

초음파 전파속도법을 이용한 목조 문화유산 흰개미 피해의 정량 평가

Quantitative Analysis for Termites Damage of Wooden Heritage using Ultrasonic Pulse Velocity

안 재 철*

Ahn, Jae-Cheol

(동아대학교 건축학과 조교수)

Abstract

Quantitative analysis of termites damage is important in terms of conservation and maintenance of wooden cultural heritage buildings, because termites makes cavities and decreases the section area of wooden structural members. The purpose of this study is to forecast the range and spread of termites damage in the wooden structural members by using ultrasonic pulse velocity method.

Ultrasonic pulse velocity has been used as one of non-destructive test to analysis the internal defect by using difference velocity between medium material and cavity. This method would be effective to analysis termites damages. From the result of the ultrasonic velocity test, the loss rate of area effected by termites damage had a strong correlation with ultrasonic velocity. And it is possible to predict the loss rate of area from by termites damage by using regression equation in the case of structural member of fine tree.

주제어 : 생물학적 열화, 흰개미 충해, 초음파, 단면 결손, 목조 문화유산

Keywords: Biological deterioration, Termites damage, Ultrasonic, Loss of area, Wooden heritage

1. 서 론

우리나라는 콘크리트와 철 등의 근대재료가 출현하기 이전까지 오랜 기간 목재를 구조재료로서 이용해왔다. 따라서 전통 문화재를 비롯하여 근대 역사문화유산에 이르기까지 많은 목조 구조물이 역사·문화적 가치를 인정 받아 보존되고 있다. 그러나 이러한 목조 구조물의 유지 관리에 있어 필수적으로 수반되는 내구성과 방재에 대해서는 체계적인 연구와 기술개발이 부족한 실정이며, 이로 인하여 많은 문화유산이 재난과 환경적 열화에 의해 훼손되고 있다.

특히 목재는 부후 및 흰개미에 의한 충해 등의 생물학적 열화가 건축물의 내구수명에 큰 영향을 미치고 있으며, 이는 지속적인 유지관리와 원형 보존, 그리고 경제성

측면에서 많은 문제의 원인이 된다. 따라서 유기재료인 목재가 생물학적 열화요인으로 인하여 강도 및 강성이 저하하거나 단면이 결손되는 재료적 특성에 대한 체계적인 연구와 함께 피해 원인 및 과정을 과학적으로 분석하는 다양한 기술 개발이 요구된다.

생물열화의 대표적 원인인 부후와 흰개미에 의한 식해(食害)는 동시에 발생하는 경우도 있으나, 내력저하의 요인으로서의 셀룰로오스의 분해와 공동화라는 상이한 손상 메커니즘을 가지고 있다¹⁾.

본 연구에서 대상으로 하는 흰개미에 의한 식해 현상은 구조부재 내부의 점진적인 공극 발생과 이로 인한 응력집중 및 구조내력 저하로 이어지기 때문에 내부 공극 구조에 의해 구조적 성능을 나타내는 다공질 재료의 물성과 메커니즘 측면에서 유사하다.

* Corresponding Author : jcan222@dau.ac.kr

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음

1) 森拓郎, 香東章博, 築瀬佳之, 小松幸平, 「シロアリ食害材の強度特性および超音波伝搬速度の關係」, 材料, vol.59, no.4, pp.297-302, 2010

그러나 현재까지 흰개미 식해에 의한 목구조 부재의 결손을 육안에 의해 관찰하거나 타진법, 탐침법 등 외부로부터의 정성적인 분석법에 의존하는 것이 일반적이다. 또한 해외에서 이루어진 기존 연구에서도 응력과 및 초음파를 이용하여 부재 전체의 강도를 예측하는 것이 주를 이루어 식해 범위의 규명 및 보수범위의 결정에는 활용이 어려운 측면이 있다.

특히, 문화재 건축물의 경우 흰개미 피해가 발생할 경우 당해 부재의 전체 교체보다 부분적인 교체가 이루어지는 것이 일반적이기 때문에 흰개미 식해의 진행과정과 피해범위의 과학적 규명이 필수적이라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 근대 목조 문화유산의 지속가능한 유지관리를 위하여 흰개미 식해에 의한 목조 구조물의 구조적 성능 저하를 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 내부 공극 증가에 의한 목부재의 단면적 감소율을 내부 결함 및 공극의 발견에 용이한 초음파 전파속도를 통하여 분석하고자 하였다.

2. 목재 생물학적 열화 분석의 이론적 고찰

2-1. 목재의 흰개미에 의한 총해와 단면 결손

국내 서식하는 대표적인 흰개미인 일본흰개미 (*Reticulitermes speratus*, Kolbe)와 집흰개미 (*Coptotermes formosanus*, Shiraki)²⁾에 의한 피해의 대부분은 마루 밑 토양으로부터 따라 올라가는 흰개미가 동자주나 기둥, 나아가 명에와 장선 부재를 식해하는 것으로 시작한다. 흰개미는 일정한 수분 보급을 필요로 하기 때문에 습한 토양이나 목재에 모이기 쉽다. 또한 건조불량의 재료에는 부후와 함께 흰개미 피해가 발생하는 경우도 많다.

