 측정은 만능강도시험기(HOUNSFIELD TEST EQUIPMENT LTD, H50K-S)를 이용하였다. 종압축강도의 측정은 시험편을 40 mm (L) × 20 mm (R) × 20 mm (T) 크기로 재단하여 3 mm/min의 하중속도로 실시하였다. 각 압축세트량에 따라 12개의 시험편과 대조군 시험편 12개 등 총 60개의 시험편을 준비하였다.

### 2.2.3. 휨강도

휨강도는 열압밀화 시험편을 200 mm (L) × 18 mm (R) × 10 mm (T) 크기로 재단하여 각 압축세트량에 따라 5개씩 총 25개의 시험편을 준비하였다. 휨강도 측정은 3 mm/min의 하중속도로 측정하였으며, 양단지지 중앙집중하중을 가하는 3-point bending test로 실시하였고, span의 길이는 180 mm로 하였다.

### 2.2.4. 브리넬경도

브리넬 경도는 0.5 mm/min의 하중속도로 시험편의 표면경도를 측정하였다. 직경 10 mm인 최구슬의 압입깊이  $h$  (mm)가  $1/\pi \approx 0.32$  mm일 때의  $P$  (N)를 측정한다. 브리넬 경도  $H_B$ 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$H_B = \frac{P}{\pi Dh} = \frac{P}{10}$$

여기에서  $D$ 는 최구슬의 직경(10 mm),  $h$ 는 최구슬의 압입깊이(0.32 mm),  $P$ 는 하중을 뜻한다. 모든 측정은 반경방향으로 실시하였으며, 각 시험편당 6회 반복 실시하였다.

### 2.2.5. 못뽑기저항

못뽑기저항 실험은 압축세트량에 따라 150 mm (L) × 50 mm (R) × 50 mm (T) 크기의 열압밀화 목재 시험편 5개씩을 준비하여 3단면에 직경 2.5 mm, 전장 50 mm의 일반못을 각각 2개씩 박았다. 못의 침투깊이는 뾰족한 부분을 제외하고 11 mm이며, 만능강도시험기를 이용하여 3 mm/min의 하중속도로 시험하였다. 못뽑기 저항력은 못을 박은 후의 경과시간에 크게 영향을 받기 때문에 못을 박은 후 바로 시험을 실시하였다. 시험 시 함수율이  $w$ 인 목재의 못뽑기저항  $\sigma_w$ 는 아래의 식에 따라서 계산하였다.

$$\sigma_w = \frac{F_{\max}}{l}$$

여기에서,  $F_{\max}$ 는 최대하중(N)이며,  $l$ 은 못의 침투깊이(mm)를 뜻한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 열압밀화 후 목재의 성상

압축세트량의 증가에 따라 열압밀화 목재의 비중이 현저하게 증가하였다(Table 1). 먼저 대조군의 기건비중이 0.48인데 반해, 열압밀화재의 비중은 압축세트량에 따라 10% 0.51, 20% 0.62, 40% 0.71, 60% 1.01의 비중을 나타내었다. 이러한 비중의 증가가 열압밀화재의 역학적 특성 향상에 가장 직접적인 원인이 된다고 판단된다.

라디에타 소나무의 최대 압축세트량을 확인하기 위해 압축세트량 70%로 압밀화를 실시한 결과 시험편은 압축방향의 직각방향으로 늘어났으며, 횡단면에서는 방사방향으로의 파괴가 발생하였다. 다음으

Table 2. Compressive strength of compressed Radiata pine

Compression Set	Control	10%	20%	40%	60%
Compressive Strength (N/mm <sup>2</sup> )	10.8 (± 2.4)*	14.1 (± 2.0)	14.8 (± 2.2)	16.5 (± 3.4)	23.5 (± 2.0)

\* Standard Deviation.

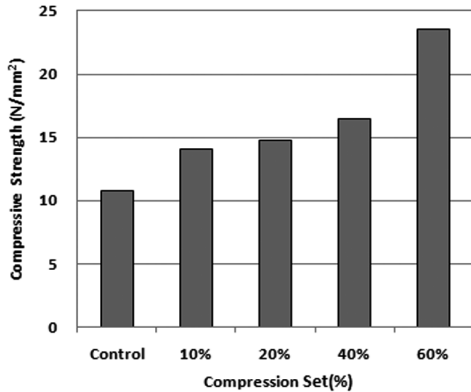


Fig. 1. Compressive strength of compressed Radiata pine by compression set.

