

## 열압밀화 라디에타 소나무재의 역학적 특성\*1

황 성 옥\*2† · 이 원 희\*2†

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

- Effect of Press Temperature & Time -

Sung-Wook Hwang\*2 · Won-Hee Lee\*2†

#### 요 약

본 연구에서는 압제온도와 시간에 따른 열압밀화 라디에타 소나무재의 역학적 특성을 조사하였다. 종압축강도와 휨강도는 압제온도와 시간의 증가와 함께 증가하였다. 그러나 압제온도 220°C에서는 열화로 인해 오히려 감소된 값을 나타내었다. 표면경도는 압제온도의 증가와 함께 증가하였으며, 압제시간이 표면경도에 미치는 영향은 미약하였다. 못뽑기저항의 경우 접선단면의 저항력이 가장 높았으며, 압제온도와 시간에 의한 영향은 거의 나타나지 않았다.

#### ABSTRACT

The mechanical properties of heat-compressed Radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) by compression temperature and time were investigated. The compressive strength and bending strength of heat-compressed wood increased with increasing compression temperature and time. But the compressive strength and bending strength decreased with press temperature 220°C. It was considered due to thermal degradation during high temperature conditions. The surface hardness of heat-compressed wood increased with increasing compression temperature. However, the

\*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) : 황성옥(E-mail: swhwang@knu.ac.kr), 이원희(E-mail: leewh@knu.ac.kr)

effect of compression time was negligible. The nail holding power was not affected by compression temperature and time.

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

## 1. 서 론

라디에타 소나무(*Pinus radiata* D. Don)는 국내에 가장 많이 수입되고 있는 침엽수종이다. 생장이 빠르고 비교적 재질이 균질하며, 변재부의 비율이 높은 것이 특징이다. 뉴질랜드산 라디에타 소나무는 방부처리 시 약액이 목재 내부까지 거의 100% 침투되어 방부처리용 목재로써 많이 이용되고 있다. 그리고 국내에서는 내구성이 떨어진다고 판단되어 주로 건설용 가설재나 일회용 포장박스로 많이 이용되고 있다. 이처럼 제한된 용도로 사용되는 라디에타 소나무에 열압밀화를 통한 내구성을 부여한다면, 건축용 내·외장재는 물론 구조용재로써 그 활용가치가 향상될 것으로 생각된다.

목재의 부가가치 향상을 목적으로 압밀화 목재에 대한 연구가 많이 수행되었다. 주로 비중이 낮은 수종을 이용하여 비중증가에 의한 물리적, 역학적 특성의 향상을 도모하였다(Norimoto, 1993; Wang, 2000). Tabarsa (1995)는 열압공정이 목재의 건조속도, 평형함수율, 흡습성, 치수안정성, 파괴계수, 탄성계수 등에 영향을 미친다는 연구를 수행하였으며, Kubojima 등(2003, 2004)은 압밀화 목재의 휨특성과 진동특성에 대한 전단계수의 영향을 연구하였다. Asako 등(2002)은 삼나무 열압밀화재의 열전도성을 측정하여 밀도의 증가에 따라 열압밀화재의 열전도성도 함께 증가한다고 보고하였다. 그리고 Yuhe 등(1999)은 오동나무 압밀화재의 스프링백 유발요인에 대해 연구하였으며, Unsal 등(2008)은 소나무 보드의 내부밀도분포, Janka 경도, 함수율에 대해 압력과 온도가 미치는 영향을 연구하여 압밀화 압력과 온도의 증가에 따라 밀도와 경도가 증가한다고 보고하였다. 이 등(2000)은 수증기 처리에 의한 열압밀화재의 압축 고정에 관한 연구를 수행하였고, 김 등(2000)

은 수증기처리 열압밀화 목재의 강도적 성질에 관한 연구를 하였다. Cadan 등(2010)은 열압밀화한 미송 단판의 표면 품질을 연구하여 압력이 증가할수록 단판의 표면 거칠기가 개선된다고 보고하였다. 이 외에도 목재의 열압밀화를 통한 흡수성, 팽윤성, 부패 및 흰개미에 대한 저항성이 연구되었다(Unsal, 2009).

