

비파괴 방법을 이용한 목재의 부후 탐지*1

손동원*2† · 이동흡*2

Wood decay Detection by Non-destructive Methods*1

Dong-Won Son*2† · Dong-Heub Lee*2

요 약

비파괴 시험 방법 중 초음파 방법을 이용하여, 목재의 열화상태를 진단하였다. 기초 자료로서, 목재 내 온도변화에 따른 초음파 전송속도의 변화, 목재 내 함수율변화에 따른 초음파 전송속도 변화, 목재 강제부후에 의한 중량감소와 초음파 전송속도 변화를 검토하였다. 또한 원목의 비파괴 시험 등을 수행하고, 초음파 전송속도에 근거한 부후분포도를 작성하여 고목재의 열화 진단을 하였다.

일련의 시험들을 통하여 비파괴 방법에 의한 목재 열화진단을 위한 데이터를 축적하고, 이를 고목재에 적용하여 목재 내부의 부후분포도를 작성함으로써 금후 고목재의 비파괴 방법에 의한 부후탐지의 가능성을 검토하였다.

ABSTRACT

The ultrasonic non-destructive method was used for wood decay test. The temperature change and moisture contents of wood were estimated how the ultrasonic wave velocity changes. The relationship between weight loss of wood decayed by *T. palustris* and ultrasonic wave velocity was investigated. The non-destructive methods of different condition of logwood were estimated. Decay map of old wood was made by non destructive methods.

Through these tests, we can accumulate the data to judge the degree of wood decay. The decay map of wood could be used for the analysis of old wood.

Keywords: ultrasonic non-destructive methods, weight loss of wood, ultrasonic wave transmission time of log wood, decay map of wood

*1 접수 2004년 4월 8일, 채택 2004년 5월 25일

*2 국립산림과학원 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 주저자(corresponding author) : 손동원(e-mail: dongwon@foa.go.kr)

1. 서론

비파괴 평가는 재료의 물성에 대한 변화없이 재료의 특성, 성능, 상태 등을 평가하는 것이다. 비목질 재료들에 대한 비파괴 기술은 재질의 불연속, 공극의 존재, 불순물의 유입여부 등을 탐지하는 반면, 목재에서의 비파괴 평가는 환경적인 불균일성 요인이 목재 내로 유입되었는지 여부를 탐지하여 물리적인 특성을 결정짓는 것이다.

목조문화재의 해체 보수작업에서 열화된 부재의 교체판정은 현재 육안적 판정에 의존하고 있다. 문화재용 목재의 특수성을 감안한다면 열화목재의 교체는 개인의 주관적인 판단에 의존하기보다는 과학적이고 객관적인 방법에 의한 접근이 필요할 것으로 사료된다.

야외사용 목재는 부후로 인한 목재의 중량감소가 매우 작은 상태임에도 불구하고 목재의 강도 감소는 매우 크므로 목재의 안전적 사용을 고려할 때, 목재 초기 부후 상태에서 빠른 진단이 필요하다. 육안적인 판정에 의한 부후의 진단에는 초기 부후 시 놓치기 쉬운 부분이 많이 있으므로, 기계적 측정 장치에 의한 과학적 접근 방법이 필요하다.

그러나 이러한 연구에 대한 기초 자료의 부족으로 현장에서 비파괴 평가를 적용할 수 있는 환경적 요인과 기계적 오차를 극복할 수 있는 데이터가 절대적으로 부족하기 때문에 그 적용에 한계가 있다.

초음파(Ultrasonic wave)는 고주파(ultra)음파(sonic wave)로서 비파괴에 사용되는 초음파의 주파수 영역은 50 kHz에서 수 GHz까지이다. 초음파의 전송 속도 및 감소는 물질의 구성, 구조, 탄성특성, 밀도 및 형태를 평가하는데 사용되어 왔다. 또한 초음파 비파괴 측정 방법은 물질의 결점과 피해의 정도를 파악하는데 사용되었다.

