

낙엽송 소경각재의 휨 파괴계수 예측¹

이 인 환² · 조 수 민² · 홍 순 일^{ID 2,†}

Prediction of The MOR of Larch Lumber¹

In-Hwan Lee² · Soo-min Cho² · Soon-Il Hong^{ID 2,†}

요 약

국내산 낙엽송 소경각재의 휨 강도 성능을 예측하기 위하여 비파괴적인 지표의 검토가 필요하다. 본 연구에서는 낙엽송 소경각재(단면 89 × 120 mm)를 초음파법, 종진동법, 소하중법의 비파괴 방법으로 탄성계수를 측정하였다. 실측 탄성계수와 유의성이 높은 비파괴 측정 방법을 결정 후 휨 파괴계수 예측 지표로 적용하였다. 종진동법으로 측정된 탄성계수가 실측 탄성계수와 가장 높은 유의성을 나타냈다. 휨 파괴계수와 실측 탄성계수의 유의성도 매우 밀접하게 측정되었으므로 종진동법에 의한 비파괴 탄성계수로 소경각재의 휨 파괴계수를 예측하였다.

ABSTRACT

It is necessary to review the non-destructive indexes in order to estimate the bending strength performance of the domestic larch lumber. In this study, MOEs (modulus of elastic) the larch lumber (cross-section 89 × 120 mm) were evaluated through non-destructive methods such as the ultra-sonic method, longitudinal vibration method, and non-destructive bending method. The non-destructive measurement method which best represented the static MOE was determined and applied as the MOR(modulus of rupture) estimation index. The MOE that was measured through the longitudinal vibration method showed the highest correlation with the static MOE. The MOR was highly related to the static MOE. Therefore, the non-destruction MOE measured through the longitudinal vibration method was used to estimate the MOR of the lumber.

Keywords : bending strength, larch lumber, longitudinal vibration, non-destructive, ultra-sonic

¹ Date Received December 13, 2017, Date Accepted January 8, 2018

² 강원대학교 산림환경과학대학 산림응용공학부 산림바이오소재공학전공. Program of Forest Biomaterials Engineering, Division of Forest Material Science & Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 홍순일(e-mail: hongsi@kangwon.ac.kr, ORCID: 0000-0002-9627-2208)

1. 서 론

집성재 CLT 등의 구조용 공학목재산업이 발달하면서 두께 5 cm 이하 판재의 선호도가 높아졌다. 대한민국 일반 재제업에서는 낙엽송이 전체수종의 73%를 차지하여 중, 소경재가 공급량의 대부분을 차지하고 있다. 하지만 소경재는 판재 생산 수율이 낮아 제재, 건조, 취급 및 관리비용이 높은 원주목이나 소경각재로 생산된다(Survey on actual use of timber, 2016). 소경각재는 층재와 달리 하나의 원목으로부터 단 하나의 각재만이 생산되며 수(Pith)가 중앙부에 포함되어 있는 형태의 부재를 얻게 된다. 이러한 소경각재들은 수와 그 주변의 미성숙재를 포함하고 있기 때문에 성숙재에 비하여 그 강도 특성이 떨어지는 경향을 나타낸다(Kim *et al.*, 2014). 소경각재의 구조용재로서의 신뢰성을 향상시키고 고부가 가치화를 위해서는 비파괴적인 소경각재 선별의 지표가 검토되어야 한다. 초음파를 이용한 비파괴 탄성계수 측정법은 목재내부의 부후상태 및 용이의 유무가 예측 가능(Kodama *et al.*, 1993; 1994)하여 다양한 외부인자(온·습도, 단면적, 섬유경사각, 주파수 등)에 따른 추가 연구가 폭넓게 진행되었다(Sakai *et al.*, 1990; Sandoz, 1993; Mishiro, 1995; Jang, 2000; Beall, 2002; Kang *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2003). 일반적으로 초음파 측정시 송·수신단자의 위치는 횡·횡 단면에 위치하거나 동일선상에 위치하여 측정을 실시한다. 따라서 동일한 단면적 목재의 단자위치에 따른 초음파 비파괴 탄성계수 예측에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 소경각재의 비파괴 방법에 의한 탄성계수를 초음파법, 종진동법, 소하중법을 이용하여 측정하였으며, 후 파괴 시험에 의해 구해진 실측 탄성계수와 유의성을 비교 분석하였다. 일반적으로 목재의 휨 탄성계수와 휨 파괴계수는 양의 상관관계가 존재한다(Cavalli *et al.*, 2016). 따라서 실측 탄성계수와 비파괴 탄성계수간 유의성이 양호한 비파괴 탄성계수 측정방법으로 휨 파괴계수 예측 가능성을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

평균 기건 함수율 16%, 평균 기건 비중 0.52의 국내산 낙엽송(*Larix kaempferi* Carr.) 소경각재(89 (T) × 120 (W) × 3600 (L) mm)를 사용하였다.

