

잣나무 열압밀화재의 열처리에 의한 치수안정성 변화¹

조 범 근² · 황 성 옥² · 강 호 양² · 이 원 희^{2,†}

Change of Dimensional Stability of Thermally Compressed Korean Pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) Wood by Heat Treatment¹

Beom-Geun Cho² · Sung-Wook Hwang² · Ho-Yang Kang² · Won-Hee Lee^{2,†}

요 약

국내산 잣나무(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) 열압밀화재의 치수안정성 확보를 위해 열압밀화 후 열처리를 실시하여 흡수시험을 실시하였다. 잣나무재를 압축세트량 50%로 열압밀화하여 비중 0.84의 고비중재를 얻을 수 있었다. 열처리 온도와 시간이 증가함에 따라 열압밀화재의 흡수성과 팽윤성은 감소하였다. 그리고 열압밀화 후 열처리에 의해 열압밀화재의 치수안정성은 크게 향상되었다. 대조군의 두께 회복률이 11.5%인 반면, 120℃ 온도에서 24시간 열처리된 그룹의 두께회복도는 3.8%로 나타났다. 열압밀화 후 열처리는 열압밀화재의 치수안정성 확보를 위한 매우 효과적인 방안을 확인하였다.

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the change of dimensional stability of thermally compressed Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) wood by post heat treatment. Specific gravity of compressed wood was notably increased with thermal compression. In the compression set 50%, compressed Korean pine showed a specific gravity of 0.84. The amount of water absorption and swelling of thermally compressed Korean pine decreased with increasing temperature and time of the heat treatment. Set recovery also decreased with increasing temperature and time of heat treatment. Thermally compressed Korean pine that heat-treated in 120℃ for 24 hours showed a set recovery of 3.8%, whereas non-treated group showed 11.5%. Therefore, it was confirmed that the thermal treatment was a very effective method for the dimensional stability of the heat compressed wood.

Keywords : Korean pine, thermal compression, heat treatment, dimensional stability

¹ Date Received June 2, 2015, Date Accepted June 22, 2015

² 경북대학교 농업생명과학대학 임산공학과. Department 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)

1. 서 론

목재의 열압밀화 가공은 저비중 수종의 고밀도화를 통한 물리 및 역학적 성능의 향상이 주요 목적이다. 목재의 역학적 성능은 비중과 직접적인 관련이 있기 때문에 열압밀화된 목재의 역학적 성질은 비중의 증가와 함께 크게 향상된다(Tabarsa 1995; Kubojima *et al.* 2003; Hwang and Lee 2011a).

열압밀화재의 이용에 있어 가장 중요한 조건은 치수안정성의 확보이다. 치수안정성이 확보되지 않은 열압밀화재는 열과 수분에 의해 목재 내부에 저장되어 있던 탄성에너지가 해소되면서 형상이 회복된다. 이러한 형상회복은 실용적 측면에서 열압밀화재의 가장 큰 약점이라 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 열압밀화재의 치수안정성 확보를 위한 많은 연구가 수행되었다. 260℃ 온도에서 30분간 열압한 라디에타소나무 열압밀화재의 두께 회복률이 2.2% (Hwang and Lee 2011b)로 나타났으며, 소나무 열압밀화재를 120℃의 수증기로 100분간 처리했을 때의 두께 회복률이 1.9% (Jung and Lee 2000)로 나타났다. 그리고 삼나무 열압밀화재를 180℃에서 20시간, 220℃에서 5시간 건조했을 때의 두께 회복률은 2% 이하(Inoue 1993)로 보고된 바 있다. 이상의 연구결과와 같이 열압밀화 과정에서 열압 온도가 증가됨에 따라 치수안정성은 향상된다. 그러나 열압 온도 180℃ 이상에서 열압밀화를 실시할 경우 고온에 의한 목재의 열화가 발생하여 역학적 성능이 저하되는 부작용이 발생한다(Morsing 2000; Hwang and Lee 2011c; Hwang *et al.* 2015). 또한 200℃ 이상의 고온에서 제작된 열압밀화재는 재색의 암색화가 매우 진행된다는 단점이 있다(Hwang and Lee 2011d).

