목재공학 31(2): 31~37, 2003
Mokchae Konghak 31(2): 31~37, 2003

목재 내 초음파 전달 경로 구명*1

이 전 제*2† · 김 광 모*2 · 배 문 성*2

Investigation of Transmission Process for Ultrasonic Wave in Wood*1

Jun-Jae Lee*2 · Gwang-Mo Kim*2 · Mun-Sung Bae*2

요 약

목재의 결함을 탐지하는 비파괴 진단법 중에서 초음파를 이용한 비파괴 시험법은 그 경제성과 사용에서 큰 장점을 지니고 있어, 그 활용과 관련된 연구가 활발히 진행 중이다. 그러나 현재까지의 연구는 입목 또는 원목 등과 같이 비파괴 평가를 위한 측정이 비교적 적은 경우에 국한되어 있어, 목조 문화재 등을 비롯한 구조물의 부재와 같이 부재의 일부 면만을 측정할 수 있는 경우에 대한 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에는 이러한 초음파 시험기의 측정방법의 제한을 극복하는 방법을 모색하고자 그 첫 번째 단계로 결함을 갖는 목재 내에서 초음파 전달 경로를 구명하고자 하였다. 다양한 전달 경로 모델을 가정하고 실제 실험과 비교를 통해 초음파 전달의 가장 적합한 모델을 제시하고자 한다. 실험 시편에 인위적인 결함을 만들어 실험한 결과 초음파가 직접전달될 수 없는 부분의 경우 그 결함을 피해서 전달되고 전달 경로는 탐촉자의 반대 측면에서 일차반사를 통해 전달되는 것으로 판단되었다.

ABSTRACT

Among the nondestructive evaluation (NDE) methods for wood defect detection, ultrasonic wave has been considered as competitive technique in terms of economics and workability. Until now, researches on application of NDE methods for wood have focused mainly on standing tree and logs. Recently, some attempts have been conducted with NDE technique, for evaluation of wooden structural members. However, wooden structural members are different from others (standing tree or log) in various aspects.

* 1 접수 2002년 6월 14일, 채택 2002년 7월 31일
이 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업 중 특정기초연구 No. Ro1-2000-000-00394-0의 일환으로 수행됨.
* 2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture & Life Science, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea
† 주저자(corresponding author) : 이전제(e-mail: junjae@snu.ac.kr)

Expecially when some parts or whole member are covered with other materials, they can't be evaluated appropriately on general NDE methods.

For the purpose of development of proper NDE technique for the wooden structural members, the ultrasonic wave transmission process investigated on artificial defect in wood. First, various types of transmission process were assumed, and then the transmission times were predicted respectively. Predicted times were compared with the measured time of ultrasonic wave and then a suitable type of transmission process is determined. In case of the ultrasonic wave doesn't transmit directly due to defect, it is reflected once only at the opposite surface of member, and the path is accord with the line of shortest length.

Keywords: nondestructive evaluation, ultrasonic wave, artificial defect, transmission process

1. 서 론

목재 산업분야에 대한 비파괴 진단에는 핵 자기 공명법, microwaves, 그리고 응력파나 초음파 CT 등과 같은 다양한 평가 방법이 사용되고 있다. 특히 초음파를 이용한 목재의 비파괴 평가는 많은 연구가 진행되어 있는 상태이다. 외국의 경우 주로 원목을 가공하여 제재목이나 단판 등을 생산할 때 원목의 활용도를 높이기 위해 내부 상태에 대한 평가를 목적으로 사용되고 있으며(Sandoz. 1994; DeGroot. et al. 1995; Fuller. et al. 1994). 목조 교량, 체육관, 전신주 등과 같은 구조물의 안전성 평가에도 비파괴 평가 방법의 적용 가능성 여부가 검토되고 있다(Emerson. et al. 1998; Lemaster. et al. 1994). 국내의 경우, 최근 들어 초음파를 이용한 목재의 비파괴적 평가 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는데 강(2001)은 촉진열화 목재의 초음파 전달 속도에 관하여 연구하였으며, Jang(2000)은 함수율과 섬유경사각이 초음파 전달 속도에 미치는 영향을 조사하였다. 초음파를 구조부재에 적용한 연구로는 홍 등(2001)이 목재 파단 부위에 대한 비파괴 평가를 실시하여 초음파를 이용하여 목재 파단 부위를 탐지할 수 있는 가장 적합한 방법을 제안하였으며, Lee 등(2001)은 목조 고건축물에 대하여 다양한 비파괴 방법을 적용하고 그 결과를 제시하였다.

