

초음파 비파괴 시험법을 이용한 탄성계수의 산정을 통한 침엽수 구조용재의 이방성에 관한 기초연구¹

오 세 창^{2,†}

Anisotropy of Softwood Structural Lumber Using The Elastic Modulus Determined by The Ultrasonic Nondestructive Method¹

Sei-Chang Oh^{2,†}

요 약

본 연구의 목적은 목재의 세 주요 축 방향에 대하여 각 방향별 탄성계수를 비파괴적으로 측정하여 이에 따른 목재의 이방성을 검토해 보고자 하였다. 결점이 없는 SPF (spruce-pine-fir)와 Hem-fir 및 낙엽송재에 대하여 무결점 시험편을 채취하고 각 시험편에 대해 세 방향에서 초음파 속도를 측정한다. 이 속도와 각 재료의 밀도를 이용하여 산정된 탄성계수를 비교하였다. 시험 결과 초음파속도 및 탄성계수는 방향별로 목재의 길이방향, 방사방향, 접선방향의 순으로 나타났으며, 밀도가 높을수록 각 방향별 탄성계수가 더 높게 나타났다. 수종 간에 있어서 길이방향의 탄성계수의 차이보다 방사방향, 접선방향의 차이가 더 크게 나타났다. 산정된 탄성계수를 사용하여 재료의 이방성을 비교하여 제시하였으며, 이를 통해 강성매트릭스의 대각선 항을 산정하였다.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the modulus of elasticity of E_L , E_R , E_T along three principal axis of softwood dimension lumber by nondestructive method. Ultrasonic measurement was carried out on defect free wood samples taken by the Japanese Larch, SPF (spruce-pine-fir) and Hem-fir 2×4 s. The ultrasound velocities were measured to calculate young's moduli and it was derived elastic constants for each wood samples using the ultrasound velocities and densities of wood. From the test, E_L was much greater than E_R and E_T . E_R/E_T ratios were about 1.3. The high density wood had high young's moduli in three principal axis and the difference in young's moduli between species was greater in transverse direction than longitudinal direction. The anisotropy of the lumber was presented through the calculated elastic moduli and compliances matrix in diagonal term were determined by inverting the stiffness matrix.

Keywords : ultrasonic measurement, young's moduli, anisotropy, stiffness matrix, Japanese Larch, spruce-pine-fir, Hem-fir

¹ Date Received September 28, 2016, Date Accepted November 8, 2016

² 대구대학교 생명환경대학 산림자원학과. Department of Forest Resources, Daegu University, Kyongsan, 38453, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 오세창(e-mail: osc@daegu.ac.kr)

1. 서 론

목재의 탄성적인 성질은 매우 중요한 성질로 목재의 재료적 특성을 이해하는데 필요한 정보를 제공해 주는데 이는 탄성적인 성질은 목재의 기계적 특성을 반영하기 때문이다. 이 때문에 탄성적인 성질의 측정 은 공학적인 구조설계에 있어서 아주 중요한 항목이 된다(Bucur and Archer, 1984). 특히 목재는 다른 주요 건축 재료와는 달리 방향에 따라 성질이 달라지는 직교이방성 재료이며 이에 따라 12가지의 독립적인 탄성 파라미터(3개의 영계수, 3개의 전단탄성계수, 6개의 프와송의 비)가 목재의 탄성적인 거동을 해석하는데 필요시 된다(Bodig and Jayne, 1982). 하지만 이에 대한 정보가 제한적이며 정적실험을 통해 측정해내는 것은 고가의 시험 장비가 필요할 뿐만 아니라 많은 시간과 노력이 소요되는 등 많은 문제점을 갖고 있다.

재료의 탄성적인 성질을 측정하는데 있어서 초음파 기법은 정적 시험(static test)을 통해 탄성계수를 구하는 방법보다 간편하게 측정할 수 있는 방법으로 널리 사용되어 왔다. 초음파 시험법에 의한 탄성계수의 측정은 초음파의 전달속도와 밀도측정을 통하여 수행된다. 초음파 전달속도의 측정은 소재나 목질복합재료의 내부구조와 결함을 파악하는데 상당히 유효한 방법으로 목재의 탄성거동을 평가하는데 있어서 초음파 전달속도는 중요한 파라미터가 된다. 이는 초음파의 전달속도를 통해 산정된 재료의 탄성계수와 정적시험을 통해 산정된 탄성계수와의 높은 상관관계에 근거한 것이다. 이와 같이 초음파 비파괴 시험법을 이용하여 목재의 물리 및 기계적 성질을 평가하는 것은 그 유효성과 편리함으로 인해 성공적으로 이용되어 왔으며 동적탄성계수 측정 시 이 방법을 채택하는 경우가 많다.