2.2. 낙엽송 소경각재의 비파괴 탄성계수 측정

2.2.1 초음파를 이용한 비파괴 탄성계수 측정 (MOE_V)

초음파시험기 Pundit Plus(CNS Farnell사: 영국)로 주파수 54 kHz의 Transducer를 사용하여 실험하였다. 초음파로 비파괴 탄성계수를 산출하는 방법은 송신단자와 수신단자의 위치에 따라 결과 값의 편차가 존재하므로 적절한 초음파 단자의 위치 선정이 필요하다. 송신단자에서 발생한 초음파가 수신단자로 도달하는 시간을 측정한 후 식 1을 이용하여 탄성계수를 측정하였다(Fig. 1). 초음파 시험기의 송신단자와 수신단자의 위치를 Fig. 1과 같이 측정 후 초음파 방법으로 탄성계수를 산출하였다. 각재의 단면과 송·수신단자 위치에 따른 유형은 8가지이지만 각재의 상·하 및 좌·우 단면에 따른 차이를 알아보기 위하여 총 10가지 방법을 실시하였다. 송·수신단자가 소경각재 횡단면에 위치하는 직접적방법: 1유형(Fig. 1 - I), Flatwise-Flatwise (Fig. 1 - II, VI, VIII), Edgewise-Edgewise (Fig. 1 - IV, V, IX), Flatwise-Edgewise (Fig. 1 - X)에 위치하는 간접적방법: 7유형, Cross section-Flatwise (Fig. 1 - VI), Cross section-Edgewise (Fig. 1 - VII)에 위치하는 반직접적방법 2유형으로 구분하여 측정하였다. 초음파법은 각 측정방법당 21개의 소경각재 시험편의 비파괴 탄성계수를 측정하여 타 측정방법과의 유의성을 비교 검토하였다. 이후 유의성이 양호한 초음파 측정방법으로 107개의 시험편의 비파괴 탄성계수를 측정하였다.

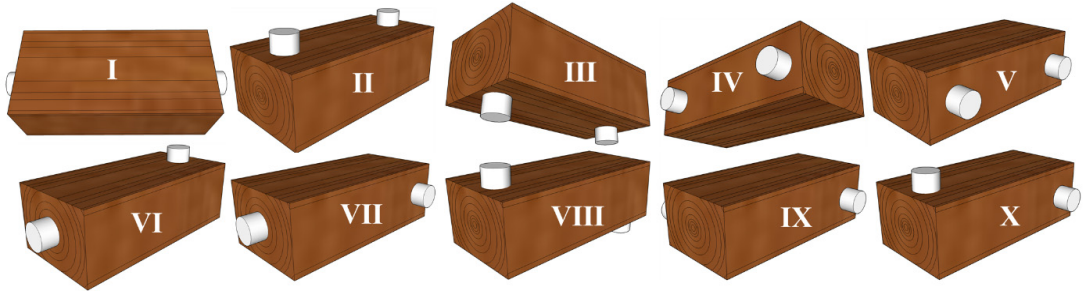


Fig. 1. Schematic diagram of ultra-sonic test method.

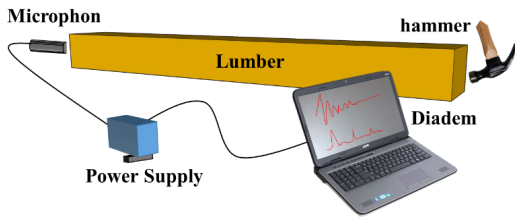


Fig. 2. Measuring natural frequencies of longitudinal vibration in specimens.

$$MOE_U = (C^2 \rho)(GPa) \dots\dots\dots (1)$$

MOE_U : 초음파법에 의한 소경각재의 비파괴 탄성계수

C : 초음파 통과속도(mm/sec)
 ρ : 밀도

2.2.2. 종진동법을 이용한 비파괴 탄성계수 측정 (MOE_L)

