

아세틸화 처리가 대나무재의 초음파 전달 속도에 미치는 영향*1

강 호 양*2 · 이 관 영*2

Effect of Acetylation on Ultrasonic Velocity of Bamboo*1

Ho-Yang Kang*2 · Gwan-Young Lee*2

ABSTRACT

The ultrasonic velocity and dynamic MOE of acetylated bamboos were investigated using PUNDIT, a transit time measuring device for longitudinal ultrasonic propagation. Bamboo specimens were boiled in acetic anhydride for 2, 4 and 6 hours, and the maximum average WPG (Weight Percentage Gain) of 19% was obtained at 6 hours. The volumes of acetylated bamboos increase with boiling time and WPG, while as WPG increases their oven-dry densities generally increase with a concave around 5% WPG. This oven-dry density pattern likely influences the trends of ultrasonic velocity and dynamic MOE, which generally decrease with a convex around 5% WPG. It is postulated that during boiling extractives in a bamboo move and aggregate at its surfaces transiently, resulting in the increase of ultrasonic velocity and dynamic MOE. To explain the fact that ultrasonic velocity varies with WPG a simple model was proposed and some ultrasonic properties of a transmitted wave were examined.

Keywords : Acetylation, bamboo, PUNDIT, ultrasonic velocity, transit time, dynamic MOE

1. 서 론

대금, 단소 등 전통 대나무 악기는 우리 주위에서 흔히 구할 수 있는 재료로 만들 수 있으나 그 맑고 청아한 소리는 우리 정서에 잘 맞기 때문에 오랜 세월을 사랑받아 온 우리 고유의 악기이다. 오랜 기간 계승 발전되어 왔지만 제작 방법이 과학화되지 못해 악공들은 지금도 경험에 의한 전통적인 제작방법에 의존하고 있어 제작기간이 오래 걸리며 제작 중 뿐만 아니라 완성 후에도 불량 발생

하여 시간과 재료의 손실을 가져오고 있다. 더군다나 훌륭하게 제작되어 좋은 소리를 내던 악기도 일정기간이 지나면 타액에 의해 대나무 내부가 부후되어 음을 잃어버리게 된다. 이러한 문제를 막기 위해 일부 저가의 대나무 악기는 내부가 페인트로 칠해져 있다.

악기재를 포르말린, 무수초산, 페놀, PEG 등으로 화학처리하여 악기의 음향적 성질을 향상시키고자 노력하였다(Akitsu *et al.*, 1991; Yano *et al.*, 1992). 목재 악기의 화학처리는 두 가지 음향적 성질 향상 효과를 가

*1 접수 1997년 2월 10일 Received February 10, 1997

본 연구는 1994년도 한국과학재단 연구비(과제번호:941-0600-061-2)지원에 의해 수행되었음.

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

지는데, 첫째는 약기재의 흡습성과 치수안정성 개선이고, 둘째는 약기재의 탄성계수 변화이다 (Rowell *et al.*, 1993; Yano *et al.*, 1993; 강, 1996). 약기재의 흡습성과 치수안정성이 개선되면 환경 변화에 영향을 받지 않고 일정한 소리를 낼 수 있기 때문에 음향적 성질이 좋아지며 오래 간직할 수 있다. 좋은 약기재는 가볍고 탄성계수가 높은 것이어야 한다고 알려져 있다(이 등, 1989; Takeshi, 1991). 따라서 화학처리에 의해 약기재의 탄성계수가 높아진다면 음향적 성질도 좋아진다고 볼 수 있다. 화학처리된 약기재가 처리전보다 치수안정성과 탄성계수가 모두 개선된다면 더 말할 나위 없겠지만 치수안정성은 좋아지나 탄성계수는 감소하는 경우도 있다 (Akit-su, 1991).

본 연구는 아세틸화 처리를 통한 대나무 약기재의 음향적 특성 개선에 관한 연구의 일부로 前報(강, 1996)에서 아세틸화 처리 대나무재의 치수안정성 효과에 대하여 발표하였으며, 본 연구에서는 아세틸화 처리 대나무재의 초음파 전달 속도와 탄성계수 변화에 대해 조사하였다.

