

# 라디에타소나무 열압밀화 목재의 경도와 치수안정성\*<sup>1</sup> - 압체 온도와 시간의 영향 -

황성욱\*<sup>2</sup> · 이원희\*<sup>2†</sup>

## Hardness and Dimensional Stability of Radiata Pine (*Pinus radiata* D.Don) Heat-Compressed Wood\*<sup>1</sup> - Effect of Press Temperature & Time -

Sung-Wook Hwang\*<sup>2</sup> · Won-Hee Lee\*<sup>2†</sup>

### 요 약

라디에타 소나무(*Pinus radiata* D.Don)를 이용하여 압체 온도와 시간에 따른 압밀화 목재의 경도와 치수안정성을 조사하였다. 압체 온도가 상승함에 따라 표면경도도 함께 증가하였다. 열압체 시간 30분을 기준으로 압체 온도 70°C에서는 경도 값이 5.0 N/mm<sup>2</sup>, 220°C에서 15.6 N/mm<sup>2</sup>으로 312% 향상되었으며, 60분에서는 313%, 90분에서는 224% 향상되는 것으로 나타났다. 치수회복실험 결과 열압체 온도가 상승함에 따라 치수고정효과는 상승한 반면 압체 시간의 증가에 의한 치수고정효과는 미약하였다. 접촉각 측정결과 압체 온도와 시간의 증가와 함께 접촉각도 증가했으며 압체 온도 220°C에서는 90° 이상의 접촉각을 나타내어 표면이 소수성을 나타냄을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

It was investigated the hardness and dimensional stability of heat-compressed wood by compression temperature and time. The surface hardness of heat-compressed wood increased with increasing compression temperature. The lowest hardness value (5.0 N/mm<sup>2</sup>) was observed in the temperature 70°C while the highest value (15.6 N/mm<sup>2</sup>) was obtained in compression

\*<sup>1</sup> 접수 2010년 12월 31일, 채택 2011년 3월 30일

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

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

temperature 220°C. Dimensional recovery test results showed that fixation of compression set improved with increasing compression temperature. However, the fixation effects were negligible by press time. Contact angle increased with increasing press temperature and time.

**Keywords:** heat-compressed wood, hardness, dimensional stability, contact angle

## 1. 서 론

라디에타 소나무(*Pinus radiata* D. Don)는 목재산업에서 널리 이용되고 있는 주요 수입산 침엽수종이다. 라디에타 소나무의 천연 분포지는 미국 캘리포니아 남부이지만, 조림목으로 장려되어 세계적으로 가장 많이 식재되고 있는 수종이다. 적지에 식재하였을 때는 생장이 대단히 빨라 20년이면 수고가 30 m, 직경이 50 cm에 달한다. 기건비중은 0.48 정도로 나뭇결은 균일하고 건조가 빠르며, 비중에 비해 단단한 편으로 가공이 용이하나 웅이 주변에 갈라짐이 많이 발생하는 것과 내구성이 낮은 것이 흠이다.

이러한 저비중, 속성수종의 물리적·기계적 물성을 향상시키기 위해 열압밀화 방법이 이용된다(Norimoto, 1993; Wang, 2000). 압밀화된 목재는 비중 증가에 의해 강도적인 특성이 현저하게 향상된다. 열압공정은 목재의 건조속도, 평형함수율, 흡습성, 치수안정성, 내구성, 표면품질, 파괴계수, 탄성계수, Janka 경도, 표면 마모도, 못 뽑기 강도, 전단계수 등에 영향을 미친다(Tabarsa, 1995; Kubojima 등, 2003; Wang 등, 2005). Unsal 등(2008)은 소나무 보드의 내부밀도분포, Janka 경도, 함수율에 대해 압력과 온도가 미치는 영향을 연구하여 압밀화 압력과 온도의 증가에 따라 밀도와 Janka 경도가 증가한다고 보고하였다. 그리고 Unsal 등(2003)은 유칼립투스스의 물리적·기계적 물성에 대한 열처리의 영향을 연구하여 열처리 시간과 온도가 증가할수록 밀도, 팽윤성, Janka 경도 값이 감소한다고 보고하였다. 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).

