

## 과열증기 열처리 잣나무재의 물성 평가\*1

박 용 건\*2 · 엄 창 득\*3 · 박 준 호\*2 · 장 윤 성\*2 ·  
김 광 모\*3 · 강 춘 원\*4 · 여 환 명\*2,5†

### Evaluation of Physical Properties of Korean Pine (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.) Lumber Heat-Treated by Superheated Steam\*1

Yonggun Park\*2 · Chang-Deuk Eom\*3 · Jun-Ho Park\*2 · Yoon-Seong Chang\*2 ·  
Kwang-Mo Kim\*3 · Chunwon Kang\*4 · Hwanmyeong Yeo\*2,5†

#### 요 약

본 연구에서는 과열증기를 이용한 열처리 공정 제어 방법을 설계하고 적용하였다. 170°C, 0.4 MPa 조건의 과열증기에서 약 10시간 동안 열처리한 잣나무 판재의 물리 및 역학적 성질 변화를 무처리재 및 220°C 상압조건에서 일반 열처리한 목재와 비교하였다. 과열증기 처리재는 무처리재에 비해서 수분 흡습량 및 평형함수율이 낮아졌으며, 종압축 강도 및 휨 강도가 증가하였다. 흡습성은 일반 열처리재와 비슷하였으며, 일반 열처리 시 발생하기 쉬운 내부 할렬은 발생하지 않았다. 또한 과열증기 처리에 의해서 잣나무 내부에 있는 다량의 송진이 제거되는 효과도 나타내었다.

#### ABSTRACT

In this study, the method for heat treating wood using superheated steam (SHS) was designed

\*1 접수 2012년 2월 21일, 채택 2012년 7월 12일

\*2 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부, Department of Forest Science, College of Agriculture & Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

\*3 국립산림과학원 녹색자원이용부 재료공학과, Division of Wood Engineering, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

\*4 전북대학교 생활과학대학 주거환경학과, 전북대학교 인간생활과학연구소, Department of Housing Environmental Design, and Research Institute of Human Ecology, College of Human Ecology, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

\*5 Research Institute for Agriculture & Life Science, College of Agriculture & Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

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

and applied. The physical and mechanical properties of Korean Pine (*Pinus koraiensis Siebold & Zucc.*) lumber heat-treated by SHS at 170°C and 0.4 MPa for 10 hours were compared with those of non-treated and normal heat-treated wood. The amount of adsorbed water and equilibrium moisture content of the SHS treated wood were lower than non-treated wood. On the other hand the compressive strength parallel to grain and the bending strength of SHS treated wood were higher than those of non-treated wood. The hygroscopicity of SHS treated wood was similar to normal heat treated wood at 220°C. Internal checks that often occur during normal heat treatment were not developed at SHS treatment. Also, SHS treatment are effective in control of internal checks occurrence and resin exudation.

**Keywords:** superheated steam(SHS), heat treatment, *Pinus koraiensis*, hygroscopicity

## 1. 서 론

과열증기는 끓는점 이상의 온도를 갖는 증기로서 1940년대 독일에서 처음 건조 산업에 이용되었다고 보고된다[8]. 이후, Mujumdar[7]에 의해서 과열 증기 건조에 대한 원리와 산업적인 이용, 응용잠재력, 시장 잠재력, 연구개발의 필요성 등이 언급되면서 본격적으로 과열증기 건조에 대한 연구가 시작되었다. 과열증기 건조는 기체의 대류를 이용한 직접 건조 방식으로 건조매체로 과열증기를 이용하여 열을 공급하고 증발된 수분을 운반하는 방식이다. 과열증기 건조는 산소가 배제된 증기를 이용하고, 건조가 밀폐된 공간에서 이루어지기 때문에 많은 장점을 갖는다. 가장 큰 장점은 배출되는 증기를 이용하여, 열교환기를 통해 전기에너지를 생산하거나 폐증기를 그대로 재활용함으로써 에너지효율을 높일 수 있다는 점이다. 배출되는 고온·고압의 증기는 비엔탈피(specific enthalpy)가 낮기 때문에 기계적으로 또는 열-압축 방식에 의해 폐증기를 압축시켜 비엔탈피를 상승시킨다면 과열증기에 공급된 잠열을 대부분 회수하여 재활용할 수 있다. 과열증기건조의 또 다른 장점은 건조속도의 향상이다. 일반 건조방법에서는 목재에서 증발된 수분이 외부로 확산될 때 저항이 발생하는데 과열증기 건조의 경우 외부가 같은 증기이기 때문에 저항이 거의 발생하지 않게 된다. 따라서 외부가 다양한 기체분자들로 이루어진 열기건조에 비해 증발된 수분의 확산속도가 매우 빨

라서 건조속도 또한 빨라지게 된다. 과열증기에 의한 열처리는 열처리 장치 내부에 산소가 존재하지 않기 때문에 산화반응이나 연소반응이 일어날 수 없다. 따라서 산화에 의한 목재의 변형을 억제할 수 있으며 화재 혹은 폭발의 위험성이 없다. 또한 산소가 없기 때문에 목재를 부후시키는 호기성 세균에 대한 살균효과 또한 기대할 수 있다[3].