본 연구에서는 라디에타 소나무의 부가가치 향상을 목적으로 압체온도와 시간에 따른 종압축강도, 휨강도, 브리넬경도, 못뽑기저항 등을 조사하여, 라디에타 소나무 열압밀화재의 기초적인 역학적 특성 자료를 제시하고자 한다.

## 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 (± 0.08), 평균연륜폭은 10.2 (± 1.5) mm이며, 결함이 없는 무결점 부분을 선택하여 열압밀화를 실시하였다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 목재의 열압밀화

열압밀화 시험편을 제작하기 위해 먼저 기건상태의 시험편을 감압상태로 24시간 동안 물에 침지시킨 다음 70°C의 건조기에서 건조하여 시험편의 함수율이 15%가 되었을 때 열압밀화를 실시하였다. 열판

프레스기를 사용하여 모든 시험편은 stop-bar에 의해 약 50% 수준으로 압밀화 되었다. 모든 시험편은 방사방향으로 압밀화를 실시하였고, 압밀화 조건은 압력 65 kgf/cm<sup>2</sup>, 압체온도 70, 100, 140, 180, 220°C의 5가지 조건과 압체시간 30, 60, 90분의 3가지 조건으로 하였다. 시험편의 개수는 각 조건당 3개씩 제작하여, 45개의 열압밀화재와 압밀화하지 않은 대조군 3개, 총 48개의 열압밀화 시험편을 준비하였다.

### 2.2.2. 종압축강도

종압축강도의 측정은 만능강도시험기(HOUNSFIELD TEST EQUIPMENT LTD, H50K-S)를 이용하였으며, 시험편을 40 mm (L) × 20 mm (R) × 20 mm (T) 크기로 재단하여 3 mm/min의 하중속도로 실시하였다. 각 열압밀화 조건에 따라 8개의 시험편을 제작하여 총 108개의 시험편을 준비하였다.

### 2.2.3. 휨강도

휨강도는 열압밀화 시험편을 200 mm (L) × 18 mm (R) × 10 mm (T) 크기로 재단하여 만능강도시험기를 이용하였으며, 각 열압밀화 조건에 따라 5개씩 총 80개의 시험편을 준비하였다. 휨강도의 측정은 3-point bending test로 실시하였고, span의 길이는 180 mm, 하중속도는 3 mm/min로 측정하였다.

### 2.2.4. 브리넬경도

브리넬경도는 만능강도시험기를 이용하여 0.5 mm/min의 하중속도로 시험편의 표면경도를 측정하였다. 브리넬 경도  $H_B$ 를 구하는 식은 다음과 같다.

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

여기에서 D는 쇠구슬의 직경(10 mm), h는 쇠구슬의 압입깊이(0.32 mm), P는 직경 10 mm인 쇠구슬의 압입깊이 h (mm)가  $1/\pi \div 0.32$  mm일 때 측정된 하중을 뜻한다. 모든 측정은 반경방향으로 실시하였으며, 각 시험편당 6회 반복 실시하였다.

### 2.2.5. 못뽑기저항

못뽑기저항 실험은 압체온도와 시간에 따라 150 mm (L) × 50 mm (R) × 50 mm (T) 크기의 열압밀화 목재 시험편 3개씩을 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. 시험편에 못을 박은 후 바로 시험을 실시하였으며, 시험 시 함수율이 w인 목재의 못뽑기 저항  $\sigma_w$ 는 아래의 식에 따라서 계산하였다.