로 65%의 압축세트량으로 압밀화한 결과 일부 시편에서는 횡단면에서 방사방향으로의 파괴가 발견되었으나 대부분 양호한 압밀화 상태를 나타내었다. 따라서 라디에타 소나무의 최대 압축세트량은 약 65% 정도라고 판단된다. 비중 0.48의 라디에타 소나무의 공극율은 68%이다. 이는 라디에타 소나무의 최대 압축세트량과 거의 비슷한 값으로써 압밀화 목재의 생산 시 각 수종의 공극률을 바탕으로 그 수종의 최대 압축세트량의 근사치를 추정 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2. 종압축강도

종압축강도 측정결과를 Table 2와 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에 이용된 시험편의 경우 연륜폭이 넓은 미성숙재를 많이 포함하고 있어 전반적으로 종압축강도 값이 낮게 나타났다. 압축세트량이 증가함에 따라 종압축강도가 함께 증가하였다. 이는 압밀화에 의한 비중 증가에 기인한다고 판단된다. 대조군의 종압축강도가 10.8 N/mm<sup>2</sup> 인데 반해 압축세트량 60%인 열압밀화 시험편의 경우 23.5 N/mm<sup>2</sup>로 대조군에

비해 2배 이상 정도 높은 값을 나타내었다. 그리고 압축강도의 증가폭을 살펴보면 압축세트량 0~40%까지 완만한 증가를 보이는 반면, 60%에서 비교적 높은 증가폭을 나타내었다. 이러한 결과는 마이크로파를 조사한 열압밀화재의 역학적 특성을 조사한 정등(1998)의 연구결과와 일치한다. 이들의 연구에 의하면 압축세트량 50%까지는 압축에 의한 변형이 조재부에서 집중적으로 일어나기 때문에 응력이 천천히 증가하는 반면, 압축세트량 50% 이상에서는 조재부 대부분의 세포가 압축되어짐은 물론, 만재부의 두꺼운 세포벽이 변형되기 때문에 압축응력이 급격히 증가하는 것으로 판단하였다.

시험편의 파괴형상을 살펴보면 대조군과 압축세트량 10, 20%의 시험편의 경우 주로 파괴면이 거의 수평하게 나타나는 압축형 파괴가 일어난 반면, 40% 압밀화 시험편의 일부와 60% 시험편 대부분에서는 섬유가 수직면을 따라 할렬되는 할렬형 파괴가 발생하였다. 이는 열압밀화 목재의 압축세트량이 증가함에 따라 연성이 감소하고 취성이 증가한 결과, 압축세트량이 높은 열압밀화 목재에서 주로 취성파괴가 일어난 것이라고 판단된다.

### 3.3. 휨강도

Table 3과 Fig. 2에는 압축세트량에 따른 열압밀화 목재의 휨강도를 나타내었다. 휨강도 역시 압밀화에 의한 비중의 증가에 의해 압축세트량이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났다. 대조군의 휨강도는 74.3 N/mm<sup>2</sup>이며, 60% 열압밀화 목재의 경우 200.2 N/mm<sup>2</sup>로 약 3배 가까이 증가한 결과를 나타내었다.

휨탄성계수 또한 압축세트량의 증가와 함께 증가하였다. 휨탄성계수 값을 살펴보면 대조군의 경우 평균 9.4 N/mm<sup>2</sup>으로 나타났고, 60% 열압밀화 목재는

Table 3. Bending strength of compressed Radiata pine

Compression Set	Control	10%	20%	40%	60%
MOR (N/mm <sup>2</sup> )	74.3 (± 4.6)*	116.9 (± 3.4)	145.6 (± 14.2)	154.6 (± 18.6)	200.2 (± 11.4)
MOE (× 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	9.4 (± 1.2)	17.4 (± 2.4)	21.5 (± 2.2)	22.5 (± 1.9)	24.7 (± 1.3)

\* Standard Deviation.

Table 4. Hardness of compressed Radiata pine

Compression Set	Control	10%	20%	40%	60%
Hardness (N/mm <sup>2</sup> )	7.0 (± 2.8)*	17.5 (± 3.4)	21.0 (± 3.0)	22.1 (± 2.5)	24.0 (± 4.7)

\* Standard Deviation.

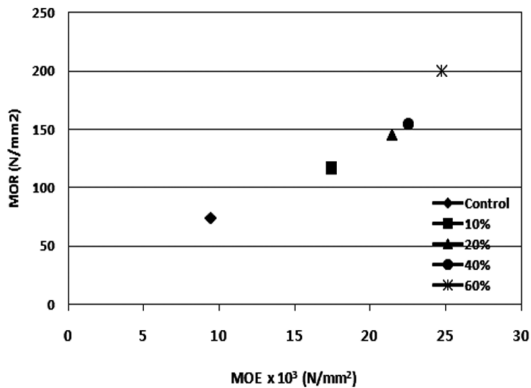


Fig. 2. Relationships between bending strength (MOR) and modulus of elasticity (MOE).