종진동법은 각재의 횡단면에 마이크로폰(1/2" Prepolarized Free Field Microphone Type 40AE)을 설치하고 다른 횡단면에 타격을 주어 산출된 고유진동수로 탄성계수를 산출하는 방법이다(Fig. 2). 탄성계수는 식 2로 산출하였다.

$$MOE_L = (2fL)^2 \cdot \rho(GPa) \dots\dots\dots (2)$$

MOE_L : 고유진동수에 의한 소경각재의 탄성계수
 f : 종진동의 고유진동수(H_z)
 L : 길이(mm)
 ρ : 밀도(g/cm^3)

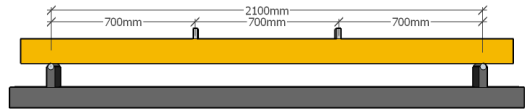


Fig. 3. Shape of bending strength test.

2.2.3. 소하중법을 이용한 비파괴 탄성계수 측정 (MOE_N) 및 휨 강도시험(Static MOE & MOR)

소하중법과 휨 강도시험은 전단응력을 최소화하기 위하여 경간 2100 mm 하중점간 간격 700 mm의 3등분 4점하중으로 시험을 실시하였다. 소하중법은 3 kN까지 분당 5 mm로 하중을 가하였다. 소하중법의 비파괴 탄성계수는 식 3으로 산출하였다. 휨 강도 하중은 분당 15 mm의 속도로 가하였으며 휨 파괴 시험편 53개로 시험을 실시하였다. 실측 휨 탄성계수와(Static MOE) 휨 파괴계수(MOR)는 다음 식 4와 5로 산출하였다. 산출된 결과를 토대로 실측 탄성계수와 비파괴 탄성계수의 3가지 방법 총 4가지 방법을 휨 파괴계수와 직선회기식으로 유의성을 검토하였다.

$$MOE_N = \frac{PL^3}{48I\delta}(GPa) \dots\dots\dots (3)$$

$$MOR = \frac{3P_{max}(l-s)}{2bh^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$Static\ MOE = \frac{\Delta Pa(3L^2 - 4a^2)}{48I\Delta V} \dots\dots\dots (5)$$

MOE_N : 소하중법에 의한 탄성계수, P: 하중 = 3 kN, δ : 각재의 변형
 P_{max} : 최대하중(N), ΔP : 비례 한도 하중(N), ΔV :

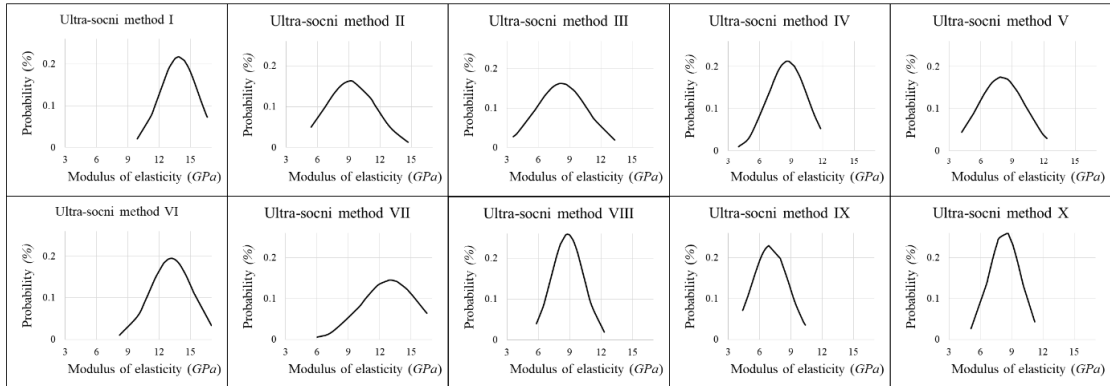


Fig. 4. Normal distribution graph of non-destructive ultrasonic measurement method.