따라서 본 연구는 열압밀화를 통한 국내산 침엽수의 고부가가치화 연구의 일환으로 치수안정성 확보를 위해 실시하였다. 역학적 성능의 저하 없이 치수안정성을 확보하기 위해 열압밀화 후 열처리를 실시하였다. 선행된 연구 결과를 바탕으로 최대의 역학적 성능을 나타내었던 열압온도 180℃에서 열압밀화 목재를 제작한 후(Hwang and Lee 2011a; Hwang *et al.*

2014) 열처리를 실시하였으며, 열처리 온도 및 시간이 치수안정성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

공시재료는 대표적인 국산 침엽수종 중에서 잣나무(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)를 이용하였다. 제재된 잣나무 판재 중 판목판재를 선별한 후 60 mm (L) × 60 mm (R) × 24 mm (T) 크기로 시험편을 절삭하여 열압밀화 가공에 이용하였다. 잣나무재 시험편의 기건비중은 0.48 (± 0.03), 함수율은 12.6% (± 0.8%). 평균연륜폭은 3.8 mm (± 0.5 mm)이었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 열압밀화재 제작

열압밀화재의 제작은 선행연구(Hwang *et al.* 2014, 2015)와 동일한 방법으로 진행되었다. 두께 24 mm의 잣나무재를 압축률 50%로 열압밀화하여 두께 12 mm의 열압밀화재를 제작하였다. 열압밀화 전 함수율 약 13%의 잣나무재 시험편을 폴리에틸렌 필름으로 밀봉한 후 700 W 출력의 마이크로파 오븐으로 90초간 가열하여 시험편을 연화하였다. 이후 열판프레스를 이용하여 열압온도 180℃, 열압시간 60분, 압력 80 kgf/cm²의 조건에서 시험편의 방사방향으로 열압밀화를 실시하여 총 36개의 열압밀화재를 제작하였다.

2.2.2. 열처리

치수안정성 확보를 위해 잣나무재를 열압밀화한 다음 열처리를 실시하였다. 잣나무 열압밀화재의 열처리에는 열기건조오븐을 이용하였다. 열처리는 80℃, 100℃, 120℃의 각 온도조건에서 2, 6, 12, 24시간 동안 실시하였다. 각 조건당 3개의 시험편을 이용하여 총 36개의 열압밀화재가 열처리에 이용되었다.

2.2.3. 흡수시험

치수안정성을 확인하기 위하여 KS F 2204에 의거하여 24시간 흡수시험을 실시하였다. 침지 초기 2시간 동안은 30분 간격, 침지 5시간까지는 1시간 간격, 침지 9시간까지는 2시간 간격, 이후 24시간까지는 3시간 간격으로 시험편의 두께와 중량을 측정하였다. 각 측정 시점에서 측정된 두께와 중량을 바탕으로 두께 팽윤율과 흡수량을 측정하였다. 흡수량 측정 시험편의 경우 단위면적당 흡수량을 측정하기 위해 시험편의 횡단면을 제외한 나머지 단면에는 아크릴계 방수용 페인트(Damplock, Seal-Krete, USA)를 2회 도포하여 시험편의 횡단면을 통한 흡수를 유도하였다. 최종적으로 흡수 24시간 종료 후 시험편을 전건하여 측정된 두께를 바탕으로 치수회복도를 측정하였다. 팽윤율(S_T), 흡수량(W_A), 치수회복도(R_T)는 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$S_T (\%) = \frac{t_m - t_c}{t_c} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

$$W_A (\text{g/cm}^2) = \frac{w_m - w_c}{A} \dots\dots\dots (2)$$

$$R_T (\%) = \frac{t_r - t_c}{t_o - t_c} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

여기에서, S_T : 두께 팽윤율, W_A : 단위면적 당 흡수량, R_T : 치수회복도, t_m : 흡수시험 중 각 측정시점에서의 시험편 두께, t_c : 열압밀화 후 시험편 두께, t_r : 흡수시험 후 전건상태의 시험편 두께, t_o : 열압밀화 전 시험편 두께, w_m : 흡수시험 중 각 측정시점에서의 시험편 중량, w_c : 흡수시험 전 열압밀화재의 중량, A : 시험편의 흡수단면적(cm^2)을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열압밀화 후 비중의 변화

열압밀화 후 잣나무재의 비중은 0.84 (± 0.04)로 나타났다. 이 값은 열압밀화 전의 비중 0.48에 비해 75% 증가된 수치이다. 증가된 비중은 잣나무재의 역

학적 성능의 향상을 수반한다. 국내산 침엽수 열압밀화재의 역학적 성능을 연구한 Hwang *et al.* (2014)의 연구에 의하면 압축률 50% 수준의 잣나무 열압밀화재는 대조군 대비 종압축강도가 약 76%, 휨강도가 약 83%, 표면경도가 약 55% 향상된다고 보고한 바 있다. 이러한 역학적 성능의 향상은 열압밀화에 의한 비중의 증가에 기인한다.