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

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

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 열압밀화 후의 상태

압체온도 180°C, 압체시간 60분, 압축세트량 50%로 라디에타 소나무를 열압밀화 하여 비중 0.84 ( $\pm 0.03$ )의 압밀화 목재를 얻을 수 있었다. 이것은 대조군의 비중 0.48에 비해 크게 증가된 것으로 압밀화 목재의 역학적 특성 향상의 가장 직접적인 원인이다. 그리고 180°C의 높은 열과 압력으로 인해 열압밀화 목재의 표면은 매끄러웠으며, 재색은 암색화 되었다. 재색의 변화는 180°C의 높은 열로 60분간 목재를 가열한 결과 헤미셀룰로오스가 분해되어 목재의 백색도가 감소한 결과라고 판단된다. 모든 열압밀화 시험편에서 활렬이나 굽음 등의 결함은 발견되지 않았다.

### 3.2. 종압축강도

Table 1과 Fig. 1에 열압밀화 온도와 시간에 따른 종압축강도를 나타내었다. 본 연구에 이용된 시험편의 경우 연륜폭이 넓은 미성숙재를 많이 포함하고 있어 전반적으로 종압축강도 값이 낮게 나타났다. 압체

Table 1. Compressive strength of Radiata pine compressed wood

Compression Temperature	Compressive Strength (N/mm <sup>2</sup> )					
	70°C	100°C	140°C	180°C	220°C	
Compression Time (min)	30	17.5 (± 20)*	17.9 (± 18)	19.5 (± 23)	19.7 (± 11)	18.5 (± 17)
	60	18.3 (± 19)	19.2 (± 18)	19.7 (± 22)	20.0 (± 24)	18.4 (± 21)
	90	18.0 (± 14)	19.1 (± 11)	20.2 (± 14)	21.3 (± 0.8)	17.8 (± 20)

\* Standard Deviation.

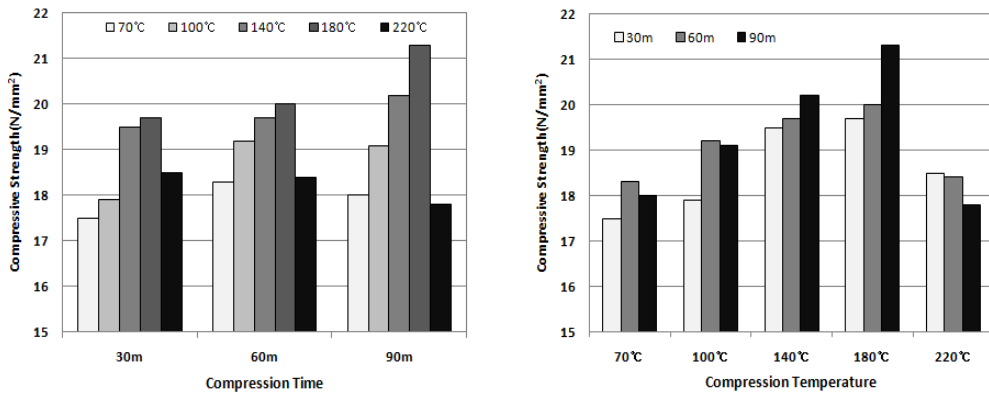


Fig. 1. Compressive strength of Radiata pine compressed wood by compression time (left) & temperature (right).

온도가 가장 낮은 70°C와 가장 높은 220°C를 제외한 나머지 조건에서는 압체온도와 시간의 증가에 따라 종압축강도가 함께 소폭 증가하는 경향을 나타내었다. 압체온도 180°C에서 90분간 열압밀화한 시험편의 종압축강도가 21.3 N/mm<sup>2</sup>로 가장 높은 값을 나타내었으며, 이 값은 대조군의 종압축강도 10.8 N/mm<sup>2</sup>와 비교하여 2배 정도 높은 값이다. 압체온도와 시간이 증가함에 따라 종압축강도가 증가하는 것은 열압밀화에 의한 함수율의 감소에 기인한다고 생각된다. 즉, 압체온도와 시간이 증가함에 따라 열압밀화 목재 내부의 수분이 감소하여 재질이 경화된 결과, 종압축강도가 상승한 것으로 판단된다(김 등, 2009; 2010). 그리고 압체온도 220°C에서 열압밀화한 시험편의 경우 오히려 종압축강도가 감소하였다. 이것은 압체온도가 상승하면서 목재의 분자가 진동하고 격자의 간