비례 한도 변형(mm), L : 경간(mm)

S : 하중 간 거리(mm), b : 시험편의 폭(mm), h : 시험편의 두께(mm)

a : 시험편 지점과 하중 지점 간 거리(mm), I : 단면 2차 모멘트(mm^3)

3. 결과 및 고찰

3.1. 비파괴 측정 방법에 따른 탄성계수

3.1.1. 초음파 측정방법에 의한 탄성계수

Fig. 4는 낙엽송 소경각재 21개의 초음파 측정방법(I ~ X)에 따른 비파괴 탄성계수의 정규분포곡선이다. 정규분포곡선은 표준편차 크기에 따라 분포가 다르다. 모든 정규분포 측정방법 III의 변동계수는 29.8로 정규분포 곡선이 가장 넓게 흩어졌으며, 측정방법 I의 변동계수는 13.2로 정규분포 곡선이 평균을 중심으로 밀집되어있다. 정규분포 곡선을 살펴보면 직접적 I 측정방법 및 반직접적 VII 측정방법의 비파괴 탄성계수가 평균 약 3~4 GPa 높게 측정되었다. 이는 소경각재의 할렬이 I 측정방법과 평행한 섬유방향으로 존재한 것에 기인한다. 초음파는 방향성을 가지고 있어 송·수신단자의 직선상으로 파장이 진행한다고 보고된다. 초음파의 진행 방향에 수직 파단이 존재할 경우 다른 경로로 회절되며 전달되기 때문에 전달시간이 증가하지만, 초음파 진행방향에

수평파단이 존재하면 결점에 영향을 거의 받지 않고 일정한속도로 초음파가 전달되는 경향이 있다(Park and Hong, 2008).

Table 1은 초음파 측정방법별 탄성계수 평균 값 및 초음파 측정방법의 탄성계수와 타 측정방법의 탄성계수를 직선회기식으로 산출한 결정계수이다. 초음파법과 종진동법의 결정계수는 송·수신단자를 횡단면에 위치한 직접적 측정방법이 0.92로 가장 양호한 유의성이 검토되었다. 초음파법과 소하중법의 결정계수는 직접적 I 측정방법과 간접적 III 측정방법 그리고 반직접적 VII 측정방법의 유의성이 양호하였다. 따라서 유의성이 양호한 직접적 측정방법 I 이 낙엽송 소경각재의 비파괴 탄성계수 산출 방법으로 적절한 것으로 사료된다. 이후 소경각재 107에 시험편의 초음파법 탄성계수는 I 측정방법을 사용하여 낙엽송 소경각재의 비파괴 탄성계수를 측정하였다. 소경각재의 동일 선상에 단자를 위치한 상·하 및 좌·우면에 따른 평균 휨 탄성계수는 8~11%의 편차가 존재하였으나, 변동계수가 21.6~29.8%인 것을 감안하면 큰 차이가 없는 것으로 사료된다. 각 면의 할렬 및 응이 등의 결점에 기인하여 편차가 크게 나타난 것으로 판단된다.

3.1.2. 비파괴 탄성계수 측정방법간 상관관계

비파괴 탄성계수 측정방법에 따라 산출된 탄성계수의 상관관계를 분석하였다(Fig. 5). 종진동법과 소

Table 1. Results of session analysis according to ultra-sonic measurement method

Ultra-sonic test methods	MOE _u mean. (GPa)	COV (%)	MOE _u -MOE _L COD	MOE _u -MOE _N COD
I	13.9	13.2	0.92	0.65
II	9.2	26.7	0.68	0.48
III	8.2	29.8	0.77	0.65
IV	8.7	21.6	0.6	0.62
V	8	28.5	0.66	0.39
VI	13.2	15.6	0.64	0.36
VII	13	21.1	0.77	0.71
VIII	8.8	17.5	0.32	0.18
IX	7.1	24.5	0.43	0.34
X	8.3	18.1	0.59	0.43

*COV: coefficient of variation, *COD: coefficient of determination

*MOE_L: MOE measured by longitudinal vibration method

*MOE_u: MOE measured by ultra-sonic method, MOE_N: MOE measured by non-destructive bending method

