

목재의 단면적과 수분경사가 초음파 전달 특성에 미치는 효과^{*1}

강 호 양 · 이 관 영^{*2}

Effects of Cross-Sectional Dimension and Moisture Profile of Small Specimens on Characteristics of Ultrasonic Wave Propagation^{*1}

Ho-Yang Kang and Kwan-Young Lee^{*2}

ABSTRACT

Effects of the cross-sectional dimension and moisture profile of wood specimens on the ultrasonic sound velocities of radiata pine heartwood and sapwood. Each moisture profile model specimen was made by composing five wood pieces with various moisture contents. As the cross-sectional dimensions decreased the ultrasonic velocities of both heartwood and sapwood decreased by 4~8%. In the ultrasonic signals transmitted through the specimens low frequency components more dominated than high frequency components as the dimension of cross section increased. The specimens with the same average MCs and different moisture profiles showed different ultrasonic velocities. By plotting the ultrasonic velocities against the average moisture contents of the inner three pieces of the moisture profile model specimens it was revealed that three distinct plot patterns existed.

Keywords : ultrasonic velocity, longitudinal stress wave, moisture gradient, cross section, waveform,

- 요약 -

본 논문에서는 목재시편의 횡단면적과 수분경사가 라디에타파인 심재와 변재의 초음파 전달속도에 미치는 효과를 조사하였다. 각 수분경사 모델시편은 함수율이 다른 다섯 개의 소편을 배합하여 만들었다. 횡단면적이 작아질수록 초음파 전달속도는 심재와 변재 모두 4~8% 감소하였다. 수분경사 모델시편을 투과한 초음파 신호를 분석한 결과, 횡단면적이 클수록 저주파 신호가 고주파 신호보다 분명한 주류를 이루었다. 평균 함수율이 같더라도 수분경사가 다르면 시편의 초음파 전달속도는 다르게 나타났다. 초음파 전달속도와 수분경사 모델시편의 내측 평균 함수율의 분포는 함수율에 따라 세 가지 서로 다른 형태를 나타냄이 밝혀졌다.

1. 서 론

초음파를 이용한 비파괴적 방법으로 목재의 탄성계

수를 측정하고 이를 바탕으로 목재등급을 판정하는 기술이 개발되어 실용화 단계에 있다 (Ross and Pellerin, 1991). 그러나 초음파 신호는 함수율과 온도

*1 접수 1999년 12월 20일. Received Dec. 20, 1999

본 연구는 한국학술진흥재단의 1997년도 학술연구조성비 지원에 의해 수행되었음.

*2 충남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chungnam National University, Dae-Jeon 305-764, Korea

에 영향을 받기 때문에 이에 대한 보정이 필요하다 (Gerhards, 1975; Sakai *et al.*, 1990; Ross and Pellerin, 1991; Sandoz, 1993; 강, 1999). 따라서 함수율과 초음파 전달속도의 관계를 이용하여 목재의 함수율을 측정하려고 몇몇 학자들이 시도하였다 (James *et al.*, 1982; Simpson, 1998).

함수율과 온도 외에 탐촉자와 목재의 접촉면적, 목재 내 수분경사 등도 초음파 전달특성에 영향을 미치는 것이 일련의 예비실험에서 밝혀졌다. 목재 내 수분경사가 초음파 전달속도에 미치는 영향에 대해서는 Mishiro(1995)가 모델시편을 이용하여 조사하여 발표하였으나, 탐촉자와 목재의 접촉면적이 초음파 전달속도에 미치는 영향에 대한 연구는 발표된 바가 없다.

Mishiro는 수분경사가 초음파 진행방향과 평행할 때는 시편의 초음파 전달속도는 각 소재 초음파 전달속도의 평균과 비슷하나, 수분경사가 초음파 진행방향과 수직일 때는 각 소재 중 전달속도가 제일 빠른 것에 영향을 받는다고 결론 지었다.

