

고온 열기 처리에 의한 낙엽송재의 물리·역학적 성능 및 내부후성능 변화 고찰¹

박 용 건² · 한 연 중^{2,4} · 박 준 호² · 장 윤 성² · 양 상 윤² · 정 현 우² ·
김 경 중³ · 여 환 명^{2,4,†}

Evaluation of Physico-Mechanical Properties and Durability of *Larix kaempferi* Wood Heat-Treated by Hot Air¹

Yonggun Park² · Yeonjung Han^{2,4} · Jun-Ho Park² · Yoon-Seong Chang² · Sang-Yun Yang² ·
Hyunwoo Chung² · Kyungjung Kim³ · Hwanmyeong Yeo^{2,4,†}

요 약

본 연구에서는 국내에서 상업적으로 이용되고 있는 국산 낙엽송 열처리재의 여러 가지 물성(밀도, 평형함수율, 수축률, 흡습/흡수성, 종/횡압축강도, 휨강도, 경도, 내부후성능)을 정량적으로 평가하기 위하여 수행되었다. 고온처리에 의해 목재의 소수성이 증가함에 따라 평형함수율이 감소하였다. 이에 따라 수축률 및 흡습/흡수성이 감소하여 치수안정성이 개선되었고, 낮은 함수율의 영향으로 압축강도가 증가하였으며, 목재 주성분의 변화와 낮은 함수율의 영향으로 내부후성능이 개선되었다. 하지만 열처리에 의해 밀도와 휨강도 및 경도는 감소하였다.

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate quantitatively some properties (density, equilibrium moisture content, shrinkage, water vapor adsorption, water absorptivity, compressive strength, bending strength, hardness and decay resistance) of *Larix kaempferi* lumber which was heat-treated by hot air and has been used commercially in Korea. Equilibrium moisture content of the heat-treated wood was decreased with increase of hydrophobicity. Dimensional stability of the wood was improved with decrease of shrinkage, water vapor adsorption and free water absorptivity. Also, with the thermo-chemical changes of wood component and lower equilibrium moisture content, decay resistance and

¹ Date Received January 14, 2015, Date Accepted February 5, 2015

² 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부. Department of Forest Sciences, College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea

³ (주)위드우드. With-Wood Co., 30-151 Dongsunonggongdanji-ro, Naju, Jeollanam-do 520-320, Korea

⁴ 서울대학교 농업생명과학연구원. Research Institute of Agriculture & Life Science, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author) : 여환명(e-mail: hyeo@snu.ac.kr)

compressive strength of heat-treated wood were increased. But, bending strength and hardness of wood were decreased.

Keywords : heat treatment, dimensional stability, equilibrium moisture content, water absorptivity, compressive strength, decay resistance, *Larix kaempferi*

1. 서 론

목재 열처리는 목재에 160℃~260℃ 범위의 고온의 열을 가하여 목재의 구성성분을 변화시킴으로써 물리·역학적 성질을 영구적으로 변화시키는 방법이다(Militz 2002). 열처리는 친환경 방부·방충 처리 방법으로 2000년대 초반부터 유럽을 중심으로 사용되고 있으며 최근 국내외에서 열처리 방법과 열처리재의 물성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다(Repellin and Guyonnet 2005; Esteves *et al.* 2008; Yoon *et al.* 2008; Tuong and Li 2011).

2010년 레드파인을 열처리한 목재인 ‘루나우드’가 핀란드에서 수입되면서 열처리재가 국내 목재 시장에 본격적으로 유통되었고, 2011년 국내에서 자체적으로 생산 및 유통되기 시작하여 현재 내장재, 데크재 및 천연 방부목재 등에 이용되고 있다. 현재 유통되는 대부분의 열처리재는 물성에 대한 많은 연구가 이루어진 수입산 열처리재이다. 삼나무나 낙엽송 등 일부 국산재의 경우 열처리재가 시중에 판매되고 있지만 그 물성평가에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 국내 연구진이 발표한 논문 등의 연구결과는 대부분 실험실 수준으로 제작된 Lab scale 또는 Pilot scale 수준의 소형 열처리장치를 사용하여 열처리한 목재의 물성을 평가한 경우이기 때문에 실제 시중에 판매되는 상업용 열처리재의 물성과는 다를 수 있다(Yoon *et al.* 2008; Yoon *et al.* 2009; Kim *et al.* 2009, 2010).

이에 본 연구에서는 상업용으로 생산/판매되고 있는 국산 낙엽송 열처리재의 밀도, 평형함수율, 수축률, 흡습/흡수량, 종/횡압축강도, 휨강도, 경도 및 내부후성능을 정량적으로 측정해보고자 한다.