흰개미는 빛을 싫어해 주로 땅속에서 생활하고 기둥을 따라 안으로 올라와 파괴하므로 Fig.1과 같이 내부의 심각한 단면 결손이 나타나더라도 외부에서 표시가 잘 나지 않는 점이 가장 큰 특징이다.

반면 Fig.2과 같이 일부 건물의 상부구조에도 흰개미 총해가 발생하는 경우가 있다. 이는 지하로부터 흰개미가 타고 올라가는 경우도 있으나, 상부구조 특히 지붕부재 내에 우의(羽蟻)가 날아 들어와 기와토 등을 이용하여 새로운 콜로니(colony)를 형성하는 경우도 다수 관찰된다.³⁾ 또한, 최근 미국산 목재의 수입 증대로 일본에서

피해가 증가하고 있는 미국흰개미(*Incisitermes minor*, Hagen)는 주로 건조 목재를 식해하기 때문에 수분이 필요하지 않으며 구조물 전체에 콜로니가 점재(點在)하는 특징이 있다⁴⁾.

흰개미 총해는 장기간에 걸쳐 영역이 넓어지며 부재의 결손도 크게 증가하게 된다. 어느 정도 식해가 진행되면 식해영역으로부터 흰개미가 이동하는 경우도 많다.

부후균에 의한 열화와 마찬가지로 흰개미에 의한 목재의 열화 역시 부재 하나의 파괴에만 그치는 것이 아니라 건축물 전체 안전성에 대한 심각한 영향을 미치게 된다.

흰개미에 의해 총식된 부재는 변재(邊材)부를 중심으로 내부에 공극을 형성한다. 때로는 표면 근처에서 형성된 공극으로 외부에서의 육안 확인이 가능한 경우도 있으나 대부분의 경우 내부에서 진행하며 의도(蟻道)에 의해 Fig.3과 같은 연속된 형태의 공극구조 및 대규모 공극을 나타내게 된다. 이 경우 동일한 단면 결손율의 상태에서도 연속된 형태의 공극은 독립공극에 비하여 구조 부재의 강도저하에 큰 영향을 미치게 된다.



Fig.1 Typical Termites Damages in Dismantled Wood Members of Old Wooden Heritage



Fig.2 Termites Damages in Wood Beam of Old Wooden Heritage (Gye-jeong of Dokrak-dang)

2) 이동홍 외, 「국내에서 흰개미의 분포 및 피해사례 조사」, 한국목재공학 학술발표논문집, 한국목재공학회, pp.216-220, 1998

3) 이규식 외, 「목조문화재의 원형보존을 위한 총해 방제방안」,

보존과학연구 21집, 국립문화재연구소, pp.6-65, 2000

4) 築瀨佳之, 森拓郎, 藤原裕子, 南宗和, 「日本におけるアメリカカンザイシロアリの木造住宅被害の調査研究」, 住総研研究論文集, no.38, pp.245-256, 2012

대부분의 흰개미 피해는 전술한 바와 같이 하부에서 상부로 진행되기 때문에, 흰개미에 의한 피해를 입은 문화재 구조물의 보수는 일반적으로 기존 부재의 보존을 위해서 Fig.4와 같이 하부 식해부의 육안에 의한 확인과 함께 부분적인 교체가 이루어지고 있다.

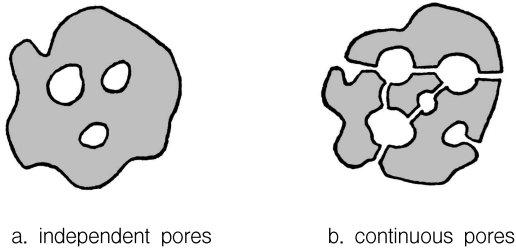


Fig.3 Pore structure of Termites Damage



Fig.4 Repair of Wooden Member Damaged by Termites

2-2. 초음파 전파속도를 이용한 생물열화의 분석

목재의 생물열화를 탐지하는 데에는 육안 검사에 의해 부후면적 또는 흰개미의 탈출공 수를 파악하는 방법이 주를 이루고 있으나, 표면 상태의 확인으로 내부 현황의 파악에는 한계를 가진다⁵⁾.

특히 흰개미 충해의 경우 식해 부위 이외의 부분은 건전한 경우가 많아 내부 결함의 확산 정도와 이로 인한 구조재로서의 성능 평가에 어려움이 있다.

부후, 충해 등의 생물열화는 미시조직의 분해 및 공동화로 밀도 저하를 수반하기 때문에 과학적 분석법으로는 응력파, 초음파 등의 탄성과 전파속도법이 대표적이며 재료의 강도 및 탄성계수 측정에 주로 활용되고 있다.