격이 넓어져 응집력이 감소되어 강도의 손실을 가져온 것으로 생각된다. 일반적으로 고온의 일시적 영향으로 온도가 감소하면 목재의 강도가 다시 회복되지만 온도가 어느 한계를 넘으면 열분해를 일으켜 강도 회복이 불가능한 영구적 영향을 받게 된다(강 등, 2008). 따라서 열압밀화 목재를 구조용으로 이용할 경우 180°C 이상의 압체온도를 적용하기에는 신중한 판단이 필요할 것으로 생각된다.

### 3.3. 휨강도

Table 2에 압체온도와 시간에 따른 휨강도의 변화를 나타내었다. 압체온도와 시간이 증가함에 따라 휨강도가 함께 증가하였지만, 압체온도 220°C에서는 오히려 휨강도가 감소했으며, 시간의 경과에 따라 더

Table 2. Modulus of rupture (MOR) of Radiata pine compressed wood

Compression Temperature	Modulus of Rupture (N/mm <sup>2</sup> )					
	70°C	100°C	140°C	180°C	220°C	
Compression Time (min)	30	145.1 (± 6.2)*	149.5 (± 5.6)	151.0 (± 4.9)	154.3 (± 12.3)	156.5 (± 5.5)
	60	147.6 (± 4.6)	150.1 (± 10.5)	158.5 (± 4.1)	164.3 (± 5.3)	145.0 (± 5.8)
	90	151.1 (± 5.7)	154.3 (± 5.4)	163.7 (± 9.1)	170.0 (± 7.8)	131.5 (± 8.0)

\* Standard Deviation.

Table 3. Modulus of elasticity (MOE) of Radiata pine compressed wood

Compression Temperature	Modulus of Elasticity ( $\times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> )					
	70°C	100°C	140°C	180°C	220°C	
Compression Time (min)	30	12.2 (± 1.2)*	15.9 (± 0.7)	16.0 (± 0.8)	17.4 (± 0.9)	15.1 (± 1.3)
	60	13.8 (± 1.0)	15.6 (± 0.7)	16.3 (± 0.7)	15.3 (± 0.5)	13.2 (± 0.9)
	90	15.6 (± 0.4)	15.7 (± 1.3)	16.4 (± 1.3)	14.2 (± 0.6)	11.1 (± 0.8)

\* Standard Deviation.

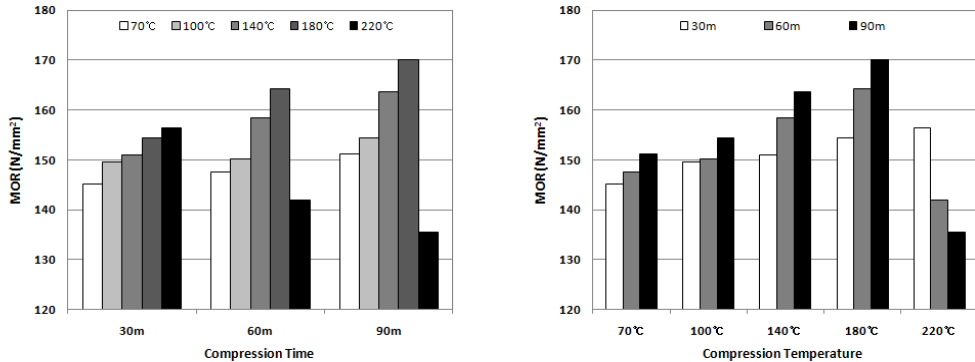


Fig. 2. MOR of Radiata pine compressed wood by compression time (left) & temperature (right).