24.7 N/mm<sup>2</sup>로 크게 증가된 값을 나타내었다. 수증기 처리한 열압밀화 목재의 강도적 성질을 연구한 김 등 (2000)의 연구에서는 대조군에 비해 열압밀화 목재의 휨강도는 2배, 휨탄성계수는 1.4배 증가하였으며, 수증기처리에 의한 휨강도와 탄성계수의 향상 효과는 미약하다고 보고하였다. 따라서 열압밀화 목재의 휨강도와 탄성계수에는 수증기처리나 열처리 등의 후처리의 영향보다 압축세트량의 영향이 더욱 큰 것으로 판단된다.

### 3.4. 브리넬경도

브리넬경도 측정결과 압축세트량의 증가와 함께

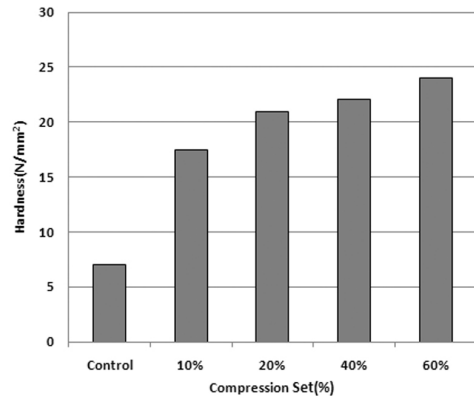


Fig. 3. Hardness of compressed Radiata pine by compression set.

경도도 증가하였다(Table 4). 이 또한 열압밀화 목재의 비중 증가에 기인한다고 판단된다. 압밀화에 의해 주로 비중이 작은 조재부에서 압밀화가 이루어졌기 때문에 조재와 만재의 비중이 비슷해지고, 재질이 균질화된 결과 표면경도가 향상된 것으로 판단된다. 그리고 180°C의 고온에서 60분간 압밀화하여 이에 의한 목재의 함수율 감소에 의한 영향도 있으리라 판단된다.

60% 열압밀화 목재의 표면경도는 24.0 N/mm<sup>2</sup>으로 대조군의 표면경도 7.0 N/mm<sup>2</sup>에 비해 3배 이상 높은 값을 나타내었다. 그리고 Fig. 3의 압축세트량에 따른 표면경도의 증가폭을 살펴보면, 10% 압밀화 목재의 표면경도가 가장 큰 증가폭을 보여주었다. 이

Table 5. Nail holding power of compressed Radiata pine

	Nail Holding Power (N/mm)				
	Control	10%	20%	40%	60%
Cross Section	9.1 (± 1.2)*	29.5 (± 2.8)	37.0 (± 6.7)	46.6 (± 3.6)	68 (± 3.7)
Radial Section	16.8 (± 4.8)	27.2 (± 5.0)	53.3 (± 3.7)	59.3 (± 3.1)	112.3 (± 7.3)
Tangential Section	19.3 (± 3.3)	29.3 (± 2.2)	45.4 (± 5.5)	54.2 (± 2.6)	79.4 (± 5.3)

\* Standard Deviation.

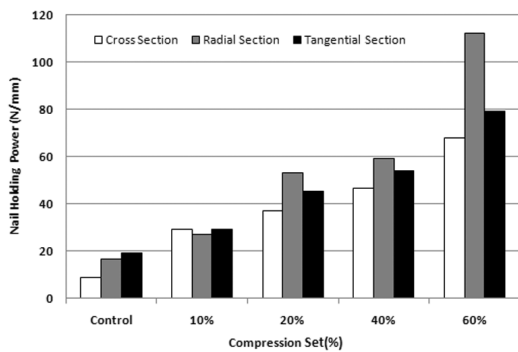


Fig. 4. Nail holding power of each section by compression set.

후 압축세트량이 증가할수록 표면경도도 함께 증가하지만 증가폭은 조금씩 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 표면경도가 중요한 지표인 가구재나 바닥재 등의 생산에 있어 10%의 열압밀화 만으로도 표면경도가 현저히 개선된 재료를 생산 가능할 것으로 판단된다.