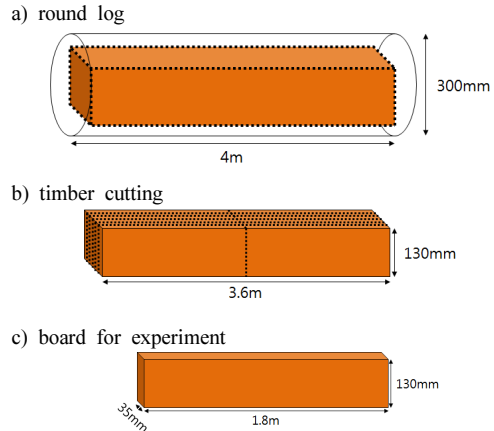


Fig. 1. Wood cutting process from round log to board for experiment.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

강원도 동해시 인근에서 말구 직경이 300 mm인 낙엽송(*Larix kaempferi*) 한 그루를 벌목하여 길이 4 m로 조제한 후, 산림조합중앙회 동부목재유통센터에서 Fig. 1과 같이 폭 130 mm, 두께 35 mm, 길이 1.8 m의 판재 12개로 제재하였다. 제재된 12개의 판재는 무처리재, 열기건조재, 190℃ 열처리재, 210℃ 열처리재로서의 물성평가를 위하여 각각 3개씩 사용되었다.

2.2. 처리방법

2.2.1. 열기건조(Kiln-dry)

무처리재 시편을 제외한 9개의 판재는 강원도 동해시에 위치한 산림조합중앙회 동부목재유통센터에서 72시간 동안 열기건조하였다. 건조 중 목재의 최

Table 1. Equilibrium moisture content for four different relative humidity conditions at 25℃

Relative Humidity (%)	35	50	65	80
EMC* (%)	6.91	9.06	11.95	16.40

*equilibrium moisture content determined by Hailwood-Horrobin equation

고 온도는 90℃였고, 열기건조 후 목재 시편의 최종 함수율은 8~11% MC였다. 건조된 9개의 판재 중 3개는 무처리재 물성평가에 사용될 미건조 목재와 함께 4℃ 냉장실에서 냉장 보관하였으며, 3개는 190℃ 열처리, 나머지 3개는 210℃ 열처리에 사용되었다.

2.2.2. 열처리(Hot air heat treatment)

열기건조된 9개의 목재 시편 중 6개는 전라남도 나주시에 위치한 (주)위드우드가 보유한 고온 열기 열처리를 이용하여 190℃ 및 210℃ 온도 조건에서 각각 3개씩 고온 열처리하였다. 2가지 온도 조건에서 처리 시간은 36시간으로 동일하였고, 최고 온도 노출 시간은 3~4시간이었다. 열처리 후 목재 시편의 함수율은 거의 전건 상태였으나 보관 및 이동 과정에서 4~6% MC로 증가하였다.

2.2.3. 열처리재의 물성평가

무처리재, 열기건조재, 190℃ 열처리재 및 210℃ 열처리재에 대하여 밀도, 평형함수율, 수축률, 흡습/흡수량, 종/횡압축강도, 휨강도, 경도 및 내부후성능을 평가하였다.

2.2.3.1. 밀도 평가

처리 조건별로 직육면체 시편을 제작한 다음 기건 및 전건 상태에서 무게와 치수를 측정하였다. 일주일 간 증류수에 침지시켜 섬유포화점 이상의 함수 상태가 된 시편을 온도 20℃, 상대습도 65% RH 조건으로 설정된 항온항습기에서 무게 및 치수 변화가 없을 때까지 조습시킨 다음 무게(W_a)와 부피(V_a)를 측정하였다. 무게 및 치수 측정이 끝난 시편을 105 ± 2℃ 오븐에서 24시간 이상 충분히 건조시켜 무게 및 치수 변화가 없을 때 무게(W_o)와 부피(V_o)를 측정하였다. 기건 밀도(1)와 전건 밀도(2)는 다음의 식을 통

해 계산되었다.

$$\rho_a = \frac{W_a}{V_a} \dots\dots\dots (1), \quad \rho_o = \frac{W_o}{V_o} \dots\dots\dots (2)$$

여기에서, ρ_a 와 ρ_o 는 각각 기건 밀도와 전건 밀도를 의미한다.

2.2.3.2. 평형함수율 평가

처리 조건 별 상대습도에 따른 평형함수율을 비교하기 위하여 한 변의 길이가 20 mm인 정육면체 시편 10개를 제작하여 25℃의 온도 조건으로 설정된 항온항습기에서 상대습도를 35% RH, 50% RH, 65% RH, 80% RH로 상승시키면서 평형함수율의 변화를 측정하였다. 각 상대습도 조건에서 Hailwood-Horrobin 방정식에 의해 결정되는 목재의 평형함수율은 Table 1과 같다.