목재를 압밀화하여 제품을 생산할 때 가장 큰 문제점은 수분에 의해 압밀화목재가 스프링백 현상으로 회복된다는 것이다. 이와 관련하여 Seborg 등(1945)은 목재를 압밀화하는 동안 열처리를 하여 Staypak으로 알려진 밀도가 높고 치수안정성이 높은 목재를 개발하였다. 그리고 Inoue 등(1993)은 수증기와 열처리를 이용한 압밀화 목재의 고정에 관한 연구에서 200°C에서 1분, 180°C에서 8분 동안 수증기 처리를 할 경우 압밀화재의 압축세트 회복이 나타나지 않는다고 보고하였다.

본 연구에서는 라디에타 소나무를 각기 다른 온도와 시간으로 열압밀화를 실시하여 이에 따른 경도의 변화를 관찰하였다. 경도란 목재표면에 변형을 부여하려고 할 때, 목재가 보여주는 저항의 크기를 뜻하는데, 이는 가구와 바닥재 산업에서 매우 중요한 특성이다. 그리고 압밀화 목재의 수분흡수 실험을 통한 압밀화재의 치수회복 정도를 측정하였으며 표면의 물방울 접촉각을 측정하여 압밀화 온도와 처리시간이 열압축 고정과 목재표면에 어떤 영향을 미치는지 검토 고찰하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

본 연구에 사용된 라디에타 소나무(*Pinus radiata* D. Don) 판재는 경북대학교 인근 제재소에서 구입하였다. 소나무 판재의 치수는 1,500 mm (L) × 140 mm (R) × 15 mm (T)이며, 기건함수율 11.7%, 기건비중 0.43 (± 0.05), 평균연륜폭 1.1 (± 0.11) mm의 판목 판재를 양면 대패질하여 이용하였다. 압밀화 실험에

이용된 시험편은 웅이 등의 결함을 피하여 판재를 140 mm (L) × 140 mm (R) × 14.5 mm (T)로 재단하여 사용하였다.

## 2.2. 실험방법

### 2.2.1. 목재의 열압밀화

건조상태의 시험편을 감압상태로 24시간 동안 침지시켰다. 이 침지시험편을 온도 70°C의 건조기에서 가열하여 시험편의 함수율이 15%가 되었을 때 압밀화를 실시하였다. 열판 프레싱기를 사용하여 모든 시험편은 stop-bar에 의해 약 50% 수준으로 압밀화되었다. 압밀화 과정에서 연륜 경계부분의 파괴를 방지하기 위해 모든 시험편은 방사방향으로 압밀화하였다.

압밀화 조건은 압력 65 kgf/cm<sup>2</sup>, 열압체 온도 70, 100, 140, 180, 220, 260°C의 6가지 조건과 열압시간 30, 60, 90분의 3가지 조건으로 하였다. 시험편의 개수는 각 조건당 3개씩 제작하여, 54개의 열압밀화재와 압밀화하지 않은 대조군 3개, 총 57개의 시험편을 준비하였다.

### 2.2.2. 브리넬경도

만능강도시험기(HOUNSFIELD TEST EQUIPMENT LTD, H50K-S)를 이용하여 0.5 mm/min의 하중속도로 브리넬 경도를 측정하였다. 직경 10 mm인 최구슬의 압입깊이  $h$  (mm)가  $1/\pi \div 0.32$  mm일 때의  $P$  (N)를 측정한다. 따라서 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.