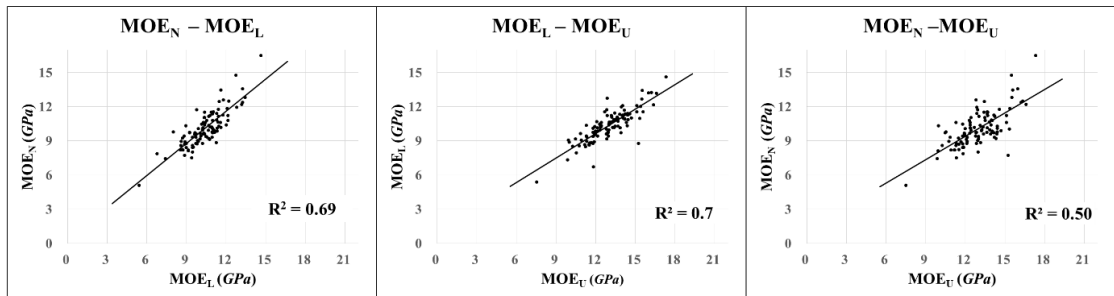


Fig. 5. Regression analysis graph of non-destructive MOE measurement method.

하중법은 0.69, 종진동법과 초음파법은 0.7, 소하중법과 초음파법은 0.5로 종진동법이 타 측정방법과 유의성이 높았으며 종진동법과 소하중법의 유의성이 양호하였다.

소하중법과 실측 탄성계수의 결정계수는 0.63이었다. 실측 탄성계수와 종진동법으로 측정된 탄성계수가 가장 양호한 유의성을 나타냈다.

3.2. 휨 파괴계수와 탄성계수의 유의성

3.2.1. 실측 탄성계수와 비파괴 탄성계수의 상관관계

Fig. 6는 비파괴 측정방법의 탄성계수와 실측 탄성계수를 회기분석한 결과다. 초음파법과 실측 탄성계수의 결정계수는 0.47으로 낮은 유의성을 보였으며,

3.2.2. 탄성계수 및 비파괴 탄성계수와 휨 파괴계수와 상관관계

낙엽송 소경각재를 휨 강도 시험을 한 결과 휨 파괴계수는 40 MPa~78 MPa, 실측 탄성계수는 5.6 GPa~13.5 GPa로 분포하였다.

산출결과 4가지 휨 탄성계수 모두 휨 파괴계수와 양의 상관관계를 보였다. 실측 탄성계수와 휨 파괴계수의 결정계수는 0.46으로 측정되었다. 종진동법

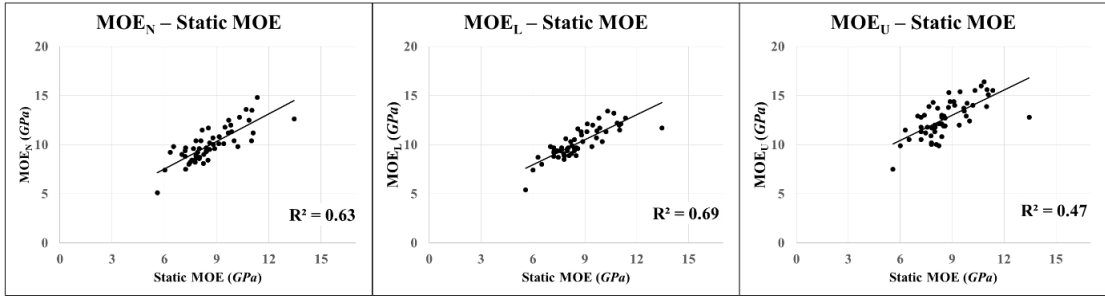


Fig. 6. Regression analysis graph between static MOE and non-destructive MOE.

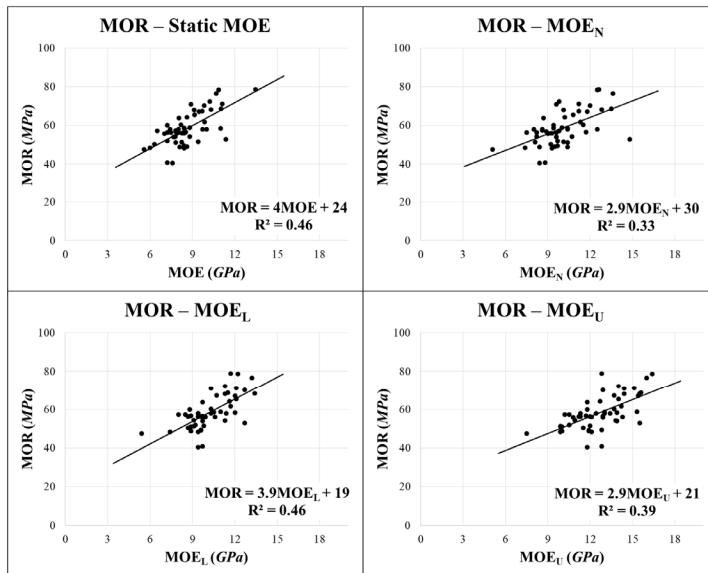


Fig. 7. Seismic analysis graph of static and non-destructive MOE and MOR.