국내의 경우 목조 건축물이라 하면 일반 주택보다는 전통 목조 고건축물(문화재)이 주류를 이루고 있음에도 불구하고 이러한 목조 문화재를 보수 및 유지하는데 있어 체계적이고 과학적인 접근이 이루어지지 않고 있다. 목조 문화재 구조 부재의 경우 단면이 원형으로 된 부재가 많으며 또한 벽과 벽 사이에 묻혀 있거나 부재의 일부만 노출된 경우가 많다. 이러한 경우 평가하고자 하는 구조 부재의 필요한 위치로의 접근이 어려워, 평가하고자 하는 구조 부재의 위치 및 노출상태에 따른 적합한 탐측 방법의 개발이 필요하다. 본 연구는 목조 고건축물의 탐측 방법 개발에 앞서, 목재 내 초음파 전달 속도 및 경로를 파악하였다. 특히, 결함이 존재하는 경우 초음파가 결함을 우회하는 경로 및 전달 시간을 예측함으로써 앞으로의 평가 방법 개발에 중요한 참고자료로 활용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 시편의 수종은 국산 낙엽송이며 크기는 180×153×1,000(mm)이다. 또한 옹이, 할렬 등의 결함에 의한 영향을 최소화하기 위하여 외관상 무결점 부분을 선정하여 시험편으로 제작하였다.

본 연구에서 사용한 초음파 전달 속도 탐지 장치(PUNDIT-PLUS)는 외국이나 다른 연구에서도 비파괴 평가 기기로 많이 사용되어 신뢰성을 확보한 기기이다. 주파수는 54 kHz이며 두 개의 탐촉자를 사용하여 발생되는 초음파가 시편을 지나는 동안 걸리는 전

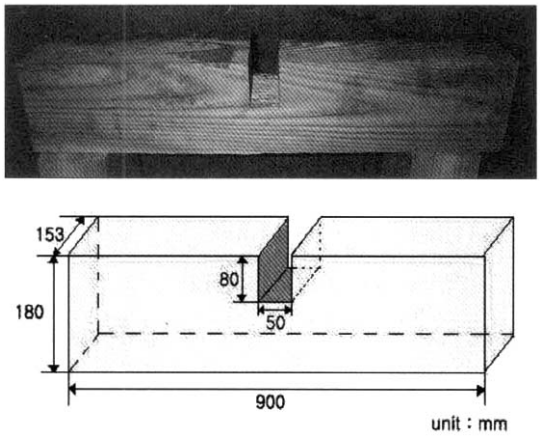


Fig. 1. The specimen with artificial defect.

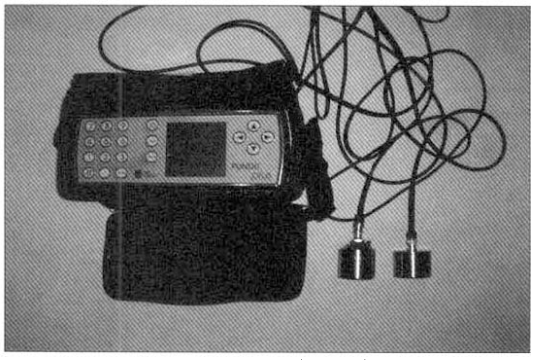


Fig. 2. Ultrasonic (PUNDIT-PLUS).

달 시간(ultrasonic wave transmission time)을 측정하여 목재 내의 상태를 정성적으로 평가한다. 초음파의 전달 시간은 목재의 비중 및 목리방향, 그리고 초음파가 전달되는 거리에 따라 달라지게 되며 전달 거리는 목재내의 결함 등에 의해 변하게 된다.

2.2. 방법

2.2.1. Hankinson Equation 구성

목리 경사각에 따른 초음파의 예측 속도를 결정하는 식은 Hnakinson 식에 근거하여 아래와 같이 주어진다(Peter. and Kucera. 1992).