속 감소된 값을 나타내었다. 이러한 결과는 종압축강도와 마찬가지로 압체온도와 시간의 증가에 따른 함수율 감소로 인해 휨강도가 증가하다가 압체온도 220°C에서는 열화에 의해 오히려 휨강도가 감소된 것으로 생각된다.

휨탄성계수 또한 압체온도의 증가와 함께 증가하다가 180와 220°C에서는 감소하였다. 그리고 압체시간이 증가하면서 압체온도 70°C 열압밀화 시험편의 휨탄성계수는 상승하였고, 100와 140°C는 비슷한 값을 유지하였다. 그러나 압체온도 180와 220°C 열압

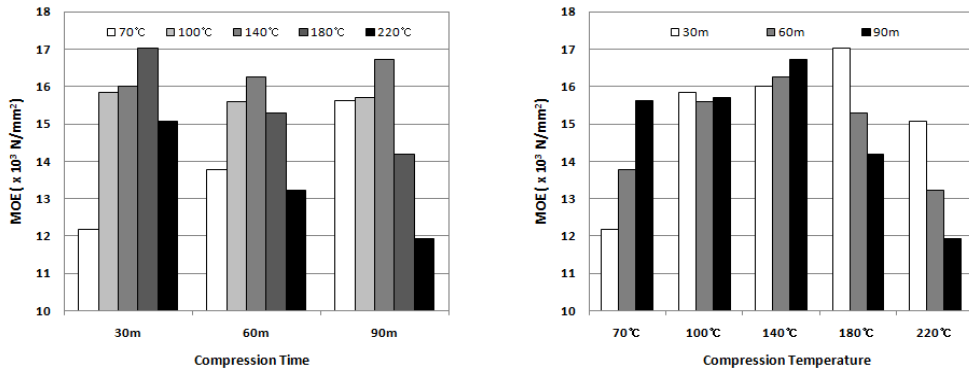


Fig. 3. MOE of Radiata pine compressed wood by compression time (left) & temperature (right).

Table 4. Hardness of Radiata pine compressed wood

Compression Temperature	Hardness (N/mm <sup>2</sup> )					
	70°C	100°C	140°C	180°C	220°C	
Compression Time (min)	30	9.4 (± 20)*	9.5 (± 1.5)	17.2 (± 1.3)	22.8 (± 1.8)	21.6 (± 1.7)
	60	9.5 (± 1.5)	10.8 (± 1.8)	19.7 (± 1.8)	22.5 (± 2.0)	22.7 (± 1.6)
	90	7.2 (± 1.3)	8.8 (± 1.2)	18.7 (± 2.3)	24.2 (± 3.3)	23.4 (± 2.0)

\* Standard Deviation.

밀화 시험편의 휨탄성계수는 압체시간의 증가에 따라 오히려 감소하였다. 일반적으로 탄성계수와 온도, 함수율과의 관계는 온도가 증가할수록 탄성계수는 저하되고, 함수율이 높으면 감소율은 더욱 커진다고 알려져 있다(Sulzberger, 1953). 본 연구에서 휨탄성계수가 증가하다 180와 220°C 영역에서 감소한 것은 압체온도 140°C까지는 가열처리 효과로 함수율이 감소하여 일단 탄성계수가 극대를 나타낸 후, 180°C 이상의 온도에서는 열 열화에 의한 저항력의 감소로 다시 감소된 것으로 생각된다.

### 3.4. 브리넬경도

압체온도와 시간에 따른 표면경도의 변화를 Table 4와 Fig. 4에 나타내었다. 압체온도의 증가와 함께 표면경도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 180°C에서 90분간 열압처리한 시험편의 경도는 24.2

N/mm<sup>2</sup>으로 대조군의 7.0 N/mm<sup>2</sup> 보다 3배 이상 향상된 값을 나타내었다. 이것은 압체온도가 증가되면서 시험편의 재질이 경화되어 경도가 상승된 것으로 생각된다.