2.2.3.3. 수축률 평가

열처리에 의한 목재의 수축률 억제 효과를 평가하기 위하여 각 처리재의 수축률을 측정하였다. 수축률의 측정은 한국 산업 규격의 『목재의 수축률 시험 방법』(KS F 2203)에 따라 수행되었다. 접선단면과 방사단면, 횡단면이 서로 직교하는 한 변의 길이가 20 mm인 정육면체 시편을 각 처리 조건별로 10개씩 제작하였다. 제작된 시편은 횡단면에 방사방향과 접선방향으로 각각 측정기준선을 그어 시험 도중 동일한 위치에서 길이 측정이 가능하도록 하였다. 길이는 생재 상태(l_g), 기건 상태(l_a) 및 전건 상태(l_o)에서 측정되었다. 시편을 증류수에 완전히 잠기도록 침지시킨 상태에서 감압(10분)-가압(10분)의 과정을 5회 반복하여 포수시킴으로써 생재 상태를 가정하였고, 온도 20℃, 상대습도 65% RH 조건을 기건 상태로

Table 2. Calculation formula of air-dried and total shrinkage

	Air-Dried Shrinkage	Total Shrinkage
Radial direction	$S_{Ra}(\%) = \frac{l_{Rg} - l_{Ra}}{l_{Rg}} \times 100 \dots\dots\dots (3)$	$S_{Ro}(\%) = \frac{l_{Rg} - l_{Ro}}{l_{Rg}} \times 100 \dots\dots\dots (4)$
Tangential direction	$S_{Ta}(\%) = \frac{l_{Tg} - l_{Ta}}{l_{Tg}} \times 100 \dots\dots\dots (5)$	$S_{To}(\%) = \frac{l_{Tg} - l_{To}}{l_{Tg}} \times 100 \dots\dots\dots (6)$
Volumetric	$S_{Va}(\%) = \frac{(l_{Rg} \times l_{Tg}) - (l_{Ra} \times l_{Ta})}{l_{Rg} \times l_{Tg}} \times 100 \dots\dots (7)$	$S_{Vo}(\%) = \frac{(l_{Rg} \times l_{Tg}) - (l_{Ro} \times l_{To})}{l_{Rg} \times l_{Tg}} \times 100 \dots\dots (8)$

설정하였으며, 105 ± 2℃ 오븐에서 24시간 이상 완전히 건조시킨 후 전건 상태의 길이를 측정하였다. 길이 측정은 섬유 방향으로의 수축 변형이 발생하지 않는 것으로 가정하여 방사 방향과 접선 방향만 측정하였고, 수축률은 방사 방향(S_R), 접선 방향(S_T)과 부피(S_V)에 대한 기전 수축률과 전 수축률을 Table 2에 제시한 각 식에 따라 결정하였다.

2.2.3.4. 흡습/흡수량 평가

외기 습도 변화에 따른 처리별 목재의 흡습량 변화를 평가하였고, 액상 수분 침투 정도를 평가하기 위하여 처리별 시간에 따른 방향별 흡습량을 측정하였다.

흡습량의 측정은 한국산업규격의 『목재의 흡습성 시험 방법』(KS F 2205)에 따라 수행되었다. 처리 조건별로 60 mm (L) × 30 mm (R) × 30 mm (T) 크기의 직육면체 시편 15개씩 제작하여 단면 별로 5개씩 나누었다. 제작된 시편은 상온에서 자연 건조시킨 후에 온도 20℃, 상대습도 75% RH의 조건으로 설정되어 있는 항온항습기에서 충분히 조습한 뒤, 흡습면적 (A)을 측정하였다. 흡습면을 제외한 나머지 면을 파라핀-바셀린 1 : 1 혼합물을 이용하여 피복하고, 같은 조건에서 충분히 조습시킨 다음 무게(W_{0h})를 측정하였다. 이후, 상대습도 온도 20℃, 90% RH 조건에서 흡습시키면서 6시간, 12시간, 24시간, 48시간, 72시간 후에 각각의 무게(W)를 측정하였다. 각 측정 시간에서의 각각의 단위 면적 당 흡습량은 식 (9)를 이용하여 계산하였다.

$$h = \frac{W - W_{0h}}{A} \dots\dots\dots (9)$$

여기에서 h는 각 측정 시간에서의 단위면적 당 흡습량(g/cm²)을 의미한다.

흡수량의 측정은 한국산업규격의 『목재의 흡수량 측정 방법』(KS F 2204)에 따라 수행되었다. 처리 조건 별로 100 mm (L) × 30 mm (R) × 30 mm (T) 크기의 직육면체 시편 15개씩 제작하여 단면 별로 5개씩 나누었다. 제작된 시편은 상온에서 자연 건조시킨 후에 흡수되는 면적(A)을 측정하였다. 이때, 횡단면의 경우에는 한 면만을 측정하고, 방사단면 및 접선 단면을 두 면 모두 측정하였다. 흡수면을 제외한 나머지 면은 파라핀-바셀린 1 : 1 혼합물을 이용하여 방수처리하였다. 방수처리가 끝난 시편의 무게(W_{0h})를 측정하고, 25℃ 증류수에 흡수면이 수면에 수직이 되도록 하고, 윗면이 수면에서 50 mm의 깊이가 되고, 섬유방향이 수면과 평행이 되도록 놓고 1시간, 2시간, 4시간, 6시간, 9시간, 12시간 24시간 후의 무게(W) 변화를 측정하였다. 각 측정 시간에서의 단위 면적 당 흡수량은 식 (10)을 이용하여 계산하였다.

$$Ab = \frac{W - W_{0h}}{A} \dots\dots\dots (10)$$

여기에서 Ab는 각 측정 시간에서의 단위면적 당 흡수량(g/cm²)을 의미한다.