목재의 음향적 성질 조사를 위해 주로 많이 사용되는 동적탄성계수 측정 방법에는 공진법과 응력파법이 있다 (Bucur, 1995). 前者는 기본 공진 주파수와 시편의 길이를 이용하여 소리 전달속도를 구한 후 식[1]을 이용하는 방식이고 後者는 초음파 전달속도를 장비로 직접 측정하는 방식이다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 모두 사용하여 예비실험을 실시하였으며 특히 공진법은 두 가지 서로 다른 장비를 사용하여 보았다. 그러나 공진법으로 측정한 값은 장비간 뿐만 아니라 동일한 장비 내에도 오차가 심하여 본 논문에서는 응력파법의 결과에 대하여만 언급하였다. 대나무 시편의 길이가 짧고 간벽의 두께가 얇아 시편에 금속편을 부착하는데 어려움을 겪는 등 본 연구에는 공진법이 적당치 않았다.

$$C = (E / \rho)^{1/2} \text{ or } E = \rho C^2 \dots\dots\dots [1]$$

- C : 물질 내 소리전달 속도 (m/sec)
- E : 동적탄성계수(Pa) (1 Pa = 1 kg/m sec²)
- ρ : 밀도 (kg/m³)

前報(강, 1996)에서 사용한 아세틸화 방법은 무수초산을 대나무 시편에 흡수시킨 후 여분의 무수초산을 제거하고 나서 120℃에서 8시간 반응시킨 것으로 중량증가율을 최대 6% 밖에 얻지 못하였다. 그러나 본 연구에서는 전보와는 달리 대나무 시편을 무수초산에 넣고 자비처리함으로써 중량증가율을 좀 더 높이고자 노력하였다. Book-

er(1996)는 자비처리 방법으로 라디에타 파인의 중량증가율을 25%까지 높일 수 있었다고 보고하였다.

Akitsu 등(1991)은 양단자유공진법으로 아세틸화 처리 목재의 진동특성을 조사하여 무처리 목재에 비해 비중은 증가하나 동적탄성계수와 감쇠율은 감소한다고 보고하였다. 이 결과에 의하면 물질 내 소리전달 속도는 밀도에 반비례하고 동적탄성계수에 비례하므로(식[1]) 아세틸화 처리 목재의 소리전달 속도는 무처리 목재보다 감소한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 결과가 아세틸화 대나무재에도 나타나는가를 알기 위해 응력파법으로 초음파 전달시간을 측정하여 전달속도와 동적탄성계수를 구하였다. 또 대나무재를 통과한 초음파의 특성을 알기 위해 Acousto-ultrasonic 방법을 사용하여 투과된 초음파의 amplitude, Root Mean Square Voltage (RMS), duration time을 측정하였다. 본 연구의 주목적은 대나무재의 아세틸화 처리도에 따른 초음파 전달 속도와 동적탄성계수 변화를 측정하고 그 원인을 밝히는 데 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료 및 시편

지리산 쌍계사 주위 대나무 밭에서 5~6년생으로 추측되고 지상 1m지점의 외경이 4.5cm 정도의 왕대(*Phyllostachys bambusoides*)를 직접 채취하여 공시 재료로 사용하였다. 절간 간격이 20cm 이상 되는 부분만 잘라 실험실로 운반하였다. 실험실 내에서 대나무의 길이를 60cm로 절단하여 3일간 기건시킨 후 할열의 발생을 방지하기 위해 조심스럽게 40℃ 와 60℃ 오븐에서 2주 정도 건조시켰다. 건조 후 대나무의 평균 함수율은 약 3.2%가 되었다.

아세틸화 처리를 위해 건조 대나무를 15cm 길이로 절단하고 격벽(nodal diaphragm)을 뚫어 약품의 이동이 원활하도록 하였다. 시편을 무처리와 자비시간(2, 4, 6시간)에 따라 무작위로 네 그룹으로 나누어 그룹별 시편의 수는 16개가 되도록 하였다. 간벽(culm wall) 두께에 따른 중량증가율을 비교하기 위해 각 그룹 내에서 간벽 두께 4mm 이상과 미만의 두 가지로 분류하였다. 간벽 두께는 캘리퍼로 양 마구리의 3지점을 각각 측정하여 평균하였다. 아세틸화 연속처리를 위해 위와는 별도로 시편 3개를 선택하였다.

대나무의 밀도를 측정하기 위해 시편부피를 수침법으로 측정하였다. 시편에 수분이 흡수되는 것을 막기 위해 시편 표면에 파라핀 왁스를 도포하여야 하나 초음파 전달

시간 측정에 영향 미칠 것을 염려하여 도포하지 않았다. 대신 가능한 한 신속히 측정하려고 노력하였으며 부피측정 전후에 시편 무게를 재어 무게 변화를 관찰하였으나 큰 차이가 발견되지 않았다.