목재의 부가가치 향상을 위한 열처리효과에 대한 다양한 연구가 수행되어져 왔는데 Cooper[5]는 180~200°C의 온도에서 고온 열처리한 목재에 대한 전반적인 목재의 물성변화에 대하여 보고하였는데 열처리한 목재는 화학적 변화에 의해 어둡게 변색되고, 치수 안정성은 높아졌으며, 수분 흡습성이 감소하였고, 내부후성이 증가하였다.

하지만 열처리는 할렐이나 휼 등의 변형 발생을 줄이기 위하여 10% 이하로 예비 건조해야 하기 때문에 에너지를 과도하게 사용해야 하며, 고온에서 공정이 이루어지기 때문에 열효율도 떨어진다. 또한, 고온의 영향으로 화재의 위험성이 존재하기 때문에 안전성을 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 과열증기를 열처리의 매체로 도입하여 생체 상태의 목재를 예비건조 없이 열처리하고자 한다. 또한, 과열증기 열처리는 산소를 배제하기 때문에 화재의 위험성이 없는 열처리 방법이다. 따라서 잣나무를 과열증기 열처리하여 과열증기에 의한 건조효과를 평가하고, 과열증기 처리한 목재의 흡습성, 강도, 재색 제어 및 송진 제거 효과를 평가

하여 잣나무 과열증기 열처리재의 이용 가능성 제고 및 기초적인 물성평가 자료로서 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

본 연구에 사용된 잣나무(*Pinus koraiensis Siebold & Zucc.*)는 경기도 여주군 목재유통센터에서 구입하였으며, 150 mm (R) × 50 mm (T) × 500 mm (L)의 판재로 총 15개를 재단하여 각각 5개씩 무처리, 일반 열처리, 과열증기 열처리 샘플로 구분하였다. 열처리 전 초기함수율은 약 32%였다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 과열증기 열처리 및 일반 열처리

과열증기 열처리와 일반 열처리는 자체적으로 설계하여 제작한 장치(Hydrothermal Reactor System, 한울엔지니어링)를 사용하였다. 장치는 반응기(reactor), 피드탱크(feed-tank), 응축기(separator)로 구성되어 있으며, 감압을 위한 진공펌프가 따로 연결되어 있다. 반응기는 내부지름이 180 mm 이고, 깊이가 600 mm인 원통형으로 제작되어 있으며, 전체 부피는 약 15 ℓ이다. 공정의 조절은 장치의 컨트롤패널과 연결되어 있는 컴퓨터 프로그램을 통해서 제어하고, 반응기 내부의 온도와 압력, 시편의 표면 및 내부의 온도가 실시간으로 저장된다. 과열증기 처리를 위해서는 반응기를 완전 밀폐시킨 상태에서 내부 증기 온도와 압력 제어를 위한 소정의 공정을 적용하였고, 일반 열처리는 반응기 내 압력을 상압으로 유지하면서 온도만 제어하였다.

#### 2.2.2. 흡습량 및 수축/팽창율

처리재의 흡습성능을 평가하기 위하여 습도에 따른 평형함수율 및 흡습량(KS F 2205 : 목재의 흡습성 시험 방법)을 측정하였다.

습도에 따른 평형함수율은 5 mm (L) × 30 mm (R) × 30 mm (T) 크기의 직육면체 모양의 시편을

처리재 별로 각각 10개씩 제작하여 40°C의 온도에서 상대습도 15, 30, 45, 60, 75, 90% 조건의 항온항습기에서 항량에 도달한 후 무게를 측정하여 계산하였다.

흡습량의 평가를 위하여 60 mm (L) × 30 mm (R) × 30 mm (T) 크기의 직육면체 모양의 시편을 각각 15개씩 제작하였으며 이를 다시 방향별로 5개씩 나누어서 실험을 진행하였다. 각 시편은 상온에서 함수율 약 10% 이하로 예비 건조시킨 후 온도 40°C, 상대습도 75%의 항온항습기에 두어 질량이 항량에 도달하였을 때의 무게를 측정한다. 다음 각 방향 별 흡습량의 비교를 위하여 측정을 위한 한 단면을 제외한 나머지 면을 알루미늄 테이프를 이용하여 피복하였고, 피복되지 않은 단면의 단면적을 측정하였다. 피복과 무게 및 치수 측정이 끝난 시편을 온도 40°C, 상대습도 90%의 항온항습기에 넣고, 24시간이 지난 후의 무게를 측정하여 흡습량을 계산하였다.

또한 함수율의 변화에 따른 처리재의 수축률(KS F 2203 : 목재의 수축률 시험 방법) 및 팽창율(KS F 2205 : 목재의 흡습성 시험 방법)을 측정하였다.

수축률 측정을 위한 시편은 한 변의 길이가 20 mm인 정육면체로 방사방향 및 접선방향이 정확하게 노출되도록 처리재 별로 각각 10개씩 제작하였다. 횡단면에 방사방향과 접선방향으로 각각 측정기준선을 그어 동일한 위치의 길이가 측정되도록 하였고, 길이의 측정은 생재, 기건재, 전건재로 나누어 측정하였다. 생재상태를 가정하기 위하여 제작된 시편을 감압 하에서 24시간 동안 함침시켜 약 100%의 함수율이 되었다. 기건 상태는 온도 20°C 및 상대습도 65%의 조건에서 평형상태에 도달하도록 건조하여 측정하였으며, 105°C 온도의 오븐에서 완전히 건조시킨 후 전건상태의 길이를 측정하였다. 모든 길이의 측정은 0.1 mm 이내의 오차를 갖는 디지털 버니어 캘리퍼스를 사용하였다.