2.2.3.5. 종/횡압축강도 평가

고온의 열처리에 의한 목재의 압축강도 변화를 평가하기 위하여 한국산업규격의 『목재의 압축 시험

방법』(KS F 2206)에 따라 목재의 종압축강도와 횡압축강도를 측정하였다. 처리 조건별로 30 mm (L) × 20 mm (R) × 20 mm (T) 크기의 직육면체 시편을 할렬이나 웅이 등의 결함이 없도록 60개씩 제작하여 종압축강도 측정에 30개, 횡압축강도 측정에 30개씩 이용하였다. 실험은 10 ton 만능재료시험기(Universal Testing Machine, Zwick, Germany)를 이용하였으며, 하중속도는 종압축강도에서 5 mm/min, 횡압축강도에서 3 mm/min으로 설정하였다.

2.2.3.6. 휨강도 평가

고온의 열처리에 의한 목재의 휨강도 변화를 평가하기 위하여 한국산업규격의 『목재의 휨 시험 방법』(KS F 2208)에 따라 목재의 휨강도를 측정하였다. 처리 조건별로 300 mm (L) × 20 mm (R) × 20 mm (T) 크기의 직육면체 시편을 할렬이나 웅이 등의 결함이 없도록 20개씩 제작하였다. 제작된 시편은 온도 20℃, 상대습도 65% RH 조건으로 설정된 항온항습기에 1주일 동안 조습하여 모든 시편의 함수율이 기건 상태의 함수율이 되도록 하였다. 실험은 10 ton 만능재료시험기를 이용하였으며, 하중속도는 5 mm/min으로 설정하였다.

2.2.3.7. 경도 평가

고온의 열처리에 의한 목재의 표면경도 변화를 평가하기 위하여 한국산업규격의 『목재의 경도 시험 방법』(KS F 2212)에 따라 목재의 A형 표면경도를 측정하였다. 처리 조건별로 한 변의 길이가 30 mm 인 정육면체 시편을 할렬이나 웅이 등의 결함이 없도록 15개씩 제작하여 각 단면별로 5개씩 분류하였다. 제작된 시편은 온도 20℃, 상대습도 65% RH 조건으로 설정된 항온항습기에 1주일 동안 조습하여 모든 시편의 함수율이 기건 상태의 함수율이 되도록 하였다. 실험은 10 ton 만능재료시험기를 이용하였으며, 하중속도는 5 mm/min으로 설정하였다.

2.2.3.8. 내부후성능 평가

고온의 열처리에 의한 목재의 내부후성능 변화를 평가하기 위하여 한국산업규격의 『목재의 내후성 시

방법』(KS F 2213)에 따라 목재의 내부후성능을 측정하였다. 살균된 석영 모래 250 g이 들어 있는 유리 병에 내부후 시험용 배양액(글루코오스 2.5%, 맥아 추출물 1.0%, 펩톤 0.5%, 인산수소칼륨 0.3%, 황산 마그네슘 0.2%, 증류수 95.5%) 80 ml를 주입하여 배양병을 제작하였다. 제작된 배양병에 갈색부후균의 공시균인 부후개떡 버섯균(*Fomitopsis palustris*)을 접종하고, 온도 26 ± 2℃, 상대습도 70% RH (EMC : 13.15%)인 항온항습기에서 균이 모래 위를 충분히 덮을 때까지 2주간 배양하였다. 내부후 시험을 위한 시편은 처리 방법 별로 각 변의 길이가 20 mm인 정육면체 시편으로 6개씩 준비하였다. 질량감소를 계산을 위한 무게 측정은 105 ± 2℃ 오븐에서 전건한 무게(W_1)를 측정하였다. 균이 모래 위를 충분히 덮을 만큼 자란 후, 준비한 내부후 시험용 시편을 섬유 방향이 수직이 되게 하여 하나의 배양병에 6개의 시편을 넣고, 온도 26 ± 2℃, 상대습도 70% RH인 항온항습기에서 60일간 부후시험을 수행하였다. 부후 시험이 끝난 시편은 표면에 부착된 균체를 흐르는 물과 부드러운 브리시를 이용하여 깨끗하게 닦아내고, 부후 시험 전과 같이 105 ± 2℃ 오븐에서 전건한 무게(W_2)를 측정하였다. 처리 전과 후에 측정된 두 전건 무게를 이용하여 식 (11)에 따라 질량 감소율을 계산하였다.

$$ML(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \dots\dots\dots (11)$$

여기에서 ML은 질량 감소율(Mass Loss)을 의미한다. 또한, 무처리재 대비 각 처리 방법에 따른 부후 억제율을 식 (12)로 정의하고 이를 계산하였다.

$$E(\%) = \frac{ML_{non} - ML_{TR}}{ML_{non}} \times 100 \dots\dots\dots (12)$$

여기에서 E는 각 처리 방법의 부후 억제율, ML_{non} 은 무처리재의 질량감소율, ML_{TR} 은 각 처리재의 질량감소율을 의미한다.