2.2 아세틸화 자비처리

시편을 직경 29cm 원형플라스크에 넣고 99% 공업용 무수초산을 시편 수에 맞추어 충분히 부은 후 원형플라스크 위에 환류냉각기를 설치하였다. 무수초산과 시편이 담긴 원형플라스크를 용량 12l 멘틀로 무수초산의 비점인 138~140℃까지 가열하였다. 비점에 도달한 후에는 과열되지 않도록 온도 조절기를 사용하여 온도를 일정하게 유지하였다. 자비시간을 2, 4, 6시간으로 구분하여 실시하였으며 무수초산이 끓기 시작한 시점부터 자비시간을 계산하였다.

자비처리 후 시편에 남아 있는 미반응 무수초산과 생성물 초산을 제거하기 위해 시편을 물로 씻은 후 통기가 잘되는 그늘에 4일간 말린 후 40℃와 60℃ 오븐에서 차례로 건조한 다음 최종적으로 103℃ 오븐에서 전건하여 정도 0.01g의 디지털 저울로 무게를 측정하였다.

그룹 아세틸화 처리 실험에 존재하고 있는 그룹간 시편변이를 없애기 위해 별도로 선택된 3개의 시편을 2시간씩 연속적으로 3회 아세틸화 자비처리를 실시하였다. 2시간의 자비처리가 끝날 때마다 시편을 전건하여 초음파 전달속도를 측정하였으며 한 번 끓였던 무수초산은 다시 사용하지 않았다.

2.3 초음파 측정 시스템

본 연구에 사용된 초음파 측정 장비는 영국 CNC Electronic사의 PUNDIT(Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)로 원래 콘크리트의 비파괴 검사용으로 개발되었으나 최근에는 목재 비파괴 선별에도 많이 사용되고 있다. 이 장비는 크게 초음파 발생장치, 한 쌍의 압전 탐촉자(piezoelectric transducer)와 그들을 연결하는 동축 케이블로 구성되어 있으며, 초음파 발생 장치는 펄스 발생기, 지연 시간 조절기, 수신증폭기, 10MHz 펄스 진동자, 그리고 게이트와 카운터 등을 포함하고 있다.

본 연구에 사용된 초음파 측정 장치 시스템은 Fig. 1과 같다. PUNDIT내 초음파 발생 장치에서 발생된 펄스는 송신 탐촉자를 진동시켜 응력파를 발생시킨다. 이 응력파는 초당 10개가 발생되어 송신 탐촉자와 시편의 접촉면을 통과하여 시편에 전달된다. 시편을 통과한 응력파는 시편과 수신 탐촉자의 접촉면을 통과하여 수신 탐촉자를 진동시킨다. 수신 탐촉자에 의해 응력파는 전기적 신호로 바뀌어 PUNDIT내 카운터와 오실로스코프로 전달된다.

본 연구에서는 직경 50mm, 길이 38mm, 공진 주파수 54kHz의 종파 압전 탐촉자를 송신과 수신에 모두 사용하였다. 일반적으로 탐촉자와 초음파 전달 물체사이에서 발생하는 투과시간 지연을 막기 위해 고진공 그리스 등의 접촉제(couplant)를 사용하나 접촉제의 침투로 인한 목재의 물리적 성질 변화를 막기 위해 밀착성이 좋은

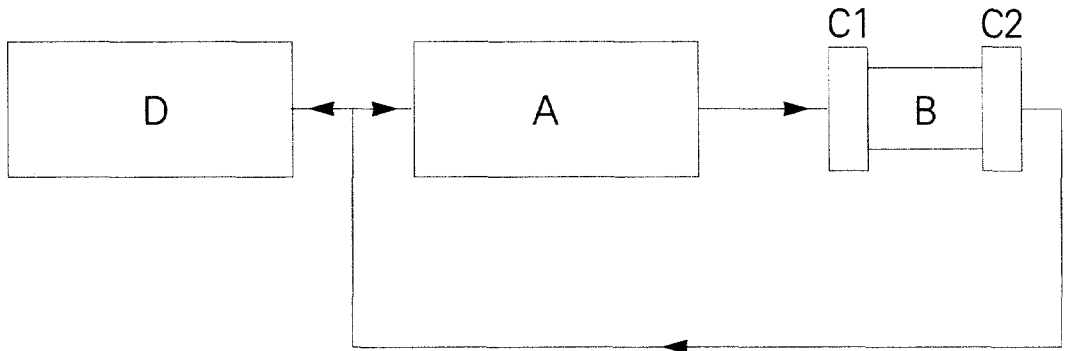


Fig. 1. Apparatus set-up for transit time measurement of ultrasonic stress wave transmitting through a bamboo specimen.