3.2. 흡수성

잣나무 열압밀화재의 단위시간 당 흡수량을 Fig. 1에 나타내었다. 모든 열처리 조건별 그룹에서 흡수 초기 1시간 동안 최대 흡수량을 나타내었으며, 이후 흡수량은 급격히 줄어 흡수 5시간 경과 이후 안정화되는 경향을 나타내었다. 그리고 열압밀화 후 열처리의 온도 및 시간이 증가함에 따라 시험편의 흡수성은 감소하였다.

열처리 온도에 따른 흡수성 변화를 살펴보기 위해 가장 높은 흡수량을 나타낸 흡수 1시간 경과 시점에서의 단위시간 당 흡수량을 살펴보면, 열처리를 실시하지 않은 대조군의 흡수량은 $0.069 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$ 로 나타났다. 그러나 80°C 열처리 시험편의 경우 $0.066\text{-}0.057 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$ 의 흡수량을 나타내었으며, 100°C 열처리는 $0.056\text{-}0.050 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$, 120°C 열처리는 $0.052\text{-}0.044 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$ 를 나타내었다. 그리고 흡수량이 안정화되는 시점인 흡수 5시간 경과 이후의 흡수량은 80°C 온도에서 2시간 열처리한 그룹을 제외한 모든 그룹에서 대조군과 비슷하거나 더 낮은 흡수량을 나타내었다.

또한 열처리 시간이 증가함에 따라 흡수성은 감소되었다. 80°C 열처리 그룹의 경우, 흡수 초기 1시간 시점에서의 단위시간당 흡수량은 2, 6, 12, 24시간 열처리 조건에 따라 각각 $0.066, 0.061, 0.057, 0.057 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$ 의 흡수량을 나타내었다. 그리고 100°C 와 120°C 열처리에서도 열처리 시간의 증가에 따라 흡수성은 감소하였으며, 120°C 에서 24시간 열처리한 시험편의 경우 흡수 1시간 경과 후 $0.44 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$ 의 흡수량을 나타내었다. 열처리 시간 증가에 의한 흡수량 감소의 경향은 흡수 종료시점까지 유지되었다.

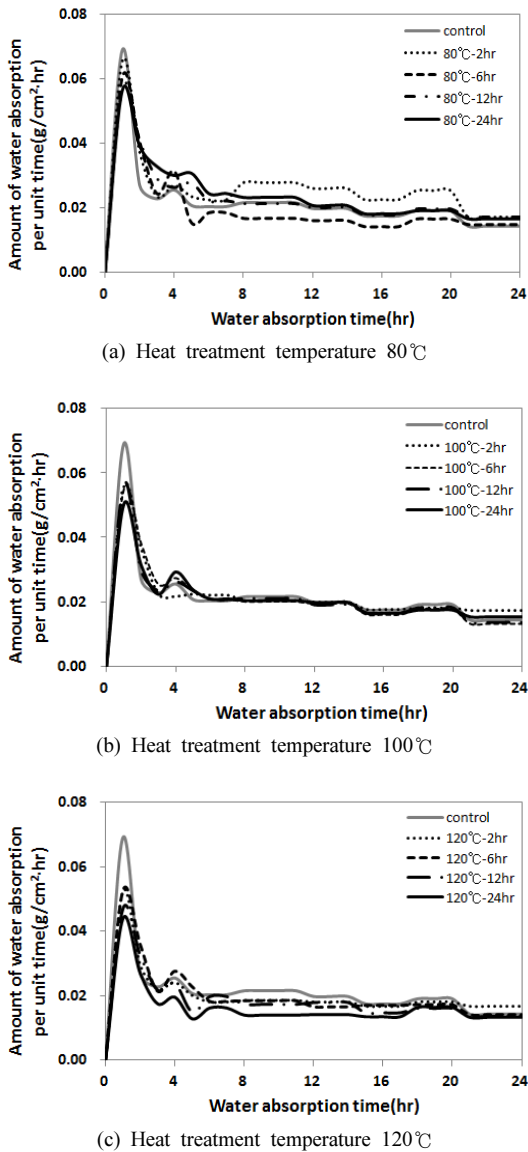


Fig. 1. Amount of water absorption per unit time of heat-treated Korean pine wood after thermal compression.

