

비파괴 시험방법을 이용한 낙엽송재 원목의 휨강도 특성 평가¹

박준철² · 홍순일²

Bending strength assessment of Larix logs by nondestructive evaluation techniques¹

Jun Chul Park² and Soon Il Hong²

요 약

목재의 기계적 특성을 평가하기 위하여 여러 가지 비파괴 측정 기술이 도입되고 있다. 본 실험은 낙엽송(*Larix kaempferi* Carr.) 소경재 원목을 초음파의 통과 속도와 종진동의 고유진동수를 이용한 비파괴 측정 기술로 영계수를 측정하여 휨강도 실험을 통해 얻은 실측 영계수와 휨파괴계수의 상관관계를 검토하였다.

실험에는 50본의 소경재 원목이 사용되었다. 종진동의 고유진동수를 이용한 영계수와 실측 영계수는 비교적 높은 상관관계를 나타내었다. 초음파를 이용한 비파괴 영계수 측정은 응력의 출현빈도가 높은 원목의 선별에 효과적이었으며 종진동의 고유진동수를 이용한 측정은 할렬의 출현빈도가 높은 원목의 선별에 효과적임을 확인하였다.

ABSTRACT

In forest products industry, a variety of nondestructive evaluation techniques are now being used to assess the mechanical properties of structural lumber. Ultrasonic and longitudinal vibration technique are frequently used to assess the modulus of elasticity(MOE) of lumber. The objective of this research was to evaluate the MOE and modulus of rupture(MOR) of small-diameter of Larix log(*Larix kaempferi* Carr.), using these techniques. In this study, 50 small-diameter logs were nondestructively evaluated. The dynamic modulus of elasticity(Eu) of the logs was first evaluated, using an ultrasonic method. After ultrasonic tests, the logs were measured using a longitudinal vibration technique(Ev). Static bending test was then performed on the logs to obtain the static modulus of elasticity(Es) and modulus of rupture of these logs. In general, the dynamic MOE (Ev) of logs was closely correlated with the static MOE for log. Based on the results of these experiments, it can be concluded that

1. 접수 2003년 6월 24일 Received on June 24th, 2003.

2. 강원대학교 산림과학대학 임산공학과 Dept. of Wood Science & Technology,

College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

※본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 일부임.

small-diameter Larix logs can be successfully evaluated by Ultrasonic and longitudinal vibration technique. The experimental results indicated that the ultrasonic technique is effective to the log, which contains many knots. The longitudinal vibration technique is effective to the log, in which many cracks are included.

Keywords : small diameter logs, nondestructive evaluation, ultrasonic, longitudinal vibration

서 론

국내 산림자원은 3영급 이하의 어린 나무가 약 90%로 성숙 임목이 많지 않고 제대로 관리되지 않아 국내재의 질적인 목재 수급 부진이 계속되고 있다. 목재 생산도 주벌 비율은 25% 전후에 불과하고 생산원목의 대부분이 말구직경 20cm이하의 소경재로 구성되고 있다. 또한, 벌채된 국내재 원목은 60%이상 철도, 보드류, 갱목용등 저가 용도에 국한되고 있다. 이런 중, 소경재는 근래 간벌작업등으로 많은 양이 생산되고 있으나 활용도가 낮아 간벌 작업 후 방치되거나 저급용도로 사용되고 있는 실정이다. 또한, 수입재에 비해 생산, 유통 과정이 불리하여 채산성이 맞지 않는 상황이다. 소경재의 이용방안이 많이 연구되어 근래에는 원주가공을 통한 통나무집, 놀이시설로 이용되고 있으며, 원목을 이용한 목교도 제작되고 있지만⁵⁾, 원목자체의 강도시험이나 내구성 평가는 많이 이루어지지 않고 있다.

원목의 강도 예측 및 결점평가를 위한 비파괴 방법은 박 등(1996)^{3,4)}이 응력파 시험을 통하여 목재내의 부후와 활렬이 응력파의 속도에 영향을 준다고 했으며 웅이가 많은 재는 속도의 증가로 고려해야할 사항이라고 했다. Wang 등(2002)²⁾은 응력파와 진동수, 휨강도시험을 통하여 비파괴 방법을 통한 영계수와 실측 영계수간에 높은 상관관계를 갖는다고 하였으며 Ross 등(1997)¹⁾은 원목상태의 응력파 시험을 통한 영계수와 제재된 후의 영계수를 비교하여 평균적인 영계수는 상관관계를 갖으나 각각의 제재목간에는 상관관계가 없어진다

고 보고했다.