Notes: A : PUNDIT, B : a bamboo specimen, C1 : a transmitter transducer (54kHz), C2 : a receiver transducer(54kHz), D : an oscilloscope.

박막 고무판을 접촉제 대신 사용하기도 한다 (Sakai et al., 1990). 본 연구에서는 아세틸화 연속처리 실험을 제외하고는 모든 측정시 고진공 그리스를 접촉제로 사용하였다. 아세틸화 연속처리 시편은 반복하여 사용하기 때문에 접촉제를 사용할 수 없었다. 대신 고무판을 사용하고자 하였으나 여러 번 예비실험 결과 대나무의 밀도가 높고 탐촉자와 접촉하는 면이 비교적 매끈하기 때문에 고무판을 사용하지 않을 때와 별 차이가 없었기 때문에 고무판을 사용하지 않고 측정하였다. 그러나 시편에 접촉제를 발랐을 때보다는 투과시간이 1 내지 2 μ s 지연되는 것은 피할 수 없었다.

2.4 초음파 특성 조사

Fig. 1에서 오실로스코프 대신 AE 장비를 설치하여 시편을 투과한 초음파의 특성을 조사하였다. 본 연구에 사용된 AE장비는 미국 Physical Acoustics사의 LOCAN 320으로 80486 프로세서가 부착되어 있다. 프리엠프는 같은 회사 제품으로 40dB와 60dB를 선택할 수 있게 되어 있는 것으로 노이즈를 낮추기 위해 40dB를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 중량증가율과 자비시간

중량증가율은 식[2]를 이용하여 아세틸화 처리 전후의 전건무게 차로 구하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 그룹 처리시 평균 중량증가율은 2시간 4.6%, 4시간 5.4%, 6시간 13.9%로 자비시간에 따라 증가하였으나 2시간과 4시간 사이에는 약간 증가하고 4시간과 6시간 사이에 급격히 증가하는 모습을 보여 전체적으로는 직선적인 관계라고 말할 수 없었다. 그러나 후에 실시한 아세틸화 연속 처리에서는 중량증가율과 자비시간은 거의 직선적 관계를 보였다(Table 2). 그룹 처리시 16개 시편

을 한꺼번에 동근 플라스크에 넣음으로써 모든 시편이 무수초산에 완전히 잠기지 못하고 일부 시편은 반만 잠긴 상태로 자비처리되었기 때문에 모든 시편에 아세틸화 반응이 균일하게 일어나지 못한 것으로 보인다. 그에 반해 연속처리에서는 단 3개의 시편만 자비처리하였기 때문에 비교적 균일한 아세틸화 반응이 일어났다고 볼 수 있다. 따라서 본 결과로 중량증가율과 자비시간의 관계식을 규정지을 수 없으나 자비시간이 길수록 중량증가율이 높아진다는 것은 의심할 여지가 없다.

$$WPG(\%) = \frac{W_{ac} - W_{od}}{W_{od}} \times 100 \dots\dots\dots [2]$$

WPG : 중량증가율

W_{ac} : 아세틸화 처리 후 시편의 전건무게

W_{od} : 처리 전 시편의 전건무게

중량증가율이 증가할수록 치수안정성도 증가하기 때문에 치수안정성 증가만을 목적으로한다면 자비처리를 통해 매우 높은 아세틸화도를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 중량증가율 13.9%를 6시간 자비처리로 얻었으나 실제 아세틸화도는 이보다 클 것으로 생각된다. 자비처리가 길수록 처리시편에서 더 많은 추출물이 빠져 나오고 더 많은 목재 분해가 일어나 시편의 실질 무게는 점차 줄어들지만 모든 중량증가율은 아세틸화 처리 전 시편의 전건무게를 기준으로 계산하였기 때문에 실질 중량증가율은 측정치보다 더 클 것이다.

한편 간벽두께별 중량증가율은 간벽두께 4mm미만 시편이 4mm이상 시편보다 2시간 처리 후에는 3.2%, 4시간 처리 후에는 10.4%, 6시간 처리 후에는 14.6% 높았다. 이 같은 중량증가율 차이는 자비처리 시간이 길어질수록 커짐을 알 수 있었다. 이는 대나무의 아세틸화 반응은 주로 내층에서 일어나기 때문에(강, 1996) 내층의

Table 1. Average and the sample standard deviation of WPG, transit time, sound velocity, dynamic MOE and physical properties of acetylated bamboo for each group of 16 specimens.