팽창율 측정을 위한 시편은 5 mm (L) × 30 mm (R) × 30 mm (T) 크기의 직육면체 모양으로 처리재 별로 각각 10개씩 횡단면에서 방사방향 및 접선방향이 정확하게 노출되도록 제작하고, 방사방향과 접선방향으로 측정기준선을 그어 동일한 위치의 길이가 측정되도록 하였다. 제작된 시편을 온도 40°C,

상대습도 75% 조건의 항온항습기에 두고, 항량에 도달하였을 때의 무게 및 측정기준선의 길이를 측정 한 다음 다시 항온항습기의 상대습도 조건을 90% 로 바꾸어 시편이 항량에 도달하였을 때 무게 및 측정기준선의 길이를 측정하였다.

### 2.2.3. 재색변화

처리하기 전과 후의 표면의 재색변화를 측정하기 위하여 표면에 반경 10 mm 원을 다섯 군데 그려 처리하기 전과 후의  $L^*a^*b^*$  색상 값을 측정하였고, 그 평균값을 대표치로 이용하였다. 색상 값의 측정은 분광측색계(Konika minolta, CM- 2600d)를 이용하여 CIE  $L^*a^*b^*$  값을 3회 반복하여 측정하였다. 일반적으로 열처리에 의해서 목재는 표면이 어두워 지는 것으로 알려져 있는 바, 본 연구에서는  $L^*$ 의 값의 변화를 비교하였다.

### 2.2.4. 강도

처리하기 전과 후의 강도 변화를 평가하기 위하여 종압축 강도(KS F 2206 : 목재의 압축 시험 방법)와 휨 강도(KS F 2208 : 목재의 휨 시험 방법)를 측정하였다. 종압축 강도 측정을 위한 시편은 35 mm (L) × 25 mm (R) × 25 mm (T) 크기의 직육면체 모양으로 활렬이나 웅이 등의 결함이 없도록 제작하였다. 휨 강도 측정을 위한 시편은 350 mm (L) × 25 mm (R) × 25 mm (T)의 크기로 제작하였으며 가급적 활렬이나 웅이 등의 결함이 없는 부분을 이용하였다. 모든 시편을 30°C, 50% 온·습도 조건의 항온항습기에 24시간 이상 조습 처리하였다. 압축 및 휨 시험은 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 이용하여 측정하였고, 하중 속도는 종압축 강도와 휨 강도에서 모두 0.3 mm/min이었다. 시험이 끝난 시편은 전건하여 측정 당시의 함수율을 계산하였고, 실험에 사용된 시편의 개수는 종압축 강도와 휨 강도 모두 10개씩이었다. 휨 강도의 지간 거리는 280 mm이었다.

### 2.2.5. 송진함량변화

과열증기 처리에 의한 송진 제거의 효과를 평가하

기 위하여 처리하기 전과 후의 내부 송진의 함량변화를 측정하였다. 송진은 다양한 성분으로 구성되어 있지만 그 함량을 정확히 측정하여 분석하기 어려워 알코올-벤젠 1 : 2용액으로 추출되는 성분의 양을 송진으로 가정하여 측정하였다. 60 mm (L) × 50 mm (R) × 20 mm (T)로 재단한 시편을 섬유방향으로 3등분하여 20 mm (L) × 50 mm (R) × 20 mm (T) 소시편 3개를 제작하였다. 이때, 각 소시편의 송진함량은 같은 것으로 가정하였다. 3등분한 소시편의 가운데 시편은 과열증기 처리를 위한 시편으로 섬유방향의 송진의 이동을 배제하기 위하여 알루미늄 테이프를 이용하여 횡단면을 실링하였다. 가운데 시편을 제외한 양쪽 끝 두 시편은 처리하기 전의 초기 송진함량 측정을 위하여 아무런 처리를 하지 않았다. 모든 시편은 추출이 용이하도록 40 mesh로 밀링하였으며 밀링된 시편은 80°C 알코올-벤젠 1 : 2 용액에서 10시간 동안 추출하였다. 추출하기 전과 후의 시편의 무게를 측정하여 송진의 함량을 측정하였고, 처리시간 및 처리방법에 따른 효과를 비교하였다. 송진 함량(Resin Content, RC (%))은 추출 후 시편의 무게에 대비한 추출 전후 무게 차이를 퍼센트로 나타낸 것으로 정의하였다.

이때, 처리시간 및 처리방법 별로 초기 송진 함량의 차이가 크기 때문에 처리효과를 비교하기가 어려워 초기 송진의 함량을 고려한 식(1)을 이용하여 송진제거율(Removing rate of resin content, R (%))을 계산하였다.

$$R (\%) = \frac{RC_i - RC_a}{RC_i} \times 100 \quad (1)$$

여기에서  $RC_i$ 는 초기 송진 함량(%)으로 양쪽 끝 두 시편의 송진 함량의 평균이고,  $RC_a$ 는 일정시간 처리 후 송진의 함량(%)이다.