즉, 열처리 온도 및 시간의 증가는 열압밀화재의 절대적인 흡수성을 감소시켰다.

이러한 열처리에 의한 흡수성의 감소는 열처리 과정에서 높은 온도에 의해 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌, 추출물 등 목재 주요성분 분자구조의 극

성기(polar groups)가 변화된 결과이다(Hillis 1984). 특히 열에 의한 헤미셀룰로오스의 열화는 목재의 흡수성 감소에 큰 영향을 미친다고 알려져 있다(Inoue *et al.* 1993).

3.3. 팽윤성

열압밀화 후 열처리한 시험편의 팽윤율을 Fig. 2에 나타내었다. 일반적으로 흡수시험에 의한 열압밀화재의 팽윤은 흡수 시작과 동시에 가장 높은 팽윤율을 나타내고 이후 안정화되는 경향을 보인다(Jung and Lee, 1998; Laine *et al.* 2013a). 그러나 예상과 달리 본 연구에서의 팽윤율은 흡수 초기 0-1시간 경과 시점보다 1-2시간 흡수 구간에서 더 높은 팽윤율을 나타내었다. 이러한 현상은 다량의 송진을 함유하고 있는 국산 잣나무재의 특성상 열압밀화 및 열처리 과정에서 내부의 송진이 용출되고, 이렇게 용출된 송진이 흡수면을 코팅하여 흡수 초기의 팽윤을 다소 지연시킨 결과라 판단된다. 잣나무재의 열처리에 대한 연구를 실시한 Park *et al.* (2012)에 의하면 잣나무재를 200°C에서 10시간 동안 열처리할 경우 약 34.9%의 송진 제거효과가 있다고 보고한 바 있다.

Fig. 2를 살펴보면 열처리 온도 80°C를 제외한 100°C와 120°C 온도조건에서 열압밀화 후 열처리 온도의 증가에 따라 팽윤율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 24시간 흡수 종료 시점에서 대조군의 팽윤율은 13.0%로 나타났으며, 80°C 열처리 그룹의 팽윤율은 15.5-12.0%의 팽윤율을 나타내었다. 80°C 온도에서 6시간 열처리한 시험편의 경우 가장 높은 팽윤율인 15.5%를 나타내었다. 그러나 100°C와 120°C에서 열처리된 시험편의 팽윤율은 각각 12.6-11.1%, 12.0-8.4%로 나타나 열처리 온도의 상승에 따라 팽윤율은 감소되었다.

수분 흡수에 의한 열압밀화 목재의 팽윤은 가역적 팽윤과 비가역적 팽윤으로 구분할 수 있다. 가역적 팽윤은 흡수 후 건조에 의해 팽윤이 원상태로 회복되는 것을 의미하며, 비가역적 팽윤은 건조 후에도 팽윤이 회복되지 않는 것을 말한다(Laine *et al.* 2013a). 가역적 팽윤은 목재 고유의 흡수성에 의한