실험실 단계에서는 Fig.5와 같이 X선 CT를 활용한 내부 시각화를 목적으로 하는 연구⁶⁾도 진행되고 있으나

현장 조사단계에서의 활용 및 범용성 측면에서 적용에 어려움이 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 대상으로 하는 초음파는 빛과 같이 직진하려는 성질이 있어 기하광학적으로 취급되어 물체의 결함과 위치를 정확히 찾아낼 수 있다. 건축분야에서는 이미 초음파를 이용하여 콘크리트의 품질관리, 구조물의 품질평가 및 균열의 깊이 등을 측정하는 경우에 널리 사용되고 있다.

따라서 초음파 측정 장치로부터 일정한 주파수와 세기를 가지는 초음파를 발생시켜 부재에 전달하고 이러한 초음파가 부재를 통과하는 시간을 측정하여 내부 공극구조의 추정과 이에 따른 강도 추정에 비교적 일정한 결과를 얻을 수 있다. 이는 응력파는 해머로 직접 충격을 가하기 때문에 매번 발생하는 응력파가 상이하여 측정위치 변화에 민감한 것과는 대조되는 특성이다⁷⁾.

목재의 경우 현재까지의 연구 결과 초음파 전파속도를 이용하여 밀도 및 함수율, 그리고 강도 및 강성의 추정이 가능한 것으로 보고되고 있으며 Fig.6과 같은 다양한 초음파 전달법을 이용한 회귀식이 제안되고 있다⁸⁾.

$$E = -12230 + 0.259B + 1.213C + 27.72\rho + 238.4W$$

$$\sigma = -52.29 + 0.003B + 0.005C + 0.097\rho + 1.871W$$

- 여기서, E : 목재 탄성계수 (MPa)
- σ : 목재 휨강도 (MPa)
- B, C, D : 초음파가 전파속도 (m/sec)
- ρ : 목재 밀도 (kg/m^3)
- W : 목재 함수율 (%)

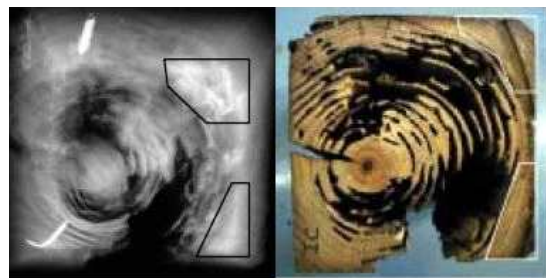


Fig.5 X-ray image of insect [Seoul University, 2005]

6) 梁瀬佳之, 森拓郎, 吉村剛, 原裕子, 藤井義久, 鳥越俊行, 今津節生, 「アメリカカンザイシロアリ食害材の空隙率と殘存曲げ強度の關係」, 材料, vol.63, no.4, pp.320-325, 2014

7) 서울대학교, 앞의 책, p.72

8) Marko Teder, Kalle Pilt, Matis Miljan, Vello Pallav, Jaan Miljan, 「Investigation of the Physical-Mechanical Properties of Timber using Ultrasound Examination」, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 18, No. 6, pp.795-801, 2012

5) 서울대학교, 「비파괴 검사법에 의한 국산재의 생물학적 열화 평가기술 개발」, 농림부, p.13, 2005. 11

초음파 전파속도와 수중에 따른 목재 강도의 관계가 Mori 등의 연구⁹⁾에 의해 Fig.7, Fig.8과 같이 보고되고 있으며, 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있다.

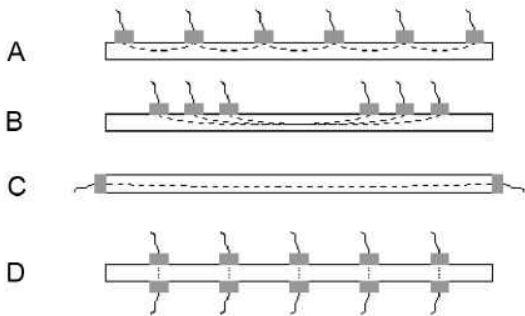


Fig.6 Various Measurement Method of Ultrasonic Pulse Velocity [Seoul University, 2005]

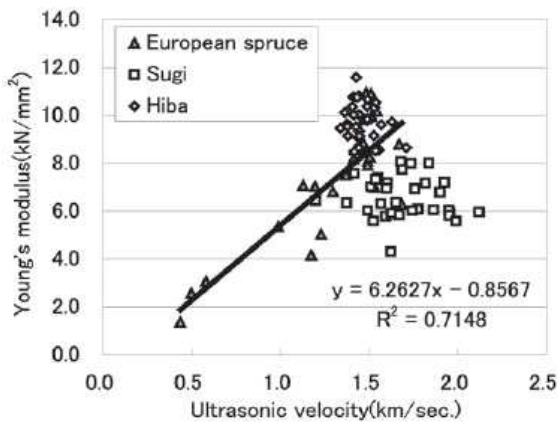


Fig.7 Relationship between Young's Modulus and Ultrasonic Velocity [Mori, 2010]