재료의 탄성계수는 재료의 강성을 나타내는데 적용되므로 목재와 같은 이방성 물체의 탄성계수는 주요 방향에 따른 탄성계수를 측정하여 강성매트릭스(stiffness matrix)의 대각선 항을 얻을 수 있으며(Castagnèe *et al.*, 1990) 이는 목재의 주요 3방향에서 각 방향별 초음파 전달 속도를 측정하여 산정할 수

있다. 국내에서는 목재에 대한 탄성계수는 거의 대부분 목재의 길이방향의 탄성계수가 제시되어 있으며, 전단탄성계수나 방사방향과 접선방향에서의 방향별 탄성계수는 제대로 정립되어 있지 않아 목구조물 설계 시 구조설계 프로그램을 사용할 때 필요한 입력 변수를 채택할 때 문제점이 적지 않다. 이는 정적시험법만으로는 이들 값을 제대로 측정하기가 상당히 어렵고 프와송비(poisson's ratio)에 대한 정확한 실험 방법이 정립되어 있지 않아 이에 따른 정보의 부족에 기인된 것으로 보인다. 따라서 초음파 기법을 사용하여 각 방향에서 필요한 초음파 전달속도를 측정하면 이를 토대로 각 방향별 탄성계수와 전단탄성계수 및 프와송비를 산출하는 것이 가능하리라고 생각된다.

본 연구에서는 주요 구조재에 대해 이방성의 지표로 각 방향별 탄성적 성질의 비교검토에 대한 기초연구로 국산재로 가장 많이 생산·유통되고 있는 낙엽송과 목조건축현장에서 사용되는 대표적인 구조재인 SPF (spruce-pine-fir)와 Hem-fir 구조재에 대해 우선 세 방향에서 각 방향별 탄성계수를 비파괴 초음파 기법을 사용하여 측정하고 산정된 방향별 탄성계수와 그 차이에 따른 재료의 이방성을 제시해 보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험재료

본 연구에서 사용된 목재는 세 종류로 국산 낙엽송과 수입재로는 SPF (spruce-pine-fir) No. 2 등급, Hem-fir (N) No. 2 등급의 2 × 4 구조재를 전문업체로부터 구입하여 시험재료로 사용하였다. 각 구조재의 두께, 나비 및 밀도와 함수율은 Table 1과 같다.

각 구조재로부터 목재의 결점에 따른 영향을 최소화하기 위하여 옹이와 수(pith), 표면 할렐 등이 없는 무결점 부위를 선정하여 L × R × T = 100 × 38 × 89 mm의 크기로 단면이 정확하게 판목이 되도록 Fig. 1과 같이 하여 각각 10개의 시험편을 제작하였다. 시험편의 함수율은 전기식 수분계로 각 시험

Table 1. Basic properties of structural softwood lumber used in this study

Material	Thickness (mm)	Width (mm)	Density* (kg/m ³)	Moisture Content (%)
Japanese Larch	37.0	84.4	578	10.4
SPF (spruce-pine-fir)	37.9	88.3	415	10.3
Hem-fir	38.3	88.2	374	10.5

* based on air dried condition

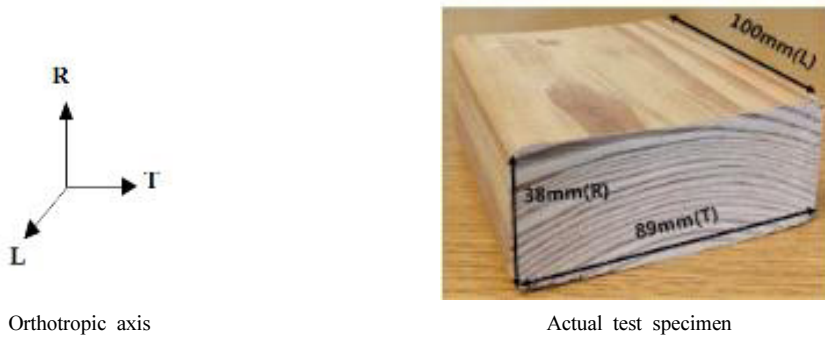


Fig. 1. Configuration of orthotropic axis and actual test specimens for ultrasonic test.