본 연구에서는 Mishiro의 실험방법과 마찬가지로 여러 함수율의 모델시편을 만들어 수분경사가 초음파 전달 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다. Mishiro(1995)는 2.5MHz의 높은 주파수대의 초음파 탐촉자를 사용하였으나 본 실험에서는 54kHz의 저주파수대를 사용하였다. 주파수가 높을수록 음파의 직진성이 강하나 감쇄가 심하다. 그러나 주파수가 낮아지면 탐촉자가 커지더라도 감쇄가 적어지기 때문에 대부분의 목재 비파괴 검사에는 저주파가 사용된다. Mishiro가 사용한 MHz 대의 탐촉자는 소형시편에서만 가능하며 목재등급판정 등에는 사용할 수 없다.

본 연구에서는 실제 목재등급판정에 사용되는 저주파수대 탐촉자를 사용하였으며 실험 중 초음파 파형의 변화를 탐지하였다. 저주파수대 탐촉자는 직경이 크기 때문에 시편의 횡단면이 작으면 탐촉자와 시편의 접촉면적이 작아지므로 충분히 큰 출력을 낼 수 없다. 이 같은 이유로 시편의 단면적 변화에 따른 초음파 전달속도 변화를 같이 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시수종

본 연구에 사용된 공시수종은 radiata pine(*Pinus radiata*)으로 인근 제재소에서 원목을 제제한 무결점

정목재를 구입하여 사용하였다.

공시재료의 생재밀도(전건무게-생재부피 기준)는 심재가 0.48, 변재가 0.43이었다.

2.2 실험방법

2.2.1 횡단면적 실험 시편의 제작

기건 정단판재의 심재와 변재에서 두 개씩의 시편을 떼어낸 후 사면 대패하여 초기시편 규격인 가로 5cm, 세로 5cm, 길이 20cm가 되도록 만들었다. 아래 2.2.3항에 설명한대로 PUNDIT와 오실로스코프를 이용하여 이 초기시편의 초음파 전달시간과 파형을 측정한다. 이 시편의 가로를 1cm 잘라 5X4시편을 만들어 같은 방법으로 초음파 전달시간과 파형을 측정하였다. 이같이 하여 5X5, 5X4, 5X3, 5X2, 4X2, 3X2, 2X2의 7가지 단면적의 초음파 전달시간과 파형을 측정하였다. 하나의 시편으로 점차 규격을 줄여 가면서 측정하므로 써 각 횡단면 규격마다 시편을 따로 만들어 생길 수 있는 시편간 오차를 줄였다.

시편의 함수율을 측정하지 않았으나 실온에서 오랜 동안 방치하였기 때문에 기건 함수율을 가지고 있을 것으로 추정하였다.

2.2.2 수분경사 실험 시편의 제작

기건 정단판재를 사면 대패하여 폭 5.0cm, 두께 0.5cm, 길이 15cm의 시편 21개를 만들었다. 시편을 3개씩 7그룹으로 나누어 각 그룹을 흡습시키거나 방습시켜 목표 함수율 30%, 25%, 20%, 15%, 10%, 5%, 0% 로 만들었다. 각 그룹에서 한 개씩은 함수율 시편으로 전건시켜 각 그룹의 정확한 함수율을 아는데 사용하였다.

기건 시편의 흡습을 위해 상온에서 물이 담긴 데시케이터에 시편을 넣고 수시로 무게를 측정하여 목표한 무게에 도달하면 꺼내어 비닐주머니에 넣고 밀봉하였다. 기건보다 낮은 함수율을 만들기 위해 기건 시편을 50~60℃ 오븐에 넣고 건조하였다.

시편은 각 함수율 당 1쌍씩 총 14개를 사용하여 5층의 수분경사시편을 만들었다. 예를 들면 표층에 30%시편 2개, 중층에 20%시편 2개 그리고 중앙에 5%시편 1개를 포개어 샌드위치 형태로 만들었다. 5개 시편을 적층하여 수분경사시편을 만들었으므로 총 35개의 함수율 조합을 만들 수 있었으며 각 함수율 조합의 표층시편과 내층시편의 순서를 바꾸므로 또 6개의 조합을 만들 수 있다. 따라서 총 210개의 수분경사시편을 사용하여 초음파 측정을 실시하였다.