Boiling time (hours)	WPG (%)	Physical properties			Transit time (μ s)	Sound velocity (m/sec)	MOE (MPa)
		Length (mm)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)			
Control	0.0(0.0)*	149.7(1.4)	72.2(11.6)	773.3(73.7)	29.9(2.4)	5.030(415)	19.707(3.749)
2	4.6(0.9)	149.7(0.9)	80.1(10.3)	726.8(65.8)	29.2(1.4)	5.138(243)	19.247(2.610)
4	5.4(0.9)	149.2(1.2)	82.8(10.2)	713.6(74.0)	29.5(1.9)	5.073(322)	18.402(2.726)
6	13.9(2.7)	149.5(1.0)	85.9(9.4)	788.8(48.4)	31.3(2.0)	4.789(284)	18.136(2.300)

Notes : * : Sample standard deviations in parentheses.

Table 2. Average of WPG, transit time, sound velocity, dynamic MOE and physical properties of three bamboo specimens for sequential acetylation.

Boiling time (hours)	WPG (%)	Physical properties			Transit time (μ s)	Sound velocity (m/sec)	MOE (MPa)
		Length (mm)	Volume (cm^3)	Density (kg/cm^3)			
Control	0.00	149.0	95.7	787.8	32.1	4.649	17.064
2	5.5	148.9	98.4	780.7	30.2	4.937	19.042
4	16.7	149.0	100.7	843.9	33.3	4.509	17.275
6	19.0	149.1	102.8	843.5	37.2	4.005	13.550

표면적에 따라 중량증가를 차이가 나타난다고 볼 수 있다. 그러나 본 연구에 사용된 시편의 내경은 비교적 균일하였기 때문에 내층의 표면적이 일정하다고 가정하면 간벽두께가 얇은 시편의 단위 중량당 표면적이 더 크다고 할 수 있다. 중량증가율은 아세틸화 처리전 전건중량을 기준하므로 얇은 시편의 중량증가율이 더 높아짐을 알 수 있다.

3.2 시편의 길이, 부피, 밀도 변화

초음파의 투과시간(transit time)은 시편 길이에 비례하므로 아세틸화 처리에 의해 시편 길이가 변하였는지를 여부를 아는 것은 매우 중요하다. 본 실험에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 투과시간은 증가하였으나 시편 길이는 부피 증가와 무관하게 거의 일정하였다. 그러나 목재의 부피 변화는 항상 포아송비에 따른 길이 변화를 수반하기 때문에 아세틸화 처리된 대나무의 길이 변화를 다시 확인할 필요가 있었다. 이를 위해 폭 1 내지 2cm, 길이 15cm의 대나무 시편을 같은 방법으로 아세틸화 처리하여 시편 길이를 측정하였다. 시편이 쭈고 길기 때문에 약간의 휨이 발견되기는 하였지만 길이의 변화는 없었다. 따라서 아세틸화 처리에 의한 대나무 시편의 길이 변화는 없다고 할 수 있다.

시편의 부피는 길이와 달리 자비처리시간이 길어질수록, 중량증가율이 커질수록 직선적으로 증가하였다(Table 1). 이 결과는 "아세틸화 반응은 수산기의 수소를 수소성 아세틸기로 치환하므로 수분 흡착력을 감소시킬 뿐만 아니라 부피를 증대시킨다"는 Akitsu 등(1991)의 목재 실험 결과와 일치한다. Plona(1980)는 부피 변화가 초음파 전달 속도에 영향을 미친다고 보고하였다.

그룹 처리시 아세틸화 처리 시편의 전건밀도는 무처리 773.3 kg/cm^3 , 2시간 726.8 kg/cm^3 , 4시간 713.6 kg/cm^3 으로 자비시간 4시간(중량증가율 5.4%)까지 감소하였으나 6시간(중량증가율 13.9%)에서는 788.8 kg

$/\text{cm}^3$ 으로 무처리보다 증가하였다(Table 1). 한편 연속 처리에서는 무처리 787.8 kg/cm^3 , 2시간 780.7 kg/cm^3 으로 2시간까지 감소하고 4시간, 6시간은 각각 843.9 kg/cm^3 , 843.5 kg/cm^3 으로 무처리보다 증가하였다. 자비시간만으로 비교하면 전건밀도가 제일 낮을 때는 그룹 처리시 4시간, 연속 처리시 2시간으로 차이를 보이지만, 이 때 두 처리의 중량증가율은 각각 5.4%와 5.5%로 차이가 없었다. 따라서 아세틸화 대나무의 최저 전건밀도는 중량증가율 5%를 약간 웃도는 지점에 존재할 것으로 추측된다.

