잣나무열처리재의 흡방습성능에 미치는 영향인자 분석*¹

장 윤 성*² · 한 연 중*² · 엄 창 득*³ · 박 주 생*³ · 박 문 재*³ · 최 인 규*^{2,4} · 여 환 명*^{2,4†}

Analysis of Factors Affecting the Hygroscopic Performance of Thermally Treated *Pinus koraiensis* Wood *¹

Yoon-Seong Chang*² · Yeonjung Han*² · Chang-Deuk Eom*³ · Joo-Saeng Park*³ · Moon-Jae Park*³ · In-Gyu Choi*^{2,4} · HwanMyeong Yeo*^{2,4†}

요 약

최근 만들어지고 있는 거주공간은 단열성능 향상을 통한 냉난방 에너지 절약을 위하여 더욱 기밀해지고 있다. 이로 인해 일상생활 중에 발생하는 수분의 인위적인 배출과 외부공기의 인위적인 유입이 줄어들에 따라 건축내장재의 자연조습기능에 대한 관심이 증대하고 있다. 본 연구에서는 열처리된 잣나무의 흡·방습성능을 평가하고 이에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다. 상대습도 변화에 따른 평형함수율과 흡·방습률을 측정하였고, 조도(거칠기)와 미시적 표면형상, 그리고 FT-IR spectrum과 흡방습성과의 관계를 고찰하였다. 본 연구결과는 거주공간의 조습성능 정량화 평가시스템 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

ABSTRACT

A high airtightness is required for the residential spaces constructed recently to save cooling and heating energy through improving insulation performance. Because the chances to release steam formed by human activity in building and inflow of water vapor in outdoor air to residential space are reduced, the natural humidity control performance of interior materials has become more important. In this study, hygroscopic performance of thermo-physically treated wood

*¹ 접수 2011년 11월 4일, 채택 2011년 12월 23일

*² 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부, Dept. Forest Science, CALS, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

*³ 국립산림과학원 녹색자원이용부 재료공학과, Div. Wood Engineering, Dept. Forest Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

*⁴ 서울대학교 농업생명과학연구원, Research Institute for Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

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

(*Pinus koraiensis*) was estimated. At various relative humidity condition, the water vapor adsorption and desorption rates of wooden materials were measured as well as equilibrium moisture content. Effects of roughness and surface microstructure as physical factors and functional groups as chemical factors on the hygroscopicity were analyzed. It is expected that the results from this study and further study of measuring moisture generation in residential spaces could contribute to install a system for evaluating the hygrothermal performance of wooden building.

Keywords: hygroscopic performance, equilibrium moisture content, adsorption, desorption, heat treatment, roughness, FE-SEM, FT-IR

1. 서 론

실내에서 생활하는 시간이 전체 삶의 90% 이상을 차지하는 현대인들에게 실내의 습도환경은 쾌적한 생활과 신체의 질병, 그리고 위생 면에서 대단히 중요하다. 인간은 음식이나 산소를 섭취하여 얻은 열을 지속적으로 방출하여 체온을 일정하게 유지하는데, 대기습도가 지나치게 높거나 낮으면 수분흡수와 증발작용이 원활하지 못하게 되어 체온조절과 기타 생리기능이 방해를 받게 된다. 과습도(80%RH 이상)시에는 집먼지 진드기와 곰팡이가 급속도로 번식하고, 미세먼지를 통한 알레르기 질환을 야기한다. 또한 과건조 상태(30%RH 이하)는 코의 점막과 피부를 자극하여 감기 및 아토피성 질환의 원인이 된다. 그러므로 실내습도는 항상 일정 범위 내에서 유지되어야 한다(조와 김, 1990).

또한 주택의 단열화와 기밀화로 인하여 주택 내부에서 일상생활 중에 발생하는 수분의 배출이 어려워짐에 따라 건축내장재의 자연조습기능이 더욱 관심을 받게 되었으며(문 등, 2010), 이러한 추세에 맞추어 대기 중의 습도에 따라 수분을 흡·방습하여 인간 생활에 알맞게 거주공간의 습도를 조절하는 특성을 가지는 목재가 내장재료로 많이 이용되고 있다. 목재로 구성된 실내의 습도변동은 다른 재료에 비해 상당히 적은 편차를 가진다. 따라서 많은 목재가 노출될 수록 외기의 습도변화에 대한 실내의 습도변동이 줄어들게 된다. 이러한 목재의 흡·방습성능은 함수율 변화와 형태학적 차이에 따라 영향을 받는다.