2.2.3 초음파 전달속도 및 파형 측정

초음파 장비인 PUNDIT를 사용하여 초음파 전달 시간을 측정하였으며 전달된 파형은 오실로스코프에 저장하였다. 본 연구에 사용된 초음파 측정장비는 영국 CNC Electronic사의 PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)로 크게 초음파 발생 장치, 한 쌍의 압전 탐촉자 (piezoelectric transducer)와 동축 케이블로 구성되어 있다.

출력전압은 1.2kV를 사용하였으며, 초당 10개의 burst 신호를 발생시키도록 조절하였다. 직경 50 mm, 길이 38 mm, 공진 주파수 54 kHz의 종과 압전 탐촉자를 송신과 수신에 모두 사용하였으며 고밀도 그리스를 couplant로 사용하였다. 전달시간의 보정은 직경 50mm, 길이 158mm의 황동 보정쇠를 사용하였으며 전달시간이 25.7us를 나타내도록 교정하여 사용하였다.

사용된 오실로스코프는 FLUKE PM2284B로 100MHz, 4CH의 아날로그/디지털 겸용으로 파형을 50개까지 동시에 저장할 수 있으며 RS232c Interface를 통해 PC와 교통신호를 주고받을 수 있다.

2.3 계산식

2.3.1 초음파 전달속도식

PUNDIT로 측정된 투과시간으로 초음파 전달속도를 구하는 식은 다음과 같다 (식 [1]).

$$V = \frac{L}{t} \dots\dots\dots [1]$$

여기서,

V : 초음파 전달속도 (m/sec)

L : 탐촉자간 거리 (m)

t : 투과시간 (sec)

3. 결과 및 고찰

3.1 초음파 전달속도

초음파 전달속도는 심재가 변재보다 높았는데 (그림 1), 이는 심재와 변재의 비중 차에 기인한 것으로 볼 수 있다. 본 실험에 사용된 심재의 평균비중은 0.48으로 변재의 0.43보다 높았다. 초음파 전달속도는 탄성계수의 제곱근에 비례하고 밀도의 제곱근에 반비례하므로 밀도만 볼 때 밀도가 증가하면 초음파 전달속도가 감소하여야 하나, 목재는 밀도가 증가하면 탄성계수도 따라서 증가한다. 본 실험결과는 탄성계수의 증가가 밀도의 증가보다 컸기 때문에 초음파 전달속도가 증가하였음을 보여준다.

3.2 횡단면적에 따른 초음파 특성

그림 1에 나타났듯이 횡단면적이 감소할수록 초음파 전달속도는 변재의 5x5 시편의 제외하고, 심재와 변재 모두 감소하였다. 탐촉자의 직경이 5cm 이

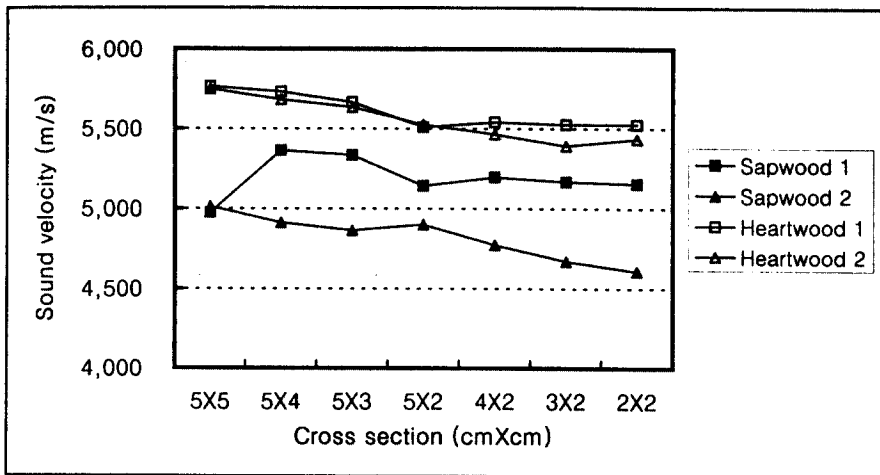


Fig. 1. Sound velocity of the ultrasonic stress wave transmitted through specimens of 20cm length with various cross sections.