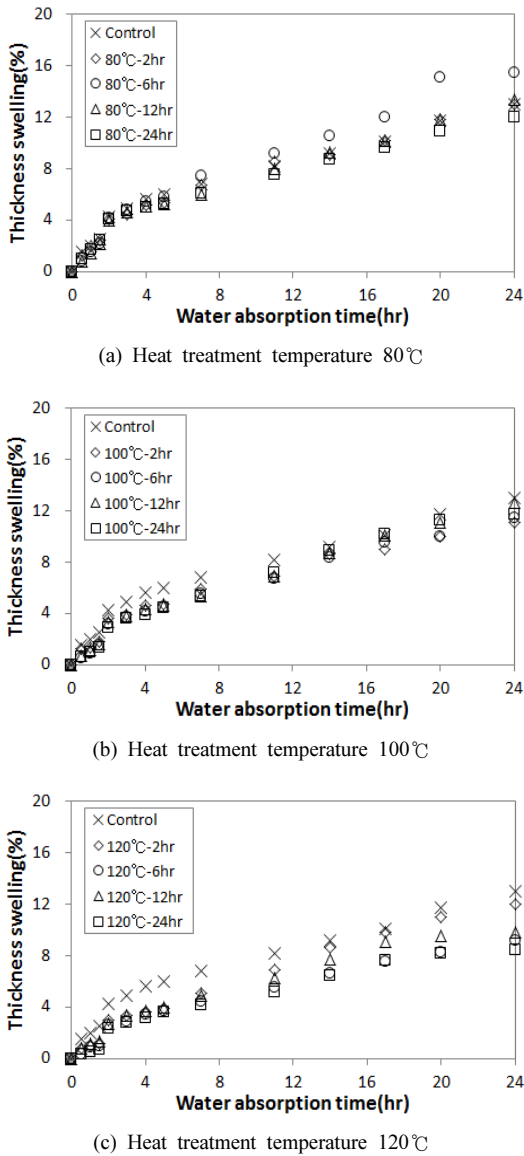


Fig. 2. Thickness swelling of heat-treated Korean pine after thermal compression.

것이며, 비가역적 팽윤은 압밀화 목재가 부분적으로 압축 전 형상으로 되돌아가려고 하는 것의 결과로써 이것은 압밀화 목재의 치수회복으로 나타난다.

각 열처리 조건별 총 팽윤율에 대한 가역적 팽윤과 비가역적 팽윤의 비율을 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 볼 수 있듯이, 열압밀화 후 열처리 온도가 높아질수록 팽윤율은 감소한다. 그리고 전반적으로 열처리 온도 및 시간이 증가할수록 비가역적 팽윤은 감소한 반면, 가역적 팽윤은 다소 증가하는 것으로 보인다. 여기에서 가역적 팽윤의 증가는 비가역적 팽윤의 감소로 인한 상대적인 증가라 할 수 있다. 열처리 온도 및 시간의 증가는 총 팽윤에 있어 치수 회복을 나타내는 비가역적 팽윤을 감소시키고 상대적으로 가역적 팽윤을 증가시킨다. 그리고 120°C에서 12시간, 24시간 열처리된 그룹의 경우 각 팽윤의 상대적인 양이 역전되어 비가역적 팽윤이 가역적 팽윤보다 낮은 수치를 나타내었다.

열압밀화 동안 마이크로피브릴의 결정영역은 주로 탄력적으로 변형된다. 이때 탄성에너지는 셀룰로오스의 고분자에 저장되며, 탄성에너지가 해소되면서 치수회복이 발생한다. 그리고 이 과정에서 내부응력이 생성되고, 내부응력은 헤미셀룰로오스의 비결정영역, 리그닌, 셀룰로오스의 반결정영역에 저장되는 것으로 추정된다. 압밀화될 때 목재의 구조는 새로운 형태로 배치되고, 헤미셀룰로오스와 리그닌 사이의 공유결합과 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스 사이의 수소결합은 파괴되지 않고 변형되는데, 이 변형은 준안정상태로서 가역적 팽윤을 나타내며, 수분 접촉과 열에 의해 다시 회복 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 압축과정에서 마이크로피브릴과 매트릭스 사이의 결합이 파괴되어 세포벽이 손상을 받는다면 열압밀화재 내부에 생성된 응력은 부분적으로 해소된다. 따라서 비가역적 팽윤은 감소되고 그 결과 치수 회복도 감소하게 된다(Morsing 2000; Laine et al. 2013a).

3.4. 치수안정성

24시간 흡수시험에 의한 잣나무 열압밀화재의 치수회복도를 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로 압밀화 후 열처리를 실시함으로써 치수안정성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

먼저, 열처리 온도에 따른 치수안정성의 변화를 살펴보면 열처리를 실시하지 않은 열압밀화재의 경

Table 1. The proportion of irreversible-to-reversible swelling of heat-treated Korean pine after thermal compression

Temp. (°C)	Time (hr)	Swelling (%)			
		TS	IS	RS	S.D.
Control (non-heat treatment)		100.0	91.4	8.6	3.6
80	2	100.0	80.1	19.9	3.4
	6	100.0	75.6	24.4	7.0
	12	100.0	71.1	28.9	3.0
	24	100.0	69.0	31.0	3.6
100	2	100.0	61.1	38.9	2.8
	6	100.0	59.2	40.8	1.5
	12	100.0	54.8	45.2	5.2
	24	100.0	53.2	46.8	2.2
120	2	100.0	63.4	36.6	3.8
	6	100.0	61.0	39.0	2.7
	12	100.0	46.7	53.3	2.5
	24	100.0	46.3	53.7	1.7

Notes) TS, total swelling; IS, irreversible swelling; RS, reversible swelling; S.D., standard deviation of irreversible and reversible swelling.