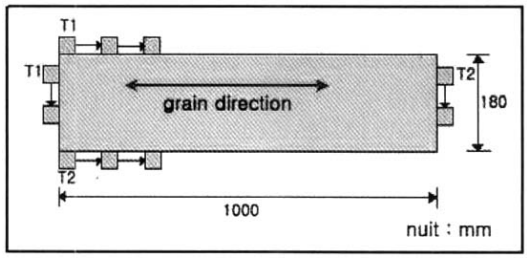


Fig. 3. Determination of $\upsilon_{//}$ and $\upsilon_{\perp}$.

Hankinson 식:

$$\upsilon_{\phi} = \frac{\upsilon_{//} \times \upsilon_{\perp}}{\upsilon_{//} \times \sin^{n}\phi + \upsilon_{\perp} \times \cos^{n}\phi} \quad (1)$$

υ_{ϕ}= sonic velocity at angle to the grain

$\upsilon_{//}$= sonic velocity parallel to the grain

$\upsilon_{\perp}$= sonic velocity perpendicular to the grain

ϕ= angle to the grain direction, as the best exponent

위 식의 $\upsilon_{//}$와 $\upsilon_{\perp}$를 결정하기 위해 Fig. 3과 같이 탐촉자 T1, T2를 서로 마주보는 상태에서 동시에 이동시키며 섬유 방향 및 섬유 직각방향으로 50 mm 간격으로 측정하였다.

υ_{ϕ}를 결정하기 위하여 탐촉자 T1을 고정시킨 상태에서 T2를 일정 간격으로 이동하면서 초음파의 전달 시간과 초음파 전달 방향이 목리와 이루는 경사각을 측정하였다.

2.2.2. 초음파 경로 파악

옹이나 기타 결함이 전혀 없는 무결점 시편을 선정하여 시편의 중앙에 목리에 수직 방향으로 폭 50 mm, 깊이 80 mm 크기의 인위적인 결함(홈)을 생성하여 T1을 고정시키고 T2를 임의로 설정한 각각의 좌표를 따라 이동하면서 초음파 전달 시간을 측정하였다 (Fig. 5). 결함을 생성한 시편에 세로축은 O, A, B, C, D로 가로축은 1에서 18까지 번호를 매겨 각각의 2차 평면에 대한 좌표 정하였다. 측정된 전달 시간에 대해 보간법을 이용하여 등가곡선을 만들고 각각의

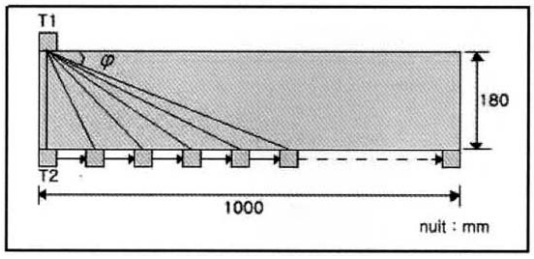


Fig. 4. Determination of v_ϕ.

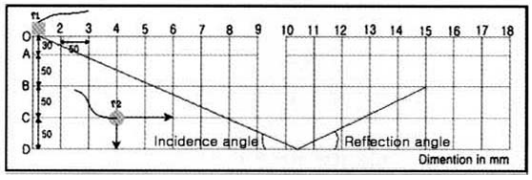


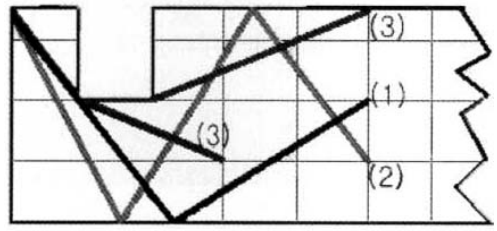
Fig. 5. The measured position of ultrasonic wave transmission time.

좌표에 대한 측정값과 Hankinson식에 의한 예측값을 비교하여 실제 초음파의 전달 경로를 파악하고자 하였다. 하지만 결함 이후에는 초음파가 직접적으로 전달될 수 없기 때문에 본 연구에서는 초음파가 부재의 반대편에서 일차반사(입사각=반사각)한다고 가정하였다. 초음파가 전달되는 좌표의 최단거리를 구하여 좌표까지의 전달거리와 초음파 진행 방향이 목리와 이루는 각도를 계산하여 목재 내부에 결함이 존재하는 경우 초음파의 전달 경로을 예측하고 실측치와 비교하였다.

