

함수율과 섬유경사각이 목재의 압축강도 및 초음파 전달속도에 미치는 영향^{*1}

장 상 식^{*2}

Effects of Moisture Content and Slope of Grain on Ultrasonic Transmission Speed of wood^{*1}

Sang Sik Jang^{*2}

ABSTRACT

Nondestructive testing(NDT) by using ultrasonic sound is widely applied to wood for grading, moisture and defect detecting, estimating degree of decay, etc. Before practicing such application, basic relationships between ultrasonic transmission and wood properties shall be studied first. In this study, ultrasonic NDT was applied to larch and red pine to investigate the effects of moisture content and slope of grain on ultrasonic transmission speed. Specimens for testing about moisture content were prepared to have moisture content of green state, 30%, 20%, 10% and oven-dry state. Specimens for testing about slope of grain were prepared to have grain angle of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degree in the tangential direction.

Ultrasonic transmission speed was inversely proportional to moisture content in low range of moisture content under around 30% that was considered to be close to fiber saturation point. In high moisture content range above 30%, the ultrasonic transmission speed was almost constant. The same trend was observed in the relationships between compressive strength and moisture content. Slope of grain also had inversely proportional relationship with ultrasonic transmission speed and compressive strength. The relationship between compressive strength and ultrasonic transmission speed could be expressed by a linear equation.

Keywords: nondestructive testing, ultrasonics, transmission speed, moisture content, slope of grain, compression

- 요약 -

초음파를 이용한 목재의 비파괴시험은 등급구분, 수분 및 결점 탐지, 썩은 정도 평가 등의 용도에 적용되고 있다. 이와 같은 기술을 실제로 적용하기 위해서는 목재 내의 초음파 전달과 목재의 성질 사이의 관계에 대한 기본적인 연구가 선행되어야 한다. 이 연구에서는 함수율과 섬유경사각이 초음파 전달 속도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 낙엽송과

*1 접수 1999년 10월 7일. Received Oct. 7, 1999

본 연구는 한국과학재단 목적이초연구(961-0608-068-2) 지원으로 수행되었음.

*2 충남대학교 임산공학과 Dept. For. Prod., Chungnam National Univ., Taejeon 305-764, Korea

함수율과 섬유경사각이 목재의 압축강도 및 초음파 전달속도에 미치는 영향

소나무를 대상으로 초음파 비파괴시험을 실시하였다. 함수율에 대한 시험을 위한 시험편은 생재상태, 30%, 20%, 10% 및 전건상태의 함수율을 갖도록 준비하였고 섬유경사각에 대한 시험을 위해서는 접선방향으로 0, 15, 30, 45, 60, 75 및 90도의 섬유경사각을 갖는 시험편을 준비하였다.

초음파 전달 속도는 섬유포화점에 근사한 30% 이하의 낮은 함수율 범위에서는 함수율에 반비례하였으며 이보다 높은 함수율 범위에서는 함수율에 관계없이 일정한 경향을 나타내었다. 목재의 압축강도와 함수율 사이의 관계에서도 이와 유사한 경향이 관찰되었다. 목재의 섬유경사각도 초음파 전달 속도 및 압축강도와 반비례하는 경향을 나타내었다. 압축강도와 초음파 전달 속도 사이의 관계는 정비례하는 관계로서 하나의 직선식으로 나타낼 수 있었다.

1. 서 론

목재는 자연에서 성장한 재료인 나무로부터 채취되기 때문에 재료의 성질에 매우 다양한 변이를 나타낸다. 이와 같이 변이가 심한 목재를 보다 효율적으로 이용하기 위하여 가능하면 재료의 변이를 감소시키고 균일한 품질을 보장받을 수 있도록 등급구분을 시행한다. 등급구분의 방법은 오래 전부터 시행되던 육안 등급구분에서부터 현대에 이르러 개발된 기계등급구분에 이르기까지 매우 다양하다. 최근에는 음을 이용한 비파괴시험 방법들이 개발되어 목재의 이용에 활용되고 있다. 목재의 비파괴시험에 적용되는 음의 종류에는 응력파(stress wave)와 초음파(ultrasonics)가 있으며 이 중에서 응력파는 목재의 치수가 비교적 큰 경우에 적용하기 쉽고 초음파는 크기가 작거나 불규칙한 목재에도 적용할 수 있는 장점이 있다.