비파괴시험의 목재관련 연구로서는 Fuller(1994) 등이 건조 시 발생하는 목재 내 결함을 찾기 위하여 초음파 비파괴 방법을 적용하였고, Ross(2001) 등은 응력파의 전송속도와 목재의 강도와와의 관계에 대한 연구를 수행하였다. Schad 등(1996)은 비파괴 방법을 적용하여 원목의 결점을 찾고 결과를 CT스캔과 비교하였다.

Photo 1. Wood pole tester.

최근 국내에서 비파괴 방법을 적용하여 목재의 열화정도를 평가하기 위한 노력들이 이루어지고 있다. (김 등, 2001, 2003 ; LEE *et al.*, 2003)

본 연구에서는 비파괴 시험 방법 중 초음파 방법을 이용하여 사용 환경에 따른 초음파 전송속도의 영향 관계 및 부후로 인한 중량손실과 초음파 전송속도와와의 관계를 구명하고, 이를 고목재에 적용하여 목재의 부후분포도를 작성하여 비파괴 방법에 의한 목재 열화진단방법에 대한 접근을 시도하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 목재 내 온도 및 함수율의 변화가 초음파 전송속도에 미치는 영향

목재의 함수율 변화는 소나무재 45×60×120 mm 시편을 사용하였으며, 목표로 하는 함수율로 조절하기 위하여 습도 조절이 된 챔버 내에 목재를 방치하여 목표 함수율 도달 후 초음파 전송속도를 측정하였다.

목재의 온도변화는 6×12×30 cm 시편으로 길이방향으로 5 cm 마다 자동온도기록장치(YOKOGAWA UR180) 탐침을 2.5 cm 깊이로 고정하고 건조기와 냉동기를 이용하여 온도조건을 변화시키면서 초음파 전송 속도를 측정하였다. 비파괴 검사는 [Wood pole tester, (Photo 1)]와 [Sylvatest-Duo, (Photo 2)]를 사용하였다. Wood pole tester는 초음파의 전송속도를 측정할 때 사용하였으며, Sylvatest-Duo는 초음파

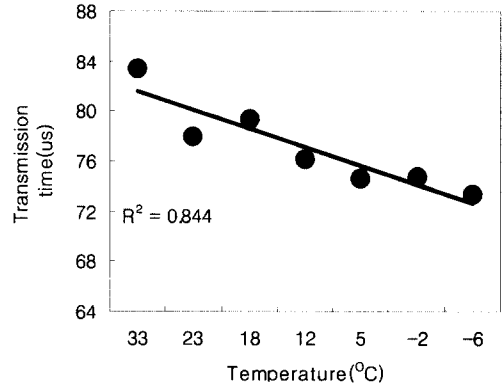


Fig. 1. The change of ultrasonic wave transmission times on different wood temperature (radial direction) Note : Each value is an average of 5 replications.

Photo 2. Sylvatest-Duo.

의 전송속도를 강도적 성질과 연결시킨 값을 읽을 수 있는 장비로서, 전송속도 및 목재의 강도적 성질을 판단 할 때 사용하였다.

2.2. 목재부후가 초음파 전송속도에 미치는 영향

목재 시편은 30×30×120 mm 소나무재로 3개월간 갈색부후균 *Tyromyces palustris*에 강제 부후 시켰다. 부후균에 폭로시킨 후 시편에 묻은 균사를 제거하고 폭로 전 시편에 대비한 중량감소율을 산출하였다. 그리고 중량감소율별 초음파 전송속도를 측정하였다.

2.3. 원목의 비파괴 측정

비파괴 측정에 사용된 원목은 소나무재로서 직경 15~25 cm, 길이는 125 cm의 원목을 사용하였다. 비파괴측정은 횡단면을 120°로 세 부분으로 나누어 측정하고, 길이방향으로 5 cm 지점마다 비파괴 측정을 하였다.