### 2.2.3. 압축회복시험

열압밀화 한 목재시험편의 수분에 대한 치수안정성을 평가하기 위해 수분흡수 실험을 실시하였다. 회복시험은 Inoue 등(1993)이 수증기 처리한 압밀화 목재의 치수안정화 시험과 동일한 방법인 simple boiling test를 이용하였으며, 이 실험의 방법은 다음과 같다. 먼저 압밀화 시험편을 수조에 넣고 30분간 감압을 실시한 다음 대기상태에서 210분 둔 후, 100°C의 끓는 물에 30분간 넣어 시험편을 팽윤시킨다. 마지막으로 팽윤된 시험편을 건조기에 넣어 전건시킨 다음 시험편의 최종 두께를 측정한다.

시험편의 개수는 각 압밀화 조건당 3개씩 측정하였다. 그리고 치수회복도는 다음의 식으로 계산되었다.

$$\text{치수회복도}(\%) = \frac{l_r - l_c}{l_o - l_c} \times 100$$

여기에서  $l_r$ 은 회복시험 후 시험편의 두께,  $l_c$ 는 압밀화 후 시험편의 두께,  $l_o$ 는 압밀화 전 시험편의 두께를 뜻한다.

### 2.2.4. 접촉각 측정

열압밀화 목재 시험편의 표면에 10  $\mu$ l의 물방울을 떨어뜨려 시험편의 표면과 물방울이 이루는 접촉각을 측정하였다. 접촉각 측정에는 비디오 현미경(SDC-411, SAMSUNG, Korea)으로 50배율로 영상을 촬영한 다음 접촉각 측정 소프트웨어 프로그램인 i-solution을 이용하여 시험편마다 10분간 분당 1장씩 접촉각을 촬영하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 열압밀화 온도에 따른 경도의 변화

열압밀화 온도에 따른 압밀화재의 경도를 Fig. 2에 나타내었다. 동일한 압밀화 시간에서 온도가 증가할수록 경도도 함께 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 먼저 압밀화 처리하지 않은 대조군의 경도가 4.8

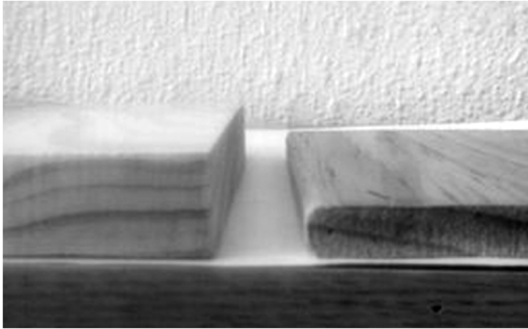


Fig. 1. Heat-compressed wood (Left - before compression, Right - after compression).

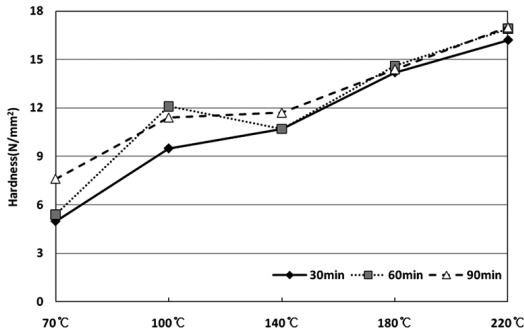


Fig. 2. Relationships between hardness and compression temperature of heat-compressed wood at treatment time 30, 60 and 90 min.

N/mm<sup>2</sup>로 나타났다. 그리고 온도 220°C, 압밀화 시간 90분인 시험편의 경도가 17.0 N/mm<sup>2</sup>로 가장 높은 경도 값을 나타냈으며, 온도 70°C, 압밀화 시간 30분인 시험편의 경도가 5.0 N/mm<sup>2</sup>로 가장 낮은 값을 나타내었다. 김 등(2009)은 삼나무 열처리재의 역학적 성능을 조사한 연구에서 열처리에 의해 목재 내부의 수분 양이 감소하면서 재질이 경화되고 연성이 감소하여 전반적인 역학성능이 증가된다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서의 경도 증가는 압밀화에 의한 밀도의 증가와 더불어 수분이 공급되지 않는 조건에서 목재에 가해진 높은 열에 의해 목재의 연성이 감소되어 경도가 증가한 것으로 생각된다.