초음파의 전달을 이용한 비파괴시험 기술은 목재 이외의 다른 재료들에 대해서는 일찍부터 개발되었으나 목재에 도입되기 시작한 것은 1960년대 이후의 일로써 목재의 성질과 음의 전달 사이의 관계에 대하여 많은 연구결과가 발표되었다(James, 1961; Miller, 1963; 1966). 이러한 기초 연구들을 통하여 목재 내의 음 전달에 영향을 미치는 많은 요인들이 분석되었고 Bertholf(1965)는 목재 내에서 음의 전달속도가 목재의 휨탄성계수(MOE)에 비례함을 발표하였다.

그러나 이러한 연구들이 목재에 대한 초음파 비파괴시험 방법으로 자리를 잡은 것은 비교적 최근의 일로 가격이 저렴하고 비교적 쉽게 사용할 수 있는 초음파 시험기들이 개발되면서 초음파 비파괴시험이 활성화되기 시작하였다. Henrique(1986)는 목재 내에서 초음파의 전달특성을 시험하여 초음파를 이용한 비파괴시험의 실용화 가능성을 제시하였다. Lemaster와 Donfeld(1987)는 초음파를 이용하여 목재 내부의 결

점을 측정하는 방법을 제안하였으며 Lemaster와 Quarles(1990)는 목재 내에서 음의 전달방향과 측정 위치에 따른 음파전달 특성의 변이를 측정하였다.

Kodama 등은 음의 전달을 측정함으로써 내부의 썩은 상태를 예측하였고(1993) 음의 주파수 분산을 통하여 내부 용이의 유무와 용이의 상태를 측정하였다(1994). Patten-Mallory 등(1988)은 초음파를 이용하여 목재 내부의 썩은 정도를 측정하는 방법을 제시하였고 Patten-Mallory(1990)는 이 방법을 적용하여 southern pine 목재의 갈색부후균에 의한 피해 정도를 측정할 수 있다. 그 외에 목재의 수분과 초음파의 전달 사이의 관계에 관한 연구도 근래에 활발하게 진행되어 초음파를 이용하여 목재 내부의 수분확산계수를 측정하거나(Minamisawa and Ozawa, 1994) 또는 목재의 방습단계에서 음의 전달속도와 탄성계수의 변이를 측정하여 수분이 미치는 영향을 분석하였다(Nakamura and Nanami, 1993).

Mishiro는 일본산 일부 침엽수 및 활엽수 그리고 일부 열대 수입목에 대하여 목재 내에서 초음파의 전달속도와 함수율의 관계를 연구(1995, 1996, 1996a, 1996b)하였으며 섬유경사각이 초음파 전달속도에 미치는 영향(1996)도 분석하였다. 그(1995)는 목재 내에 수분경사가 초음파 전달 방향과 평행하게 존재하는 경우에는 초음파 전달속도를 결정하기 위하여 복합재료에 대한 이론모형의 적용이 가능하다는 결과를 보고하였다. 섬유경사각과 관련된 Mishiro의 연구(1996)에서는 섬유경사각이 60도까지 증가할수록 초음파 전달속도가 급격히 감소하며 횡단면에서 섬유경사각이 초음파 전달속도에 미치는 영향은 침엽수와 활엽수에서 다르게 나타남을 보고하였다. Mishiro (1996a, 1996b)는 평균 함수율과 초음파 전달속도의 관계에서 섬유포화점 이상의 함수율에서는 수종의 영향을 많이 받으며 섬유포화점 이하의 함수율에서는 각 수종별로

하나의 방정식으로 이 관계를 나타낼 수 있다고 보고 하였다.

이와 같이 초음파를 이용한 목재의 비파괴시험에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있지만 아직까지 우리나라에서는 이에 관한 기초 연구가 부족하고 이용할 수 있는 기초자료가 부족한 실정이다. 이 연구에서는 우리나라에서 생산되는 낙엽송과 소나무를 이용하여 목재의 함수율과 섬유경사각이 초음파의 전달속도에 미치는 영향과 초음파 전달속도와 압축강도의 상관관계를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

낙엽송(*Larix leptolepis*)과 소나무(*Pinus densiflora*)는 현재 국내에서 생산되는 목재 중에서 앞으로 구조용재로 활용될 가능성이 가장 높은 수종으로써 구조용재로 사용되기 위해서는 그 구조성능 및 품질의 평가가 반드시 이루어져야 한다. 이 연구에서는 국내에서 가장 많은 양이 식목되어 있고 또 현재 가장 많은 양이 생산되고 있는 낙엽송과 소나무를 공시재료로 선택하였으며 공시재료로 사용된 낙엽송 및 소나무의 비중은 각각 0.53 및 0.42를 나타내었다.