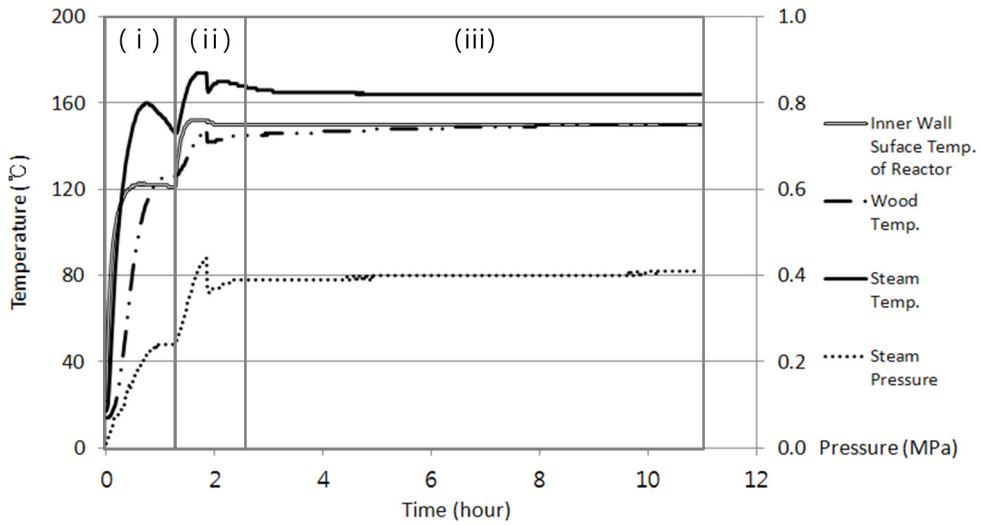


Fig. 1. Temperature and pressure progresses during SHS treatment.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 과열증기 열처리 및 일반 열처리 공정

##### 3.1.1. 과열증기 열처리

Fig. 1은 과열증기 열처리 공정이 진행되는 동안 시간에 따른 반응기 내부 표면온도(Inner Wall Surface Temp. of Reactor), 목재 내부의 온도(Wood Temp.), 증기의 온도(Steam Temp.), 증기의 압력(Steam Pressure)의 변화 그래프이다.

과열증기 열처리 공정은 목재 성질 변화온도를 고려하여 170°C를 목표온도로 하고, 반응기 내부의 설계 한계압력(0.5 MPa)을 고려하여 0.4 MPa (143°C의 포화수증기압)를 목표압력으로 하여 제어하는 것을 목표로 하였다. 전체적인 공정은 온도와 압력의 변화에 따라 크게 세 구간으로 구분할 수 있다.

(i)구간은 과열증기를 생성하기 위한 구간이다. 이 구간에서는 처리하고자 하는 시편을 반응기에 넣고, 반응기 사이즈를 고려하여 증류수 양을 조절하

여 투입한 뒤, 입구를 볼트를 사용한 덮개를 이용하여 반응기 내부공간을 밀폐시킨다. 진공펌프를 이용하여 내부의 공기를 제거한 다음 반응기를 가열하여 반응기 내부가 수증기로만 가득 차게 한다. 이때, 내부 수증기의 온도가 반응기 내부 표면온도보다 높아지는 현상을 보이게 되는데 이는 처리장치의 열에너지 투입 방식에 의한 결과이다. 즉, 반응기는 내표면에 부착되어 있는 온도 측정센서에 의해서 제어되며, 측정센서에서 측정한 온도가 반응기 내부 표면온도와 같아지면 열에너지 투입이 중단되는 식으로 공정이 진행되는데 이때, 반응기 내표면의 온도센서 주변에서 소량의 수분 흡-탈착이 계속 발생하게 되고, 탈착 시 센서로부터 열을 흡수하게 된다. 이러한 이유에서 반응기 내부가 반응기 내부 표면 온도와 같아졌어도 반응기 내부 표면 온도 센서가 이를 탐지하지 못한 채 지속적으로 반응기 내부로 열에너지를 투입하게 되고, 결과적으로 내부 증기의 온도는 반응기 내부 표면온도보다 높아지고, 증기압도 증가한다. 이때 증기압은 초기 감압상태(0.01 MPa)로부터 급격히 증가하는데 반응기 한계압력의 1/2 수준인 0.25 MPa의 증기압에 접근하면 열에너지 공급을 중단시켜 증기온도와 압력의 상승을 둔화시키고