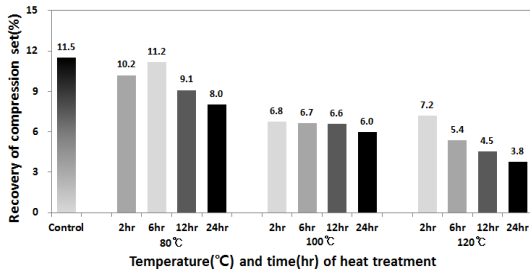


Fig. 3. Recovery of compression set by water absorption.

우 두께 회복률이 11.5%로 나타났으며, 80°C 온도로 열처리한 그룹은 11.2~8.0%, 100°C 열처리 그룹은 6.8~6.0%의 두께 회복률을 나타내었다. 그리고 120°C 열처리의 경우 7.2~3.8%의 두께 회복률을 나타내어 가장 뛰어난 치수안정을 보였다.

열처리 시간의 증가와 함께 치수안정성도 향상되었다. 열처리 온도 80°C의 경우 2시간 열처리한 그룹의 두께 회복률은 10.2%인 반면, 24시간 열처리한 그룹은 8.0%의 두께 회복률을 나타내었다. 100°C 열처리의 경우 80°C 열처리와는 달리 열처리 시간의 증가에 따른 치수안정성 향상이 뚜렷하게 관찰되지

않았지만 감소하는 경향은 동일하였다. 120°C 열처리 그룹의 경우도 동일한 결과를 나타내었다. 120°C에서 2시간 열처리 시 두께 회복률은 7.2%에서 24시간 처리 시 3.8%로 매우 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 가장 높은 치수안정성을 나타낸 열처리 온도 120°C에서 24시간 처리한 그룹의 두께 회복률 3.8%는 열처리하지 않은 그룹과 비교하였을 때 두께회복률이 약 67% 감소된 수치이다. 그리고 3.8%의 두께 회복률은 열압온도 200°C에서 30분간 열압밀화한 잣나무재의 두께 회복률 14.6% 보다 낮은 수치이다(Hwang *et al.* 2015).

열압밀화에 의한 치수고정은 고온에 의한 목재의 흡습성 저하 및 결정화도 증가, 성분분해에 따른 변형 회복력의 약화, 분자 간의 가교결합 형성과 응집력 향상 등의 영향을 받는다고 알려져 있다(Dwianto *et al.* 1997). 그리고 Norimoto *et al.* (1993)은 열압밀화 목재의 압축 회복을 방지하기 위해서는 첫째, 매트릭스 구성 성분의 분자 사이의 가교결합 형성, 둘째, 목재 내부에 형성된 내부 응력의 해소, 셋째, 재연화(re-softening) 방지를 위해 수분과 열로부터 목재 고분자, 특히 헤미셀룰로오스를 격리해야 한다고

언급한 바 있다. 따라서 열압밀화 후 열처리에 의한 치수회복의 감소는 압밀화 목재의 형상 회복을 억제하는 가교결합의 형성과 압밀화재의 열처리 동안 리그닌의 연화 및 압축 상태에서 공유결합이 형성된 결과로 설명할 수 있다(Inoue *et al.* 2008).