3.3 초음파 투과시간, 전달속도, 동적탄성계수

그룹 처리(Table 1)와 연속 처리(Table 2)의 투과시간을 비교하면 같은 중량증가율에서 연속처리가 약간 큰 것을 알 수 있는데 이는 투과시간 지연에 따른 것으로 앞서 언급한 대로 연속처리 시편은 접촉제를 사용하지 않았기 때문이다. 중량증가율 5% 지점인 그룹 처리 4시간과 연속 처리 2시간을 비교하면 각각 29.5 μ s와 30.2 μ s로 0.7 μ s의 차이를 보였다. 이러한 투과시간 차이는 초음파 전달 속도와 동적탄성계수의 계산에도 영향을 미쳐 이 두 값 모두 연속 처리가 그룹 처리보다 적게 나왔다.

초음파 전달속도는 투과시간을 아래 식(3)에 적용하여 계산하였다.

$$C = L / t \quad (3)$$

C : 소리전달 속도(m/sec)

L : 탐촉자 사이의 거리, 소재 길이(m)

t : 통과시간(μ s)

그룹 처리에 있어서 무처리, 2시간, 4시간의 평균 전달 속도는 각각 5,030m/sec, 5,140m/sec, 5,070m/sec으로 2시간에서 약간 높아졌다가 4시간에서 다시 낮아졌

으나 이들 처리 시간간 큰 차이를 보이지 않았다(Table 1). 이는 처리시간에 따른 중량증가를 차가 그리 크지 않은 때문으로 보인다. 그러나 6시간은 4.789m/sec로 크게 낮아졌는데 이는 6시간 중량증가율이 13.9%로 다른 자비시간의 중량증가율과 비교해서 매우 크게 증가했기 때문으로 해석할 수 있다. 따라서 초음파 전달 속도는 중량증가율과 상관관계가 있으며 중량증가율이 증가함에 따라 감소한다고 할 수 있다. 이러한 결과는 연속처리에 의해서도 입증되었다(Table 2). 연속처리 6시간의 초음파 전달 속도는 4.005m/sec로 무처리 4.649m/sec보다 매우 낮았다.

초음파 전달 속도와 중량증가율의 관계에서 흥미 있는 것은 그룹 처리와 연속 처리 모두 무처리부터 자비처리 2시간(또는 4시간), 즉 중량증가율 5% 내외까지 초음파 전달 속도가 증가하였다가 중량증가율이 더 커질수록 초음파 전달 속도가 급격히 감소한다는 사실이다. 연속 처리의 동적탄성계수도 이러한 경향을 뚜렷이 나타냈다(Table 2). 즉 자비처리 2시간에서 최대 동적탄성계수 19.042MPa를 나타냈다. 이러한 현상은 대나무 내의 물리적 변화에 의한 것으로 예상되며 특히 추출물의 이동이 일부 영향을 미칠 것으로 생각되었다. 따라서 추출물의 농도와 대나무 시편의 색상변화를 조사하였다.

3.4 자비처리 중 대나무의 색상 변화

자비처리 후 대나무 시편의 색상은 내층과 표층 모두 짙은 갈색을 띠었는데 진한 정도는 자비시간에 반비례하

여 2시간 처리재의 색깔이 제일 진하였으며 처리시간이 길어질수록 점차 열어졌다. 이에 반해 무수초산 용액의 불투명도는 자비시간에 비례하여 증가하였다. 용액을 UV spectroscopy로 280nm 흡광도를 조사한 결과 2시간, 4시간, 6시간 용액의 흡광도가 각각 0.047, 0.054, 0.062로 위 사실을 정량적으로 뒷받침해 주었다.

자비처리 중 시편의 갈색 변화 요인은 높은 자비온도(138~140℃)에서 열분해된 대나무의 segment와 대나무 내부로부터 표면으로 이동하는 추출물의 두 가지를 꼽을 수 있다. 추출물은 대나무 내부에서 표면으로 이동하여 표면에 결집하게 되는데 이 때가 자비처리 2시간 지점으로 본 실험에서는 중량증가율 5% 근처인 것으로 설명할 수 있다. 추출물과 열분해된 segment는 밀도가 높은 대나무의 표층보다는 내층을 통해 이동하여 내층의 표면에 결집함으로써 내층 표면의 밀도가 높아져서 초음파 전달 속도가 빨라지고 동적탄성계수가 높아진다고 할 수 있다. 이 때 내층 표면의 밀도는 추출물에 의해 일시적으로 높아지나 전체 대나무의 밀도는 열분해와 추출물의 이동으로 오히려 낮아졌다고 볼 수 있다(Table 1, 2).