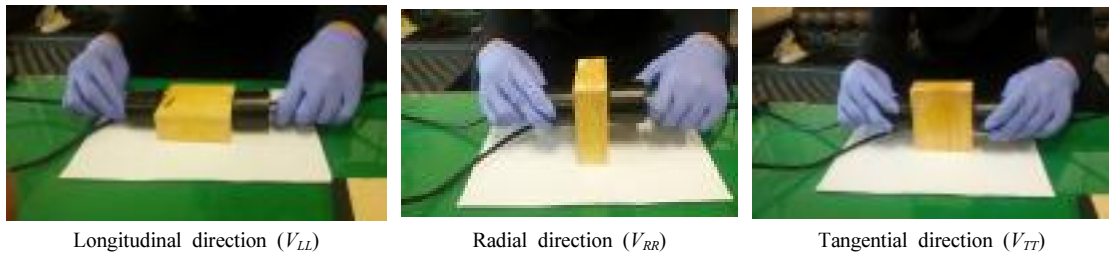


Fig. 2. Test methods of ultrasonic measurement according to grain direction.

체 마다 측정하였으며 평균값은 10.4% 정도로 나타났다.

2.2. 실험방법

준비된 각 시험편에 대하여 초음파시험기(Pundit Lab Plus)를 사용하여 시험편에 대해 Fig. 2와 같이 시험편을 설치하고 커플런트(dowcorning high vacuum grease)를 트랜스듀서(Proceq P/N325 40 131-B)에 바른 후 길이(L), 방사(R), 접선(T) 방향의 세 방향에서 각 방향에 대한 초음파 전달 속도를 측정하

였다. 사용된 트랜스듀서는 주파수는 54 kHz이며 펄스폭은 9.3 μs였다. 측정 데이터를 통해 각 방향에서 방향별 초음파 속도가 측정되어 길이방향(V_{LL}), 방사방향(V_{RR}), 접선방향(V_{TT})의 총 3개의 초음파 전달속도가 측정되었다.

측정된 초음파 전달속도를 사용하여 재료의 탄성계수(E_{ij})는 다음 식에 따라 산출하였다.

$$E_{ij} = \rho V_{ij}^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 V_{ij} = 초음파 전달속도(m/sec), ρ = 재료의 밀도(kg/m³)

Table 2. Ultrasonic velocities of softwood dimension lumber used in this study

Material	Ultrasonic pulse velocity (m/sec)			
	V_{LL}	V_{RR}	V_{TT}	$V_{LL} : V_{RR} : V_{TT}$
Japanese Larch	5,577 (3.7) ¹⁾	2,256 (5.3)	1,912 (4.9)	1 : 0.41 : 0.34
SPF	5,121 (4.0)	2,322 (5.2)	1,818 (4.6)	1 : 0.45 : 0.35
Hem-fir	5,125 (4.3)	2,153 (5.3)	1,521 (6.1)	1 : 0.42 : 0.30
Spruce ²⁾	5,600 (N.A) ⁴⁾	2,000 (N.A)	1,600 (N.A)	1 : 0.36 : 0.29
Spruce ³⁾	5,850 (8.3)	2,130 (3.1)	1,710 (9.8)	1 : 0.36 : 0.29
Japanese cedar ⁴⁾	5,410 (N.A) ⁵⁾	2,320 (N.A) ⁴⁾	1,860 (N.A) ⁴⁾	1 : 0.43 : 0.34

1) coefficient of variation (COV, %), 2) Bucur (1995), 3) Keunecke, *et al.* (2007), 4) Sakai. *et al.* (1987), 5) COV not available

3. 직교이방체의 강성매트릭스 (Stiffness matrix)

목재는 일반적으로 길이방향(L), 방사방향(R), 접선 방향(T)의 각 방향이 서로 수직을 이루고 있는 상태 이므로 대표적인 이방성 중 직교이방성(orthotropic) 재료로 간주된다. 직교이방체의 경우 3차원적인 탄성 거동을 나타내기 위해 Bodig and Jayne (1982)은 응력-변형의 관계를 다음과 같은 행렬식으로 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 σ_{ij} =응력, C_{ij} =강성텐서, γ_{ij} =변형이다.