2.4. 고목재의 부후분포도 작성

고목재는 목조문화재 보수공사 시 발생한 교체목으로서 길이방향으로 10 cm, 폭방향으로 5 cm 간격으

로 구획한 후 각각의 초음파 전송 속도를 측정하고 부후분포도를 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 목재온도, 함수율과 초음파전송속도와의 관계

목재온도 변화와 초음파 전송 속도와의 관계를 Fig. 1에 나타내었다. 온도대별 초음파 전송속도는 33°C에서는 83 us였으며, -6°C에서는 73 us였다. 함수율과 초음파 전송속도와의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 함수율 변화에 따른 초음파 전송속도는 함수율 9%에서 34 us, 함수율 25%에서는 41 us으로 느려졌다. 초음파의 전송속도는 전송 매질의 탄성적 성질에 의존하므로 온도의 저하로 인한 경직된 목재에서는 초음파 전송속도가 빨라졌으며, 함수율의 증가로 목재 내 수분이 다량 존재 할 때 초음파 전송 속도는 느려지는 것으로 나타났다. 목재의 비파괴 측정에서 야외환경에 노출되어 사용되는 목재내부의 온·습도의 변화는 본 시험에서 설정한 값을 크게 벗어나지는 않으리라 판단된다. 온도 및 목재 함수율의 변화가 큰 외부 환경에서의 비파괴 측정은 이러한 변화를 고려하여 측정합이 바람직하다고 판단되었다. 특히 측정 부재 내

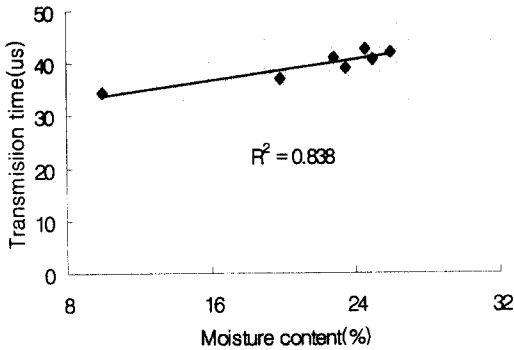


Fig. 2. The change of ultrasonic wave transmission times on different wood moisture content. Note: Each value is an average of 10 replications.

함수율의 차이가 있을 경우, 함수율 차이에 의한 초음파 전송속도의 상이함이 부후에 의한 것과 유사한 경향을 보이므로 함수율의 측정이 비파괴 측정과 병행되어야 한다고 사료된다.

3.2. 목재 부후와 초음파 전송속도와의 관계

갈색부후균 *Tyromyces palustris*에 폭로하여 강제 부후시킨 시편에서 측정된 중량감소율과 초음파 전송속도와의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 부후에 의한 목재의 중량감소가 클수록 초음파 전송 속도는 느려지는 경향을 보였다. 목리방향에 직각으로 측정하였을 때와 목리방향에 평행하여 측정 하였을 때의 방향에 따른 차이는 인정되지 않았다. 방사방향에서의 강제부후에 의한 중량감소율과 초음파 전송속도와의 관계에서의 R^2 는 0.7344, 접선방향에서의 초음파 전송속도와 중량감소율과의 관계에서의 R^2 는 0.7307이었다. 이것은 시편의 사이즈가 인공열화조건에 맞추기 위하여 작은 시편을 사용하여 얻은 결과로서, 시편의 전 층의 고른 부후 상태를 나타내었을 경우이다. 그러나 실제 비파괴 시험이 적용될 큰 부재에 있어서는 부후의 진행이 목재의 전부분에 걸쳐 일어나기 어렵고 한부분에 집중될 경우 목재의 전반적인 상태를 판단하기에는 어려움이 있다.