본 연구에서는 비파괴 방법에 의해 측정된 영계수와 휨강도 시험을 통한 실측 영계수의 상관 관계를 통해 원목의 선별 및 낙엽송 소경재 원목의 휨강도 예측의 타당성을 검토하였다.

재료 및 방법

2.1 공시 재료

본 실험에서는 함수율 10~12%로 자연 건조된 낙엽송(*Larix kaempferi* Carr.) 원목을 사용하였다.

낙엽송 원목은 길이 270~285cm, 말구 직경 12~15cm의 박피되지 않은 소경재로 여주 임산물 유통센터에서 구입하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 초음파를 이용한 영계수 측정(Eu)

실험에 사용된 시험기는 Pundit Plus(CNS Farnell사 : 영국)로 주파수 54kHz의 Transducer를 사용하여 실험하였다. 초음파 시험기의 Tx(Transducer), Rx(Receiver) 두 단자를 시편의 양끝에 위치시켜 초음파의 통과 시간을 측정 후 아래 식을 이용하여 영계수를 측정하였다.

$$Eu = C^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{g} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

Eu : 초음파를 이용한 영계수 (kgf/cm²)

C : 초음파의 통과속도(cm/sec)

ρ: 밀도 (kgf/cm³)

g : 중력가속도 (cm/sec²)

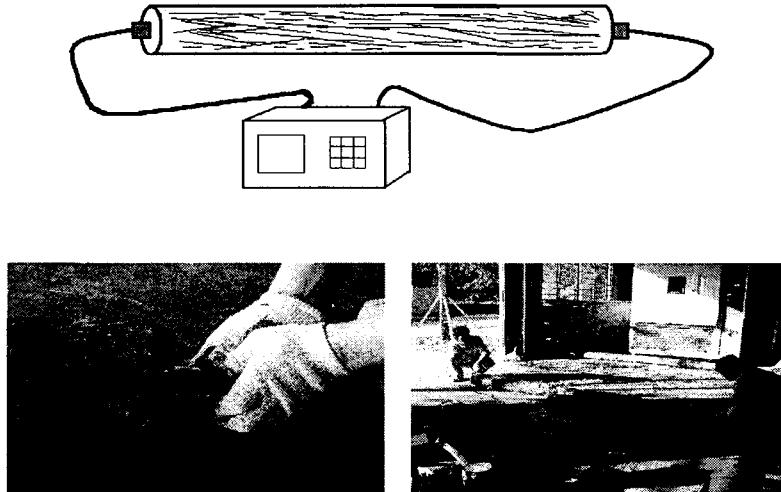


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic test equipment.

2.2.2 종진동의 고유진동을 이용한 영계수 측정(Ev)

시편의 한쪽 끝에 마이크로폰(1/2" Prepolarized Free Field Microphone Type 40AE)을 설치하고 반대편 끝에서 타격을 주어 마이크로

폰으로 종진동의 고유진동을 측정하였다. 측정된 고유진동수는 다음 식을 이용하여 영계수를 측정하였으며 본 실험에서는 1차 고유진동수를 사용하였다.

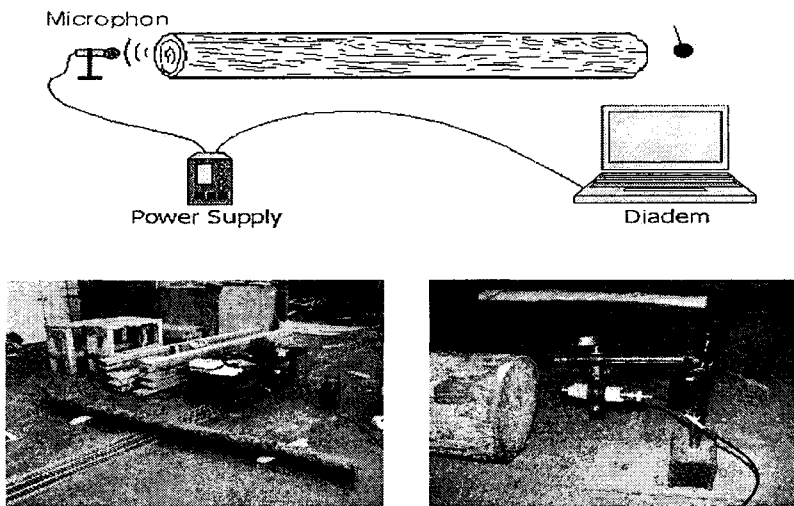


Fig. 2. Measuring natural frequencies of longitudinal vibrations in specimens.