므로 5×5 시편의 측정치를 기준하면, 횡단면적이 5×5에서 2×2로 변함에 따라 변재2는 초음파 전달속도가 8% 감소하였으며 심재1과 2는 각각 4%와 5% 감소하였다. 변재1은 5×5 시편의 초음파 전달속도를 신뢰할 수 없어 두 번째 시편인 5×4 시편 값을 기준할 때 4%의 감소를 나타냈다.

이같이 초음파 전달속도가 감소하는 요인으로 탐촉자 접촉면적의 감소를 들 수 있다. 탐촉자 접촉면적이 작아지면 초음파가 목재에 충분히 전달되지 못하기 때문에 투과되는 초음파 신호가 작아 PUNDIT가 감지를 늦게 하므로 투과시간이 길어지게 될 수가 있다. 투과시간이 지연되는 현상은 초음파 탐촉자의 온도가 실온보다 높을 때에도 발생하는데 투과신호가

작아지기 때문에 발생한다 (Kang and Booker, in press).

오실로스코프로 측정된 심재2 시편의 투과초음파 신호 크기와 파형을 그림 2에 나타내었다. 최대진폭은 횡단면적 크기가 중간인 5X2에서 나타났으며 횡단면적이 증가하거나 감소하면 최대진폭도 감소하였다. 그러나 이러한 경향은 심재2 시편에서만 나타났으며 다른 시편에서는 일정한 경향을 보이지 않았다. 뿐만 아니라 그림 2에 보인바와 같이 횡단면적에 따른 최대진폭의 변화는 그리 크지 않았다. 따라서 초음파 전달속도 감소의 주원인이 탐촉자 접촉면적 감소라고 볼 수 없다.

그림 2의 파형을 살펴보면 횡단면적이 넓을 때는 낮은 주파수 파가 주를 이루다가(그림 2-a) 좁아지면 점차 높은 주파수 파로 바뀌어 최종에는 높은 주파수 파만 남았다(그림 2-f, g). 즉 횡단면적이 좁아지면 저주파수 파는 손실되고 고주파 파만 남게되었다. 초음파 전달속도 감소의 원인을 이러한 파형 변화 때문으로 본다면 저주파수 파가 고주파수 파보다 목재 속을 더 빨리 진행한다고 할 수 있다.

3.3 수분경사에 따른 초음파 특성

수분경사 모델시편 210개의 초음파 전달속도와 시편의 평균 함수율과의 관계가 그림 3에 나타나있다. 이미 알려진 바와 같이 전체적으로 함수율이 감소함에 따라 초음파 전달속도가 증가하는 모습을 보이나 평균 함수율이 같은 시편도 수분경사 차이에 따라 초음파 전달속도의 차이를 나타내므로 산포도가 매우 분산된 형태를 보이고 있다.