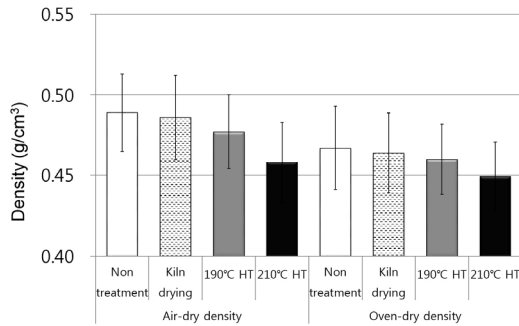


Fig. 2. Air-dry (25°C and 60% RH) density and oven-dry density.

3. 결과 및 고찰

3.1. 밀도 측정 결과

Fig. 2는 기건 밀도와 전건 밀도의 측정 결과이다. 기건 밀도와 전건 밀도 모두 무처리재와 열기건조재는 서로 비슷한 반면에 열처리재는 작게 나타났다. 특히, 온도가 높은 210°C 열처리재가 190°C 열처리재보다 더 작은 밀도 값을 나타내었다. 고온의 열처리에 의해 목재는 처리 온도가 높을수록 처리 시간이 길어질수록 밀도가 감소하는 것으로 알려져 있다 (Lim *et al.* 2014). 이는 고온의 열처리에 의해 목재를 구성하는 주성분 중 일부 헤미셀룰로오스가 열가수분해 되거나 추출물의 일부가 손실되었기 때문인 것으로 생각된다(Park *et al.* 2012).

3.2. 평형함수율 측정 결과

Fig. 3은 25°C에서 상대습도 상승에 따른 평형함수율 변화를 나타낸 그래프이다. 모든 상대습도 조건에서 평형함수율은 무처리재, 열기건조재, 190°C 열처리재, 210°C 열처리재 순서로 낮게 측정되었다. 목재는 고온의 열처리에 의해 목재의 주성분에 포함되어 있는 수산기(-OH)가 감소하여 소수성이 증가하기 때문에 동일한 상대습도에서 수분을 적게 함유하게 된다(Park *et al.* 2014). 밀도와 평형함수율은 목재의 다양한 물성에 크게 영향하는 인자이기 때문에 이로

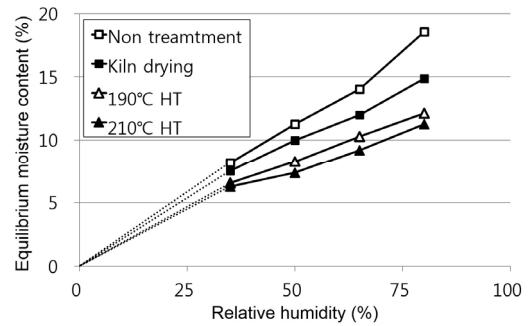


Fig. 3. Adsorption isotherm (25°C).

인해 열처리재는 수축률, 흡수/흡습성능, 역학적 성능 및 내부후 성능 등 여러 가지 물성에서 무처리재와는 다른 양상을 보일 것으로 생각된다.

3.3. 수축률 측정 결과

Table 3은 기건 수축률 및 전 수축률 계산 결과이다. 기건 수축률과 전 수축률 모두 방향에 상관없이 무처리재, 열기건조재, 190°C 열처리재, 210°C 열처리재 순으로 수축률이 작아지는 것으로 나타났다. 고온의 열처리에 의해 목재는 수분 변화에 따른 치수 변화가 작아지는 것을 알 수 있다. 전 부피 수축률의 경우 무처리재보다 210°C 열처리재가 50% 가량 감소하는 것으로 보아 고온의 열처리로 수분 변화에 따른 목재의 치수안정성이 크게 개선되는 것으로 생각된다.

3.4. 흡습/흡수량 측정 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 흡습량 및 흡수량 측정 결과이다. 210°C 열처리재가 흡습량 및 흡수량이 가장 낮게 측정되었고, 무처리재가 가장 큰 흡습량 및 흡수량을 나타내었다. 열처리재의 흡습량 및 흡수량 감소 또한 평형함수율과 같이 열처리에 의한 소수성 증가의 영향인 것으로 생각된다. 무처리재 횡단면의 경우 열기건조재에 비해 흡습량이 낮은 것은 목재 내부에 잔존하고 있던 송진이 섬유방향으로 삼출되어 횡단면 표면을 덮고 있기 때문에 섬유방향으로의

Table 3. Shrinkage from green to air-dry and total shrinkage

		Non-treatment	Kiln-dry	190°C HT	210°C HT
Shrinkage from green to air-dry (%) (25°C, 60% RH)	Radial direction	1.201 (0.254)*	0.747 (0.248)	0.559 (0.129)	0.433 (0.165)
	Tangential direction	3.693 (0.330)	1.881 (0.536)	1.137 (0.483)	0.824 (0.427)
	Volumetric	4.850 (0.255)	2.613 (0.717)	1.690 (0.576)	1.254 (0.405)
Total Shrinkage (%)	Radial direction	3.093 (0.323)	2.199 (0.184)	1.622 (0.235)	1.594 (0.227)
	Tangential direction	8.719 (0.525)	5.499 (0.633)	3.717 (0.730)	3.178 (0.400)
	Volumetric	10.777 (0.484)	7.249 (0.549)	5.117 (0.843)	4.600 (0.375)