Awoyemi와 Jones (2011)는 SEM를 이용하여 열처리에 따른 미세구조 변화를 평가하였고, Hietala 등 (2002)은 liquid state NMR을 이용하여 열처리에 따른 구조변화 측정 및 수분이동에 관하여 연구하였다. Gungor 등(2010)은 합판의 건조에서 거칠기에 따른 건조속도에 관하여 연구하였다.

또한 박 등(2010)은 낙엽송을 실내장식용재로 개발하기 위하여 밀도, 수축률, 경도, 흡습성과 거칠기 등의 재질평가를 수행하였고, 변 등(2008)은 잣나무, 낙엽송의 수분흡착성 및 물리적 성질에 대하여 평가하였다.

특히, 목조주택의 조습성능은 목재가 갖는 온습도 조절기능 등에 의존하므로, 목재 및 목질재료가 갖는 조습성능에 대한 과학적이고 정량적인 평가 자료가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위한 기초데이터를 확보하여 공업화 목조주택 보급에 기여하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

경기도 포천시 광릉수목원 시험림 내 수령 75년, 직경 387 mm, 평균연륜폭 2.6 mm인 잣나무(*Pinus koraiensis*)를 벌채한 후 두께 60 mm, 폭 150 mm, 길이 1,000 mm 판재로 제재하고, 이들을 천연건조, 열기건조, 그리고 고온열처리하였다. 천연건조는 대기 중에서 3개월간 수행하였고, 열기건조는 미국임산물 건조스케줄 코드 T9-C4에 의해 초기건구온도

Table 1. Environmental conditions for conditioning and testing specimens

Environmental Condition (Temperature 23°C)	Relative Humidity (%)	
	Adsorption (12 hr)	Desorption (12 hr)
Low (Equilibrated at 30%RH before adsorption)	55	30
Medium (Equilibrated at 50%RH before adsorption)	75	50
High (Equilibrated at 70%RH before adsorption)	95	70

Fig. 1. Specimens of heat treated woods ((a) : air-dried, (b) : kiln-dried, (c) : heat-treated).

60°C, 초기상대습도 80%, 말기건구온도 70°C, 말기 상대습도 20% 조건에서 수행하였다. 그리고 상압조건에서 처리기 내표면에 세라믹히터를 삽입하고 외표면을 단일 세라믹으로 밀폐하여 외부로의 열손실을 최소화하고, 외부 공기유입을 차단하여 열전달률의 향상과 화재의 위험성을 감소시킨 열처리기를 이용하여 6시간 동안 200°C 온도에서 열처리하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 평형함수를 측정

잣나무 천연건조재, 열기건조재, 열처리재를 50 mm (L) × 50 mm (T) × 10 mm (R)의 크기로 가공하였다. 시편은 각 조건별로 5개씩 제작하여, 온도 23°C, 상대습도 30, 50, 70% 조건에서 항온항습기를 이용하여 조습하였다. 각 조습조건별 항량에 도달한 시험편의 질량을 측정하고, 105°C ± 3의 oven에서 24시간 간격으로 측정하였다. 무게변화가 0.01 g 이하일 때를 전건질량으로 하여 재료별, 조건별 평형함수를 측정하였다.

2.2.2. 흡·방습률 측정

잣나무 천연건조재, 열기건조재, 그리고 열처리재

를 10 mm와 30 mm 두께로 평삭가공 후 노출 단면적을 100 mm × 100 mm과 150 mm × 150 mm이 되게끔 가공하였다. 흡·방습면을 제외한 모든 면을 알루미늄 테이프로 단습처리하였다.

KS F 2611: 2009에 따라 항온항습기를 이용하여 각각의 초기조건에서 질량변화가 24시간 동안 0.01 g 이하 일 때 질량을 측정하였다. 이후에, 상대습도를 높여 흡습과정에서 12시간 경과 후의 질량을 측정하고, 다시 상대습도를 낮춰 방습과정에서 12시간 경과 후의 질량을 측정하였다. 그리고 아래의 계산식에 따라 12시간 후 흡습량, 12시간 후 방습량, 시간당 흡·방습량인 흡방습률을 구하였다. 상대습도별 흡·방습량 분석을 제외한 표면조도, 미세구조, FT-IR spectrum 관련 시험은 중습조건에서 처리된 시편을 이용하여 수행하였다.