먼저 공시재료를 2cm×2cm×6cm 크기의 압축시험편으로 120개를 준비하였다. 함수율이 초음파 전달속도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 이 중에서 50개를 20±5℃의 증류수에 무게 변화가 일어나지 않을 때까지 침지하여 포수상태의 시험편을 준비하였다. 시험편을 10개씩 5개의 그룹으로 나눈 후 각각의 그룹을 포수 상태와 함수율 30%, 20% 10% 및 전건상태 시험 그룹으로 나누고 각 그룹에 적당한 함수율 상태로 건조 및 조습을 실시한 후 무게 측정, 초음파 비파괴시험 및 압축시험 등을 실시하였다. 시험을 실시하기 위한 시험편의 함수율 상태를 결정하기 위하여 전전무게의 추정치를 기준으로 시험편의 무게를 측정하여 대략적으로 함수율을 계산하였으며 각 그룹에 대한 압축시험 후 즉시 시험편을 채취하여 정확한 함수율 및 비중을 측정하였다. 전건상태 시험편은 103±2℃의 건조기 내에 시험편을 넣고 항량에 도달할 때까지 건조를 실시하였다.

나머지 70개의 시험편은 섬유경사각의 영향 시험용으로 준비하기 위하여 그룹당 10개씩 총 7개의 그룹

으로 나누고 각각의 그룹이 섬유방향에서 접선방향으로 0도, 15도, 30도, 45도, 60도, 75도 및 90의 섬유경사각을 나타내도록 시험편을 제작하였다. 섬유경사각의 영향 시험용 시험편들은 모두 실험실의 대기조건에서 기건상태가 될 때까지 조습을 실시하였으며 시험 후 함수율을 측정된 결과 평균 12.3%로 나타났다.

2.2 시험 방법

시험편의 함수율 및 비중은 KS F 2202 (목재의 평균 나이트 간격, 함수율 및 비중 측정 방법)을 적용하여 측정하였으며 압축 시험에는 KS F 2206 (목재의 압축 시험 방법)이 적용되었다.

시험편에 대한 초음파 비파괴시험에는 C.N.S. Electronics Ltd.에서 제조한 PUNDIT 초음파 측정기 및 37KHz의 초음파 센서가 사용되었으며 그림 1과 같은 방법이 적용되었다. 그림 1에서 센서와 목재 사이에 음의 전달을 원활하게 하기 위하여 점성이 높은 반고체의 석유계통 윤활유를 사용하였다.

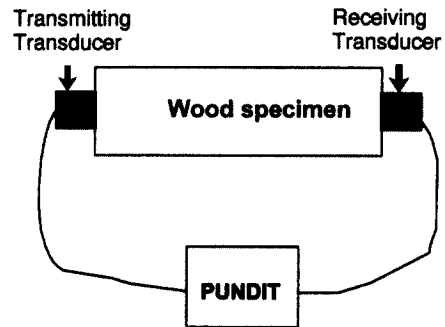


Fig. 1. Experimental arrangement used for ultrasonic transmission tests.

3. 결과 및 고찰

3.1 함수율의 영향

낙엽송 및 소나무에서 함수율과 초음파 전달속도의 관계는 그림 2와 같이 나타났다. 그림 2에서 보는 바와 같이 목재 내에서 초음파의 전달속도는 대략적인 섬유포화점으로 생각되는 30% 이상의 높은 함수율에서는 목재 내 수분의 영향을 받지 않고 거의 변화가 없으며 그 이하의 함수율에서는 함수율이 감소할수록 속도가 빨라지는 경향을 나타내었다. 섬유포화점 이