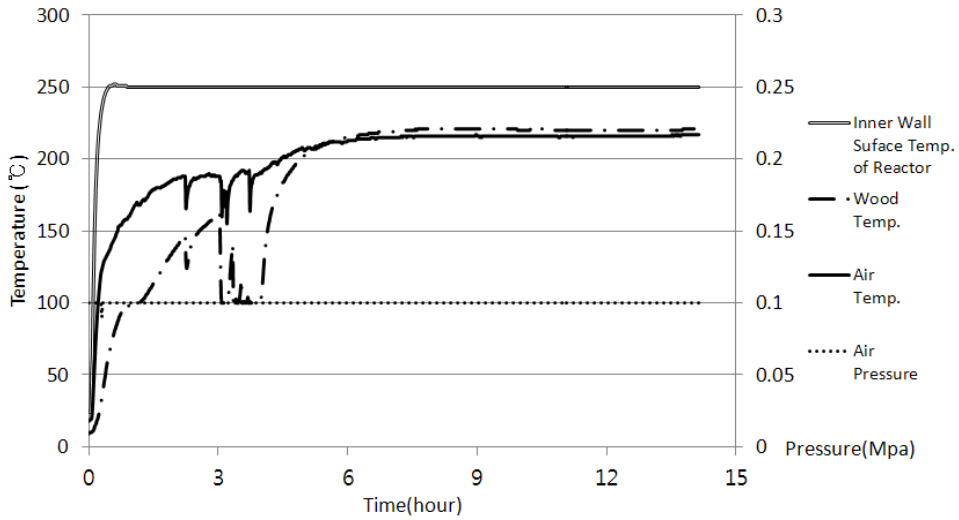


Fig. 2. Temperature and pressure progresses during heat treatment.

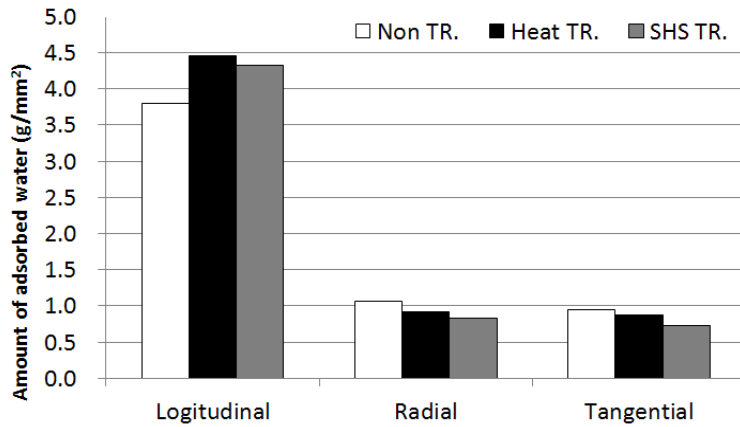


Fig. 3. Amount of adsorbed water by treatment method and direction.

1차 목표 증기온도(143°C) 및 1차 목표 증기압 (0.25 MPa)에 도달시켰다.

(ii)구간은 생성된 과열증기의 온도와 압력을 목표온도와 목표압력으로 조절하는 구간이다. 반응기 내부 증기는 반응기 내부 표면온도 및 압력밸브 조절을 통하여 목표조건인 증기온도 170°C, 증기압 0.4 MPa (143°C의 포화수증기압)으로 제어하였다.

(iii)구간은 목재의 내부 온도가 일정해지는 시점

부터 전체 공정이 끝날 때까지로 구분할 수 있다. 목재 내부의 온도가 일정해지는 것은 내부 함수율이 평형함수율에 도달한 것을 의미한다. 따라서 과열증기에 의한 목재의 건조는 (ii)구간에서 종료되며, (iii)구간에서 목재는 평형함수율에 도달한 채 열처리가 주로 이루어지게 된다. 약 10시간의 과열증기 열처리 공정이 끝난 후 시편의 최종함수율은 8.51 ( $\pm 1.52$ )%였다.

Table 1. Sorption equilibrium moisture contents (%) by treatment methods and relative humidity at 40°C

Relative Humidity	15%	30%	45%	60%	75%	90%
Non TR.	3.30	5.21	6.80	8.81	11.58	15.08
Heat TR.	2.45	3.79	5.62	6.96	8.67	12.22
SHS TR.	2.35	3.58	4.95	6.43	8.27	11.36

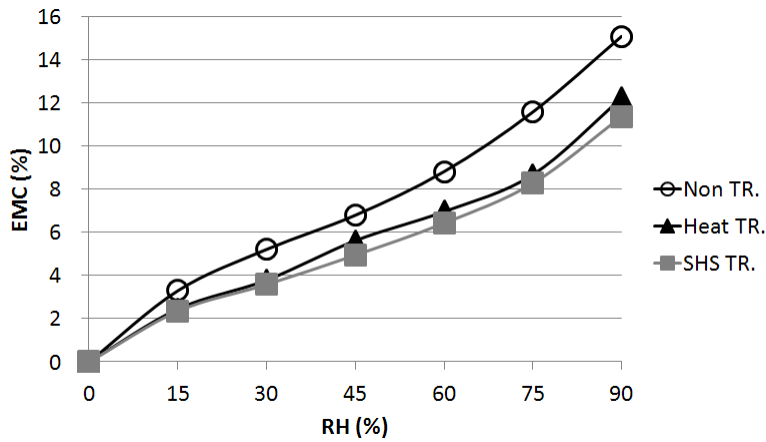


Fig. 4. Sorption isotherms by treatment methods at 40°C.