$$\rho_{A,a} = \frac{w_a - w_o}{A}$$

$$\rho_{A,d} = \frac{w_a - w_d}{A}$$

$$G_n = \frac{w_n - w_{n-1}}{A \cdot \Delta t}$$

$\rho_{A,a}$ = 단위면적당 흡습량

$\rho_{A,d}$ = 단위면적당 방습량

G_n = n번째 조건에서의 흡·방습률

w_0 = 조습 후의 재료의 질량(g)

w_a = 흡습과정 종료 시 재료의 질량(g)

w_d = 방습과정 종료 시 재료의 질량(g)

A = 외기와의 노출단면적(m²)

t = 시간(hr)

Table 2. Equilibrium moisture contents of air-dried, kiln-dried and heat-treated wood

Temp(°C)	RH(%)	Equilibrium Moisture Content (%)		
		Air-dried	Kiln-dried	Heat-treated
23	70	13.79 (± 0.37)	13.17 (± 0.31)	5.87 (± 0.18)
	50	9.78 (± 0.26)	9.34 (± 0.17)	4.72 (± 0.16)
	30	7.54 (± 0.48)	7.34 (± 0.25)	4.17 (± 0.11)

* 5 samples, () : standard deviation.

2.2.3. FT-IR Spectrum 분석

열처리에 의한 목재의 화학적 관능기 변화를 알아보고자 FT-IR spectrum을 분석하였다. 이를 위하여 소시험편을 채취하고 ball miller (pulverisette 23, Fritsch)로 10분간 분쇄하여 100 mesh로 밀링하였다. 실험에 사용한 기기는 Nicolet 6700 (Thermo Scientific, USA)로 적용조건은 해상도 8, 스캔 수 32, 파수 범위 650~4,000 cm^{-1} 이다.

2.2.4. 미세구조 관찰

열에 의한 표면미세구조변화를 관찰하기 위하여 전계방출 주사현미경(FE-SEM, SUPRA 55VP, Carl Zeiss, Germany)을 사용하여 공시재료 표면의 미세구조형상을 관찰하였다. 횡단면, 방사단면, 접선단면을 관찰하기 위하여 마이크로톰을 이용하여 두께를 약 100 μm 로 제작하였다.

2.2.5. 표면조도(roughness)에 따른 흡방습률 측정

잣나무 천연건조재 노출단면을 120 grit과 1,000 grit 사포를 이용하여 연삭 처리하여 조도별 흡습률을 측정하고 비교하였다. 두 가지 사포로 가공한 시편의 거칠기를 정량적으로 분석하기 위해, 백색광 간섭의 원리를 이용하여 제작된 비접촉 3차원 미세형상 측정기(Nano view-E1000, 나노시스템)를 이용하여 표면조도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 평형함수를 평가

재료별 상대습도에 따른 평형함수율은 Table 2에 나타내었다. 열기건조재와 열처리재는 천연건조재와 비교하여 낮은 평형함수율 값을 보여준다. 특히 열처리재의 경우에는, 일반적으로 알려진 고온처리에 의한 목재 표면의 소수성 증가로 인하여 다른 재료에 비해 확연히 낮은 값을 보였다. 그리고 낮은 상대습도에 비해 높은 상대습도에서 상대습도 변화폭에 따른 평형함수율 증가폭이 컸는데, 이는 저습에서는 단분자층 흡착을 하다가 고습으로 갈수록 반데르발스의 힘에 의해 다분자층 흡착을 하는 결합수의 특징으로 보인다.

평형함수율은 일정한 외부조건에 놓인 재료의 수분보유량을 나타내는 값으로, 실내 수증기 발생량을 예측하여 조습에 필요한 최소한의 내장재 설치면적을 계산하는 자료로 활용할 수 있을 것이다. 하지만 이 평형함수율 자료만으로는 하루 동안에도 수시로 변화하는 실제 주거공간에서의 흡방습성능을 정량화하기는 힘들기 때문에 흡습률을 평가하였다.

2.2. 흡 · 방습률 평가

우선 상대습도 조건별로 단위면적당 12시간 후 측정된 흡 · 방습량 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 상대습도의 경우 고습영역에서 상대적으로 높은 흡 · 방습량을 보였는데, 이는 고습영역에서 다분자층 흡착

Fig. 2. Amount of water in wood after 12 hr adsorption and desorption at different conditions ((a) : RH, (b) : surface area, (c) : thickness).