*() : standard deviation

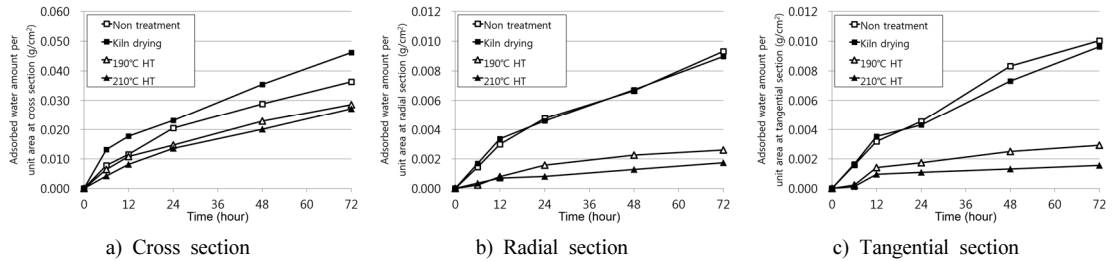


Fig. 4. Water vapor adsorption.

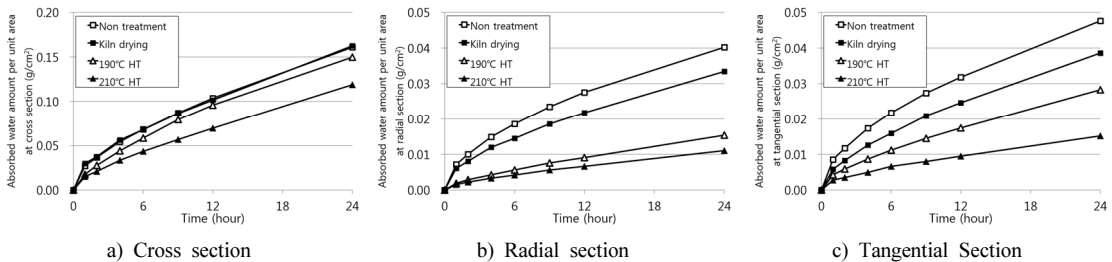


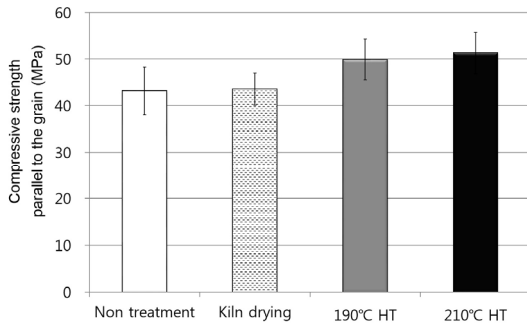
Fig. 5. Water absorption.

수분의 흡습을 방해하기 때문인 것으로 생각된다.

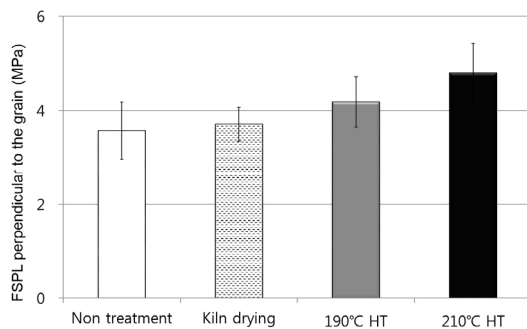
3.5. 종/횡압축강도 측정 결과

Fig. 6은 종압축강도 및 횡압축 비례한도응력을 측정할 결과이다. 횡압축의 경우 종압축과는 달리 명확한 최대응력을 판단하기 어렵고, 용도 면에서 소성변

형을 문제로 하는 경우가 많기 때문에 최대하중 대신 비례한도하중을 사용하는 비례한도응력을 측정하였다(Kang *et al.* 2008). 하중의 방향과는 상관없이 무처리재와 열기건조재는 거의 비슷하게 측정되었고, 210°C 열처리재가 190°C 열처리재보다 조금 더 크게 측정되었다. 열처리재가 무처리재보다 압축강도가 크게 측정된 이유는 낮은 평형습수율의 영향



a) Compressive strength parallel to the grain



b) Compressive fiber stress at proportional limit (FSPL) perpendicular to the grain

Fig. 6. Compressive strength.

인 것으로 생각된다. 일반적으로 목재의 강도는 함수율이 낮을수록 증가하는 경향을 나타낸다(Kang *et al.* 2008). 압축강도 시편의 함수율을 측정된 결과 무처리재는 11.27% (± 1.56), 열기건조재는 9.98% (± 1.22), 190°C 열처리재는 7.74% (± 1.88), 210°C 열처리재는 6.34% (± 1.55)로 무처리재가 가장 크고, 210°C 열처리재가 가장 낮았다.