함수율과 섬유경사각이 목재의 압축강도 및 초음파 전달속도에 미치는 영향

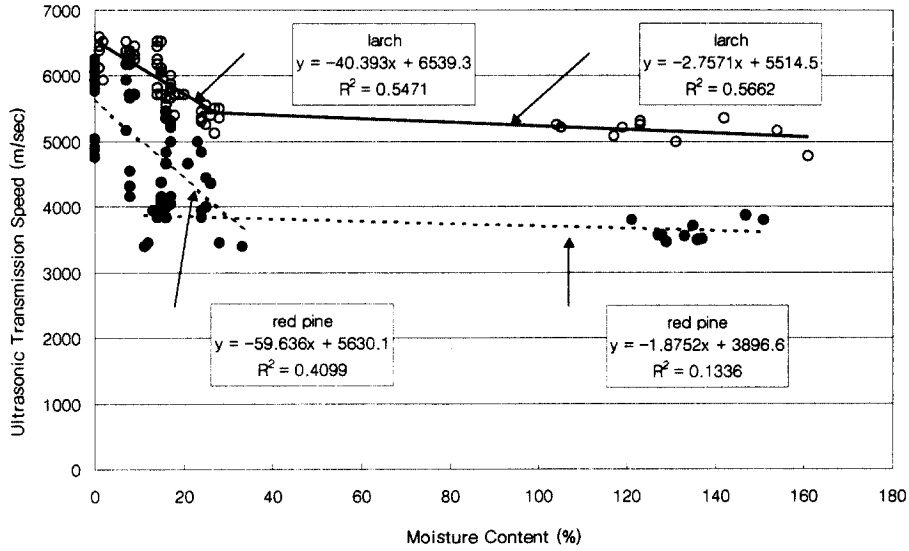


Fig. 2. Relationship between ultrasonic transmission speed and moisture content: ● - Red pine; ○ - Larch.

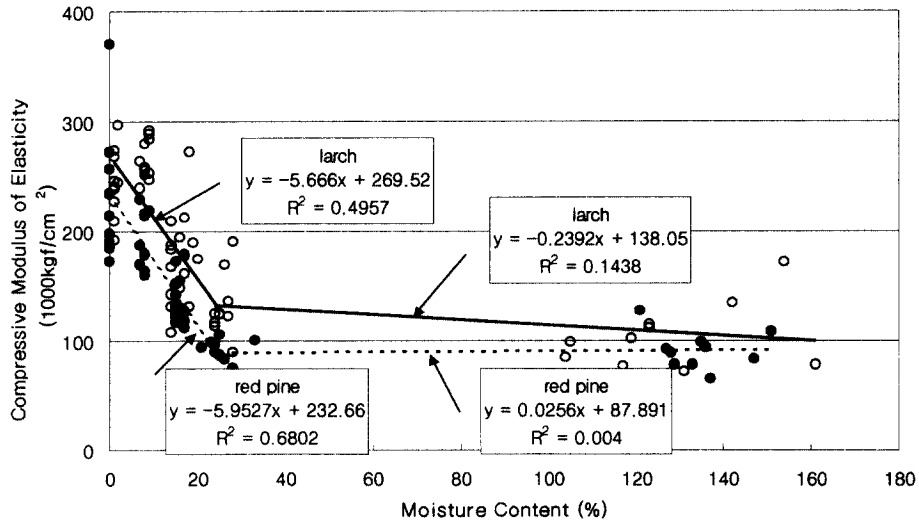


Fig. 3. Relationship between compressive modulus of elasticity and moisture content: ● - red pine; ○ - larch.

상의 함수율에서 초음파 전달속도가 거의 변하지 않는 이유는 초음파가 세포벽의 목질부를 타고 전달되기 때문에 세포내강이나 빈 공간에 있는 수분은 초음파의 전달에 큰 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 생각된다. 섬유포화점 이하의 함수율에서는 셀룰로즈

와 결합된 수분인 결합수 때문에 초음파의 전달 과정에서 에너지의 손실이 생기고 이로 인하여 초음파 전달속도가 지연되는 것으로 생각된다. 이 결과를 적용하면 초음파를 이용하여 목재의 대략적인 섬유포화점을 찾을 수 있을 것으로 생각된다. 동일한 함수율이

라면 초음파의 전달속도가 소나무보다 낙엽송에서 더 빠른 것으로 나타났으며 이러한 경향은 소나무보다 낙엽송의 강도가 더 높다는 사실을 의미한다. 함수율에 따른 초음파 전달속도의 변화 경향은 낙엽송과 소나무가 비슷한 것으로 나타났다.