을 하는 목재 내 결합수의 흡착특성과 관련된 것으로 보인다. 단면적 변화에 따른 흡·방습량의 차이는 거의 없었으나, 두께에 따른 흡방습량은 차이를 보였다. 얇은(10 mm) 시편에서 더 많은 흡·방습량을 보였다. 온도 30°C, RH 85% 에서 16시간 동안 건조한 목재의 경우, 두께가 얇을수록 수분탈착속도가 빠르다고 보고한 Straže *et al.* (2010)의 결과와 유사하다. 이는, Avramidis and Siau (1987)의 목재두께가 얇아질수록 목재의 흡습저항 중 내부저항이 차지하는 비율이 감소함으로 인하여 수분이 목재 내부로 쉽게 흡수될 수 있다는 주장을 뒷받침 한다. 이 결과를 바탕으로 미루어 볼 때, 수분의 변동이 심한 곳에는 목질 내장재의 내부저항 때문에 심층부까지 수분이 침투하는데 시간이 오래 걸리므로 두께를 얇게 시공해도 충분한 조습성능을 가질 것이라고 생각된다.

또한 본 시험에 사용된 12시간 이후 흡·방습량 평가방법의 경우, 하루 동안 실내공간에서 발생하는 습도조건과 전체적인 경향이 유사하기 때문에 이 결과를 바탕으로 외기 상대습도 변화와 공간의 크기를 고

려하여 조습기능을 극대화 할 수 있는 인테리어재료의 두께를 근사적으로 산정할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있다. 또한 이를 통해서 얻은 목재내장재료의 최대 함유수분 가능량과 최소 함유 수분 가능량은 부후와 결로 발생 위험도를 판단할 보조지표로도 사용가능하다.

그러나 12시간 주기로 측정된 이 결과로는 언제 얼마의 수분을 흡습 또는 방습하여 이 함유량에 도달했는지 알 수 없기 때문에 단위시간 당 흡습/방습량을 측정하여야 할 필요가 있다.

재료별 수분 흡·방습률을 측정한 결과, 모든 시험편에서 초기 2시간 이내에는 높은 흡습률을 보이다 시간이 지나면서 점차 수렴하는 경향을 보였다. 흡·방습률은 단위시간당 단위면적에서 재료의 수분 흡·탈착정도를 나타내는 것으로서, 값이 높을수록 급격한 습도의 변동에 효율적으로 대응할 수 있다는 뜻이다. 열처리재의 경우 다른 시험편에 비하여 흡·방습률이 확연히 낮음을 알 수 있었다. 이는 표면의 소수화에 따른 물분자의 흡착이 어려워짐에 따른 것

Fig. 3. Moisture adsorption and desorption rate of air-dried, kiln-dried and heat-treated *Pinus koraiensis* wood.

Fig. 4. FT-IR spectrum of air-dried, kiln-dried and heat-treated *Pinus koraiensis* wood.

으로 판단된다. 또한 열기건조재의 경우 천연건조재보다 흡·방습률이 높았는데 이는 열에 의한 추출물의 휘발로 인한 내부 공극의 증대로 공기와 수분이동이 천연건조재보다 용이하였기 때문이라고 생각된다.

3.3. FT-IR spectrum 분석

Fig. 4는 잣나무 천연건조재, 열기건조재와 열처리재의 FT-IR spectrum을 보여준다. 열처리가 진행될수록 OH기와 관련된 $3,400\text{ cm}^{-1}$ 에서 피크가 감소하고, $\text{sp}^3\text{ C-H}$ 결합과 관련된 $2,900\text{ cm}^{-1}$ 피크의 감소로 볼 때, 열처리에 의한 탈수화로 인하여 알킬그룹, 방향족과 카르복실산 등의 OH와 C-H가 분해된 것을 알 수 있다. 하지만 열처리재의 경우, $3,400\text{ cm}^{-1}$ 에서 상대적으로 넓은 피크를 보여, 분자끼리 수소결합을

하는 것으로 판단된다. 또한 $1,650\text{ cm}^{-1}$ 피크는 방향족의 $\text{C}=\text{C}$ 결합으로, 이의 감소는 열에 의한 추출물의 휘발을 보여준다.

탄수화물 분자와 OH기 간의 C-O-H 결합을 나타내는 $1,050\text{ cm}^{-1}$ 피크에서, 열기건조재는 가열에 따른 물분자의 탈착 때문에 천연건조재에 비해 높은 값을 보인다.