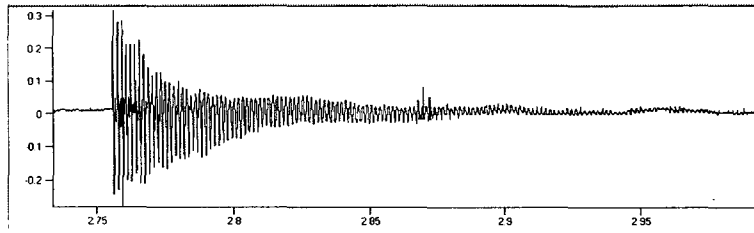


Fig. 3. Configurations of longitudinal vibrations.

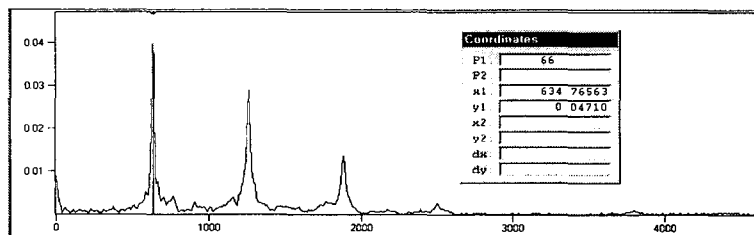


Fig. 4. Natural frequencies of longitudinal vibrations.

$$E_v = \left(\frac{2 f_n \cdot L}{n} \right)^2 \times \frac{\rho}{g} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

E_v : 종진동의 고유진동에 의해 산출된 영계수 (kgf/cm^2)

ρ : 밀도 (kgf/cm^3)

f_n : 종진동의 n차 고유진동수 (Hz)

g : 중력가속도 (980cm/s^2)

L : 재의 길이 (cm)

2.2.3 휨강도 시험

낙엽송 원목의 휨강도 시험은 지점길이 250cm, 하중간 거리 40cm로 4점 하중을 분당 10mm속도로 측정하였다. 하중 및 변형의 측정은 Data Logger(TDS-303)를 이용하여 측정하였다.

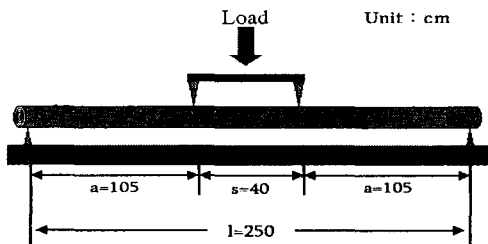


Fig. 5. Static bending test on log.

$$MOE_s = \frac{4\Delta P \cdot a(3l^2 - 4a^2)}{3\Delta y\pi D^4} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$MOR = \frac{8P(l-s)}{\pi D^3} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

ΔP : 비례영역에서의 상한하중과 하한하중차 (kgf)

Δy : ΔP 에 대응하는 스펠 중앙변형 (cm)

a : 지점과 하중점간 거리 (cm)

s : 하중점간 거리

l : 지점간 거리 (cm)

D : 원목의 직경 (cm)

P : 최대하중 (kgf)

결과 및 고찰

3.1. 측정방법에 따른 낙엽송 원목의 영계수 비교

그림 6은 초음파를 이용한 영계수(Eu)와 휨강도 실험을 통해 얻어진 실측 영계수(Es)를 비교한 것이다. 상관계수는 0.02로 매우 낮은 상관관계를 보였으며 초음파를 이용해 계산된 영계수값은 10만에서 14만의 값과 6만이하의 값으로 변동이 컸다. 초음파 측정법에 의해 구분된 원목은 6만이하의 영계수를 나타낸 원목들은 용이의 출현빈도가 높고 할렬이 심하게 나타나 용이나 할렬등의 결점과 초음파의 전달 속도와의 관계가 기인되는 것으로 추측되며 10만이상의 값의 원목들은 결점이 비교적 적은 원목들임을 확인할 수 있었다.