이를 단순화 하면

$$\sigma = C\gamma \dots\dots\dots (3)$$

후크의 법칙에 의해

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\gamma_i} \text{이므로} \dots\dots\dots (4)$$

$$E_1 = C_{11}, E_2 = C_{22}, E_3 = C_{33} \text{이 된다.} \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 1을 길이방향 L, 2를 방사방향 R, 3을 접선방향 T로 하면

$$E_L = C_{LL} = \rho V_{LL}^2, E_R = C_{RR} = \rho V_{RR}^2,$$

$$E_T = C_{TT} = \rho V_{TT}^2 \text{이 된다.} \dots\dots\dots (6)$$

4. 결과 및 고찰

4.1. 구조용 목재의 방향별 초음파 속도와 이방성

Table 2는 각 구조용재에 대한 방향별 초음파 전달속도를 나타낸 것이다. Table 2에서 보듯이 초음파 전달속도는 길이방향 > 방사방향 > 접선방향($V_{LL} > V_{RR} > V_{TT}$)의 순으로 나타났으며 이는 목재의 조직 구조의 배열의 영향에 따른 것이다. 각 방향별 초음파 전달속도를 보면 길이방향에서 가장 큰 초음파 전달속도를 보여 주었으며, 접선방향에서 가장 낮은 속도를 나타내었다. 이러한 결과는 Keunecke *et al.*

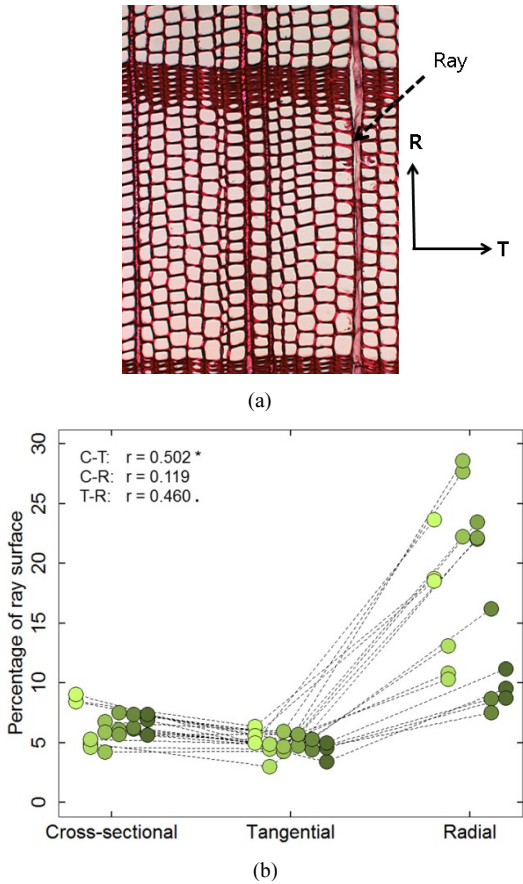


Fig. 3. Anatomical characteristics of pine species (a; *Pinus Ponderosa*, b; *Arx et al.* (2015)).

(2007)이 언급하였듯이 목재의 조직 구조에 따른 영향으로 침엽수재의 주 구성세포인 가도관은 직경에 대한 길이의 비율이 75 ~ 100 (Tsoumis, 1991) 정도의 끝이 막힌 튜브 상으로 형성되어 길이방향으로 배열되어 있어서 초음파 전달에 있어서 고도의 전달 매체가 되어 빠른 속도를 부여한다고 볼 수 있다. 방사방향에 있어서도 Fig. 3에서 보는 바와 같이 방사 가도관과 방사 유세포 같은 방사조직이 축 방향과 마찬가지로 방사방향으로 초음파의 전달매체역할을 하므로 전달매체가 상대적으로 낮은 접선방향보다 초음파 전달속도가 더 크게 나타난 것으로 보인다. Scots pine의 방사 유세포에 관한 정량적인 평가(*Arx,*

et al., 2015)에서도 Fig. 3의 (b)에서 보듯이 접선방향보다는 방사방향에서의 방사조직의 상대적인 면적이 더 높기 때문에 초음파 전달매체로서의 방사조직의 역할이 크다고 볼 수 있다.