그러나 자비처리가 계속되면 표면에 결집하였던 추출물과 segment는 표면에서 용출되기 때문에 대나무의 색상은 점차 열어지게 되나 아세틸화 반응에 의해 밀도가 증가한다고 설명할 수 있다. 아세틸화 반응에서 생성된 초산도 대나무의 리그닌을 분해함으로써 대나무 색상을 열게 하고 용액의 불투명도를 높이는 데 일익을 담당한다고 볼 수 있다.

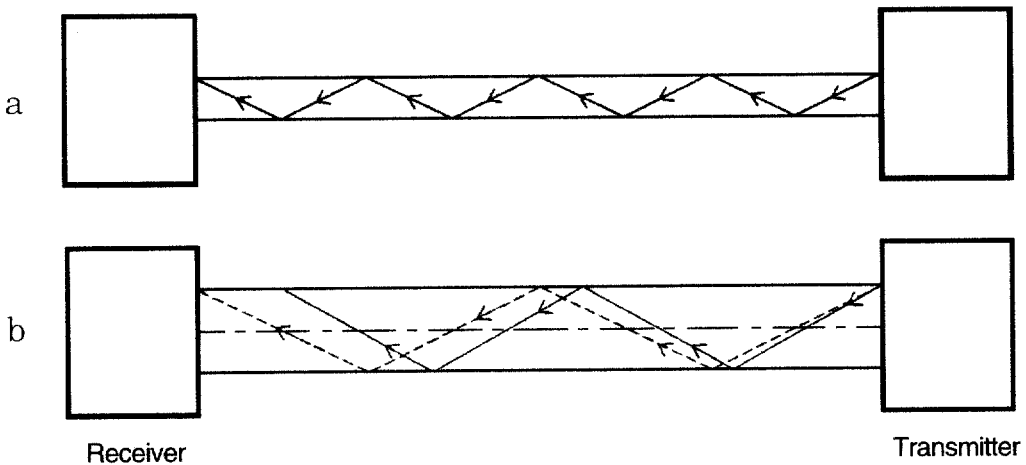


Fig. 2. Schematic diagram of ultrasonic propagation through bamboo walls. It shows that transit time delays when an ultrasonic wave transmits through a thicker wall swollen due to acetylation.

3.5 초음파 전달 속도와 부피 변화

중량증가율 5% 지점을 제외하면 초음파 전달 속도는 중량증가율이 증가할수록 감소하고 부피는 중량증가율과 직선적인 관계를 가지고 있으므로(Table 1, 2) 초음파 전달 속도는 부피 변화에 영향받음을 알 수 있다 (Plona, 1980). 초음파 전달 속도는 시편의 길이에 절대적으로 영향을 받지만 본 연구에서 조사한 바는 아세틸화 처리에 의해 시편의 길이는 거의 변화하지 않았다. 따라서 부피의 증가는 간벽의 두께만 증가하였음을 의미한다. 아세틸화 반응에 의한 대나무 간벽 두께가 증가함에 따라 초음파 전달 속도가 감소하는 원인을 다음과 같이 해석할 수 있다.

초음파 전달 방식은 매질의 크기에 따라 bulk wave와 guide wave로 구분되는데 대나무 시편은 초음파 전달 통로, 즉 격벽 두께가 탐촉자 직경에 비해 매우 좁으므로 후자에 해당한다. 초음파의 bulk wave는 물체를 최단 직선으로 통과하나 초음파의 guide wave는 물체 표면에서 반사하면서 진행한다. 이러한 초음파의 반사 진행을 그림으로 나타내면 Fig. 2a와 같은데 반사파가 대나무 간벽을 진행하면서 대나무 구성 요소를 진동시키므로 초음파 신호의 감쇠가 일어난다. 그러나 간벽 두께가 증가하더라도 구성 요소가 동일하다면 초음파의 통과시간은 일정하게 된다. 즉 Fig. 2a 실선과 2b 점선의 길이는 동일하다. 그러나 아세틸화 반응에 의해 간벽의 두께가 두꺼워지면 대나무 구성 요소에 치환된 아세틸기의 segment 수가 늘어나므로 진동 감쇠가 증가하여 통과시간이 지연되고(Fig. 2b의 실선) 따라서 초음파 전달 속도가 감소하게 된다.