### 3.5. 못뽑기저항

못뽑기저항 실험 결과를 Table 5와 Fig. 4에 나타내었다. 압축세트량의 증가와 함께 못뽑기 저항력도 증가하였다. 횡단면의 증가율이 가장 높았으며, 다음으로 방사단면, 접선단면 순이었다. 대조군에 비해 60% 압밀화 시험편의 경우 횡단면 655%, 방사단면 568%, 접선단면 311% 상승하였다. 이것은 압밀화에 의해 목재 내부 조직들이 압축되어 결속력이 증

가된 결과 못에 대한 마찰력이 증가한 결과라고 판단된다. 마이크로파를 조사한 압밀화 목재의 강도특성을 연구한 박 등(2009)의 연구에 의하면 접선단면의 경우 수직으로 배열된 가도관의 직각방향으로 국부적인 하중이 전달되기 때문에 접선단면의 변화된 조직상태로 인해 파괴 시 신장력이 줄어들어 못뽑기 저항력이 낮아진 것으로 추정하였다.

대조군의 못뽑기 저항력은 접선단면, 방사단면, 횡단면 순으로 높게 나타났다. 그러나 압축세트량 10%를 기점으로 모든 단면의 못뽑기 저항력이 비슷해진 후 압축세트량 20% 이후로 가장 높은 값을 나타낸 방사단면, 접선단면, 횡단면 순으로 명확하게 구분되었다.

## 4. 결론

압축세트량에 따른 라디에타 소나무 열압밀화 목재의 역학적 특성을 조사한 결과, 압축세트량이 증가함에 따라 모든 역학적 특성이 현저히 향상되었다. 종압축강도의 경우 60% 열압밀화 목재가 대조군에 비해 2배 이상 향상되었으며, 휨강도와 휨탄성계수 또한 대조군에 비해 약 3배 정도 높은 값을 나타내었다. 그리고 표면경도는 60% 열압밀화 목재가 24.0 N/mm<sup>2</sup>로 대조군의 표면경도 7.0 N/mm<sup>2</sup>에 비해 3배 이상 높은 값을 나타내었다. 못뽑기저항 역시 압축세트량의 증가와 함께 증가했으며, 증가폭은 횡단면, 방사단면, 접선단면 순으로 높았다. 마지막으로 라디에타 소나무의 최대 압축세트량은 약 65% 정도라고 판단되며, 각 수준의 최대 압축률은 그 수준의 공

극률로부터 추정이 가능할 것으로 판단되었다.

## 참 고 문 헌

1. 강춘원, 김남훈, 김병로, 김영숙, 변희섭, 소원택, 여환명, 오승원, 이원희, 이화형. 2008. 신고 목재물리 및 역학. 향문사 p. 25~46.
2. 김정환, 이원희, 한규성, 변희섭. 2000. 수증기처리 열압밀화 목재의 강도적 성질. 한국가구학회지 11(2): 1~6.
3. 박철우, 김남기. 2009. Microwave로 가열된 침엽수 규격재의 압축률별 강도특성에 관한 기초적 연구. 대한건축학회 학술발표대회 논문집 구조계 29(1): 491~494.
4. 이원희, 한규성. 2000. 수증기 처리에 의한 열압밀화 목재의 압축고정. 한국가구학회지 11(1): 85~89.
5. 정승수, 이원희. 1998. 열압밀화재를 위한 마이크로파의 효과. 한국가구학회지 9(2): 73~18.
6. Asako, Y., H. Kamikoga, H. Nishimura, and Y. Yamaguchi. 2002. International Journal of Heat and Mass Transfer 45: 2243~2253.
7. Jung, I. S. and W. H. Lee. 2002. Heating compression of Italian Poplar (*Populus euramericana*) wood - Dimensional stability against moisture. Mokchae Konghak 30(3): 91~96.
8. Kubojima, Y., T. Ohtani, and H. Yoshihara. 2003. Effect of shear deflection on bending properties of compressed wood. Wood and Fiber Science 36: 210-15.
9. Ohtani, T., A. Inoue, and C. Tanaka. 2002. Abrasive wear properties of compressed sugi wood. J. Wood Sci. 48: 473~478.
10. Tabarsa, T. 1995. The effects of transverse compression and press temperature on wood response during hot-pressing. M.Sc., thesis, The University of New Brunswick, Canada.
11. Unsal, O. and Z. Cadan. 2008. Moisture content, vertical density profile and janka hardness of thermally compressed pine wood panels as a function of press pressure and temperature. Drying Technology 26: 1165~1169.
12. Wang, J. and P. A. Cooper. 2005. Vertical density profiles in thermally compressed balsam fir wood. Forest Products Journal 55, 65-8.
13. Yoshihara, H. and S. Tsunematsu. 2007. Bending and shear properties of compressed Sitka spruce. Wood Sci. Technol. 41: 117~131.