수종별로는 낙엽송재가 방사방향을 제외하고는 가장 큰 값을 보여주었으며 SPF재와 Hem-fir재는 차이가 크지 않았다. 본 시험에서 측정된 목재의 초음파 전달속도는 침엽수재에서 대략 길이방향 5,000-6,000 m/s, 방사방향 1,580-2,330 m/s, 접선방향 1,146-1,990 m/s라고 밝힌 연구결과(*Bucur, 1995*)와 유사한 결과로 보인다. 또 *Sakai et al.* (1987)은 9개 수종에 대한 연구에서 각 방향별 속도의 비는 대체적으로 $V_{LL} : V_{RR} : V_{TT} = 1 : 0.4 : 0.3$ 이라고 한 바 본 연구에서도 세 수종에 대한 평균치인 $V_{LL} : V_{RR} : V_{TT} = 1 : 0.42 : 0.33$ 인 것과 비교해 볼 때 유사한 결과를 보여주었다.

한편 목재에서 각 방향별 속도에 따른 차이와 그 비는 목재의 이방성을 나타내는 주요 특성으로 간주되는데, 본 연구에서 산정된 이방성은 Table 3에 나타난 바와 같다. Table 3에서 보듯이 낙엽송재의 경우 길이방향/방사방향의 초음파 전달속도의 비는 2.47, 길이방향/접선방향의 초음파 속도의 비는 2.92로 나타났다. 침엽수인 spruce재에 대한 연구에서 대체적으로 각 이방성은 $V_{RR}/V_{LL} = 0.4$, $V_{TT}/V_{LL} = 0.28$ 로 제시한 연구결과(*Bucur, 1995*)와 비교해 볼 때 Table 3에서 역수를 취하면 낙엽송재는 각각 0.40, 0.38, SPF재는 0.45, 0.35, Hem-fir재는 0.42, 0.29로 나타나 큰 차이가 없음을 보여주었다. 목재의 각 방향에서 재료의 이방성을 나타내는 계수로는

$\frac{V_{RR} - V_{TT}}{V_{RR}}$ 와 $\frac{V_{RR} - V_{TT}}{V_{TT}}$ 이 있는데 이는 방사방향과 접선방향의 초음파 전달속도의 비를 나타내는 것으로 이 값이 크면 이방성이 큰 것으로 간주된다.

실험결과 $\frac{V_{RR} - V_{TT}}{V_{RR}}$ 의 경우 Hem-fir재에서 0.29로 가장 큰 값을 나타내었으며, SPF재는 0.22, 낙엽송재는 0.15로 나타났다. 이는 *Bucur and Declereq* (2005)가 지적한 바와 같이 고밀도재는 저밀도재보다 이방성이 저하된다는 연구결과와 같은 것으로 생

Table 3. Anisotropy of softwood lumber by the ratio of ultrasonic velocities

Anisotropic coefficient	Materials				
	Japanese Larch	SPF	Hem-fir	Spruce ¹⁾	Japanese cedar ²⁾
$\frac{V_{LL}}{V_{RR}}$	2.47	2.21	2.38	2.80	2.33
$\frac{V_{LL}}{V_{TT}}$	2.92	2.82	3.37	3.50	2.91
$\frac{V_{RR}}{V_{TT}}$	1.18	1.28	1.42	1.25	1.25
$\frac{V_{LL} - V_{RR}}{V_{LL}}$	0.60	0.55	0.58	0.64	0.57
$\frac{V_{LL} - V_{RR}}{V_{RR}}$	1.47	1.21	1.38	1.80	1.33
$\frac{V_{LL} - V_{TT}}{V_{LL}}$	0.66	0.64	0.70	0.71	0.66
$\frac{V_{LL} - V_{TT}}{V_{TT}}$	1.92	1.82	2.37	2.50	1.91
$\frac{V_{RR} - V_{TT}}{V_{RR}}$	0.15	0.22	0.29	0.20	0.20
$\frac{V_{RR} - V_{TT}}{V_{TT}}$	0.18	0.28	0.42	0.25	0.25

1) Bucur (1995), 2) Sakai. *et al.* (1987)

Table 4. Elastic constants and materials' anisotropy of softwood dimension lumber obtained by ultrasonic test

Materials	Density (kg/m ³)	Elastic constants (N/mm ²)			Anisotropy by ultrasonic test		
		E_{LL}	E_{RR}	E_{TT}	E_{LL}/E_{RR}	E_{LL}/E_{TT}	E_{RR}/E_{TT}
Japanese larch	578	17,997	2,945	2,115	6.11	8.51	1.38
SPF	415	10,809	2,240	1,373	4.86	7.93	1.63
Hem-fir	374	9,758	1,734	865	5.65	11.32	2.00
Spruce ¹⁾	399	15,800	1,800	1,170	7.67	11.79	1.53

1) Bucur (1995)

각된다. 따라서 고밀도재인 낙엽송은 저밀도재인 SPF재와 Hem-fir재에 비해 이방성의 정도가 상대적으로 낮게 나온다고 추정할 수 있다.