낙엽송과 소나무에 대한 함수율과 압축탄성계수의 관계는 그림 3과 같으며 섬유포화점 이하의 함수율에서는 함수율이 증가할수록 탄성계수가 감소하였고 섬유포화점 이상의 함수율에서는 함수율 변화에 따른 탄성계수의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이는 일반적으로 널리 알려져 있는 함수율에 따른 목재 강도의 변화 경향과 일치하는 것으로서 압축강도와 함수율의 관계도 그림 3과 비슷한 경향을 나타내었다.

그림 4는 낙엽송과 소나무에서 초음파 전달속도와 압축강도와의 관계를 나타내고 있다. 그림 4에서 보면 목재의 압축강도와 초음파 전달속도 사이에는 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 목재의 압축강도가 증가할수록 목재 내부에서의 초음파 전달속도도 직선적으로 증가하였으며 이 관계를 초음파를 이용한 목재의 비파괴시험에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 낙엽송과 소나무 사이에는 큰 차이가 없었으나 낙엽송이 소나무보다 약간 높은 값을 나타내었고 이들은 거의 비슷한 직선의 기울기를 나타내었다.

낙엽송과 소나무에서 초음파 전달속도와 압축탄성

계수 사이의 관계는 그림 5와 같으며 목재의 초음파 전달속도와 압축 탄성계수 사이에는 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 낙엽송과 소나무는 거의 비슷한 값을 나타내었으며 두 수종을 대표하는 직선의 기울기도 거의 비슷한 값을 나타내었다.

3.2 섬유경사각의 영향

섬유경사각과 초음파 전달속도와와의 상관관계는 낙엽송과 소나무에 대하여 각각 그림 6 및 7과 같다. 그림 6 및 7에서 보는 바와 같이 섬유경사각과 초음파 전달속도 사이에는 매우 높은 상관관계가 있으며 섬유경사각이 증가함에 따라서 거의 직선적이거나 또는 약간의 지수함수적인 관계로 초음파 전달속도가 감소함을 알 수 있다. 1차함수(직선) 또는 지수함수의 두 가지 모두 매우 높은 상관계수를 나타내었으나 섬유경사각에 따른 초음파 전달속도의 변화는 직선보다는 지수함수로 표현하는 것이 적당할 것으로 생각된다. 초음파는 목재 내에서 세포벽의 셀룰로즈 배열방향에 직각보다는 평행한 방향으로 더 빨리 전달되기 때문에 시험편의 섬유경사각이 증가할수록 시험편 내에서 초음파의 전달거리가 증가하기 때문에 속도가 감소하는 것으로 생각된다. 그림 6 및 7에서 보면 섬유경사각에 따른 초음파 전달속도의 감소는 경사각 60도 정도까지 급격히 감소하다가 그 이후에 감소 정

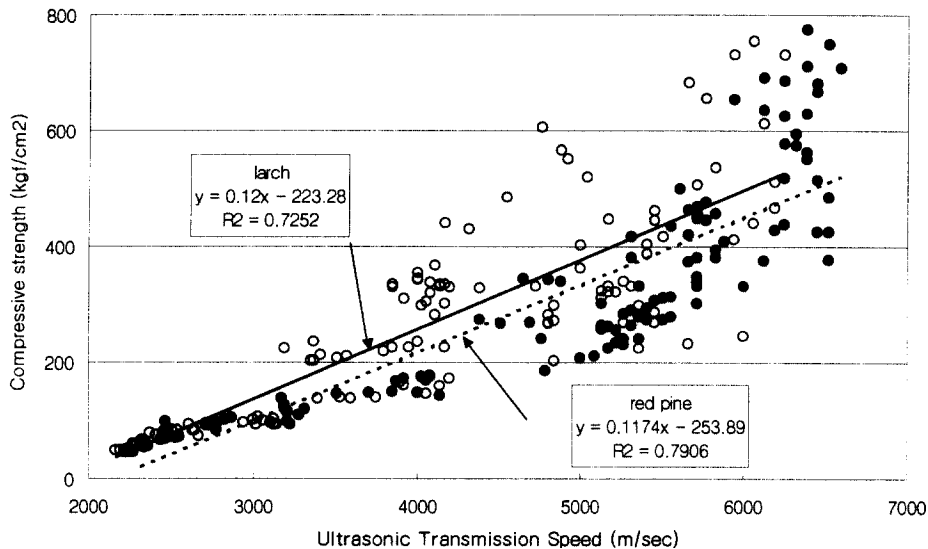


Fig. 4. Relationship between compressive strength and ultrasonic transmission speed: ● - red pine; ○ - larch.