그리고 동일한 온도에서 압체시간의 증가에 따른 경도의 변화는 거의 나타나지 않았다. 압체시간이 증가하면서 표면경도의 미소한 변동은 있으나 뚜렷한 증감의 경향은 찾을 수 없었다. 따라서 열압밀화 목재의 경도를 결정하는데 압체시간보다 압체온도가 더욱 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

### 3.5. 못뽑기 저항

Table 5에 못뽑기저항 실험 결과를 나타내었다. 못뽑기저항력은 접선단면과 방사단면이 비슷한 값을 나타내었고, 횡단면이 가장 낮은 값을 나타내었다. 못뽑기 저항력의 경우 압체온도와 시간의 증가에 따

열압밀화 라디에타 소나무재의 역학적 특성

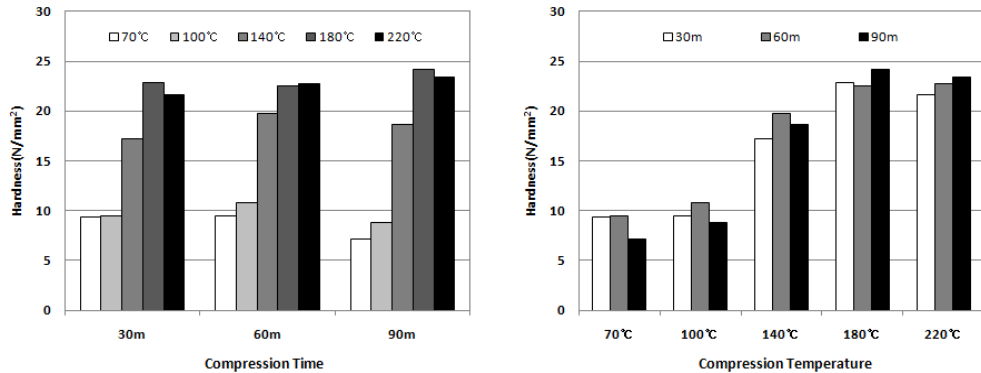


Fig. 4. Hardness of Radiata pine compressed wood by compression time (left) & temperature (right).

Table 5. Nail holding power of Radiata pine compressed wood

Compression Temperature		Nail Holding Power (N/mm)				
		70°C	100°C	140°C	180°C	220°C
Cross Section	30	61.2 (± 5.4)*	63.4 (± 8.9)	56.9 (± 3.2)	54.6 (± 3.5)	59.4 (± 6.9)
	60	57.7 (± 4.9)	62.5 (± 6.1)	57.3 (± 4.4)	60.1 (± 6.1)	62.0 (± 9.9)
	90	58.3 (± 7.2)	57.1 (± 4.7)	53.2 (± 7.0)	62.3 (± 8.3)	66.2 (± 5.3)
Radial Section	30	75.6 (± 7.7)	81.4 (± 6.9)	73.7 (± 4.6)	72.1 (± 8.7)	79.2 (± 9.2)
	60	79.0 (± 3.6)	82.3 (± 14.3)	79.1 (± 8.1)	70.9 (± 9.9)	80.0 (± 9.4)
	90	81.8 (± 10.7)	79.4 (± 11.2)	84.9 (± 9.4)	73.4 (± 6.5)	81.7 (± 4.9)
Tangential Section	30	74.2 (± 9.8)	80.6 (± 10.0)	79.9 (± 5.6)	81.7 (± 7.8)	86.7 (± 7.6)
	60	80.5 (± 11.3)	81.3 (± 9.7)	74.3 (± 7.7)	79.2 (± 4.8)	81.3 (± 10.4)
	90	83.1 (± 4.5)	78.3 (± 6.9)	72.6 (± 8.1)	83.1 (± 7.8)	74.9 (± 12.4)

\* Standard Deviation.