또한 더 높은 온도에서 가열된 열처리재는 탈수가 더 진행되면서, $\text{C}=\text{O}$ 결합이 증가하는 것을 $1,735\text{ cm}^{-1}$ 피크의 증가로 확인할 수 있었다(Christner and Walker, 1993).

앞에서의 결과와 비교해 볼 때, 목재에 있어서 수분흡착점이 되는 곳은 목재 구성성분의 친수성 기인 OH기이고, 이 피크가 높을수록 목재의 흡습성이 높다고 알려져 있다. 열기건조재의 경우, 천연건조재에 비해 가열에 의한 목재의 OH기가 물분자를 잃음

Fig. 5. Cross-sectional view of air-dried (left), heat-treated wood (right).

Fig. 6. Cell wall of air-dried wood (left) and heat-treated wood (right).

과 동시에 서로 접근하여 일부가 목재 실질간의 결합인, 에테르 결합을 하는 것과, 목재의 구성성분 중 하나인 OH기를 많이 포함하는 헤미셀룰로오스의 비율을 감소시키는 것에 의해 평형함수율이 낮은 것으로 판단된다. 하지만, 추출물의 휘발로 인한 세포벽 내 미세공극의 확대로, 열건조재가 천연건조재에 비해 수분의 이동이 원활하여 흡·방습률은 더 높은 것으로 생각된다.

3.4. 미세구조 관찰

열처리재에서는, 많은 미세할렬이 관찰되었으며, 이와 같은 조직의 파괴로 다른 목재에 비해 표면이 거친 것을 확인하였다. 열처리재의 횡단면을 보면 세포벽이 열분해되어 할렬이 발생하였고, 상대적으로 세포벽이 수축하였으며 세포간층이 노출되었음을 확인할 수 있다. 그리고 열처리재 접선단면에서는 타일

로소이드(tylosoid)와 유사한 형상의 열에 의해 녹았다가 다시 굳어 막힌 수평수지구를 관찰할 수 있었다. 이들로 인한 표면조도의 증가와 미세이동통로 확장이 수증기 확산저항을 줄여 흡방습속도를 빠르게 하는 효과가 있을 것으로 사료되나, Hietala *et al.* (2002), Awoyemi and Jones (2011)의 고찰과 유사하게, 이와 같은 구조적인 변화보다 소수화와 같은 화학적인 변화의 영향이 더 크기 때문에 단위시간당 흡방습하는 절대수분량이 적은 것으로 생각된다.

3.5. 표면조도(roughness)

열처리에 의한 소수화 효과로 인하여 표면거칠기가 흡습속도에 미치는 영향을 분명하게 알 수 없었기 때문에 표면조도를 다르게 연삭한 천연건조재의 흡습률을 측정하고 평가하였다. 조도는 일반적으로 중심선에서 단면곡선까지의 평균 높이를 나타내는 평

Table 3. Surface roughnesses of specimens abraded with 120-grit and 1000-grit sandpaper

Material	Roughness (μm)			
	Ra	Rq	Rt	Rz
120 grit (air dried wood)	15.10	25.03	253.66	218.72
1,000 grit (air dried wood)	4.55	8.43	215.93	262.51

Fig. 7. 3D rendering of surface roughness in wood.

Fig. 8. Moisture adsorption rate by surface roughness.

균조도(R_a), 중심선에서 단면곡선 사이거리의 근평균제곱인 제곱평균근(root mean square) 조도(R_q), 중심선에 평행하고 그 곡선의 최고점과 최저점을 지나는 두 평행선 간의 상하거리를 나타내는 최대높이 조도(R_t), 곡선의 제일 높은 봉우리에서부터 5번째까지의 평균 골깊이 사이의 거리의 합을 나타내는 10점 평균조도(R_z)로 나타낼 수 있다.

사포로 표면을 연삭한 잣나무 천연건조재의 경우, 120 grit에서 R_a : $15 \mu\text{m}$, R_q : $25 \mu\text{m}$, 1,000 grit에서 R_a : $5 \mu\text{m}$, R_q : $4 \mu\text{m}$ 으로 뚜렷한 차이를 보였다. 아래 그림은 표면의 거칠기를 입체적으로 구현한 것이

다. 처리별로 차이가 확연히 드러남을 알 수 있다.