### 3.1.2. 일반 열처리

일반 열처리는 동일한 처리장치를 사용하였고, 과열증기 열처리와는 다르게 내부는 증기가 아닌 공기로 가득 차있으며 압력은 대기압을 유지하였다. 내부 공기 온도가 220°C인 상태에서 총 14시간 동안 처리하였고, 공정이 끝난 후 시편은 전건 상태에 도달하였다. Fig. 2는 열처리 공정이 진행되는 동안 시간에 따른 반응기 내부 표면온도(Inner Wall Surface Temp. of Reactor), 목재 내부의 온도(Wood Temp.), 공기의 온도(Air Temp.), 공기의 압력(Air Pressure)의 변화 그래프이다. 일반 열처리는 공기와 수증기의 열전달 속도 차이에 의해 반응기 내부 및 목재의 온도가 과열증기 열처리에 비해서 느리게 상승한다. 목재의 온도가 상승하기 위해 소요된 4시간을 제외하고, 목재가 약 200°C가 된 이후부터 약 10시간을 처리시간으로 하여 과열증기 열처리 시간과 동일하게 조절하였다.

### 3.2. 흡습량 및 수축/팽창율

Fig. 3는 무처리재(Non TR.), 일반 열처리재(Heat TR.), 과열증기 처리재(SHS TR.)의 방향별 흡습량을 측정된 결과이다. 섬유방향의 경우 무처리재가 0.038 g/cm<sup>2</sup>, 일반 열처리재가 0.045 g/cm<sup>2</sup>, 과열증기 처리재가 0.043 g/cm<sup>2</sup>으로 무처리재가 가장 작은 것으로 측정되었으며, 방사방향의 경우는 무처리재가 0.011 g/cm<sup>2</sup>, 일반 열처리재가 0.009 g/cm<sup>2</sup>, 과열증기 처리재가 0.008 g/cm<sup>2</sup>, 접선방향의 경우는 무처리재가 0.009 g/cm<sup>2</sup>, 일반 열처리재가 0.009 g/cm<sup>2</sup>, 과열증기 처리재가 0.007 g/cm<sup>2</sup>으로 무처리재가 가장 크며, 과열증기 처리재가 가장 작은 것으로 측정되었다. 무처리재의 섬유방향의 경우 횡단면에서 일반 열처리재와 과열증기 처리재에서 발견되지 않은 다량의 송진이 삼출되었는데 이 송진 삼출이 흡습을 저해하는 것으로 생각

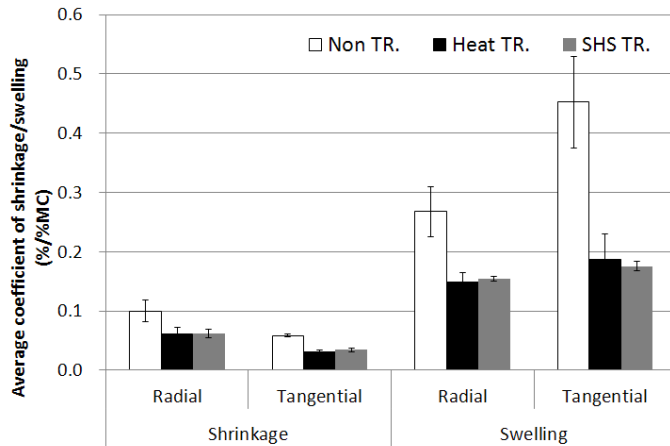


Fig. 5. Shrinkage and swelling by 1% change of MC at radial and tangential direction.

된다. 송진의 영향이 거의 없었던 방사방향과 접선 방향의 결과를 보면 과열증기 처리재의 경우가 가장 작은 흡수량을 나타냈는데 이는 고온의 열처리에 의해 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스의 열화가 발생하고 이에 따라 친수성 반응기인 하이드록시기(-OH)가 줄어들기 때문으로 생각된다.

Table 1과 Fig. 4에 40°C의 온도에서 15, 30, 45, 60, 75, 90%의 상대습도 조건에서 무처리재(Non TR.), 일반 열처리재(Heat TR.), 과열증기 처리재(SHS TR.)의 평형함수율을 나타내었다. 모든 상대습도 조건에서 과열증기 처리재의 평형함수율이 가장 작게 측정되었으며 무처리재의 평형함수율이 가장 크게 측정되었다. 일반 열처리의 경우 과열증기 열처리에 비해 더 높은 온도에서 열처리가 이루어졌음에도 불구하고 과열증기 열처리재에서 더 낮은 평형함수율이 측정된 것은 고압의 과열된 수증기에 의한 영향으로 보이며, 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 5는 각 처리방법 별 방사방향과 접선방향의 함수율 1% 변화에 대한 평균 수축률과 평균 팽창율을 측정된 결과이다. 수축률 및 팽창율 모두 방사방향, 접선방향에서 일반 열처리재 및 과열증기 처리재가 무처리재에 비해서 작은 값을 나타내었다. 고온의 열처리한 목재는 함수율의 변화가 작을 뿐만

아니라 함수율의 변화에 대한 수축률 및 팽창율 또한 작은 것을 알 수 있다. 따라서 고온의 열처리하는 목재의 치수안정성에 크게 기여함을 알 수 있다.

### 3.3. 재색변화

일반 열처리 및 과열증기 처리 전 목재시편의 명도는 각각 74.46, 73.21로서 거의 동일하다. 하지만 일반 열처리의 경우는 39.43으로 줄었고, 과열증기 처리는 50.90으로 줄었다. 두 방법 모두 재색이 어두워지는 경향을 보였고, 일반 열처리의 경우 그 정도가 더 큰 것이 확인되었다. 열처리에 의한 표면 재색변화는 주로 헤미셀룰로오스의 열화로 인하여 발생하는 것으로 알려져 있다[6]. 헤미셀룰로오스는 주성분에 따라 160~250°C 범위에서 열화가 발생한다. 따라서 170°C의 과열증기 처리의 경우보다 220°C의 일반 열처리의 경우가 재색이 더 어둡게 변한 것으로 생각된다.

