

목재 물성 측정 및 변형 예측 모델 개발

김건우¹ · 김다혜¹ · 김명석¹ · 고영준² · 하병국² · 김형식² · 김지훈[#]

Measurement of Mechanical Properties and Constitutive Modeling of Woods

K. W. Kim, D. H. Kim, M. S. Kim, Y. J. Ko, B. K. Ha, H. S. Kim, J. H. Kim

(Received November 8, 2018 / Revised November 16, 2018 / Accepted November 21, 2018)

Abstract

This study measured the mechanical properties of an ash wood under various temperature and humidity conditions and a finite element model was developed to predict the behavior of the wood. A humidity-controlled chamber was developed and used for measuring the dimensional changes of woods under various humidity conditions. The thermal expansion coefficient and the elastic stiffness constants were measured by using a thermal chamber and the three-point bending test along the three principal axes of the wood. A constitutive model was proposed to describe the moisture content and temperature dependent behavior of wood. The proposed model was validated for the warping test of a wood plate. The warping of the plate was calculated using the finite element method. The calculated amount of warping was in consistence with the measurements.

Key words : Anisotropy, Elasticity, Hygroscopic Swelling, Warping

1. 서론

목재는 가공이 용이하며 외관이 수려할 뿐만 아니라 가볍고 강도가 크며 열전도율이 작아 보온, 방한이 우수한 특징을 지니고 있어 가구재나 내장재로 많이 이용되고 있다. 또한 재질이 부드럽고 탄성이 있어 촉감이 우수하며 고유의 무늬를 가지고 있어서 제품의 외관 마감재로 사용되는 경우가 많다. 그러나 목재는 나무가 자라는 줄기 내에서 나무 세포의 배열에 따라 길이, 반경, 접선 등 세 가지 주요 방향을 가지고 있으며 (Fig. 1) 이 방향에 따라 높은 이방성의 특성을 보여준다. 또한 목재는 온도와 습도에 따라 팽창과 수축이 큰 특징을 갖는다. 특히 목재는 가공 후 시간, 온도, 습도 등의 환경의 변화에 따라 뒤틀림이 발생할 수 있으며 이는 정확한 치수가 중요한 제품에 목재를 사용하는데 큰 장애가 된다.

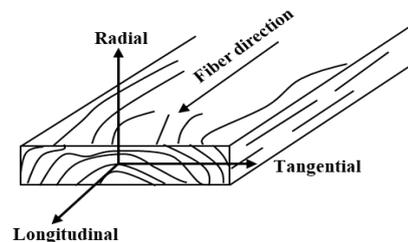


Fig. 1 The principal axes of wood

목재는 오랜 기간 사용되어 왔기 때문에 탄성변형, 열팽창 등에 관한 연구가 폭넓게 진행되어 왔다. Sevanto 등은 목재의 반경방향으로 열팽창 계수의 변화를 측정하였다 [1]. Zhao 등은 목재의 방향별 열팽창이 기계적 성질에 미치는 영향에 대해 분석하였다 [2]. Bjurman 등은 실내 습도 변화가 목재로 제작된 건물에 미치는 영향에 대해서 연구하였다 [3]. Leslaw는 목재로 이루어진 복합재료의 거동을

1. School of Mechanical Engineering, Pusan National University

2. LG Electronics

Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, kimjh@pusan.ac.kr

탄성 구성방정식을 이용하여 표현하였다 [4]. Oqudjene과 Khelifa는 목재의 압축 거동을 삼차원 탄소성 구성방정식을 이용하여 표현하였다 [5]. 하지만 온도와 습도에 의한 팽창과 수축을 고려한 변형 해석에 관한 연구는 제한적이다.

본 연구에서는 온도 및 습도에 의한 목재의 변형을 측정하고 이를 이용하여 목재의 변형을 예측할 수 있는 해석 모델을 개발하여 그 유효성을 검증하였다.

2. 목재 물성 측정

2.1 소재

본 연구에서는 물푸레나무(Ash)를 이용하여 기계적 성질을 측정하였다. 적용 목재는 여러 개의 작은 원목을 배열하여 접착한 집성목 형태로 두께는 15 mm 이다. 방향별 시험을 위해 세 방향에 따라 재단하여 시편을 제작하였다 (Fig. 2). 특히 가능한 한 시편 내의 방향이 균일하도록 시편을 제작할 부위를 선정하였다.