2.2.3. 결함과 인접한 경우

결함 이후에서 초음파의 전달 경로를 정확하게 파악하기 위해 Fig. 5와 동일 조건에서 T1의 위치를 (0,8)좌표에 고정시키고 T2를 8번 이후의 좌표로 이동시키며 실험을 실시하였다.

결함과 T1과의 거리를 가깝게 함으로써 T2에 직접적으로 전달되거나 일차반사(입사각=반사각)에 의해 전달되는 부분 이외의 좌표점에 대하여 다른 전달 경로를 가정하였다. 가정한 초음파의 전달 경로는 일차반사(입사각 ≠ 반사각), 다중반사(입사각 = 반사각), 그리고 인위적인 결함을 우회하는 세 가지 타입



(1)first-order reflection
(2)multiple reflection
(3)transmit around defect

Fig. 6. Assuming of ultrasonic wave transmission process beyond defect.

의 전달 경로를 가정하였다. (Fig. 6.) 위의 세 가지 가정으로 예측한 전달 시간과 실측치를 비교하여 가장 적합한 전달 경로 모델을 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

목재 내에서 전달되는 초음파의 진행 경로는 아직까지 명확하게 설명되고 있지 않다. 그것은 목재가 지니고 있는 고유한 성질 때문인데 가장 큰 이유로 목재 자체가 불균일한 성질을 지니고 있기 때문이다. 이러한 목재 특성으로 인해 목재 내부에서 파의 산란, 반사, 흡수, 회절 등 다양한 현상의 발생이 가능하다. 초음파의 전달 거리가 길어질수록 일반적으로 전달 속도나 전달 시간의 변화가 발생하는데 이러한 여러 특성을 고려하여 목재 내부의 결함을 평가할 수 있다.

실험 시편에 인위적인 결함을 생성하기 이전에 예비실험을 통하여 초음파의 전달이 목리에 평행한 경우와 수직한 경우에 대하여 예비실험을 실시하였으며 측정결과는 Table 1과 같다. 측정 결과는 값들 사이에 편차가 크지 않으므로 평균값을 대표값으로 사용하였으며, 시험편 내에 초음파 전달에 심각한 영향을 미치는 결함이 존재하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

3.1. Hankinson Equation 검증

Hankinson 식에서 n값을 정하기 위해 Fig. 4에서와 같이 T1을 고정하고 T2를 50 mm 간격으로 이동시

Table. 1. Ultrasonic transmission time for parallel and perpendicular to the grain

	Ultrasonic transmission time (μs/m)	
	Mean	Standard variation
Parallel to the grain	2060	1
Perpendicular to the grain	513	0.548

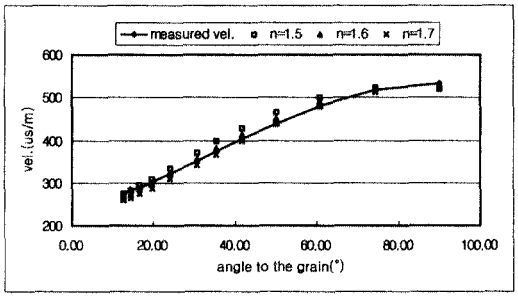


Fig. 7. Determination of n value by using the equation according to Hankinson.

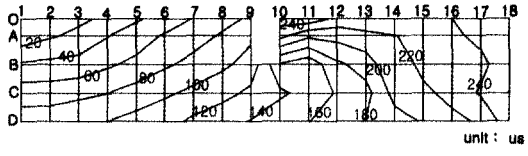


Fig. 8. The equal elevation line of ultrasonic wave transmission time.

키면서 측정한 실제 값과 식 (1)의 n을 변화시키면서 얻은 예측값을 비교하였다. Fig. 7에서 보듯 n값이 1.6일 때 예측값이 실제 측정값과 가장 근사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

T1을 (0,1)위치에 고정시키고 T2를 결함 이전 (0-9)좌표에서 이동시키며 측정한 결과와 식 (1)로 예측한 결과를 비교함으로써 Hankinson 식의 목재 내 초음파 전달 시간에 대한 적용 가능 여부를 검증하였다. 검증 방법으로는 예측치와 실측치가 일치한다는 가정 하에 t-검정을 실시하였으며, 검정결과 5% 유의수준에서 유의함을 확인하였다. 목재 내 초음파 전달 시간의 예측에 Hankinson 식의 적용이 가능함