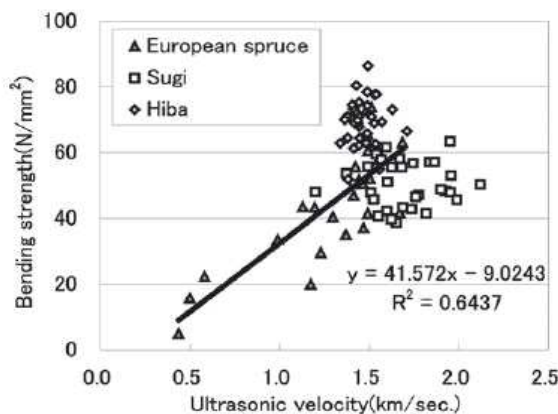


Fig.8 Relationship between Bending Strength and Ultrasonic Velocity [Mori, 2010]

9) 森 拓郎, 香東章博, 築瀬佳之, 小松 幸平, 「シロアリ食害材の強度特性と密度および超音波伝搬速度の關係」, 材料, Vol. 59, No. 4, pp.297-302, 日本材料學會, 2010. 4

3. 초음파 전파속도법에 의한 목재 총해 현황의 분석

3-1. 실험개요

본 장에서는 목조 건축물의 흰개미에 의한 총해 부위 중 기둥, 보 부재와 같이 비교적 단면이 큰 부재를 중심으로 초음파 전파시간을 이용한 비파괴 평가를 실시하고, 그 결과를 육안 조사의 결과와 비교하였다.

비파괴 평가는 각 단면을 기본 단위로 하여 수행되며, 단면의 형태 및 크기, 그리고 흰개미의 침투가 발생하는 하부로부터 상부의 방향으로 5회 이상의 시험을 실시하였다. 먼저 부재의 표면에 붙어있는 먼지 및 이물질을 제거하고, 각각의 측정위치에서의 부재 두께(전파길이)를 측정하여 초음파 전파속도를 측정하였다.

초음파 실험 장치(PUNDIT-pulse)는 초음파의 전달 시간을 측정하는 것으로서 한쪽 탐촉자에서 초음파를 발생시키고 다른 탐촉자에서 신호를 수신하는 방식으로 출력전압 1.2kV를 사용하였고, 공진 주파수 54kHz, 직경 50mm의 중과 압전 탐촉자를 송신과 수신에 사용하였으며 그리스를 접촉매질(couplant)¹⁰⁾로 사용하였다.

본 실험에 사용한 시료는 일제강점기(준공시기 미상)에 건축된 광양 서울대학교 학술림 관사(등록문화재 제 223호)의 기둥 및 보 부재를 사용하였다. 목재는 수중에 따른 밀도가 상이하어 초음파 전파속도의 차이가 발생한다. 따라서 Fig.9와 같이 조직분석을 수행한 결과 대상 건축물에 구조부재로 사용된 재료는 소나무(*Pinus densiflora Sieb. et Zucc.*)로 판명되었다.

3-2 초음파 전파속도법을 이용한 총해현황의 현장 측정

Fig.10은 초음파 전파속도를 이용하여 흰개미에 의한 총해가 발생한 부재의 내부 탐침을 수행한 20여개소의 결과 중 건전 부재와 총식 부재를 비교한 대표적인 결과이다. 본 그래프에서 높이의 기준은 실내 바닥을 기준으로 측정된 것으로 동바리 등 하부구조는 측정하지 않았다.

먼저 흰개미 총해가 거의 발견되지 않은 건전 부재인 column 1과 column 2 등에서의 초음파 전파속도는 약 1,500m/sec로 비교적 일정한 값을 나타내었다.

10) 초음파를 탐촉자로부터 시험체에 전달하기 위하여 탐촉자와 탐상 면과의 사이에 적용하는 음향 결합용 매질. 물질의 전달 손실을 적게 하기 위해서는 음향 임피던스가 큰 접촉매질에 좋다. 주로 기름, 물, 페이스트, 글리세린 등이 사용된다.