Fig. 2 Wood specimens

본 연구에서는 온도와 습도가 변형에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 목재의 변형률 변화량($\Delta\varepsilon$)을 아래와 같이 세 항으로 나타내었다.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^M + \Delta\varepsilon^{MC} + \Delta\varepsilon^T \quad (1)$$

여기서 $\Delta\varepsilon^M$, $\Delta\varepsilon^{MC}$, $\Delta\varepsilon^T$ 는 각각 응력, 함수율, 온도에 의존하는 변형률 증가량이다.

2.2 항습 챔버 제작

일정한 습도 조건에서 목재의 함수율 및 길이 변화를 측정하기 위해 습도를 일정하게 유지하는 항습 챔버를 제작하였다 (Fig. 3). 항습 챔버는 내측, 외측 챔버의 2 중 구조로 제작되었다. 내측 챔버 바깥 쪽

에는 실리카겔을 사용하여 저습도 조건을 유지하고 시편이 위치하는 내측 챔버 내부는 가습 제어 장치를 이용하여 습도를 제어하였다. 제어장치 개발 도구 아두이노[6]를 이용하여 가습 제어 장치를 구성하였다.

습도 센서로부터 측정된 챔버 내부의 습도가 설정된 습도 이하로 변동 시 제어 알고리즘을 지닌 릴레이 회로를 통하여 가습 장치를 제어하여 습도를 유지하였다. Fig. 4는 설정 습도 80%일 때 내측 및 외측 챔버 내부의 습도 변화를 보여준다. 챔버 내의 습도는 가습장치의 작동에 따라 주기적으로 변화를 보인다. 내측 챔버 습도가 조금씩 감소하여 목표 습도 아래로 떨어지면 가습장치가 작동하며, 이에 따라 외측 챔버내로 습기가 유입되어 외측 챔버 습도가 올라가게 된다. 내측 챔버 습도가 다시 목표 습도 이상으로 올라가면 가습장치의 작동이 멈추고 습도는 다시 서서히 떨어지게 된다.

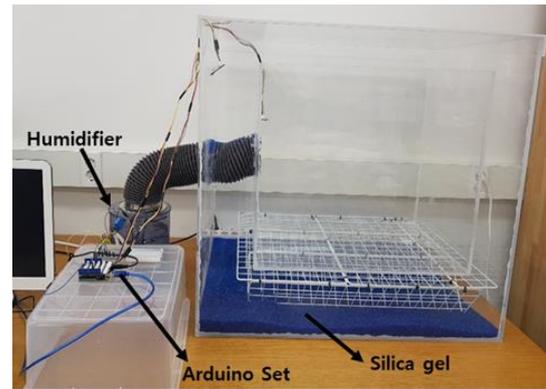


Fig. 3 Setup of the humidity chamber

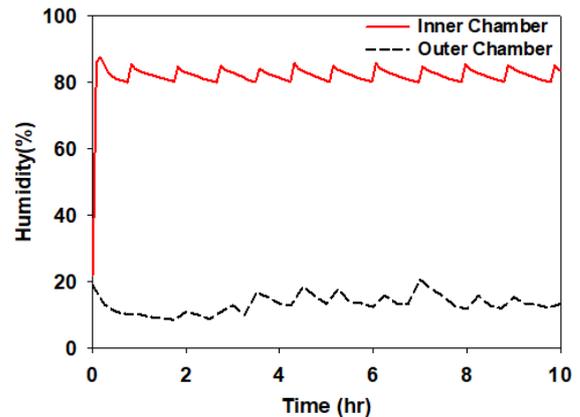


Fig. 4 Humidity in outer and inner chambers at the target humidity of 80%

2.3 습도에 따른 함수율 및 치수변화

목재의 수분 흡수 정도는 식(2)의 함수율 (Moisture Content, MC)로 정의한다.

$$MC(\%) = \frac{w - w_{dry}}{w_{dry}} \times 100 \quad (2)$$

여기서 w 는 목재의 무게이며 w_{dry} 는 완전 건조 상태의 목재 무게(건조무게)이다.

목재의 초기 함수율을 측정하기 위해 가열 챔버를 이용하여 150 °C에서 건조하면서 1시간 간격으로 무게를 측정하였다 (Fig. 5). 가열 챔버내에서 12시간 후에는 무게가 더 이상 변하지 않았으며 이때의 무게를 건조무게로 정하였다. 이로부터 습도 50%인 실험실 환경에서의 초기 함수율은 3.5%로 측정되었다. 본 연구에서는 습도 50%인 실험실 환경을 기준으로 함수율의 변화량(ΔMC)을 이용하여 결과를 분석하였다.