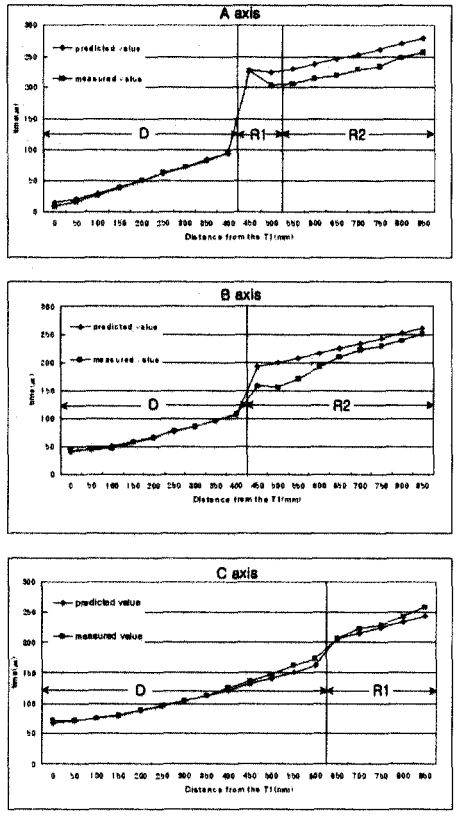


Fig. 9. The comparison of measured and predicted value for the A, B and C axis of coordinates. [D:direct reflection; R1: first-order reflection (incident angle ≠ reflect angle); R2: first-order reflection (incident angle = reflect angle)].

을 확인할 수 있었다.

각 좌표점에서 측정된 초음파 전달 시간을 토대로 보간법에 의해 만들어진 등가곡선을 Fig. 8에 나타내었다.

3.2. 초음파 전달 경로 파악

초음파가 목리와 일정 각도를 이루며 목재 내부로 전달될 경우 Hankinson 식을 이용하여 초음파 전달 시간을 예측할 수 있다. 각각의 좌표에서 측정한 실제 초음파 전달시간과 Hankinson 식을 사용한 예측값을

Fig. 9에서 비교하였다. 결함으로 인해 초음파의 직접적인 전달이 불가능한 좌표에 대해 초음파 전달 경로가 가장 짧은 일차반사(입사각 ≠ 반사각)로 파가 전달된다고 가정하였다. 이 방법으로 예측된 값과 실제 측정된 결과를 비교하였다(Fig. 9). 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 이러한 방법으로 비교적 정확하게 전달 시간을 예측할 수 있었다.

좌표 B의 경우 결함과 인접한 부위에서 예측치와 실측치 사이에 차이가 비교적 크게 나타났다. 이는 본 연구에서 사용한 탐촉자의 지름이 50 mm로 상대적으로 크고 탐촉자의 중심이 좌표점과 일치하도록 위치시킨 상태에서 실험함에 따라 T1 으로부터 직접 전달해져 오는 파가 탐촉자의 끝부분에서 탐지되어 측정된 것으로 사료된다. 차이가 크게 나타나는 T1에서의 거리가 450~600 mm인 좌표에서 실측치가 직접 전달로 예측된 이전의 실측치들과 비교적 일정한 경향으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에서 T1으로 부터의 거리가 450~500 mm인 좌표는 입사각과 반사각이 동일한 일차반사에 의한 파의 전달이 불가능한 부분으로 이 점에서의 파의 전달은 입사각과 반사각이 일치하지 않는 일차반사 중 최단 거리인 것을 전달 경로로 가정하고 예측값을 구하였다.

3.3. 결함과 인접한 경우

앞에서 언급한 바와 같이 결함 이후의 초음파 전달 경로를 확인하기 위해 Fig. 6의 3가지 타입의 전달 경로 모델에서 얻어진 예측치와 T1을 (0,8)좌표에 위치시키고 측정한 결과와 비교하였다(Fig. 10).

예측값은 세 가지 타입의 가정된 전달 경로에 대하여 Hankinson 식을 이용하여 계산한 값이다. 결과는 초음파의 전달 경로가 다중반사하거나 결함을 우회하여 전달된다고 보기 어렵다. 측정한 초음파 전달 시간에 가장 적합한 예측값은 전달 경로를 일차반사(입사각 ≠ 반사각)로 가정한 경우이다. 하지만 일차반사로 가정한 경우에도 결함주위에서는 실측치와 예측치 간에 큰 차이가 나타나는데 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 탐촉자 크기에 의해 직접 전달되는 파의 영향을 받기 때문인 것으로 사려된다.