### 3.4. 강도

Table 2와 Table 3은 처리방법 별 종압축 강도 및 휨 강도 결과와 함수율이며, Fig. 6은 결과의 그래프이다. 종압축 강도의 경우는 일반 열처리재가



Table 2. Compressive strength parallel to grain and MC by each treatment methods

	Non TR.	Heat TR.	SHS TR.
Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	43.38 (± 2.22)*	54.74 (± 2.06)	51.14 (± 1.64)
MC (%)	8.34 (± 0.31)	3.22 (± 0.41)	4.68 (± 0.18)

\* Standard Deviation.

Table 3. Bending strength and MC by each treatment methods

	Non TR.	Heat TR.	SHS TR.
Bending strength (N/mm <sup>2</sup> )	60.95 (± 7.51)*	52.69 (± 6.21)	73.16 (± 5.75)
MC (%)	8.99 (± 0.36)	1.82 (± 0.23)	2.98 (± 0.51)

\* Standard Deviation.

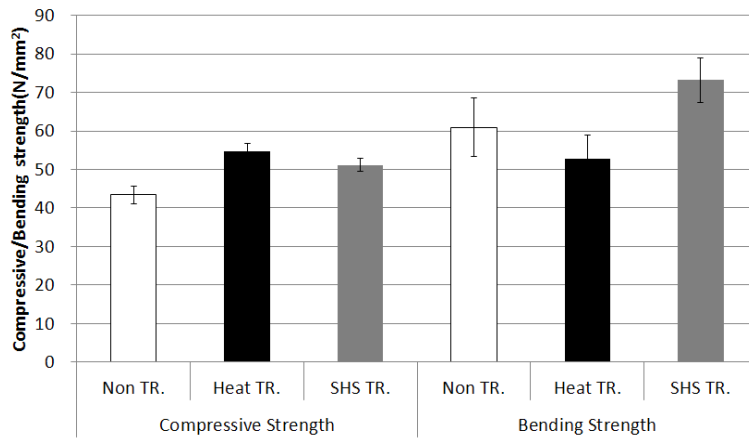


Fig. 6. Compressive strength parallel to strain and bending strength of wood treated by each methods.

54.74 N/mm<sup>2</sup>으로 가장 크게 측정되었고, 과열증기 처리재가 51.14 N/mm<sup>2</sup>, 무처리재가 43.38 N/mm<sup>2</sup>으로 가장 작게 측정되었다. 반면에 휨 강도의 경우는 과열증기 처리재가 73.16 N/mm<sup>2</sup>으로 가장 크게 측정되었으며, 무처리재가 60.95 N/mm<sup>2</sup>, 일반 열처리재가 52.69 N/mm<sup>2</sup>로 가장 작게 측정되었다. 목재의 강도는 함수율에 크게 영향을 받는다.

다. 섬유포화점 이하에서 강도는 선형적으로 감소하며 섬유포화점 이상에서는 거의 일정하다. 무처리재는 일반 열처리재나 과열증기 처리재에 비해서 동일한 온도 및 상대습도 조건에서 높은 평형함수율을 갖는다. 따라서 내부 활렬이 없는 무결점 시편을 사용한 압축 강도의 경우 함수율이 가장 낮은 일반 열처리재가 가장 큰 강도 값을 갖는 것으로 생각된다.

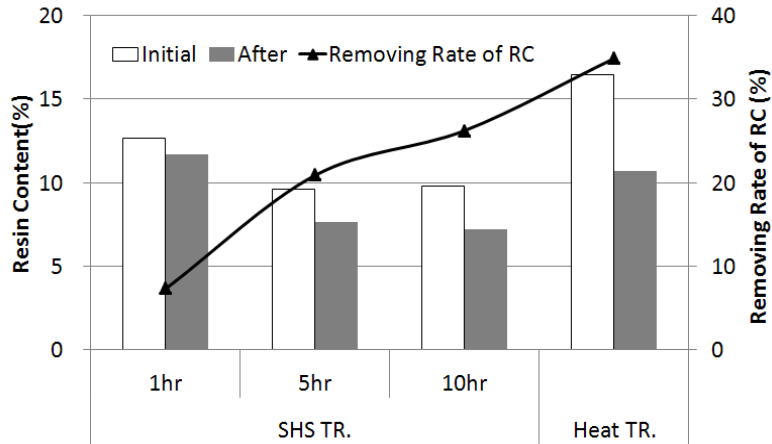


Fig. 7. Resin content (RC) and removing rate of resin content by each treatment methods.