그림 7은 종진동의 고유진동수를 이용한 영

계수와 휨강도 실험을 통해 얻은 실측 영계수를 비교한 것으로 상관계수 0.33으로 초음파보다 높은 상관관계를 나타내었다. 종진동의 고유진동수의 경우 8만에서 14만정도의 값을 나타내었으며 실측 영계수의 경우는 5만에서 15만의 값을 나타냈다.

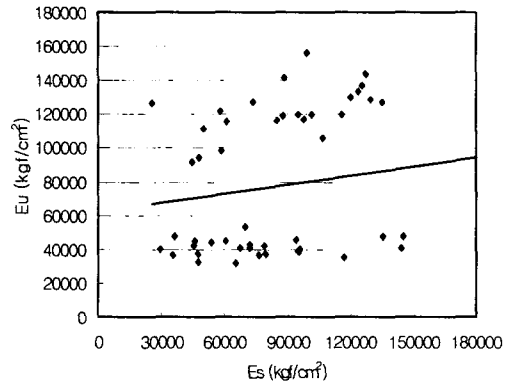


Fig. 6. Relationship between Eu and Es.

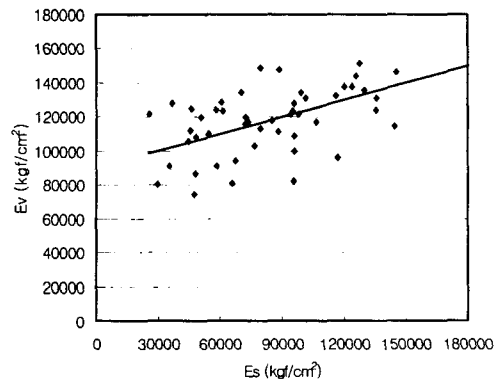


Fig. 7. Relationship between Ev and Es.

Table 1. Results of linear regression analyses of MOE of Larix logs.

y=a+bx				
y	x	a	b	R ²
Eu	Es	61,993	0.1813	0.02
Ev	Es	89,848	0.3352	0.34362

3.2. 영계수와 파괴계수와의 관계

원목의 휨파괴계수는 300 ~ 800kgf/cm²이 있으며 영계수가 증가하면 파괴계수도 증가하는 경향을 보였다. 실측 영계수와 파괴계수를 비교한 그림 3을 보면 상관계수 0.55로 비교적 높은 상관관계를 보이고 있으며, 종진동의 고유진동수를 이용한 영계수와 파괴계수는 0.54로 실측영계수와 비슷한 상관관계를 보이고 있다. 반면, 초음파를 이용한 영계수의 경우 0.16으로 낮은 관계를 보였다. 낙엽송 소경재 원목의 비파괴 측정법에 의한 휨강도 특성 평가 방법은 종진동의 고유진동수를 이용하는 것이 효과적임을 보여주고 있다.

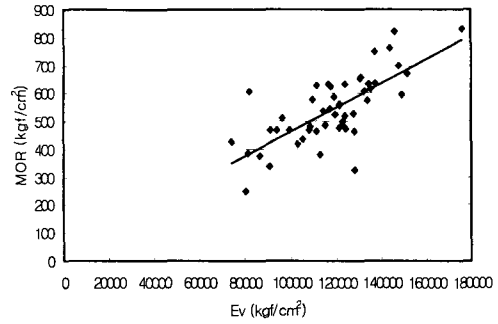


Fig. 9. Relationship between MOR and Ev.

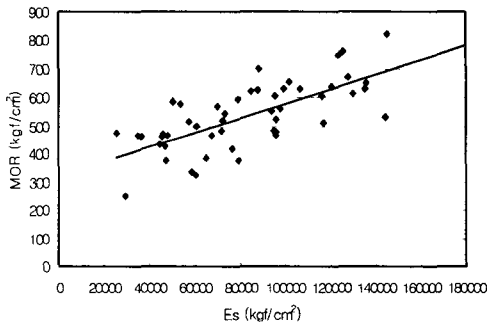


Fig. 8. Relationship between MOR and Es.