목재 내를 투과하는 초음파의 경로가 아직 완전히 밝혀지지 않았다. 수분경사가 존재하는 목재 내를 초

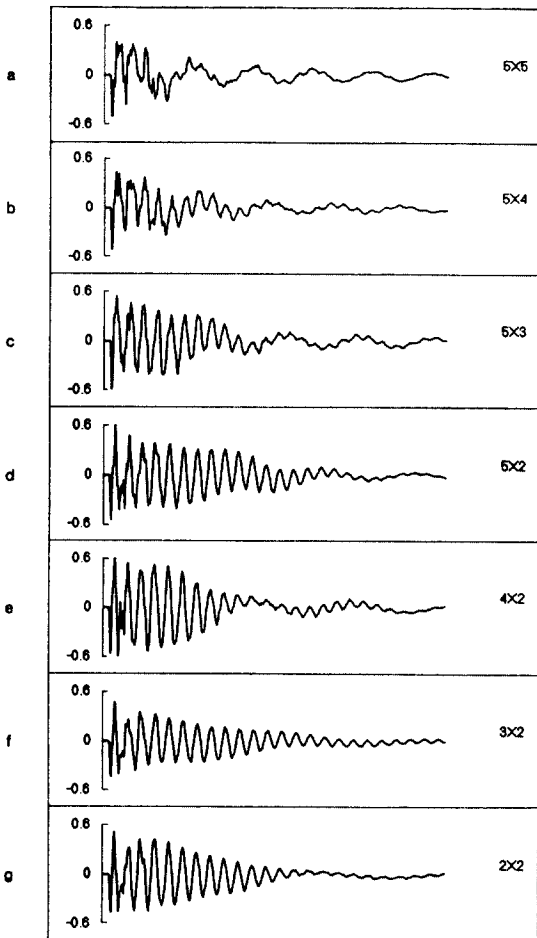


Fig. 2. Waveforms of the ultrasonic stress waves transmitted through 7 different cross sectional specimens.

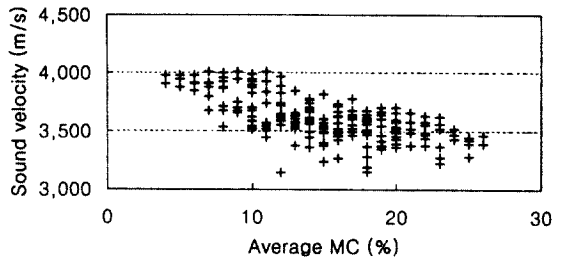


Fig. 3. Ultrasonic velocity vs. average moisture content for specimens with various moisture gradients.

목재의 단면적과 수분경사가 초음파 전달 특성에 미치는 효과

음파가 투과할 때 표층과 내층 중 어느 곳의 함수율에 영향 받는지를 알기 위해 각 시편의 다섯 개 소편 중 내층 3개 소편의 평균 함수율에 대한 초음파 전달속도를 조사하였다. 그 결과를 그림 4에 나타냈는데 흥미로운 사실은 평균 함수율에 따라 분포 형태가 다르다는 것이다.

모델시편의 평균 함수율의 낮을 때 (그림 4-a)는 내층 함수율이 증가함에 따라 초음파 전달속도도 증가하나, 평균 함수율이 중간일 때 (그림 4-b)는 내층 함수율이 평균함수율과 같은 지점에서 최대를 나타냈다. 또 평균 함수율이 높을 때 (그림 4-c)는 함수율이 증가함에 따라 감소하였다.

내층 함수율이 평균 함수율보다 낮다는 것은 반대로 표층 함수율이 평균 함수율보다 높다는 것을 의미

한다. 그림 4의 결과를 설명하는데 여러 가지 어려움이 있으나 다음과 같이 해석할 수 있다.

목재의 평균 함수율이 낮을 때는 초음파가 목재 내에서 비교적 자유롭게 전파되기 때문에 표면반사가 많이 일어나 표층을 통한 전달이 많이 일어난다. 따라서 표층 함수율 영향을 많이 받게 된다. 그 때문에 표층 함수율이 낮으면, 다시 말해 내층 함수율이 높으면 초음파 전달속도가 증가하고 반대 경우 초음파 전달속도가 감소한다. 이는 목재 평균 함수율이 낮을 경우이고, 그림 4의 c 처럼 평균 함수율이 높으면 초음파가 자유롭게 전파되지 못하기 때문에 표면반사의 효과가 발생하지 못하고 내층만을 통해 전달된다. 따라서 초음파 전달속도는 내층 함수율에 따라 변한다.

목재의 평균 함수율이 중간인 그림 4의 c 경우는 내층이든 표층이든 높은 함수율에 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 즉 내층 함수율이 평균 함수율보다 높으면 내층 함수율 증가에 따라 초음파 전달속도가 감소하였으며, 내층 함수율이 평균 함수율보다 낮으면 표층 함수율 증가에 따라 초음파 전달속도가 감소하였다.