함수율과 섬유경사각이 목재의 압축강도 및 초음파 전달속도에 미치는 영향

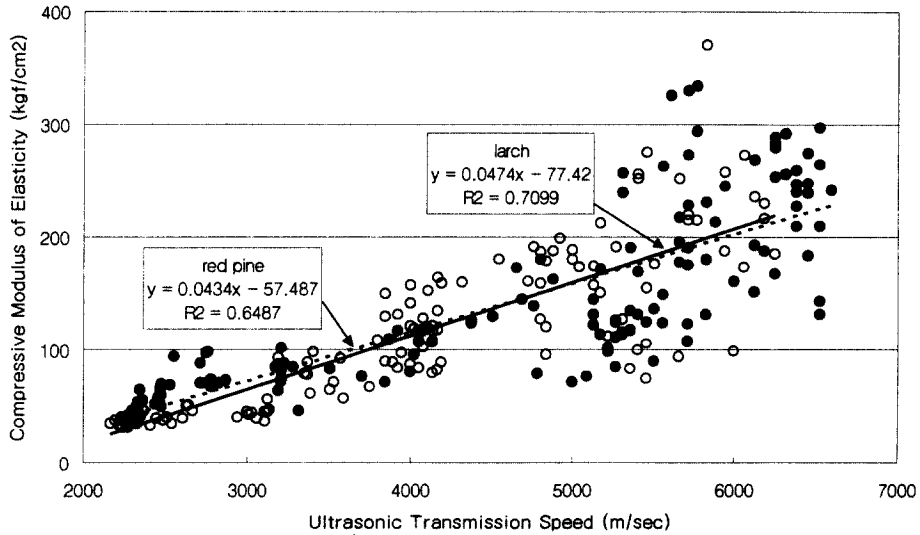


Fig. 5. Relationship between compressive modulus of elasticity and ultrasonic transmission speed: ● - red pine; ○ - larch.

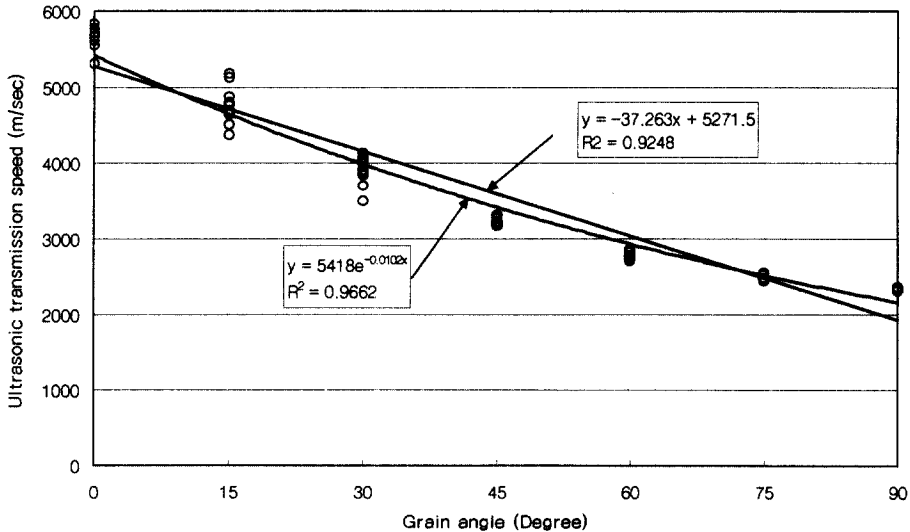


Fig. 6. Relationship between ultrasonic transmission speed and grain angle for air-dried larch specimens.

도가 완화됨으로써 Mishiro(1996)의 연구결과와 일치하였다.

낙엽송과 소나무에서 압축탄성계수와 압축강도 사이의 관계는 그림 8과 같으며 이들 두 가지 값들 사이에도 서로 비례하는 높은 상관관계가 있음을 알 수

있다. 압축탄성계수는 비파괴시험을 통하여 얻을 수 있는 계수이고 압축강도는 파괴시험을 통하여 얻을 수 있는 값이기 때문에 이들 사이의 관계를 이용하면 비파괴시험으로부터 파괴시의 강도를 예측할 수 있다.