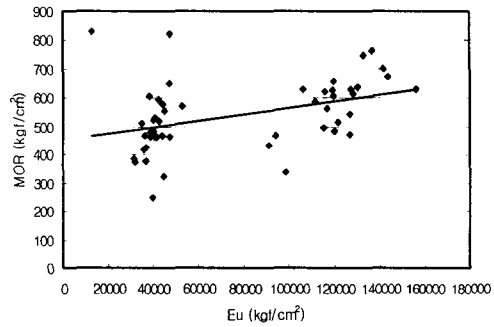


Fig. 10. Relationship between MOR and Eu.

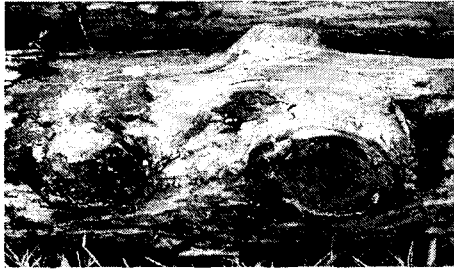
Table 2. Results of linear regression analyses of MOR and MOE of Larix logs.

		y=a+bx		
y	x	a	b	R ²
MOR	Es	322.54	0.0026	0.55
MOR	Ev	26.165	0.0043	0.54
MOR	Eu	451.38	0.0011	0.16

3.3 재의 결점에 따른 원목의 파괴형상

원목의 결점 출현 상태에 따라 3가지 형태로 구분이 가능하였다. Type I은 용이의 출현빈도가 높은 재료 휨강도 시험을 통한 실측 영계수와 종진동의 고유진동수를 이용한 영계수는 큰 차이를 보이지 않았지만 초음파 시험기를 이용한 경우 45,000kgf/cm²로 낮게 나타났다. 이는 용이의 영향으로 초음파의 변동이 심한 것으로 기인된다.

또한, 파괴계수는 554kgf/cm²로 비교적 양호한 재와 차이를 보이지 않았다. 이는 용이가 하중을 받는 중앙에 존재하지 않아 파단에 영향을 미치지 않았기 때문이다. 반면, 용이의 출현빈도는 낮으나 중앙부위에 용이가 있을 경우 결점으로 작용하는 용이부위부터 파단이 일어났다. 파괴계수는 510kgf/cm²로 제재목에 비하여 큰 강도저하의 원인은 되지 않는 것을 확인하였다.



$$\begin{aligned} E_u &= 45,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_v &= 121,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_s &= 94,000 \text{kgf/cm}^2 \\ \text{MOR} &= 554 \text{kgf/cm}^2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} E_u &= 115,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_v &= 117,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_s &= 85,000 \text{kgf/cm}^2 \\ \text{MOR} &= 510 \text{kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

Type I

Fig. 11. Photograph of rupture.

Type II는 원목에 할렬이 있는 경우이다. 실측 영계수와 초음파를 이용한 영계수가 $46,000 \text{kgf/cm}^2$ 과 $44,000 \text{kgf/cm}^2$ 으로 비슷한 값을 나타냈지만 종진동의 고유진동수를 이용한 경우 $124,000$ 으로 실측 영계수와 차이를 보였

다. 이는 할렬의 경우 초음파를 이용한 경우 더욱 정확한 측정이 가능하였다. 특히, 할렬의 직접적인 영향으로 파괴계수가 469kgf/cm^2 로 낮은 값을 나타내었다. 원목 파단에 있어 용이보다도 할렬이 강도에 더 큰 영향을 미치는



$$\begin{aligned} E_u &= 44,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_v &= 124,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_s &= 46,000 \text{kgf/cm}^2 \\ \text{MOR} &= 469 \text{kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

Type II



$$\begin{aligned} E_u &= 116,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_v &= 121,000 \text{kgf/cm}^2 \\ E_s &= 97,000 \text{kgf/cm}^2 \\ \text{MOR} &= 561 \text{kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

Type III

Fig. 12. Photograph of rupture.