그러므로 위의 해석으로 토대로 볼 때 수분경사가 존재하는 목재 내의 초음파 전달경로는 함수율에 따라 달라지며 따라서 초음파 전달속도는 수분경사에 영향받는다 할 수 있다.

3. 결 론

Radiata pine 심재와 변재의 이용하여 목재 시편의 단면적과 수분경사가 초음파 전달속도와 파형 등에 미치는 효과를 조사하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 초음파 전달속도는 심재가 변재보다 높았는데 이는 밀도차에 기인하는 것으로 밝혀졌다.
- 2) 횡단면적이 감소할수록 초음파 전달속도는 심재와 변재 모두 4~8% 감소하였다.
- 3) 투과 초음파의 파형은 횡단면적이 넓을 때는 낮은 주파수 파가 주를 이루나 횡단면적이 좁을 때는 높은 주파수 파가 주를 이루었다. 즉 횡단면적이 좁아지면 저주파수 파는 손실되고 고주파 파만 남게되었다.
- 4) 평균 함수율이 같은 시편도 수분경사가 다르면 초음파 전달속도가 다르게 나타났다.
- 5) 평균 함수율에 따라 수분경사에 대한 초음파

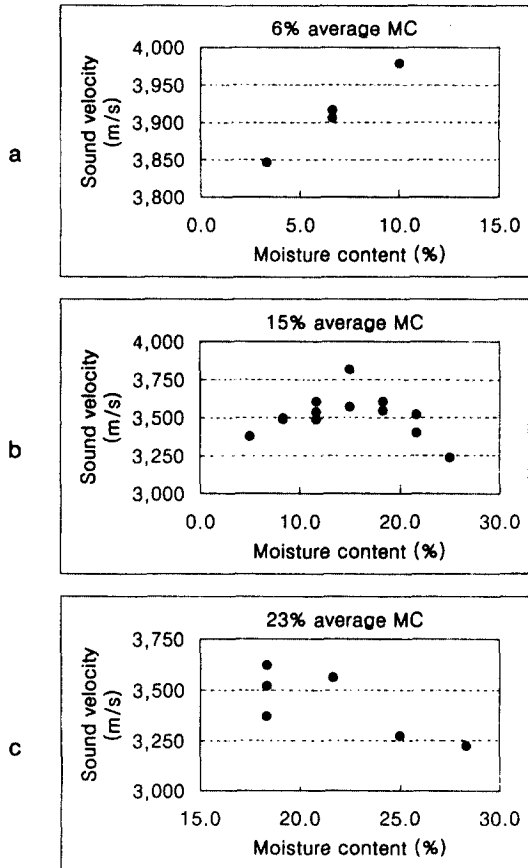


Fig. 4. Ultrasonic velocity vs. the average moisture content of three middle layers for specimens with the same moisture contents.

전달속도의 분포도가 다르게 나타났다.

참 고 문 헌

1. Gerhards, C.C. 1975. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC. Forest Products Journal 25(4): 51-57.
2. James, W.L., R.S.Boone and W.L.Galligan. 1982. Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. Forest Products Journal 32(9): 27-34.
3. Kang, H. and R. Booker. In press. Variation of stress wave velocity with MC and temperature. Wood Science and Technology.
4. Kang, Ho-Yang and R. Booker. 1997. Stress wave velocity as an in-kiln moisture meter. NZFRI Report 5648, Rotorua.
5. Mishiro, A. 1995. Ultrasonic velocity in wood and its moisture content I. Effects of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood. Mokuzai Gakkaishi 41(12): 1086-1092.
6. Ross, R.J. and R.F.Pellerin. 1991. NDE of green material with stress wave: preliminary results using dimension lumber. Forest Products Journal 41(6): 57-59.
7. Sakai, H., A.Minamisawa and K.Takagi. 1990. Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. Ultrasonics 28 November: 382-385.
8. Sandoz, J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. Wood Science and Technology 27: 373-380.
9. Simpson, W.T. 1998. Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. Wood and Fiber Science 30(4): 405-413.
10. 강호양. 1999. 목재 초음파 전달속도에 대한 온도의 영향. 목재공학 27(1): 50-55.