른 저항력의 변화는 관찰되었으나 뚜렷한 증감의 경향은 찾을 수 없었다. 따라서 압체온도와 시간이 못뽑기저항에 미치는 영향은 미약하다고 생각되며, 목재의 구조방향의 영향이 더욱 밀접한 관계를 나타내는 것으로 판단된다. 그리고 못뽑기 저항력의 향상은 압축세트량의 조절로 가능하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

압체온도와 시간에 따른 라디에타 소나무 열압밀화 목재의 역학적 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 종압축강도와 휨강도의 경우 압체온도와 시간의 증가와 함께 증가하였으나, 압체온도 220°C에서는 오히려 감소된 값을 나타내었다. 표

면경도는 압축온도의 증가와 함께 증가하였으며, 압체시간에 의한 영향은 미약하였다. 못뽑기저항의 경우 접선단면의 저항력이 가장 높게 나타났으며, 압축온도와 시간에 의한 영향은 거의 나타나지 않았다.

## 참 고 문 헌

1. 강춘원, 김남훈, 김병로, 김영숙, 변희섭, 소원택, 여환명, 오승원, 이원희, 이화형. 2008. 신교 목재물리 및 역학. 향문사 pp. 279~289.
2. 김광모, 박정환, 박병수, 손동원, 박주생, 김운섭, 김병남, 심상로. 2009. 삼나무 열처리제의 물리 및 역학적 특성. 목재공학 37(4): 330~339.
3. 김광모, 박정환, 박병수, 손동원, 박주생, 김운섭, 김병남, 심상로. 2010. 백합나무 열처리제의 물리 및 역학적 특성. 목재공학 38(1): 17~26.
4. 김정환, 이원희, 한규성, 변희섭. 2000. 수증기처리 열압 밀화 목재의 강도적 성질. 한국가구학회지 11(2): 1~6.
5. 이원희, 한규성. 2000. 수증기 처리에 의한 열압밀화 목재의 압축고정. 한국가구학회지 11(1): 85~89.
6. Yutaka, A., K. Hisayoshi, and N. Hisashi, Yamaguchi, Yoshiyuki. 2002. International Journal of Heat and Mass Transfer 45: 2243~2253.
7. Cadan, Z., S. Hiziroglu, and A. G. McDonald. 2010. Surface quality of thermally compressed Douglas fir veneer. Materials and Design 31: 3574-3577.
8. Kubojima, Y., T. Oktani, and H. Yoshihara. 2003. Effect of shear deflection on vibrational properties of compressed wood. Wood Sci. Technol. 38: 237~244.
9. Kubojima, Y., T. Oktani, and H. Yoshihara. 2004. Effect of shear deflection on bending properties of compressed wood. Wood and Fiber Science 36: 210~215.
10. Norimoto, M. 1993. Large compressive deformation in wood. Mokuzai Gakkaishi 39(8): 867~874.
11. Sulzberger, P. H. 1953. The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints. Aeron. Res. Cons. Comm., Australia, Rep. ACA-46. p. 44.
12. 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.
13. 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.
14. Unsal, O., S. N. Kartal, Z. Cadan, R. A. Arango, C. A. Clausen, and F. Green. III. 2009. Decay and termite resistance, water absorption and swelling of thermally compressed wood panels. International Biodeterioration & Biodegradation 63: 548~552.
15. Wang, J. M., G. J. Zhao, and I. Lida. 2000. Effect of oxidation on heat fixation of compressed wood of China fir. Forestry Studies in China 2(1): 73~79.
16. Yuhe, C. and H. J. Muehl. 1999. Factors of affecting the spring back of compressed *Paulownia* wood. Journal of Forestry Research 10(3): 168~172.