3.6 초음파 특성

투과된 초음파 신호의 특성을 조사한 결과 아세틸화 처리재와 무처리재 사이에는 차이가 뚜렷하였으나 처리재간에는 차이가 나타나지 않았다(Table 3). 처리재간 초음파 전달 속도의 차이를 초음파 특성 분석을 통해 해석

Table 3. Average of amplitude, RMS and duration of ultrasonic signals transmitted through acetylated bamboo specimens.

Boiling time (hours)	Amplitude (dB)	RMS (V)	Duration (μ s)
Control	84	0.59	1300
2	90	0.62	1470
4	91	0.62	1460
6	89	0.62	1460

하고자 하였으나 본 실험 결과는 만족스럽지 못하였다. 그러나 아세틸화 처리 대나무를 통과한 초음파 신호는 무처리재를 통과하였을 때보다 Amplitude와 평균 전압(RMS)이 높고 유지시간(Duration)이 긴 것을 알 수 있다.

4. 결 론

초음파 투과시간 측정장치인 PUNDIT를 사용하여 아세틸화 대나무재의 초음파 전달 속도와 동적탄성계수 변화를 조사하고 그 원인을 분석하였다.

아세틸화 대나무재의 중량증가율은 뚜렷한 직선 관계를 나타내지 않았으나 자비시간에 따라 꾸준히 증가하였으며 6시간 자비처리로 평균 19%의 중량증가율을 얻었다. 대나무재의 부피는 중량증가율에 따라 직선적으로 증가하였다. 아세틸화 대나무의 전진밀도는 중량증가율이 증가함에 따라 약간 감소하다 증가하였는데 중량증가율이 5%를 약간 웃도는 지점에서 최소 전진밀도를 나타냈다. 이러한 경향은 초음파 전달속도와 동적탄성계수에도 영향을 미쳐 같은 지점에서 이 두 값은 최대치를 나타냈으며 그 후에는 중량증가율이 증가함에 따라 급격히 감소하여 무처리보다 낮아졌다. 이러한 현상은 자비처리 중 추출물이 내부에서 표면으로 이동 응집하였다가 용출되는 과정에서 일시적으로 대나무 표면의 밀도가 높아져 초음파 전달 속도와 동적탄성계수가 증가하는 것으로 해석할 수 있으며 자비처리 시간에 따른 대나무재의 색상 변화가 이를 뒷받침하였다. 아세틸화 처리에 의해 초음파 전달 속도와 동적탄성계수가 감소하는 원인은 대나무 조직내 치환된 아세틸기가 초음파의 진동감쇠를 증가시켜 투과시간이 지연되기 때문으로 설명하였다.

투과 초음파 특성을 조사한 결과 아세틸화 대나무재와 무처리재간에는 뚜렷한 차이를 나타냈으나 처리재간에는 차이가 없었다.

참 고 문 헌

1. Akitsu H., M. Norimoto, and T. Morooka. 1991. Vibrational properties of chemically modified wood. *J. Japan Wood Res. Soc.* 37(7) : 590~597
2. Booker, R., 1996. Personal Communication
3. Booker, R., and J. Froneberg. 1994. Non-destructive measurement of the sound velocity and Young's modulus of radiata

- pine. Project Report No. 3835, NZ Forest Research Institute, Private Bag 3020, Rotorua, New Zealand
4. Bucur, Voichita. 1995. *Acoustics of Wood*. CRC Press, New York : 284
 5. Plona, T. J. 1980. Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies. *Appl. Phys. Lett.* 36(4) : 259~261
 6. Rowell, R. M., R. S. Lichtenberg, and P. Larsson. 1993. Stability of acetylated wood to environmental changes. *Wood & Fiber Sci.* 25(4) : 359~364
 7. Sakai, H., A. Minamisawa, and K. Takagi. 1990. Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in wood. *Ultrasonics* 28 November : 382~385
 8. Takeshi, O. 1991. Acoustic properties of wood. *J. Japan Wood Res. Soc.* 37(11) : 991~998
 9. Yano, H., M. Norimoto, and R. M. Rowell. 1993. Stabilization of acoustical properties of wooden musical instruments by acetylation. *Wood & Fiber Sci.* 25(4) : 395~403
 10. 강호양 등. 1996. 전통 대나무 악기재의 아세틸화. *목재공학* 24(3) : 5~11
 11. 이화형 등. 1989. 목재물리 및 역학. 향문사. 한국 : 377