이러한 실험 결과를 바탕으로 압밀화재의 치수 회복을 크게 감소시키기 위해서는 열압밀화 후 열처리와 같은 후처리가 매우 유용한 방법이라는 것을 확인할 수 있었다. 또한 열압밀화재를 120℃ 이하에서 열처리를 실시하여 기존의 200℃ 이상 고온에서 열압된 압밀화재보다 뛰어난 치수안정성을 확보하였다. 이를 통해 치수안정성 확보와 더불어 고온에 의한 역학적 성능의 저하 가능성을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

국내산 잣나무 열압밀화재를 제작한 후 열처리를 실시하여 열처리 조건에 따른 치수안정성을 조사하였다. 비중 0.48의 국내산 잣나무재를 압축세트량 50%로 열압밀화하여 비중 0.84의 열압화재를 얻을 수 있었다. 열처리 온도와 시간이 증가함에 따라 열압밀화재의 흡수성과 팽윤성은 감소하였다. 그리고 열압밀화 후 열처리에 의해 열압밀화재의 치수안정성은 크게 향상되었다. 120℃ 온도에서 24시간 열처리된 그룹의 두께회복도는 3.8%로써 열처리를 하지 않은 그룹과 비교하여 두께회복률이 약 67% 감소된 매우 우수한 치수안정성을 나타내었다.

사 사

본 연구는 산림청 “임업기술연구개발사업(과제번호: S121414L060100)”의 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

Dwianto, W., Inoue, M., Norimoto, M. 1997. Fixation of compressive deformation of wood by

heat treatment. Journal of The Japan Wood Research Society 43(4): 303-309.

Hillis, W.E. 1984. High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: general considerations. Wood Science and Technology 18: 281-293.

Hwang, S.W., Lee, W.H. 2011a. The mechanical properties of heat-compressed Radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) by compression set. Journal of The Korean Wood Science and Technology 39(4): 311-317.

Hwang, S.W., Lee, W.H. 2011b. Hardness and dimensional stability of Radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) heat-compressed wood: Effect of press temperature & time. Journal of The Korean Wood Science and Technology 39(3): 206-212.

Hwang, S.W., Lee, W.H. 2011c. The mechanical properties of heat-compressed Radiata pine (*Pinus radiata* D.Don): Effect of press temperature & time. Journal of The Korean Wood Science and Technology 39(4): 303-310.

Hwang, S.W., Lee, W.H. 2011d. Change of wood color of Radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) by press temperature and time. Journal of The Korean Wood Science and Technology 39(3): 238-243.

Hwang, S.W., Cho, B.G., Lee, W.H. 2014. Mechanical properties of thermally compressed domestic softwoods. Journal of The Korean Wood Science and Technology 42(6): 666-674.

Hwang, S.W., Cho, B.G., Lee, W.H. 2015. Hardness and dimensional stability of thermally compressed domestic Korean pine. Journal of The Korean Wood Science and Technology 43(1): 68-75.

Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M., Rowell, R.M. 1993. Steam or heat fixation of compressed wood. Wood and Fiber Science 25(3): 224-235.

- Inoue, M., Sekino, N., Morooka, T., Rowell, R.M., Norimoto, M. 2008. Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *Journal of Tropical Forest Science* 20: 273-281.
- Jung, S.S., Lee, W.H. 1998. Characteristics of moisture absorption for heat-compressed wood. *Journal of The Korea Furniture Society* 9(1): 9-16.
- Korean Standard Association. 2014. KS F 2204. Method of test for water absorption of wood.
- Kubojima, Y., Ohtani, T., Yoshihara, H. 2003. Effect of shear deflection on bending properties of compressed wood. *Wood and Fiber Science* 36: 210-215.
- Laine, K., Belt, T., Rautkari, L., Ramsay, J., Hill, C.A., Hughes, M. 2013a. Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. *Journal of Materials Science* 48(24): 8530-8538.
- Laine, K., Rautkari, L., Hughes, M., Kutnar, A. 2013b. Reducing the set-recovery of surface densified solid Scots pine wood by hydrothermal post-treatment. *European Journal of Wood and Wood Products* 71(1): 17-23.
- Morsing, N. 2000. Densification of wood - the influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. Department of structural engineering and materials, Technical university of Denmark. Series R No 79.
- Norimoto, M., Ota, C., Akitsu, H., Yamada, T. 1993. Permanent fixation of bending deformation in wood by heat treatment. *Wood Research : bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University* 79: 23-33.
- Park, Y., Eom, C.D., Park, J.H., Chang, Y.S., Kim, K.M., Kang, C., Yeo, H. 2012. Evaluation of physical properties of Korean pine (*Pinus koraiensis Siebold & Zucc.*) lumber heat-treated by superheated steam. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 40(4): 257-267.
- 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.