각 압밀화 처리 시간별 온도에 따른 경도의 최소값

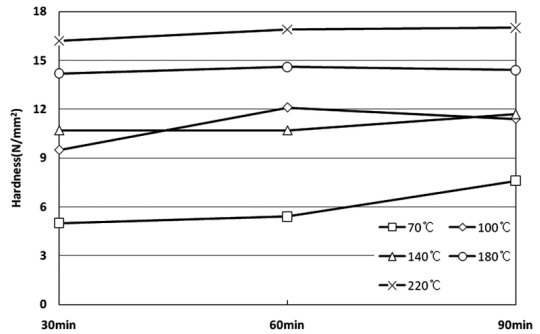


Fig. 3. Relationships between hardness and compression time of heat-compressed wood at various temperatures.

과 최대값을 비교하면 30분 처리 시 70°C에서 경도가 5.0 N/mm<sup>2</sup>, 220°C에서 15.6 N/mm<sup>2</sup>으로 312% 향상되었다. 60분에서는 70°C에서 5.4 N/mm<sup>2</sup>, 220°C에서 16.9 N/mm<sup>2</sup>로 온도상승에 따라 경도가 313% 향상되었다. 그리고 90분에서는 70°C에서 7.6 N/mm<sup>2</sup>, 220°C에서 17.0 N/mm<sup>2</sup>로 경도가 224% 향상되는 것이 확인되었다. 이 결과는 Inoue 등(1993)이 연구했던 50%의 압축률로 압밀화한 삼나무재의 경도가 0.7~0.28 MPa로 약 3배 정도 상승한 결과와 거의 일치한다.

### 3.2. 열압밀화 시간에 따른 경도의 변화

열압밀화 시간의 증가에 따른 경도 값의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로 압밀화 시간이 길어질수록 경도 값이 증가하는 경향을 나타내었지만, 70°C를 제외하고 대부분의 온도에서 증가폭이 매우 작다는 것을 알 수 있었다. 오히려 열압밀화 온도 100°C와 180°C에서는 압밀화 시간이 60분에서 90분으로 넘어가면서 경도 값이 소폭 감소했다.

이 실험결과를 통해 열압밀화 목재의 경도를 결정하는데 압밀화 시간보다는 가열온도가 더욱 큰 영향을 미친다는 사실을 분명하게 확인할 수 있었다.

### 3.3. 압축회복시험

열압밀화 목재의 치수회복을 알아보기 위해 sim-

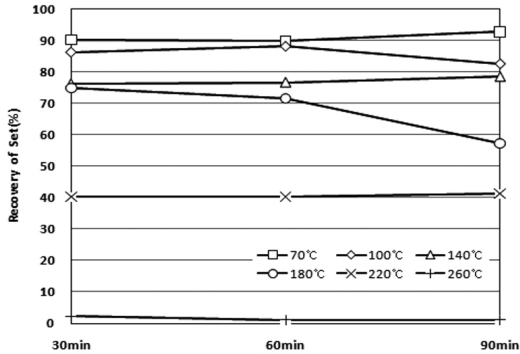


Fig. 4. Relationships between recovery of set and compression conditions of heat-compressed wood.

ple boiling test한 시험편의 두께방향 치수회복도를 Fig. 4에 나타내었다. 열압밀화 온도가 증가할수록 치수고정 효과가 현저히 개선된다는 것을 알 수 있었다(Fig. 5). 압밀화 온도 70°C에서 약 90% 정도의 치수회복도를 보였지만 220°C에서는 약 40% 수준으로 현저히 감소하였다. 그리고 압밀화 온도 260°C에서는 30분간 압밀화한 시험편의 치수회복도가 2.2%, 60분과 90분간 압밀화한 시험편의 경우 치수회복도가 1.1%로 매우 우수한 치수고정 효과를 나타내었다. 그러나 압밀화 온도 260°C의 경우 높은 열로 인해 목재의 재색이나 무늬결을 찾아볼 수 없을 정도로 표면이 심하게 탄화되었다. 따라서 목재 고유의 미적 가치가 중요한 내장용재로 열압밀화 목재를 사용하기 위해서는 260°C 이상의 고온은 적합하지 않다고 생각된다. 그리고 본 실험을 통해 열압밀화 목재의 치수고정에는 압밀화 시간보다 열압밀화시 가열 온도가 더욱 큰 영향을 미친다고 판단되었다.