장 상 식

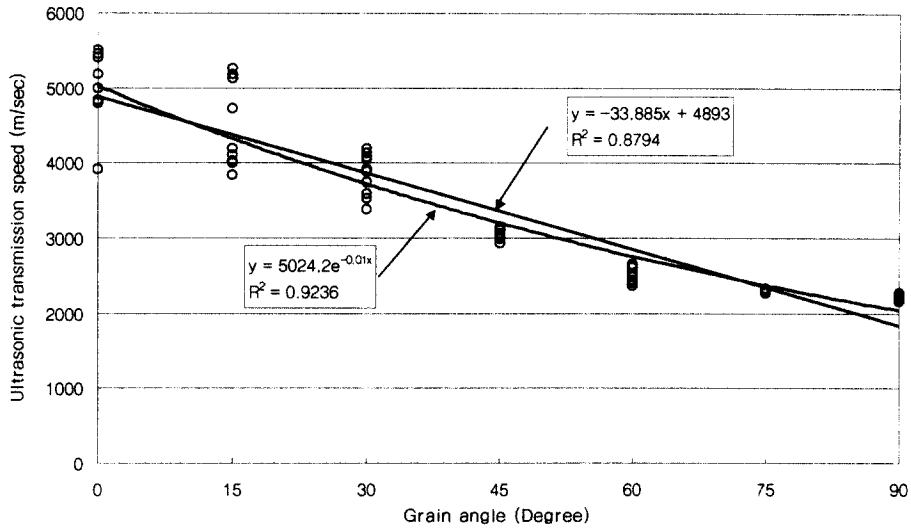


Fig. 7. Relationship between ultrasonic transmission speed and grain angle for air-dried red pine specimens.

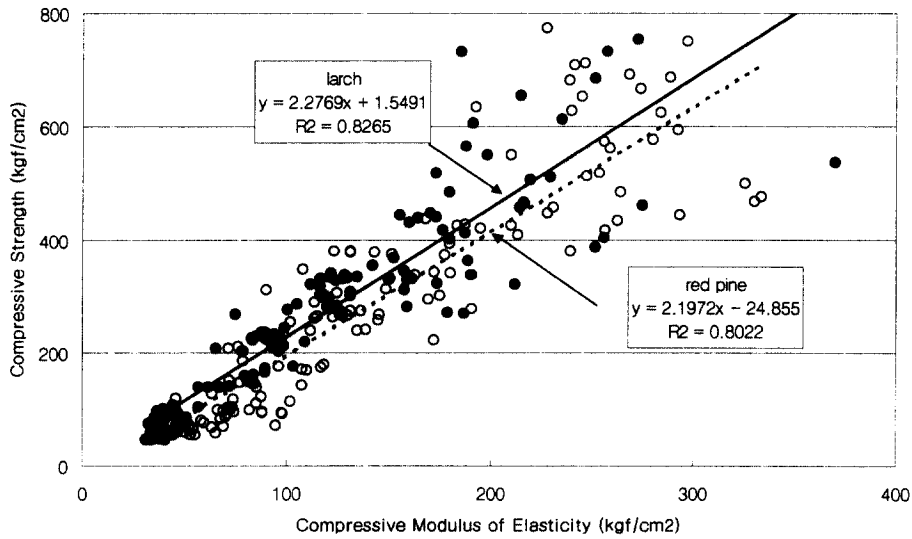


Fig. 8. Relationship between compressive modulus of elasticity and compressive strength:
 ● - red pine; ○ - larch.