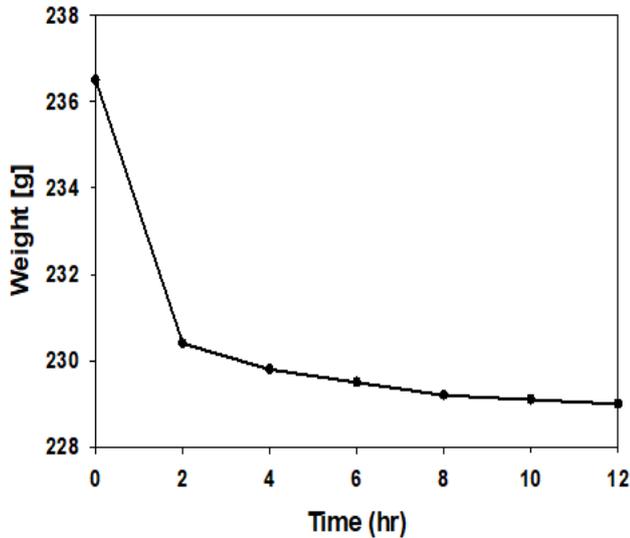


Fig. 5 Weight during the drying test

목재의 습도에 따른 함수율과 길이의 변화를 파악하기 위해 습도 80% 조건에서 5일동안 12시간 간격으로 목재의 함수율과 반경, 접선, 길이 방향의 변형률을 측정하였다. 목재의 무게는 전자저울을, 길이는 정밀 전자 버니어 캘리퍼를 이용하여 측정하였다.

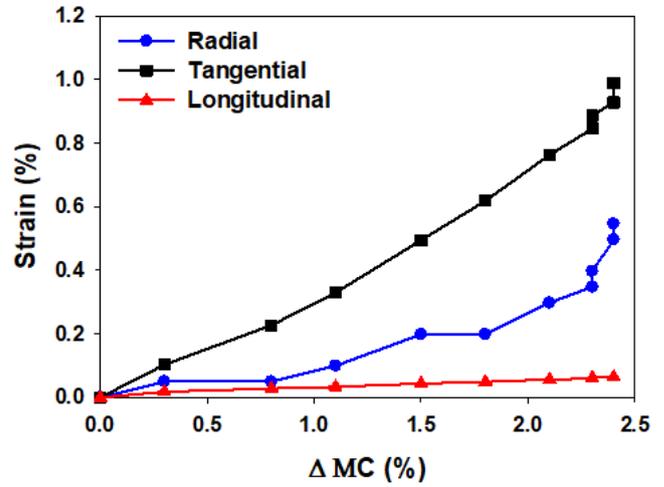


Fig. 6 Evolution of strain with respect to the moisture content

80% 습도 조건에서 함수율이 증가함에 따라 접선 방향의 팽창이 가장 크게 나타나며 길이방향의 팽창이 가장 작게 나타났다 (Fig. 6).

시험 결과로부터 함수율 변화량(ΔMC)과 이에 따른 변형률 변화량($\Delta \epsilon^{MC}$)은 식(3)과 같이 서로 비례한다고 가정하면 함수율에 의한 팽창계수(β)를 결정할 수 있다 (Table 1).

$$\Delta \epsilon^{MC} = \begin{pmatrix} \Delta \epsilon_R^{MC} \\ \Delta \epsilon_T^{MC} \\ \Delta \epsilon_L^{MC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_R \\ \beta_T \\ \beta_L \end{pmatrix} \Delta MC(\%) \quad (3)$$

여기서 아래첨자 R, T, L은 각각 반경, 접선, 길이이다.

Table 1 Hygroscopic expansion coefficients

	Hygroscopic expansion coefficient(β)
Radial	0.158
Tangential	0.364
Longitudinal	0.0282

2.4 온도에 따른 치수변화

목재의 온도에 의한 치수변화를 측정하기 위해

50, 100, 150°C에서 목재의 길이 변화를 측정하였다. 길이 변화는 비접촉식 레이저 신율계를 이용하여 측정하였다. 초기 표점 거리는 50 mm이며 온도를 150°C에서 냉각시키며 방향별 길이 변화를 측정하였다(Fig. 7).