휨 강도의 경우 350 mm 길이로 시편을 제작할 때 내부 할렬이 없는 일반 열처리재 시편을 제작하기 어려워 내부 할렬이 포함된 시편을 사용하였기 때문에 강도의 감소가 큰 것으로 생각된다. 과열증기 처리재는 일반 열처리재에 비해서 내부 할렬 발생이 현저히 떨어져 비교적 할렬이 없는 부분을 채취하여 시편을 제작할 수 있었고, 함수율이 낮은 과열증기 처리재가 무처리재보다 높은 휨 강도 값을 갖는 것으로 생각된다. 무처리재와 동일한 수준의 함수율로 조습한 열처리재라면 질량 손실에 의한 비중의 감소 및 세포벽을 구성하는 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스의 결정화도 감소 등에 의해 할렬의 영향이 없다고 하더라도 무처리재보다 강도가 낮을 것으로 생각된다. 하지만 동일한 온도 및 상대습도 조건에서 열처리재가 무처리재보다 평형함수율이 더 낮기 때문에 내부 할렬이 많이 발생하지 않는 과열증기 처리 방법은 강도를 개선할 수 있는 방법으로 이용될 수 있을 것이다.

### 3.5. 송진 함량 변화

Fig. 7의 세로 막대그래프는 처리방법에 따른 송진 함량의 변화(RC (%))에 대한 그래프이다. 일반 열처리와 과열증기 처리 모두 송진 함량이 감소하는

것을 확인할 수 있다. 하지만 초기 송진 함량에 차이가 크기 때문에 각 처리방법에 따른 송진 제거의 효과를 정량적으로 비교하기 어렵다. 따라서 초기 송진 함량을 고려하여 송진 제거율(R (%))을 계산한 결과를 Fig. 7에 꺾은선 그래프로 나타내었다. 송진 제거의 효과는 일반 열처리의 경우가 34.85%로 가장 큰 것으로 나타났으며 10시간 동안 과열증기 처리한 경우는 26.22%로 어느 정도의 송진 제거의 효과를 보이는 것으로 나타났다. 잣나무나 소나무 등의 침엽수는 다량의 송진을 함유하고 있어서 생재를 그대로 이용할 경우 가공과 도장이 어려운 단점이 있는데 고온의 열처리를 통하여 송진을 제거함으로써 가공성 및 도장성을 개선하는 데 유용하게 쓰일 것으로 기대할 수 있다.

## 4. 결 론

170°C, 0.4 MPa 조건의 과열증기 처리한 잣나무와 220°C에서 일반 열처리한 잣나무의 흡습성, 강도, 송진 함량의 변화를 측정하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다. 흡습량의 경우 다량의 송진의 영향을 받은 횡단면을 제외하고 방사단면과 접선단면에서 모두 과열증기 처리재와 일반 열처리재의 흡습량이 무처리재에 비해서 감소하였고, 40°C의 온도에

서 상대습도에 따른 평형함수율을 측정한 결과 모든 상대습도 조건에서 과열증기 처리재가 가장 낮은 평형함수율을 나타내었고, 일반 열처리재가 중간 값을, 무처리재가 가장 큰 값을 나타내었다. 또한 증압축 강도에서는 일반 열처리재, 과열증기 처리재, 무처리재 순서로 큰 값을 나타내었으며, 휨 강도에서는 과열증기 처리재, 무처리재, 일반 열처리재 순서로 큰 값을 나타내었다. 송진 함량은 일반 열처리 방법이 가장 큰 효과가 있는 것으로 나타났다.

## 사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0003453).

## 참 고 문 헌

1. 김광모, 박정환, 박병수, 손동원, 박주생, 김운섭, 김병남, 심상로. 2009. 삼나무 열처리재의 물리 및 역학적 특성. 목재공학. 37(4): 330~339.
2. 김광모, 박정환, 박병수, 손동원, 박주생, 김운섭, 김병남, 심상로. 2010. 백합나무 열처리재의 물리 및 역학적 특성. 목재공학. 38(1): 17~26.
3. 김옥신, 이동현, 전원표. 2008. 과열 증기 이용 친환경 건조기술. Korean Chem. Eng. Res., 46(2): 258~273.
4. 장상식. 2000. 함수율과 섬유경사각이 목재의 압축강도 및 초음파 전달속도에 미치는 영향. 목재공학. 28(2): 10~18.
5. Cooper, P. 2009. High Temperature Treated Wood. Value to Wood Research Program Poster Presentation.
6. Garrote, G., H. Dominguez, and J. C. Parajo. 1999. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. Holz als Roh- und Werkstoff. 57(3): 191~202.
7. Mujumdar, A. S. 1990. CEA Report, 816 U 671, Montreal, Canada.
8. Mujumdar, A. S. 1995. Handbook of Industrial Drying, Second Edition, Marcel Dekker, Inc. New York.
9. Shibata, H. and Mujumdar, A. S. 1994. Steam Drying Technologies: Japanese R & D. Drying Technology. 12(6): 1485~1524.
10. Woods, B., H. Hussain, and A. S. Mujumdar. 1994. Technoeconomic Assessment of Potential Superheated Steam Drying Applications In Canada. Canadian Electrical Association Report, 913U888. 120.
11. 한국표준협회. 2004. KS F 2203. 목재의 수축률 시험 방법.
12. 한국표준협회. 2004. KS F 2205. 목재의 흡습성 시험 방법.
13. 한국표준협회. 2004. KS F 2206. 목재의 압축 시험 방법.
14. 한국표준협회. 2004. KS F 2208. 목재의 휨 시험 방법.