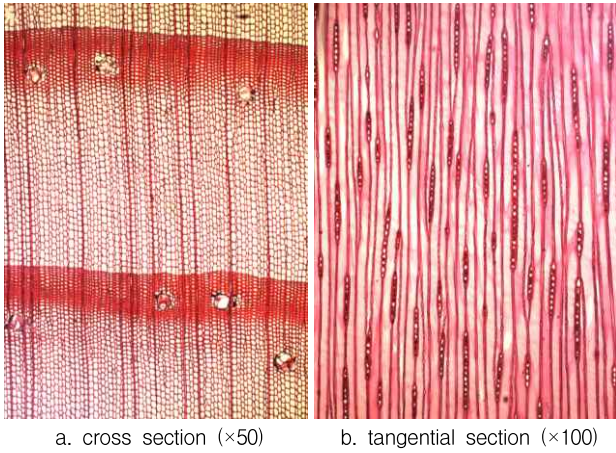


Fig.9 Species Identification of Wooden Member using Microscope

건진 부재에서 Fig.7, Fig.8 등의 기존 연구 결과의 초음파 전파속도에 비하여 다소 낮은 값을 나타내는 것은 목재의 방사조직과 파의 진행 방향의 차이에 따른 경계면이 초음파 전달을 방해하기 때문인 것으로 판단된다¹¹⁾.

측정 대상의 부재가 모두 소나무 재질임을 감안한다면 기둥 위치에 따른 건진부재 내부를 진행하는 초음파 전파속도의 오차는 심재 및 변재에 따른 목재의 고유 밀도 또는 주변 환경에 의한 내부 함수율의 영향으로 판단된다.

흰개미의 출입공이 발견된 부재(점선 부위)에서는 내부 공극의 발생으로 인한 밀도 저하로 초음파 전파속도가 감소하는 결과를 나타내었으며, 이러한 결과는 목재의 초음파 전파속도에 비하여 공동부의 초음파 전파속도가 크게 낮은 것이 원인이다. 따라서 column 3~6과 같이 출입공의 위치와 초음파 전파속도 저하 부위가 거의 일치하고 있다. 또한 이러한 부위에서 초음파 전파속도는 500~1,400m/sec 범위의 속도를 나타내고 있다. 특히 column 6과 같이 하부로부터의 내부 식해가 심각한 상황에 이른 경우는 초음파 전파속도가 500m/sec 이하로 나타나 내부의 공동화가 심각하게 진행된 것을 잘 나타내고 있다.

본 결과를 통하여 흰개미 충식을 통하여 발생한 내부의 독립 또는 연속된 공극의 초음파 전파속도를 통한 분석 가능성이 확인되었다. 이러한 결과는 현장에서 수행하는 목조 문화유산의 흰개미에 의한 피해 유무의 정성적인 판단은 가능하다. 그러나, 저하된 초음파 전파속도와 내부 공극율에 대한 정확한 분석에 한계가 있다.

11) 서울대학교, 앞의 책, p.91-92

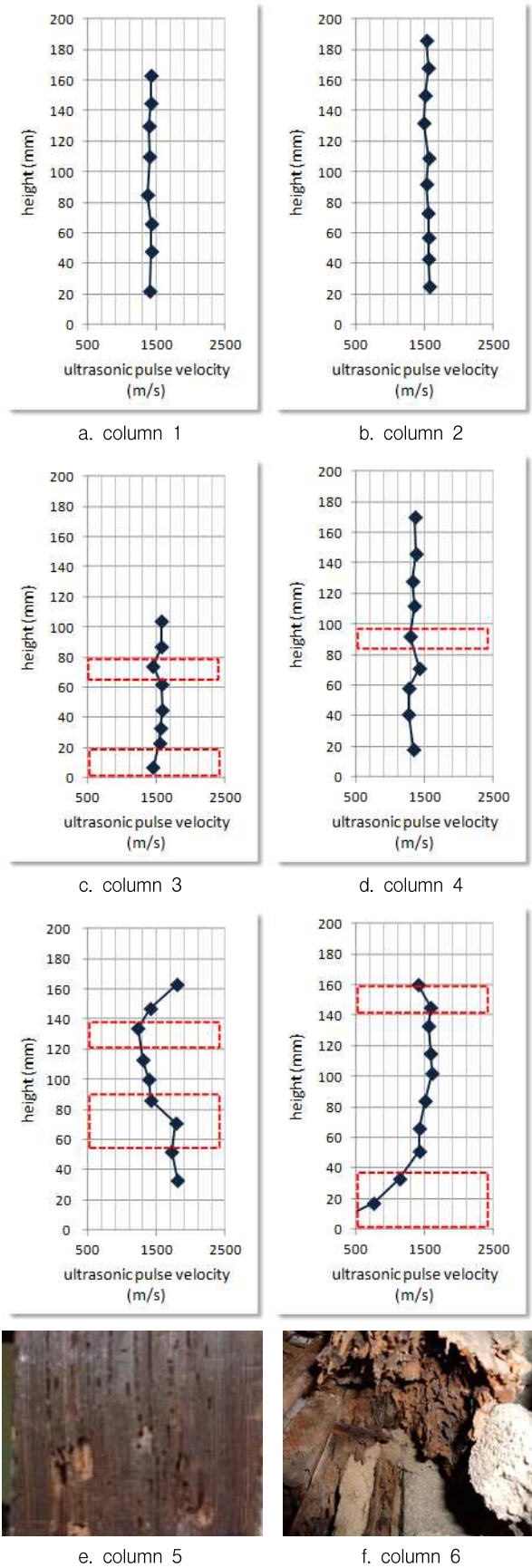


Fig.10 Change of Ultrasonic Velocity by Height of Wooden Column Damaged by Termites