습도의 경우와 유사하게 접선 방향의 길이변화가 가장 크게 나타나고 길이방향의 변화가 가장 작게 나타났다. 온도 변화량(ΔT)과 이에 따른 변형률 변화량($\Delta \epsilon^T$)이 식 (4)와 같이 서로 비례한다고 가정하면 온도에 의한 팽창계수(α)를 결정 할 수 있었다.

$$\Delta \epsilon^T = \begin{pmatrix} \Delta \epsilon_R^T \\ \Delta \epsilon_T^T \\ \Delta \epsilon_L^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_R \\ \alpha_T \\ \alpha_L \end{pmatrix} \Delta T (^\circ\text{C}) \quad (4)$$

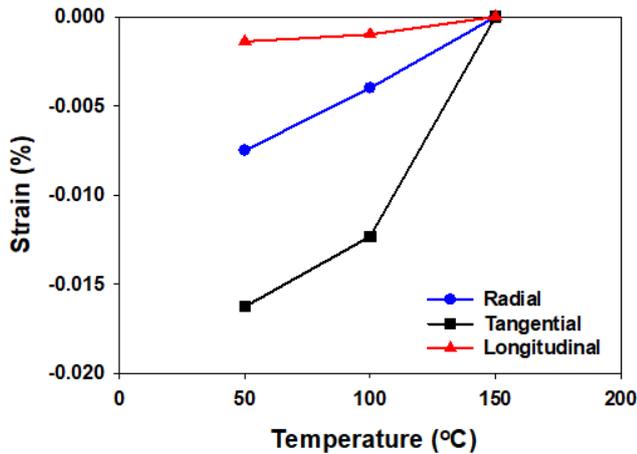


Fig. 7 Strains at various temperatures along the three directions

Table 2 Thermal expansion coefficients

	Thermal expansion coefficient (α)
Radial	7.77e-5
Tangential	1.91e-5
Longitudinal	1.59e-5

2.5 탄성 계수

방향에 따른 탄성 이방성을 측정하기 위해 3점 굽힘 시험을 수행하였다 (Fig. 8). 실제 목재의 탄성계수는 습도와 온도에 따라 조금씩 달라질 수 있으나 본 연구에서는 상온, 습도 50% 조건에서 굽힘 시험

을 수행하였다. 시험 조건은 Table 3에 정리하였다.

시험은 방향 별로 각 5회씩 수행하였으며, 식 (5)의 관계에 따라 Young's modulus(E) 값을 구하였다.

$$E = \frac{l^3 m}{4bh^3} \quad (5)$$



Fig. 8 3-point bending test of wood specimens

Table 3 Conditions for 3-point bending test

Support span	110 mm
Loading pin radius	10 mm
Crosshead speed	2 mm/min
Length (l)	110 mm
Width (b)	20 mm
Height (h)	20 mm

방향별로 측정된 Young's modulus 는 Table 2에 나타내었다.

목재의 탄성에 의한 변형률($\Delta \epsilon^M$)은 식(6)과 같이 직교 이방성을 가진 재료에 대한 일반화된 Hooke의 법칙을 이용하여 나타낼 수 있다 [3].

$$\Delta \epsilon^M = S \Delta \sigma \quad (6)$$

여기서 $\Delta \sigma$ 는 응력 변화량이며, compliance matrix S 는 다음 식으로 나타내진다.

$$S = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서 포아송비(ν)와 shear modulus(G) 는 문헌 값을 이용하였다 [7].

Table 4 Orthotropic elastic constants (MPa if apply)

E_R	1,288
E_T	1,201
E_L	8,463
ν_{RT}	0.684
ν_{RL}	0.059
ν_{TL}	0.051
G_{RT}	84.63
G_{RL}	922.4
G_{TL}	951.6

3. 목재 변형 해석

3.1 비대칭 흡습 시험

목재의 변형 거동을 표현하는 구성방정식을 검증하기 위해 고습도 조건에서 목재의 휨을 측정하였다. 목재의 휨을 극대화하기 위해 목재의 한쪽 표면에 필름을 부착하였다. 필름이 부착된 면으로 는 수분이 흡수되지 않아서 시편 양면의 수분 흡수 거동이 달라지고 결과적으로 시편에서 큰 휨이 발생하였다 (Fig. 9). 휨 양은 시편 중심부가 바닥에서 떨어진 거리(d)로 정의하였다.

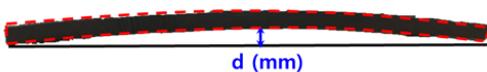


Fig. 9 Warped wood specimen and the amount of warping

시험은 11일동안 여러 습도 조건 (75%, 85%, 95%)에서 수행되었다. 24시간마다 측정한 휨 양 (d)을 Fig. 10에 나타내었다.