이 등(2000)은 수증기 처리한 열압밀화 목재의 압축고정에 관한 연구에서 소나무재를 압축률 50%로 압밀화한 다음 120°C의 수증기로 100분간 처리한 결과 치수회복도가 1.9%로 매우 양호한 치수고정 효과를 보고하였다. 그리고 Inoue 등(1993)의 연구에 의하면 열압밀화 후 180°C에서 20시간, 220°C에서 5시간 건조할 경우 회복률이 2% 이하로 나타났다. 이러한 압밀화에 의한 치수고정은 열에 의한 목재의 흡습



Fig. 5. Relationships between recovery of set and compression temperature of heat-compressed wood.

성 저하 및 결정화도의 증가, 성분분해에 따른 변형 회복력의 약화, 분자 간의 가교 형성과 응집력의 향상 등의 영향을 받는다고 알려져 있다(Dwianto 등 1997).

이상의 결과를 종합해보면 열압밀화 목재를 가구재나 마루재 등의 내장재로 사용하기 위해서는 220°C 이하의 온도에서 열압밀화를 실시한 다음 추가적으로 수증기 처리나 열처리 등의 후처리과정이 수반되어야만 치수안정성이 뛰어난 소재로서 그 가치를 인정받을 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.4. 접촉각의 변화

접촉각 측정결과를 Table 1에 나타내었다. 전반적으로 열압밀화 온도와 압체시간이 증가함에 따라 접촉각도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 시험편 표면과 물방울이 이루는 각이 90° 이상이 되면 시험편의 표면은 소수성이라 할 수 있다. 본 연구에서는 압밀화 가열온도가 220°C 이하일 경우에는 모든 시험편의 표면에 물방울이 젖어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 220°C에서는 모든 접촉각이 90° 이상인 것으로 나타나 표면이 소수성을 가지는 것으로 확인되었다. 그리고 시간의 경과에 따라 접촉각은 점차 감소하여 10분이 지났을 때 30분과 60분 압밀화재의 경우 접촉각이 각각 70°와 71°로 감소되었으나, 90분

Table 1. Change of contact angle with time

Treatment condition		Contact angle with time ( $\angle^\circ$ )				
Temp. (°C)	Time (min)	0 min	1 min	3 min	5 min	10 min
70	30	59	0	0	0	0
	60	64	0	0	0	0
	90	68	0	0	0	0
100	30	76	67	44	6	0
	60	81	31	0	0	0
	90	90	37	0	0	0
140	30	57	42	31	28	13
	60	45	12	0	0	0
	90	68	34	16	0	0
180	30	42	29	8	0	0
	60	69	40	35	34	33
	90	66	65	54	50	39
220	30	91	89	83	79	70
	60	95	88	81	75	71
	90	103	100	99	98	92

간 압밀화한 시험편은 10분이 경과한 후에도 92°의 접촉각을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

열압 공정 시 프레스기 열판의 높은 열이 시험편의 표면을 직접적으로 가열하게 된다. 이때 높은 열에 의해 흡착매체인 표면의 셀룰로오스 결정화도의 증가 및 열에 의한 물분자의 이탈로 인해 셀룰로오스 체인간 및 체인 내의 수소결합이 생성되어 열압밀화재의 표면이 소수성을 나타내는 것으로 생각되어진다.