4.2. 구조용 목재의 초음파 시험에 의한 방향별 탄성계수와 강성행렬의 산정

각 구조재에 대해 측정된 초음파 전달속도와 밀도로부터 산정된 탄성계수를 Table 4에 나타내었다. 초

음파 전달속도와 마찬가지로 탄성계수는 방향별로 길이방향, 방사방향, 접선방향($E_{LL} > E_{RR} > E_{TT}$)의 순으로 나타났으며 수종별로 길이방향이 방사방향과 접선방향보다 5배에서 11배 이상에 이르기까지 높은 탄성계수를 나타내었다. 길이방향에서 수종별 큰 차이가 나지 않았던 초음파 전달속도와는 달리 탄성계수는 수종별로 큰 차이를 보였으며, 이는 탄성계수와 밀도의 상관관계에 따른 영향에 의한 것으로 생각된다. 밀도는 마찬가지로 세포벽의 두께와 관련되므로

각 세포벽의 두께를 비교해 보면 낙엽송재 만재가 6.7 μm , SPF와 비슷한 스트로브 잣나무는 5.0 μm , Hem-fir와 비슷한 전나무는 4.6 μm 인 것(Jung and Park, 2008)과 비교해 보면 세포벽의 두께가 탄성계수에 미치는 영향이 매우 밀접하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 산정된 목재의 각 방향별 탄성계수에 대한 비는 $E_{LL}/E_{RR} = 4.86 \sim 6.11$, $E_{LL}/E_{TT} = 7.93 \sim 11.32$, $E_{RR}/E_{TT} = 1.38 \sim 2.00$ 으로 나타났으며 Table 4의 Spruce재 및 일본 삼나무재와 비교하여 유사한 경향을 보여주었다. 특히 수중 간 길이방향의 탄성계수의 차이보다 접선 및 방사방향에서의 탄성계수의 차이가 비교적 더 큰 것으로 나타났는데, 이는 Keunecke *et al.* (2007)이 지적하였듯이 방사와 접선 방향에서의 탄성계수는 주로 방사조직의 양에 따라 달라지며 이들 간의 비율이 낮다는 것은 상대적으로 방사조직의 양이 적은 것으로 볼 수 있다. 특히 각 수종에 있어서 가도관의 접선방향 두께는 상대적으로 일정한 반면 방사방향 두께는 조재와 만재간의 차이가 크게 나타나기 때문에 미세구조적인 관점에서 보면 밀도는 주로 방사방향 세포벽과 내강의 두께 비에 따르므로 결국 세포벽의 두께가 두꺼운 낙엽송재가 SPF나 Hem-fir 보다 높은 탄성계수를 갖는다고 한 결과와 같은 것으로 생각된다.

한편 측정된 초음파 전달속도와 탄성계수를 통해 산정된 값의 역수는 강성 컴플라이언스(stiffness compliance) 행렬이며 이는 다음과 같이 나타낸다.

$$S = C^{-1}$$

행렬식에서 강성 컴플라이언스 행렬의 대각선 항은 탄성계수의 역수이므로 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 이 값들과 Kollman and Côté (1968)가 Spruce재에 대해 제시한 값들을 비교해 보면 동일한 자릿수의 같은 지수 단위로 표시됨을 알 수 있으며 밀도가 높을수록 해당 값은 작아지는 경향을 보여주었다.