4. 결 론

앞으로 국산재 중에서 구조용재로 활용 가능성이 높은 낙엽송과 소나무를 공시재료로 하여 목재의 함

수율과 섬유경사각이 목재 내의 초음파 전달속도에 미치는 영향을 조사하였다. 소나무와 낙엽송에서 초음파 전달속도는 섬유포화점 이하에서 함수율에 반비례하는 관계를 나타내었으며 그 이상의 높은 함수율

상태에서는 초음파 전달속도는 함수율에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었다. 이러한 관계를 이용하면 여러 가지 함수율 상태에서 초음파 전달속도를 측정함으로써 목재의 섬유포화점을 추정할 수 있을 것으로 생각된다. 두 가지 수종 모두에서 초음파 전달속도는 섬유경사각에 대해서도 반비례하는 경향을 나타내었다. 섬유경사각과 초음파 전달속도 사이의 관계는 직선이나 또는 지수함수의 형태로 표현될 수 있었다. 초음파 전달속도와 압축강도 사이에는 직선적으로 비례하는 관계를 나타내었으며 이 관계를 이용하여 초음파 전달속도를 측정하여 압축강도를 추정할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 한국산업규격. 1985. KS F 2202. 목재의 평균 나이트 간격, 함수율 및 비중 측정 방법. 기술표준원.
2. 한국산업규격. 1999. KS F 2206. 목재의 압축 시험 방법. 기술표준원.
3. Bertholf, L.D. 1965. Use of elementary stress wave theory for prediction of dynamic strain in wood. Washington State University, College of Engineering Bulletin 291, Pullman, WA, USA.
4. Henrique, L.M. 1986. On the acousto-ultrasonic-characterization of wood fiber and board. *Journal of Acoustic Emission* 5(2): 67-70.
5. James, W.L. 1961. Internal friction and speed of sound in Douglas-fir. *Forest Products Journal* 11(9): 383-390.
6. Kodama, Y. and T. Akishika. 1993. Nondestructive inspection of defects in wood by use of the pulse-echo technique of ultrasonic waves (I): Measurement of enclosed knots. *Journal of the Japan Wood Research Society* 39(1): 7-12.
7. Kodama, Y., et al. 1994. Nondestructive inspection of knots in wood by use of the frequency shift of propagated acoustic waves. *Journal of the Japan Wood Research Society* 40(5):513-518.
8. Lemaster, R. L. and D. A. Donfeld. 1987. Preliminary investigation of the feasibility of using acousto-ultrasonics to measure defects in lumber. *Journal of Acoustic Emission* 6(3): 157-165.
9. Lemaster, R. L. and S. Quarles. 1990. The effect of same-side and through-thickness transmission modes on signal propagation in wood. *Journal of Acoustic Emission* 9(1): 17-24.
10. Miller, D. G. 1963. Nondestructive testing of cross-arms for strength. Department of Forestry Pub. No. 1021, FORINTEK Canada Corp., Ottawa, Ontario, Canada.
11. Miller, D. G. 1966. Factors affecting the "outturn" of a nondestructive test. *Canadian Forest Industries*, April.
12. Minamisawa, A. and A. Ozawa. 1994. Measurement of moisture diffusivity in woods using ultrasounds. *Journal of the Japan Wood Research Society* 40(10): 1052-1058.
13. Mishiro, A. 1995. Ultrasonic velocity in wood and its moisture content I. Effects of moisture gradient on ultrasonic velocity in wood. *Journal of the Japan Wood Research Society* 41(12): 1086-1092.
14. Mishiro, A. 1996. Effects of grain and ring angles on ultrasonic velocity in wood. *Journal of the Japan Wood Research Society* 42(2): 211-215.
15. Mishiro, A. 1996a. Ultrasonic velocity and moisture content in wood II. Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (1); Moisture content below the fiber saturation point. *Journal of the Japan Wood Research Society* 42(6): 612-616.
16. Mishiro, A. 1996b. Ultrasonic velocity and moisture content in wood III. Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (2); During desorption from a water-saturated condition. *Journal of the Japan Wood Research Society* 42(10): 930-936.
17. Nakamura, N. and N. Nanami. 1993. The sound velocities and moduli of elasticity in the moisture desorption process of sugi wood. *Journal of the Japan Wood Research Society* 39(12): 1341-1348.
18. Patten-Mallory, M. 1990. Detecting brown-rot decay in southern yellow pine by acousto-ultrasonics. pp29-44 in *Proceedings of the 7th International Nondestructive Testing of Wood*

장 상 식

- Symposium. 1989 September 27-29, Madison, WI, USA.
19. Patten-Mallory, M., K. D. Anderson and R.C. DeGroot. 1988. An acousto-ultrasonic method for evaluating decayed wood. pp167-189 in Proceedings of the 6th International Nondestructive Testing of Wood Symposium. 1987 September 14-16, Pullman, WA, USA.