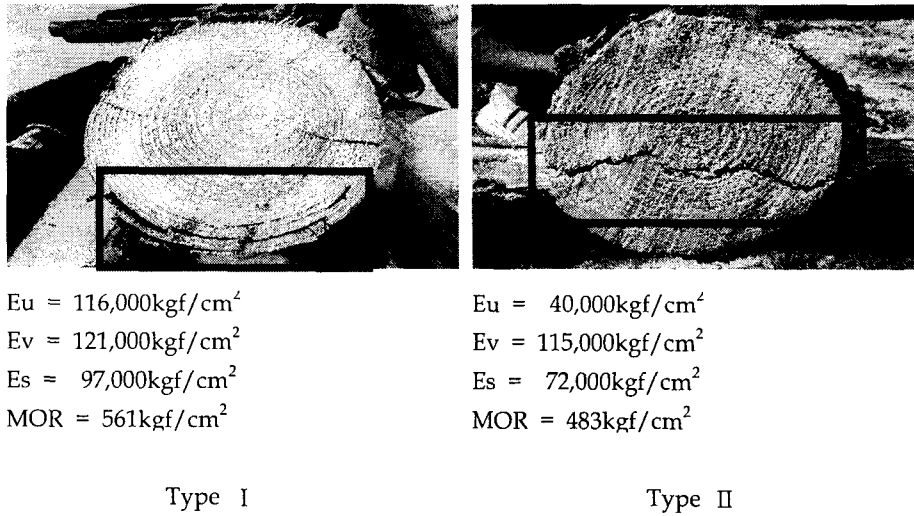


Fig. 13. Photograph of cross section rupture.

것을 알 수 있었다. Type III은 비교적 양호한 재로 각각의 영계수가 모두 비슷한 값을 나타냈으며 파괴계수 역시 561kgf/cm^2 로 높은 값을 보였다.

3.4 파단 단면의 형상

파단이 일어난 중앙부위를 잘라 단면을 확인하여 보았다. Type I과 같이 파괴계수가 561kgf/cm^2 인 비교적 양호한 재의 파단 형상을 보면 인장응력을 받는 하단부 위부터 연륜을 따라서 점진적인 파단이 일어났다. 반면, Type II와 같이 원목에 할렬이 있는 경우 할렬의 원인으로 수심부위까지 순간적인 파단이 일어났다. 또한, 파괴계수도 483kgf/cm^2 로 낮은 값을 나타냈다.

결론

휨강도 시험을 통한 실측 영계수와 파괴계수는 비교적 높은 상관관계를 보였다. 그러므로 비파괴 측정방법을 통한 영계수와 휨강도 시험을 통한 실측 영계수의 상관관계가 높을

수록 파괴계수 추정에 높은 신뢰성을 부여할 수 있음을 확인하였다. 소경재 원목의 휨강도 특성 평가에는 종진동의 고유진동수를 이용한 측정방법이 초음파를 이용한 측정방법보다 유효하였다.

비파괴 방법을 통한 원목의 선별 방법으로 용이의 출현 빈도가 높은 원목의 경우 종진동의 고유진동수를 이용한 측정방법이 유효한 것으로 나타났지만, 할렬이 많은 원목의 경우는 종진동의 고유진동수보다도 초음파를 이용한 측정방법이 더 정확한 측정이 가능하였다. 특히, 원목의 경우 파괴계수는 용이보다도 할렬에 따른 강도의 저감이 커서 할렬이 강도에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Ross, R.J., K.A. Mcdonald, D.W. Green, K.C. Schad. 1997. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. Forest Prod. J. 47(2):89-92.
2. Wang X., R.J. Ross, J.A. Mattson, J.R.

- Erickson, J.W. Forsman, E.A. Geske, M.A. Wehr. 2002. Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs. Forest Prod. J. 52(2):79-85.
3. 박훈, 강은창, 전성진, 윤경섭. 1995. 비파괴 시험방법을 이용한 원목 내부결합 예측 및 분류의 계량화에 대한 연구(I) -원목의 횡단방향을 중심으로-. 목재공학 23(2):47-54.
 4. 박훈, 윤경섭. 1998. 비파괴 시험방법을 이용한 원목 내부결합 예측 및 분류의 계량화에 대한 연구(II) -원목의 종단방향을 중심으로-. 건국자연과학연구지 9(1):31-38.
 5. 이춘택. 1993. 소경재의 이용방안 목재공학 21(1):65-73.