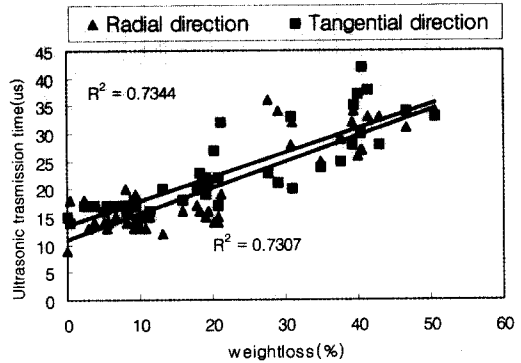


Fig. 3. The relationship between ultrasonic wave transmission times and weight loss rate of wood decayed by *T. palustris*.

목재 부후에 의한 목재 내부 상태 판단에 비파괴 방법을 사용하여 부후된 목재의 부후정도를 건전목과 비교 판단할 수 있었다. 단순 부후가 아닌 다른 인자에 의한 열화의 정도와는 혼동될 수는 있겠으나 목재 내부의 상태가 건전재와 비교하여 어느 정도의 열화가 진행되었는지는 판단할 수 있으리라 사료된다. Ross 등(1996)은 토양에 폭로시켜 열화된 목재에서 파의 전송속도와 진동의 감폭 등을 조사하여 균과 흰개미에 의해 피해를 받은 목재의 압축강도 감소를 평가하였다. 연구자들은 파의 전송시간과 진동의 감폭은 열화된 목재의 상태와 밀접한 관계가 있었으며, 강도의 감소를 예측할 수 있는 자료로서의 가능성을 제시하였다. 본 연구결과에서도 초음파의 전송속도는 부후된 목재의 열화 정도를 판단할 수는 있었다. 그러나 목재의 열화는 여러 가지 요인에 의해 일어나므로, 본 연구진은 현재 비파괴 방법에 의한 결과와 함께 중량감소 및 강도감소 그리고 해부학적 관찰 등에 관한 연구를 추진하고 있다. 일련의 시험들이 이루어지면, 비파괴 방법에 의한 결과로서 목재 내부의 상태를 보다 정확히 판단할 수 있으리라 사료된다.

3.3. 원목의 비파괴방법에 의한 열화 진단

원목의 비파괴방법에 의한 열화진단에 사용된 목재는 벌채 후 1년간 야외에 노출된 것으로 목재 내 함수

Photo 3. Log wood for non-destructive measuring.

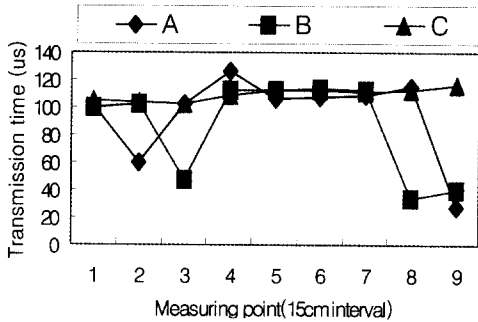
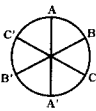


Fig. 4. The ultrasonic wave transmission times of log wood. (photo 3). Note: Measuring point (Cross section).



울의 변화가 자연환경에 따라 변화하여 부후 및 충해가 발생된 원목을 선별하여 비파괴측정을 하였다. Photo 3의 원목은 측정당시 함수율이 23%로서 목재 내부의 상태가 열화 되기 쉬운 환경에 노출되어 있었음을 알 수 있었다. 원구로부터 5 cm 간격으로 초음파 전송속도를 측정하여 본 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 목재의 가운데 부분에서는 세 방향으로 측정한 부분의 초음파 전송 속도가 모두 고르게 나타나서 목재 내부의 상태가 비교적 건전한 것으로 판단되었다. 원구로부터 60 cm 지점까지 말구로부터 30 cm 지점까지는 일정한 부분에서 목재내부의 결함 및 부후의 진행으로 인한 목재열화가 있음을 판단할 수 있었다.