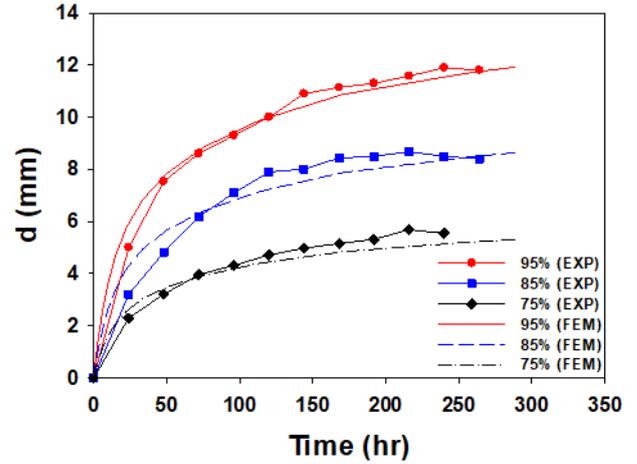


Fig. 10 Amounts of warping at various humidity conditions

휨 양은 시험 초기에 급격히 증가하다가 시간이 지나면서 증가량이 감소하였다. 또한 습도가 높을수록 많이 휘어짐을 확인 할 수 있다.

3.3 습도 조건에 따른 변형 해석 모

본 연구에서 유한요소 해석기법을 이용하여 흡습에 따른 목재의 변형을 계산하였다. 외부의 습도조건에 따라 목재 내부로 수분이 확산되는 과정은 확산방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \Delta C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \Delta C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta C}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

여기서 t 는 시간, x, y, z 는 좌표이며 $D(1.54 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s})$ 는 확산계수이다. ΔC 는 수분 농도 변화량 또는 단위부피당 수분의 질량 변화량으로 함수율 변화량으로 표현하면 식(9)와 같다.

$$\Delta C = \rho_{dry} \frac{\Delta MC(\%)}{100} \quad (9)$$

확산방정식과 함께 평형방정식을 계산하여 습도에 따른 목재의 변형 해석을 수행하였다.

휨 측정 실험에 사용되었던 한쪽 표면에 필름을 부착한 목재의 형상을 유한요소 모델로 제작하였다.

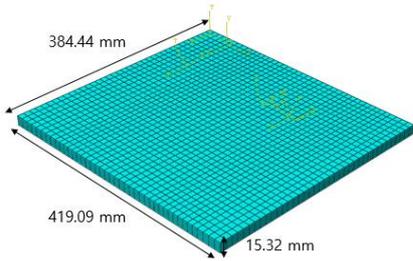


Fig. 11 Finite element model

필름이 부착되지 않은 표면과 부착된 표면의 확산 경계조건은 각각 식 (10)과 (11)과 같다.

$$j = -k(\Delta C - \Delta C^{eq}) \quad (10)$$

$$j = 0 \quad (11)$$

여기서 j 는 표면에서 내부로 흡수되는 유량, $k(= 1.3 \times 10^{-26} \text{ m/s})$ 는 표면 필름상수이다. ΔC^{eq} 는 평형상태에 도달했을 때의 농도 변화량이며 식 (9)를 이용하여 ΔMC^{eq} 로부터 구할 수 있다. ΔMC^{eq} 를 실험적으로 구하기 위해서는 상당히 오랜 시간이 걸리며, 확산계수와 표면의 필름상수는 측정하기 어렵기 때문에 유한요소 해석을 이용하여 함수율 시험결과를 맞출 수 있도록 역으로 상수값을 계산하였다 (Fig. 12).

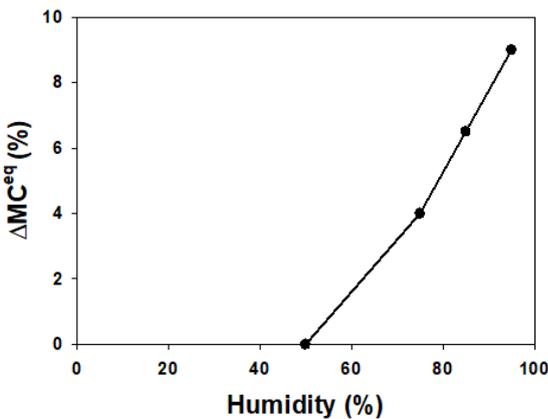


Fig. 12 Predicted equilibrium moisture content

목재의 이방성을 고려하기 위해 집성목의 나이테 방향을 고려하였다. 나이테의 방향과 유한요소 모델의 좌표계는 그림 Fig. 13 에 나타나 있다.