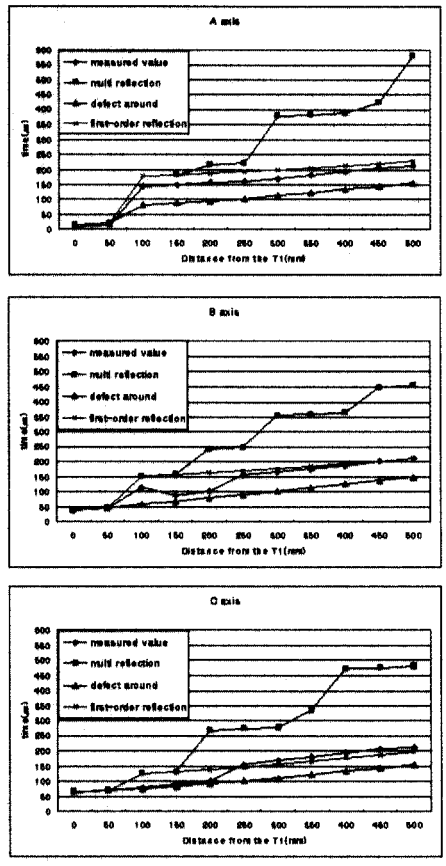


Fig. 10. The comparison of measured and predicted value for transmit path.

4. 결 론

본 연구에서는 목조 문화재의 비파괴적 평가 방법 개발에 앞서 초음파의 전달 경로를 파악하고자 인위적인 결함을 생성하여 실험을 진행하였다.

1) 목재 내 초음파가 목리와 일정 각도를 가지고 전달될 때 초음파 전달시간은 Hankinson식에 의하여 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

2) 부재 내 결함으로 인해 초음파가 직접 전달될 수 없을 경우, 초음파는 반대 면에서의 일차 반사를 통해 전달되며, 이 때의 입사각과 반사각은 전달경로를 최소로 하는 값이 되는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과를 토대로 부재의 형태 및 노출 상태

가 다른 목조 문화재의 적합한 비파괴적 평가 방법을 개발하고 이 방법을 실제 문화재 유지, 보수에 적용함으로써 과학적이고 합리적인 문화재 관리가 이루어지도록 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 강호양. 2001. 촉진열화목재의 흡습성과 초음파 전달 속도. In: Proc. The Korean society of wood science and technology annual meeting. pp. 11~14.
2. 홍순일, 김은수, 박준철. 2001. 초음파 시험기를 이용한 목재 파단 부위의 평가. In: Proc. The Korean society of wood science and technology annual meeting. pp. 5~7.
3. James J. Fuller, Robert J. Ross, and John R. Dramm. 1994. Honeycomb and Surface Check Detection Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation. Res. Note FPL-RN-0261.
4. Jean Luc J. Sandoz. 1993. Valorization of forest products as building materials using nondestructive testing. In : Proc. 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. pp. 103~109.
5. Jun Jae Lee, Kwang Chul Kim, and Mun Sung Bae. 2001. Studies on the safety assessment of the wooden ancient buildings-The qualitative evaluation of deterioration used by ultrasonic methods for wooden ancient buildings. In: Proc. The Korean society of wood science and technology annual meeting. pp. 36~42.
6. Richard L. Lemaster, Jacek M. Biernacki, and Frank C. Beall. 1993. The feasibility of using acousto-ultrasonics to detect decay in utility poles. In : Proc. 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. pp. 84~91.
7. Robert N. Emerson, David G. Pollock, James A Kainz, Kenneth J. Fridley, David L McLean, and Robert J. Ross. 1998. Nondestructive evaluation techniques for timber bridges. In: Proc. 5th World Conference on Timber Engineering.
8. Rodney C. DeGroot, Robert J. Ross, and William Nelson. 1995. Natural progression of decay in unrestrained, southern pine sapwood lumber exposed above ground. Paper prepared for the 26th Annual Meeting of the International Research Group on Wood Preservation.
9. Sang Sik Jang. 2000. Effects of Moisture Content and Slope of Grain on Ultrasonic Transmission Speed of wood. *Journal of Korean Wood Science and Technology.* 28(2): 10~18.