## 4. 결 론

열압밀화 온도와 시간에 따른 경도 및 치수회복도를 조사하기 위해 압축율 50% 수준으로 압밀화된 라디에타 소나무를 재료로 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 압밀화 가열온도가 상승함에 따라 경도가 현저하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 압밀화 시간 30분을 기준으로 압밀화 온도 70°C에서는 경도 값이 5.0 N/mm<sup>2</sup>, 220°C에서 15.6 N/mm<sup>2</sup>로 312% 향

상되었으며, 60분에서는 313%, 90분에서는 224% 향상되는 것으로 나타났다. 그리고 압밀화 시간의 증가에 따라 경도도 함께 증가하는 경향을 나타내었지만 열압온도의 영향과 비교할 때 그 증가 폭은 매우 적었다.

둘째, 치수회복실험 결과 열압체 가열온도가 상승함에 따라 치수고정효과도 상승한 반면 압밀화 시간의 증가에 의한 치수고정효과는 미약하였다. 그리고 열압밀화 목재를 내장재로 이용하기 위해서는 260°C 이하의 온도에서 압밀화를 실시한 다음 후처리로서 열처리나 수증기처리 등의 추가적인 처리방법이 수반되어야 한다고 판단되었다.

마지막으로, 압밀화 온도와 압체 시간의 증가와 함께 접촉각도 증가했으며, 압밀화 온도 220°C 이상에서는 90° 이상의 접촉각을 나타내어 압밀화목재의 표면이 소수성을 나타냄을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 김광모, 박정환, 박병수, 손동원, 박주생, 김운섭, 김병남, 김병로. 2009. 삼나무 열처리재의 물리 및 역학적 특성. 목재공학 37(4): 330~339.
2. 김정환, 이원희, 한규성, 변희섭. 2000. 수증기처리 열압밀화 목재의 강도적 성질. 한국가구학회지 11(2): 1~6.
3. 이원희, 한규성. 2000. 수증기 처리에 의한 열압밀화목재의 압축고정. 한국가구학회지 11(1): 85~89.
4. Cadan, Z., S. Hiziroglu, and A. G. McDonald. 2010. Surface quality of thermally compressed Douglas fir veneer. Materials and Design 31: 3574~3577.
5. Dwianto, W., 井上雅文, 則元 京. 1997. 熱處理による壓縮變形の固定. 木材學會誌 43(4): 303~309.
6. Hakkou, M., M. Petrissans, A. Zoulalian, and P. Gerardin. 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polymer Degradation and Stability 89: 1~5.
7. Inoue, M., M. Norimoto, M. Tanahashi, and M. R. Rowell. 1993. Wood and Fiber Science 25(3): 224~235.
8. Inoue, M., J. Kodama, Y. Yamamoto, and Y. Misawa. 2008. Dimensional stabilization of compressed wood using high-frequency heating II. 木材學會誌 52(3): 173~177.

9. Kubojima, Y., T. Oktani, and H. Yoshihara. 2003. Effect of shear deflection on bending properties of compressed wood. *Wood and Fiber Science* 36: 210~15.
10. Norimoto, M. 1993. Large compressive deformation in wood. *Mokuzai Gakkaishi* 39(8): 867~874.
11. Seborg, R. M., M. A. Millett, and A. J. Stamm. 1945. Heat - stabilized compressed wood (Staypak). *Mech. Eng.* 67: 25~31.
12. Tabarsa, T. 1995. The effects of transverse compression and press temperature on wood response during hot-pressing. MSc., thesis, The University of New Brunswick, Canada.
13. Unsal, O., S. Korkut, and C. Atik. 2003. The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) wood. *MADERAS: Ciencia Y Tecnologia Journal* 5(2): 145~152.
14. Unsal, O. and N. Ayrilmis. 2005. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) wood. *Journal of Wood Science* 51: 405~409.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Wang, J. and P. A. Cooper. 2005. Vertical density profiles in thermally compressed balsam fir wood. *Forest Products Journal* 55: 65~68.