Photo 4의 원목은 비파괴 측정당시 충해를 많이 받아 목재 내부 상태가 충해의 공도에 의해 열화된 목재였다. 비파괴 측정을 한 결과 Fig. 5에서와 같이 세 방향 모두 고른 초음파 전송 속도를 보여 주었다. 그러나 이것은 목재의 대부분이 충해를 입어 특정한 방향으로의 초음파 전송속도의 차이가 없음을 나타낸 것이다. 충해를 입은 목재의 초음파 전송속도는 충해의 공도가 목재 내에 고르게 분포할 경우, 동일한 속

Photo 4. Log wood for nondestructive measuring.

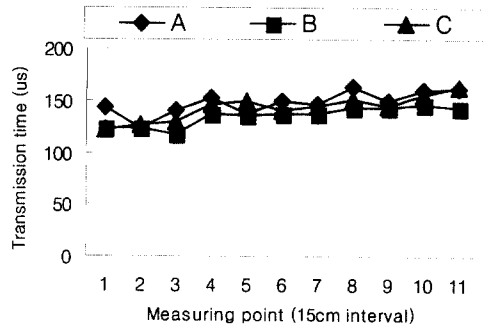


Fig. 5. The ultrasonic wave transmission times of log wood (Photo 4).

도로써 나타난다. 이러한 양상은 부후된 정도에 따라 부위별로 다른 속도를 나타내는 부후재와는 다른 것으로 건전재의 두께별 초음파 전송속도의 기본값에 근거하여 판단하는 것이 정확한 방법이라 사료된다.

Schad 등(1996)은 비파괴 방법을 적용할 때 파의 전송시간과 CT스캔 등의 방법을 혼용하면 정확한 목재 내부의 상태를 진단할 수 있다고 보고하고 있다. 목재 내부의 상태에 대한 진단의 방법으로서 비파괴 방법은 육안적인 방법보다 정확할 수 있으며, 간과 할 수 있는 국소부의 열화도 진단할 수 있는 장점이 있다. 그러나 비파괴 측정의 경우 하나의 장비에만 의존하기 보다는 진단 장비(X-ray, CT scanner 등)를 함께 운용함으로써 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

3.4. 부후분포도작성과 고목재의 부후 진단

Fig. 6은 부후분포도 작성을 위한 초음파 전송속도의 값을 각 부분별로 측정(Table. 1)하여 나타낸 값과 각 부분을 절단한 단면을 육안적으로 판단한 부후면

Table 1. Ultrasonic wave transmission time of each part of Fly rafter

Measuring point (5cm interval)

Fig. 6. The decay area rate of each part of Fly rafter.

Photo 5. The cross section of 25 cm part (5 position).

적울에 대한 값을 비교하여 나타낸 그래프이다. 부후로 인하여 초음파 전송속도가 느리게 나타난 지점에서 부후 면적비가 높게 나타나, 부후로 인한 초음파 전송속도가 실질적으로 목재내부의 열화상태의 반영임을 확인할 수 있었다.

Photo 5는 25 cm 거리에서 횡절한 목재단면(5지

Photo 6. The cross section of 110 cm part (22 position).

점)으로서 비교적 초음파 전송속도가 고르면서 빠르게 나타나 건전하리라 예상되었던 부분의 단면 사진이다. Photo 6은 110 cm에서 횡절한 목재단면의 사진으로서 부후되어 일부분이 소실되었으며, 부후된 부분으로 인하여 초음파 전송속도가 많이 느려졌음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7. The decay map of Fly rafter (Photo 5).

Photo 7. Fly rafter.

Fig. 8. The decay map of Bargeboard.

Photo 8. The nondestructive measurement of Bargeboard.

고건축의 해체 보수공사에서 발생한 교체목인 고목재를 대상으로 부후분포도 Fig. 7~Fig. 9를 작성하였다.

초음파 전송속도를 일정한 구획에 따라 측정하였으며, 조사된 목재는 초음파 전송속도를 일정한 값으로

Fig. 9. Decay map of Bar wood along the edge of eaves.

Photo 9. Bar wood along the edge of eaves.