3.6. 휨강도 측정 결과

Fig. 7에 휨강도 측정 결과를 그래프로 나타내었다. 휨강도는 압축강도와는 다르게 열처리재가 무처리재 및 열기건조재보다 낮게 측정되었고, 열처리 온도가 높은 210°C 열처리재가 190°C 열처리재보다도 낮게 측정되었다. 휨강도 시편의 경우도 압축강도와

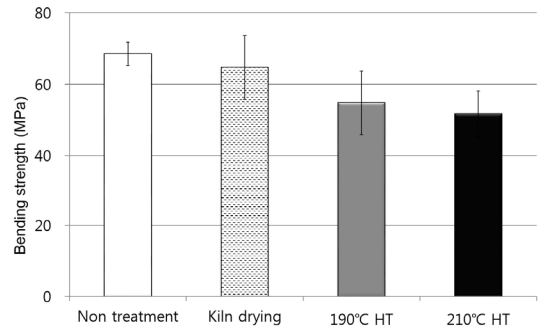


Fig. 7. Bending strength.

같이 평형함수율이 낮게 측정되었지만(무처리재 : 12.84% ± 0.78 , 열기건조재 : 10.72% ± 0.80 , 190°C 열처리재 : 7.95% ± 2.00 , 210°C 열처리재 : 6.49% ± 0.48) 평형함수율이 낮은 열처리재가 무처리재보다 휨강도가 낮게 측정되는 이유는 열처리에 의한 미세 할렬에 의한 영향인 것으로 생각된다. 목재를 열처리 할 때, 목재 내부에는 방사조직을 따라 내부할렬이나 연륜을 따라 또는 연륜과 연륜 사이를 따라 윤할이 종종 발생한다(Jung *et al.* 2008). 육안으로 할렬이 관측되지 않는 건전한 시편이 사용되었지만 실제로는 눈에 보이지 않는 미세할렬이 목재 내부에 존재할 수 있다. 특히 눈에 보이지 않는 섬유방향으로의 미세한 할렬은 섬유방향으로 배열된 세포들 간의 결합력을 감소시켜 휨하중 작용 시 외력에 저항하는 유효단면적을 줄이고, 전단내력을 감소시키는 역할을 하기 때문에 휨강도를 저하시킬 수 있다. 반면에 압축강도 시험에서는 내부할렬이나 윤할이 압축하중을 받는 단면에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 압축강도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.7. 경도 평가

Fig. 8은 처리조건에 따른 각 단면별 표면경도를 나타낸 그래프이다. 횡단면을 제외하고 나머지 단면에서는 모두 무처리재, 열기건조재, 190°C 열처리재, 210°C 열처리재 순으로 경도가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 휨강도의 경우와 같이 고온의 열처

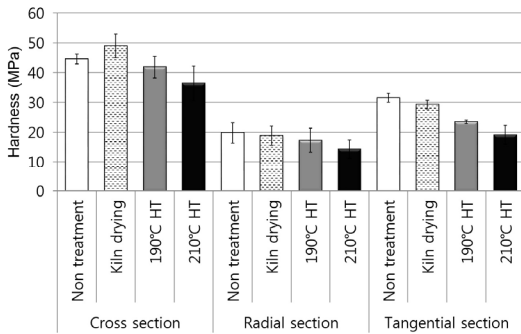


Fig. 8. Hardness.

리에 의해 발생한 미세한 내부할렬 및 운할에 의한 영향으로 목재 세포 간 결합력이 감소했기 때문인 것으로 생각된다.

3.8. 내부후성능 평가

Fig. 9는 처리 방법에 따른 부후개떡 버섯균에 대한 질량 감소율 측정 결과이다. 무처리재와 열기건조재는 약 10%의 질량감소율로 거의 비슷한 값을 나타내었으며, 190°C 열처리재는 약 8%, 210°C 열처리재는 약 6%의 질량감소율을 나타내었다. 목재는 고온의 열처리에 의해 일부 목재의 주성분이 변성되는 것으로 알려져 있다. 이러한 과정에서 갈색부후균의 분해대상이 되는 헤미셀룰로오스가 변성되어 감소하고, 평형함수율이 낮아짐에 따라 부후균의 성장 조건이 악화되어 열처리재의 질량감소율이 낮게 측정된 것으로 생각된다.

또한, 무처리재에 대비하여 열처리에 의한 내부후성능의 향상 효과 즉, 부후 억제율을 계산한 결과 열기건조재는 1.75%, 190°C 열처리재는 18.37%, 210°C 열처리재는 34.90%였다.

4. 결 론

현재 국내에서 상업적으로 시판되고 있는 2가지 온도 조건(190°C, 210°C)에서 열처리된 국산 낙엽송의 다양한 물성을 측정 한 결과는 다음과 같다.