Table 5의 산정된 값으로부터 낙엽송 재에 대해 강성행렬을 식으로 나타내면

Table 5. Average stiffness terms of softwood dimension lumber by ultrasonic test

Materials	Stiffness terms (N/mm ²) ⁻¹		
	S_{LL}	S_{RR}	S_{TT}
Japanese larch	55.5×10^{-6}	0.34×10^{-3}	0.47×10^{-3}
SPF	91.7×10^{-6}	0.45×10^{-3}	0.73×10^{-3}
Hem-fir	102.1×10^{-6}	0.57×10^{-3}	0.15×10^{-3}
Spruce*	72.5×10^{-6}	0.55×10^{-3}	0.83×10^{-3}

* Kollman and Côté (1968)

$$C_{ij}(\text{N/mm}^2) = \begin{bmatrix} 17997 & - & - & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2945 & - & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 2115 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & - \end{bmatrix} \text{이며}$$

$C = S^{-1}$ 이므로

$$S_{ij}(\text{N/mm}^2)^{-1} = \begin{bmatrix} 55.5 \times 10^{-6} & - & - & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 340 \times 10^{-6} & - & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & 473 \times 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & - \end{bmatrix}$$

로 표시할 수 있다.

이 식에서 보듯이 S_{11} 은 S_{22} 및 S_{33} 보다 현저히 작은 값을 가지는 것을 볼 수 있으며 이는 상대적으로 높은 C_{11} 의 값으로부터 유래된 것이다. 강성행렬식에서 - 표시는 전단강성계수 및 프와송의 비로부터 산출되는 것으로 향후 이들 값이 산정되면 각 재료에 대한 강성행렬식이 완성될 수 있을 것이다.

5. 결 론

현재 목조건축에서 구조용재로 많이 사용되고 있는 SPF와 Hem-fir 구조재와 그리고 국산재로서 대표적인 구조용재인 낙엽송재에 대하여 목재의 주요 축 방향에 대하여 각 방향별 초음파 전달속도를 측정하고, 이를 이용하여 산정된 탄성계수를 비교하였다. 그 결과 초음파 전달속도 및 탄성계수는 방향별로 목재의 길이방향, 방사방향, 접선방향의 순으로 나타났으며, 밀도가 높을수록 각 방향별 탄성계수는 더

높게 나타났다. 각 수종 간 길이방향의 탄성계수의 차이보다 방사방향, 접선방향의 차이가 더 크게 나타났다. 또한 탄성계수의 비율로 측정된 이방성 계수로 부터 재료의 이방성은 목재의 밀도와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며 밀도가 높을수록 이방성은 상대적으로 낮게 나타났다.

산정된 탄성계수를 사용하여 강성매트릭스와 강성 컴플라이언스의 대각선 항의 일부를 제시하였으며 추가 연구를 통해 전단 탄성계수와 프와송 비 (poisson's ratio)가 측정되어 제시되면 완성된 강성행렬을 통해 각 수종에 대한 기준값이 산출되어 목구조 분야의 구조설계에 도움이 될 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 2014년도 대구대학교 연구년 과제 지원에 의해 수행되었다.

REFERENCES

- Arx, G.V., Arzac, A., José, M.O., Fonti, P. 2015. Assessing Conifer Ray Parenchyma for Ecological Studies: Pitfalls and Guidelines. *Front Plant Science* 6, article 1016: 1-10.
- Bergander, A., Salmé, L. 2000. Variations in transverse fibre wall properties: relations between elastic properties and structure. *Holzforchung* 54(6): 654-660.
- Bodig, J., Jayne, B.A. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, p. 712.
- Bucur, V., Archer, R.R. 1984. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology* 18: 255-265.
- Bucur, V. 1995. *Acoustics of wood*. CRC Press, Boca Raton, p. 284.
- Bucur, V., Declercq, N.F. 2006. The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique. *Ultrasonics* 44: 829-831.
- Castagnè, J., Jenkins, T., Sachse, W., Baste, S. 1990. Optimal determination of the elastic constants of composite materials from ultrasonic wave-speed measurements. *Journal of Applied Physics* 67(6): 2753-2761.
- Jeong, S.-H., Park, B.-S. 2008. Wood properties of useful tree species grown in Korea. *Korea Forest Research Institute Research Paper No. 29*. p. 390.
- Keunecke, D., Sonderegger, W., Pereteanu, K., Lühi, T., Niemz, P. 2007. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology* 41(4): 309-327.
- Kollmann, F.F.P., Côté, W.A. 1968. *Principles of wood science and technology: Solid wood*. Springer-Verlag, New York, p. 592.
- Sakai, H., Takagi, K., Minamisawa, A. 1987. Ultrasonic properties in wood. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27. Supplement 27-1: 55-57.