뒀어 동일선상으로 연결하여 그래프로 작성하였다. Fig. 7의 부연은 부후된 부분이 측면의 160~190 cm 부분과 200~210 cm 위치에 존재함을 알 수 있었다. 윗부분의 부후는 90~130 cm 부분에서 있었으며, 측면 부분과 비교하면 윗부분에 한정하여 부후가 진행되었음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 박공널의 일부분으로서 부후된 부분이 측면의 경우, 100~120 cm, 150~180 cm로 나타났으며, 부후된 부분은 윗부분 10 cm 내외인 것으로 판단되었다. 평고대의 경우(Fig. 9)는 80~135 cm 부분이 부후된 것으로 나타났다. 그러나 측면의 부후도와 비교하여 보면, 윗부분에 매우 한정적으로 열화되었음을 확인할 수 있었다. 김 등(2003)은 초음파측정의 문제점으로, 파의 전송시간의 차이로 열화된 부재의 열화 유무의 판정은 가능하나 열화의 크기를 정량화 하는 것에는 한계가 있다고 고찰하고 있다. 이러한 부분은 본 연구자들이 수행하고 있는 강제 부후에 의한 시편에서의 초음파 전송속도의 측정과 강도감소 등과 연계시켜 자료가 축적되어진다면, 이 또한 가능하리라 사료되어지며, 야외 폭로 시편에서의 초음파 전송속도의 계량화 등의 연구가 현재 진행되고 있다.

4. 결 론

지금까지 강재(鋼材), 콘크리트 등의 무기재료의

비파괴 평가에 적용되었던 초음파 이용기술이 유기물이며 불균질성인 목재에 적용하여 목재의 내부 상태 판단에 적용함이 가능하였다. 초음파는 목재의 온도 및 함수율의 변화에 따라 다소 차이가 있었으므로 온도 및 습도에 따른 보정이 필요할 것으로 판단되었다. 부후에 의한 중량감소와 초음파 전송속도는 상관관계가 있었다. 이를 이용하여 부후가 예상되는 부재의 정확한 부후부위 및 부후정도를 도식화 할 수 있었고, 이를 종합하여 목재의 부후분포도를 작성할 수 있었다. 이러한 관계는 목재의 중량감소와 밀접한 관계를 가지며, 금후 목재 강도의 저하요인 탐색에도 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Fuller, J. J., R. J. Ross, and J. R. Dramm. 1994. Honeycomb and surface check detection using ultrasonic nondestructive evaluation. Forest products Laboratory Research Note FPL-RN-0261.
- Lee, J. J., K. C Kim, and M. S. Bae. 2003. Patterns of resistographs for evaluating deteriorated structural wood members. MOKCHAE KONGHAK. 31(6): 45~54.
- Nesvijski, E. G. 2000. Some aspects of ultrasonic testing of composites. Composite Structures. 48: 151~155.
- Ross, R. J., R. C. DeGroot, W. J. Nelson, and P. K. Lebow. 1996. Assessment of the strength of biologically degraded wood by stress wave nde. Durability of Building Materials and Components. 7(1): 637~643.
- Ross, R. J., R. F. Pellerin, J. W. Forsman, J. R. Erickson, and J. A. Lavinder. 2001. Relationship between stress wave transmission time and compressive properties of timbers removed from service. Forest products Laboratory Research Note FPL-RN-0280.
- Schad, K. T., D. L. Schmoltdt, and R. J. Ross. 1996. Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs. Forest Products laboratory Research Paper FPL-RP-546. 1~13.
- 김광철, 배문성, 이진제. 2001. 목조건축물의 안전성 평가(I)-Ultrasonic method를 이용한 목조 고 건축물의 정성적 열화 평가. 한국목재공학회 학술발표요지집. 3: 6~42.
- 김광철, 배문성, 이진제. 2003. 노출환경에 따른 목조 건축물의 기둥의 열화 차이. 목재공학 31(2): 58~68.