4. 초음파 전파속도법에 의한 목재 단면 결손의 정량 분석

4-1. 실험개요

전 절의 현장 측정 결과와 같이 초음파 전파속도를 이용하여 흰개미 충식 부재의 건전도에 대한 상대적 평가가 가능한 것을 확인하였다. 그러나 이러한 값은 육안으로 나타난 열화현상을 토대로 내부의 상태를 예측하는 보조적인 도구로 활용이 가능하다. 따라서 본 장에서는 초음파 전파속도를 측정된 부재에 대하여 직접 단면 결손율을 측정하여 그 상관관계를 규명하고자 하였다. 특히, 문화재 건축물의 경우 흰개미 피해가 발생할 경우 당해 부재의 전체 교체보다 부분적인 교체가 이루어지는 것이 일반적이기 때문에 부재 전체의 강도 예측보다 흰개미 충해의 진행과정과 피해 범위의 규명이 필수적이다.

초음파 전파속도의 측정은 Fig.11과 같이 전 절의 조사 기둥을 대상으로 흰개미의 침투가 이루어진 기둥 6개소를 절단하여 기둥 하부로부터 상부 건전부의 방향으로 5cm 간격으로 50여개소를 측정하였다. 초음파 실험 장치(PUNDIT-pulse)와 측정 방법은 전 절과 동일하다.

초음파 전파속도의 측정이 종료된 부재는 측정면을 절단하여 사진 촬영을 하고 화상분석(Fig.12)을 통해 산출한 단면 결손율을 회귀분석을 통해 초음파 전파속도와 상관관계를 분석하였다.

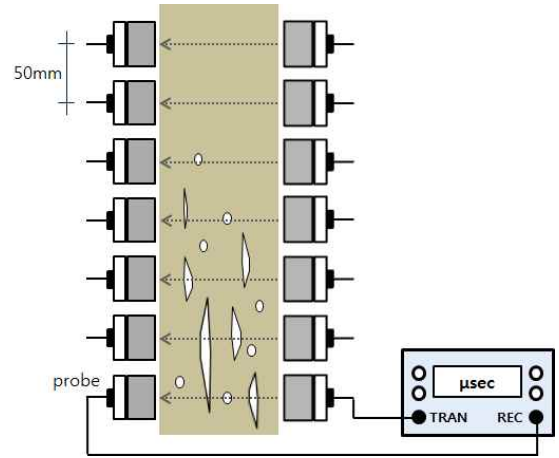


Fig.11 Measurement of Ultrasonic Velocity

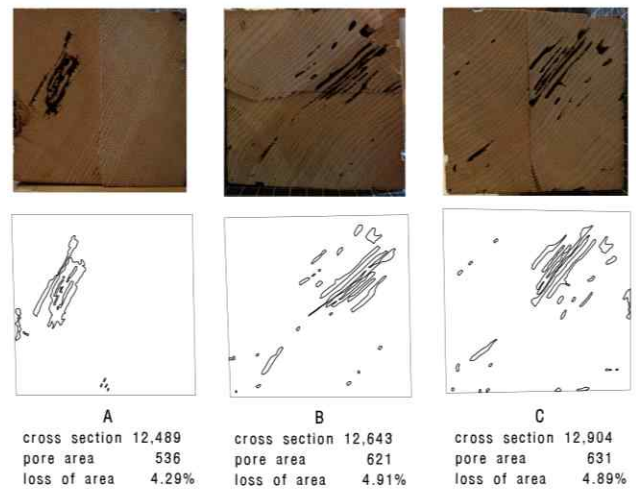


Fig.12 Measurement of Loss Area

3-2. 단면 결손율과 초음파 전파속도의 상관관계

본 실험에서 사용한 시험체의 단면 결손율은 Fig.13 및 Fig.14와 같이 0~30%의 범위이다. 이때 건전부재의 초음파 전파속도는 약 1,700m/sec으로 ±5% 범위의 오차를 나타내었다. 본 실험은 동일 수종의 목재를 대상으로 하였기 때문에 재료적 측면에서는 심재 및 변재 등의 사용재료의 고유 밀도 차이와 환경적 측면에서 부재내부의 잔존 함수율의 영향이 주된 원인으로 판단된다. 또한, 내구성 측면에서 흰개미 피해와 동반한 부후(Fig.13의 a, b)로 인한 셀룰로오스 분해에 의한 밀도 변화가 오차의 원인으로 판단된다. 따라서 소나무를 구조재로 사용한 목조 건축물의 초음파 전파속도의 측정시 1,700m/sec를 건전부재의 표준값으로 활용하는 것이 적절하다.