으로 산출한 비파괴 탄성계수와 휨 파괴계수의 결정 계수도 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서 적용한 MOR-MOE_s 및 MOR-MOE_L의 직선회기 방법으로 산출된 실험식은 다음과 같다(식 6, 7).

$$\text{MOR} = 4\text{MOE}_s + 24 \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{MOR} = 3.9\text{MOE}_L + 19 \dots\dots\dots (7)$$

낙엽송 소경각재(89 × 120)의 휨 강도 성능을 예측하기 위한 비파괴적인 지표로서 비파괴 종진동 측정방법으로 측정된 탄성계수의 적용이 가능함을 확

인하였다.

4. 결 론

낙엽송 소경각재(89 × 120)의 휨 강도 예측을 위한 비파괴 측정 방법의 지표를 검토하기 위해 비파괴 탄성계수와 실측 탄성계수 및 휨 파괴계수와의 관계를 비교 분석하였다.

초음파로 측정된 비파괴 탄성계수는 송·수신 단자를 횡단면에 위치하는 직접적 측정방법이 타 측정방법과 유의성이 양호하였다. 비파괴 탄성계수 측정

결과 3가지 방법 모두 실측 탄성계수와 양의 상관관계가 존재하였으며, 종진동법의 결정계수가 가장 양호한 유의성을 보였다.

실측 휨 탄성계수와 휨 파괴계수의 결정계수와 휨 파괴계수와 비파괴 탄성계수 측정 방법 중 종진동법의 결정계수가 거의 유사하게 산출되었다. 비파괴 측정방법인 종진동법으로 소경각재의 탄성계수를 적용하여 소경각재의 휨 파괴계수 예측 가능할 것으로 사료된다. 낙엽송 소경각재의 기계적 비파괴 탄성계수 측정방법인 종진동법은 소경각재 휨 강도 예측에 유효한 지표로 활용이 가능할 것을 확인하였다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-016R1D1A1B0101116).

REFERENCES

- Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology* 36(3): 197-212.
- Cavalli, A., Bevilacqua, L., Capecchi, G., Cibecchini, D., Fioravanti, M., Goli, G., Togni, M., Uzielli, L. 2016. MOE and MOR assessment of in service and dismantled old structural timber. *Engineering Structures* 125: 294-299.
- Jang, S.S. 2000. Effects of moisture content and slope of grain on ultrasonic transmission speed of wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 28(2): 10-18.
- Kang, H., Booker, R.E., 2002. Variation of stress wave velocity with MC and temperature. *Wood Science and Technology* 36(1): 41-54.
- Kim, D.W., Hwang, S.W., Lee, W.H. 2014. A Study on The Mechanical Properties of Korean Red Pine (Geumgangsong, *Pinus densiflora* forma *erecta* Uyeki). *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 42(1): 58-67.
- Kodama, Y., Akishika, T. 1993. Non-destructive inspection of defects in woods by use of the pulse-echo technique of ultrasonic waves, 1: Measurements of enclosed knots. *Journal of the Japan Wood Research Society* (Japan).
- Kodama, Y., Akishika, T., Nakao, T., Takahashi, A. 1994. Non-destructive inspection of knots in wood by use of the frequency shift of propagated acoustic waves. *Journal of the Japan Wood Research Society* (Japan).
- Korea forest service, 2016. Survey on actual use of timber.
- Mishiro, A. 1995. Ultrasonic velocity in wood and its moisture content, 1: Effects of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood. *Journal of the Japan Wood Research Society* (Japan).
- Lee, J.J., Kim, G.M., Bae, M.S. 2003. Investigation of transmission process for ultrasonic wave in wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 31(2): 31-37.
- Park, J.C., Hong, S.I. 2008. Determination of localized defects in wood by the transfer time of ultrasonic waves. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 36(1): 61-68.
- Sakai, H., Minamisawa, A., Takagi, K. 1990. Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics* 28(6): 382-385.
- Sandoz, J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology* 27(5): 373-380.