실험과 동일하게 세가지 습도 조건(75%, 85%, 95%)에서 확산 및 변형 해석을 수행하였다. 시험결과와 유사하게 유한요소 모델에서 휨이 발생하였다 (Fig. 14). 휨이 발생한 원인은 필름이 부착되지 않은 면으로만 수분이 유입되어 함수율의 구배가 발생하기 때문이다. 유한요소 해석 모델로 예측된 휨 양을 측정 결과는 시험결과와 잘 일치하였다 (Fig. 10). 이는 해석 모델이 수분 확산과 변형 해석을 잘 표현하고 있음을 보여준다.

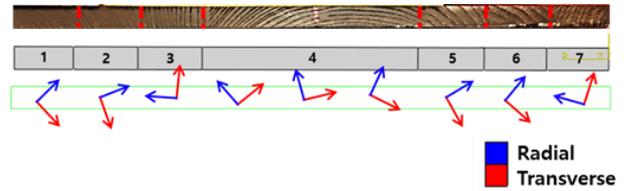


Fig. 13 Annual zones and local orientations of the wood specimen

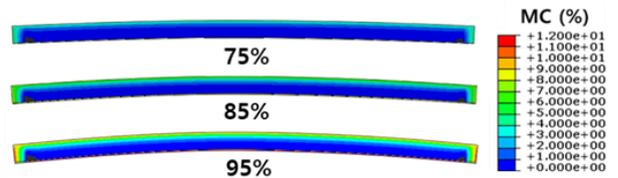


Fig. 14 Moisture content distribution of the deformed wood specimen at the humidity of 75, 85, and 95 % after 11 days

5. 결 론

이 논문에서는 습도와 온도에 따른 목재의 변형을 측정하고 이를 예측할 수 있는 유한요소 모델을 개발하였다. 습도에 따른 변형을 측정하기 위해서 아두이노를 이용한 항습 챔버를 제작하고 고습도 조건에서 목재의 팽창을 측정하였다. 항온 챔버를 이용하여 온도에 따른 변형을 측정하고 3 점 굽힘 시험을 수행하여 목재의 이방성 탄성계수를 측정하였다. 습도와 온도에 따른 팽창량은 모두 목재의 접선방향으로 가장 컸으며, 길이방향으

로 가장 작았다. 변형률이 습도와 온도에 선형적으로 비례한다는 가정으로 목재의 거동을 표현하는 수식을 제안하였다. 이를 검증하기 위해 한쪽 면으로 수분 흡수를 제한한 목재 시편을 이용하여 휘는 정도를 측정하고 유한요소 해석기법을 이용하여 확산방정식과 평형방정식의 연계 해석을 수행하여 휨 양을 예측하였다. 해석 결과는 측정 결과와 잘 일치하였으며 이는 제안된 모델이 목재의 거동을 잘 표현하고 있음을 보여준다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] S. Sevanto, T. Holttä, A. Hirsikko, T. Vesala and E. Nikinmaa, 2005, Determination of thermal expansion of green wood and the accuracy of tree stem diameter variation measurements, *Boreal Environ. Res.*, Vol. 10, pp.437~445.
- [2] J. Bjurman, C. B. Melin, 2017, Moisture gradients in wood subjected to relative humidity and temperatures simulating indoor climate variations as found in museums and historic buildings, *J. Cult. Heritage*, Vol 25, pp. 157~162.
- [3] K. Leslaw, 2016, Reinforcing wood by surface modification, *Struct*, Vol. 158, pp.64~71.
- [4] Z.W. Guan, E.C. Zhu, 2009, Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings, *Eng. Struct.*, Vol. 31, pp.394~403.
- [5] M. Oqudjene, M. Khelifa, 2009, Elasto-plastic constitutive law for wood behavior under compressive loadings, *Constr. Build. Master.*, Vol.23, No. 11, pp.3359~3366.
- [6] Interpeo, 2016, Temperature + humidity on LCD, <https://create.arduino.cc/projecthub/interpeo/temperature-humidity-on-lcd-0396b3>
- [7] RJ. Ross, 2010, Wood Handbook: Wood as an engineering material, General Technical Report