흰개미에 의한 식해가 발생된 부재의 초음파 전파속도는 500~1500m/sec로 큰 차이를 나타내었다. 이때 5%의 단면 결손이 나타난 경우의 초음파 전파속도는 약 1,300m/sec으로 약 25%의 속도가 감소하였으며, 10%의 단면 결손에서 약 35%의 속도 감소가 나타났다.

이때 초음파 전파속도와 단면 결손율은 부의 상관관계를 가지며 다음의 식과 같은 상관성이 높은 회귀식을 도출할 수 있었다.

$$L_W = 3E - 0.5 V_p^2 - 0.1011 V_p + 85.57 (R^2 = 0.87)$$

여기서, L_W : 목재의 단면 결손율(%)

V_p : 초음파(종파) 전파속도(m/sec)

단 흰개미 식해가 일어날 경우 흰개미가 운반한 흙이나 분비물로 인하여 실제 식해량보다 밀도가 커지기 때문에 오차가 발생할 수 있다.

전절에서의 측정 결과를 토대로 본 연구에서 도출한 회귀식을 활용한다면, 초음파 전파속도를 이용하여 목조 부재 내부의 흰개미 충식과 이로 인한 공동화 및 단면 결손의 진행상황의 정도 높은 예측이 가능하다.

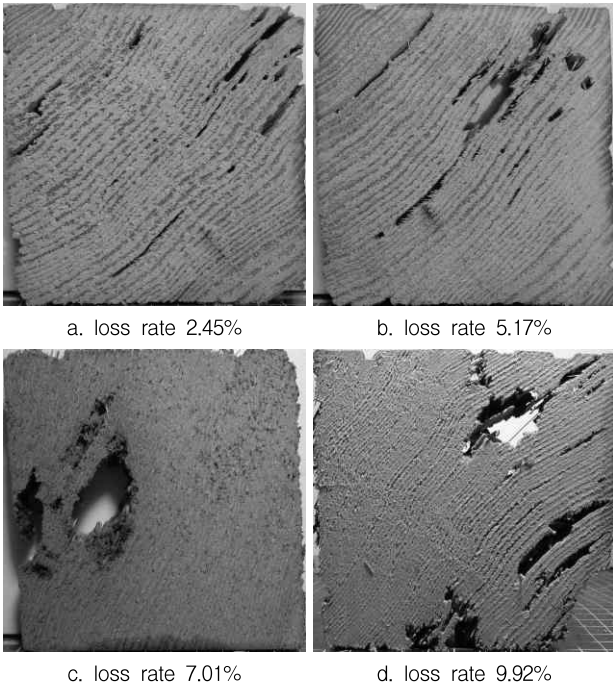
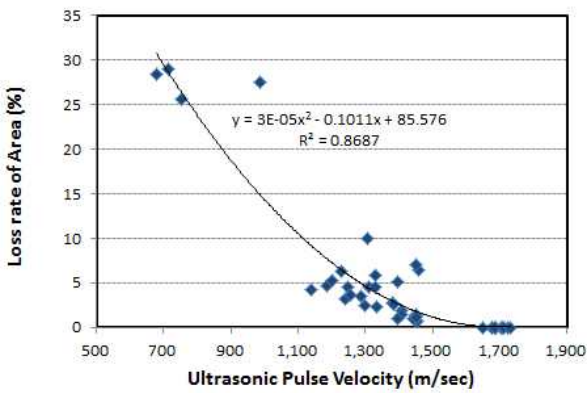
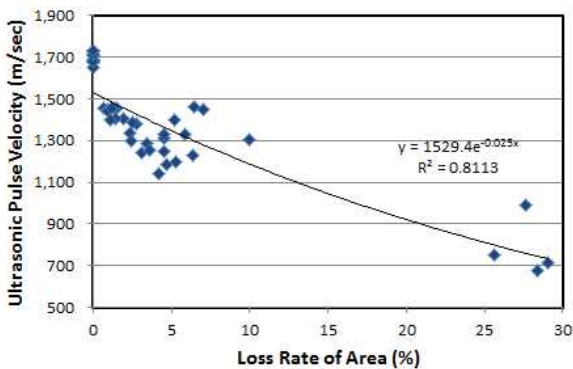


Fig.13 Section of Termites Damage and Measurement of Loss Area



a. loss rate of area by ultrasonic velocity



b. ultrasonic velocity by loss rate of area

Fig.14 Relationship between Ultrasonic Velocity and Loss rate of Area

목재의 흰개미 충해는 목재의 세포벽 성분을 분해시켜 조직의 구조를 파괴하는 부후와 달리 내부 공동화가 이루어지는 충해 이외의 조직은 건전한 상태를 나타내는 것이 특징이다. 따라서, 기존 연구에서와 같이 부재의 잔존 강도를 예측하는 것보다 내부 단면 결손율을 이용하여 구조부재의 잔존 유효 단면의 예측이 가능하다면 보다 정확한 구조안전성의 시뮬레이션 및 예측이 가능하다.