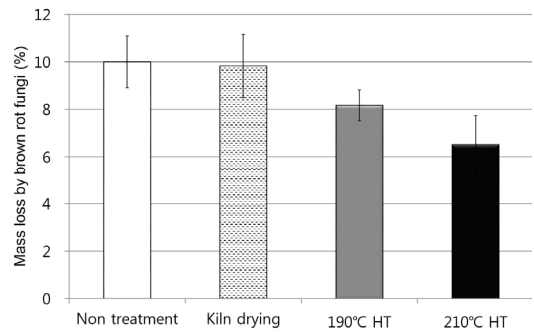


Fig. 9. Mass loss by brown rot fungi (*Fomitopsis palustris*).

고온의 열처리에 따른 열가수분해의 영향으로 목재의 주성분이 변성되고, 추출물의 함량이 줄어들에 따라 밀도가 감소하고, 소수성이 증가하면서 평형함수율과 흡습/흡수속도 및 수축률이 감소하였다.

열처리에 평형함수율이 감소하면서 압축강도는 다소 증가하는 경향을 나타내었지만 육안으로 관찰되지 않는 미세 내부할렬과 운할의 영향으로 휨강도와 경도는 감소하는 경향을 나타내었다.

열가수분해에 의한 목재 주성분의 열화 및 변성은 갈색부후균에 대한 내부후성능의 향상 효과를 나타내어 210°C 열처리에 의해 무처리재에 비해 34.90% 정도 부후 진행이 억제된 것을 확인하였다.

사 사

본 연구는 산림청 연구과제 지원 사업(S121314L010100)에 의하여 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- Esteves, B., Graça, J., Pereira, H. 2008. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. *Holzforchung* 62(3): 344-351.
- Jung, H.S., Kang, H.Y., Park, J.H., Lee, N.H., Lee, H.W., Kang, C.W., Yeo, H. 2008. A New Introduction to Wood Drying. Seoul National

- University Press, Seoul, Korea.
- Kang, C.W., Kim, N.H., Kim, B.R., Kim, Y.S., Byeon, H.S., So, W.T., Yeo, H., Oh, S.W., Lee, W.H., Lee, H.W. 2008. Wood Physics and Mechanical Properties. HyangMunSa, Seoul, Korea.
- Kim, K.M., Park, J.H., Park, B.S., Son, D.W., Park, J.S., Kim, W.S., Kim, B.N., Shim, S.R. 2009. Physical and mechanical properties of heat-treated domestic cedar. Journal of The Korean Wood Science Technology 37(4): 330-339.
- Kim, K.M., Park, J.H., Park, B.S., Son, D.W., Park, J.S., Kim, W.S., Kim, B.N., Shim, S.R. 2010. Physical and mechanical properties of heat-treated domestic yellow poplar. Journal of The Korean Wood Science Technology 38(1): 17-26.
- Korean Standards Association. 2004. Method of shrinkage test for wood. KS F 2203.
- Korean Standards Association. 2004. Method of test for water absorption of wood. KS F 2204.
- Korean Standards Association. 2004. Method of hygroscopic test for wood. KS F 2205.
- Korean Standards Association. 2004. Method of compression test for wood. KS F 2206.
- Korean Standards Association. 2004. Method of bending test for wood. KS F 2208.
- Korean Standards Association. 2004. Method of hardness test for wood. KS F 2212.
- Korean Standards Association. 2004. Method of test decay for wood. KS F 2213.
- Lim, H.M., Hong, S.H., Kang, H.Y. 2014. Investigation of the color change and physical properties of heat-treated *pinus koraiensis* square lumbers. Journal of The Korean Wood Science Technology 42(1): 13-19.
- Militz, H. 2002. Heat treatment of wood: European processes and their background. In: International Research Group Wood Pre, Section 4-Processes, No IRG/WP 02-40241.
- Park, Y., Eom, C.D., Han, Y., Park, J.H., Chang, Y.S., Yang, S.Y., Choi, J.W., Yeo, H. 2014. Combined treatment of green pitch pine wood by heat and superheated steam and the effects on physical properties of the products. Holzforschung 68(3): 327-335.
- Park, Y., Eom, C.D., Park, J.H., Chang, Y.S., Kim, K.M., Kang, C.W., 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 Technology 40(4): 257-267.
- Repellin, V., Guyonnet, R. 2005. Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition. Holzforschung 59(1): 28-34.
- Tuong, V.M., Li, J. 2011. Changes caused by heat treatment in chemical composition and some physical properties of acacia hybrid sapwood. Holzforschung 65(1): 67-72.
- Yoon, K.J., Eom, C.D., Park, J.H., Kim, H.Y., Choi, I.G., Lee, J.J., Yeo, H. 2009. Color control and durability improvement of yellow poplar (*liriodendrom tulipifera*) by heat treatments. Journal of The Korean Wood Science Technology 37(6): 487-496.
- Yoon, K.J., Eom, C.D., Park, J.H., Lee, Y.W., Choi, I.G., Lee, J.J., Yeo, H. 2008. Control of discoloration of cedar wood (*cryptomeria japonica*) by heat and UV treatment. Journal of The Korean Wood Science Technology 36(6): 33-40.