거칠기에 따른 천연건조재의 수분흡습률을 측정된 결과, 상대적으로 거친 120 grit 단면의 흡습률이 1,000 grit에 비해 높았다. 이는 거칠기가 클수록 물 분자와 흡습면의 접촉면이 증대된 것으로 판단된다. 초기에는 $2 \text{ g/m}^2\text{h}$ 정도의 차이가 있었으나 시간이 지날수록 그 차이가 줄어들었다. 이는 흡착 초기에는 물 분자가 목재 표면에 흡착을 하므로 표면적이 주요 영향인자이나 시간이 경과할수록 물 분자가 세포벽 내부로 침투하기 때문에 그 영향이 줄어드는 것으로 생각된다.

4. 결 론

물리적 처리에 따른 목재내장재의 흡·방습특성에 대하여 알아보았다. 충분한 시간동안 주위 대기와 수분교환이 이루어진 후 도달하는 평형함수율의 경우, 히스테리시스 효과에서 자유로운 천연건조재가 가장 높은 값을 가졌으나, 시간당 흡·방습량의 경우 열기 건조재가 천연건조재보다 높았다. 이를 미세구조, 표면거칠기와 관능기의 변화 등으로 설명해 보았다. 두께가 얇을수록 수분의 흡·탈착이 용이하기 때문

에 수분의 변동이 심한 곳에서는 내장재를 얇게 시공하는 것이 유리하다고 판단된다. 표면거칠기는 초기 흡·탈착률에 주요한 영향을 미치는 인자라고 판단된다. 또한, 열기건조재의 흡·방습률이 가장 높았는데, 이는 습도의 변동이 심한 곳에서도 적절한 조습기능을 보일 수 있을 것이라 판단되며, 적정 온도에서의 열처리되는 목재의 조습성능 향상에 기여할 것이라 예측할 수 있다. 한편, 고온열처리재의 경우, 흡·방습성능은 떨어지지만, 실제 제품으로의 사용에서 필요한 치수안정성과 내부후성이 높다는 장점을 가진다. 따라서 고습조건이 지속적으로 유지되는 공간에 사용될 수 있으며, 확장된 열처리재 내부공극에 흡·방습성능이 우수한 물질을 투입한다면 조습기능과 치수안정성을 동시에 충족시킬 수 있으리라 생각된다. 이 결과는 실제 거주공간의 조습성능 정량화의 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 기대된다.

사 사

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

참 고 문 헌

1. Avramidis, St. and J. F. Siau. 1987. An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. *Wood Sci Technol.* 21: 249~256.
2. Awoyemi, L. and I. P. Jones. 2011. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. *Wood Sci. Technol.* 45: 261~267.

3. Christner, L. G. and P. L. Walker, Jr. 1993. Molecular sieve character of carbons derived from cellulosic precursors. *Carbon* 31: 1149~1158.
4. Gungor, N. M. *et al.* 2010. Effect of surface roughness on drying speed of drying lamellas in veneer roller dryer. *African Journal of Biotechnology* 9(25): 3840~3846.
5. Hietala, S. *et al.* 2002. Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements. *Holzforschung* 56: 522~528.
6. Siau, J. F. 1995. Wood: Influence of Moisture on Physical Properties, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Tech pp. 227.
7. Straže, A., S. Pervan, and Ž. Gorišek. 2010. Impact of various conventional drying conditions on drying rate and on moisture content gradient during early stage of beechwood drying. *Proceeding of Conference COST Action E53 "The Future of Quality Control for Wood & Wood Products."* NO. 56 paper.
8. 강춘원, 김남훈, 김병로, 김영숙, 변희섭, 소원택, 여환명, 오승원, 이원희, 이화영. 2008. 신고 목재물리 및 역학. 향문사 p. 338.
9. 문현준, 유승호, 이민영, 박준석. 2010. 건축 내장재의 습기 물성치 측정 방법 연구. 한국건축환경설비학회 춘계학술발표대회집 pp. 243~246.
10. 박병호, 이재영, 최기, 조원희. 2010. 국내산 낙엽송의 재질평가를 통한 실내장식용재 개발. 한국디자인문화학회 16(4): 248~262.
11. 변희섭, 이원희, 박병수, 정성호, 강호양. 2008. 국산재의 응용물성연구 2. 잣나무 낙엽송의 수분흡착성 및 열적·전기적·음향적 성질. 목재공학 36(4): 1~10.
12. 조수현, 김현. 1990. Office Building에서 실내습도가 근무자의 건강에 미치는 영향. 대한산업의학회지 2(2): 123~133.