본 연구에서 도출한 회귀식은 현재 콘크리트 구조물의 안전성 검토시 활용하는 초음파 전파속도와 강도와의 관계식에 비하여 상관관계가 높게 나타나 목조 문화재의 안전성 검토 및 부재의 교체여부의 판단 등에 널리 활용이 가능할 것으로 판단된다.

단, 본 회귀식은 소나무를 구조부재로 사용한 경우에 활용 가능하며 추후 다양한 구조용 목재를 대상으로 초음파 전파속도와 단면 결손율의 관계에 대한 데이터 베이스 구축이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 초음파 전파속도법을 이용하여 목조 구조물의 흰개미에 의한 식해 범위 및 진행과정을 예측하고자 하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

흰개미 식해에 의한 내부 공극의 발생은 구조부재의 내력을 담당하는 구조부재의 단면적을 감소시키는 결과를 초래하기 때문에 이를 정량적으로 평가하는 것은 문화유산의 보존 및 유지관리 측면에서 중요하다.

초음파 전파속도법은 초음파가 통과하는 매질과 내부 공극의 속도 차이를 이용하여 내부 결함을 측정하는 도구로서 기존의 강도 측정뿐만 아니라 각 위치에 따른 목재 단면의 흰개미 피해범위의 규명에 유효하였다.

단면 결손율과 초음파 전파속도는 부의 상관관계를 나타내고 있으며 상관성이 높은 것을 알 수 있었다. 소나무를 이용한 구조부재의 경우 본 연구에서 도출한 회귀식으로 내부 단면 결손율의 예측이 가능하며, 목구조의 구조안전성 평가시 유효 단면적의 입력치로서 활용이 가능하다.

그러나, 본 회귀식은 소나무 수종에서의 적용 또는 건전부재와 상대적인 평가에 활용시 그 신뢰도가 높다는 점에서 한계점을 가진다. 따라서 국내에서 사용된 다양한 구조용 수종과 각종 마감재료의 초음파 전파속도에 관한 데이터베이스가 구축된다면 문화유산의 유지관리를 위한 비파괴 시험법으로 활용도가 넓어질 것으로 생각된다.

향후, 문화유산의 보존에 있어서 손상 범위의 확인 및 부재의 교체과정의 다양한 의사결정 프로세스에서 유용하게 활용이 가능할 것으로 생각된다.

References

1. Mori Takuro, Kousoku Akihiro, Yanase Yoshiyuki, Komatsu Kohei, 「Relationships between Strength Properties and Density or Ultrasonic Velocity of Timber Attacked by Termite」, Journal of the Japan Society for Testing Materials, Vol.59, No.4, 2010, pp.297-302
2. Lee Dongheop, Kang Changho, Son Dongwon, 「Distribution and Damage of Termite in Korea」, Proceeding of Korean Society of Wood Science Technology, 1998, pp.216-220
3. Kyusik Lee, Soyoun Jeong, Yongjae Chung, 「Pest Control Management for Preservation of Wooden Cultural Properties」, Conservation Studies, Vol.21, 2000, pp.6-65
4. Seoul National University, 『Development of Technique for Estimating the Biological Deterioration in Domestic Wood using NDE』, Ministry of Agriculture and Forestry, 2005. 11
5. Yoshiyuki Yanase, Takuro Mori, Tsuyoshi Yoshimura, Yuko Fujiwara, Yoshihisa Fuji, Toshiyuki Torigoe, Setsuo Imazu, 「Relationship Between Porosity in Wood Attacked by the Drywood Termite Incisitermes Minor and Residual Bending Strength」, Journal of the Society of Materials Science, Vol.63, No.4, 2014. 4, pp.320-325
6. Marko Teder, Kalle Pilt, Matis Miljan, Vello Pallav, Jaan Miljan, 「Investigation of the Physical-Mechanical Properties of Timber using Ultrasound Examination」, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 18, No. 6, 2012, pp.795-801
7. Carrasco, E. V. M., Passos, L.B., Bremer, C. F., Alves, R. C., Mantilla, J.N.R, 「Ultrasound classification for recycled glulam sleepers」, International Journal of Applied Science and Engineering Research, Vol. 2, No. 5, 2013. 10, pp.524-533
8. Yanase Yoshiyuki, Mori Takuro, Minami Munekazu, 「Investigation of Damages by Drywood Termite in

Japanese Wooden Structure」, Journal of Housing Research Foundation, No.38, 2011, pp.245-256

9. Yasutoshi Sasaki, Mariko Yamasaki, Anri Yoshino, Masayuki Sumioka, Hideaki Tanahashim, Yu Ooka, Yoshiyuki Suzuki, 「Estimation of Used Wood Strength for Traditional Construction Preservation」, Journal of Disaster Mitigation for Historical Cities, Vol.6, 2012. 7, pp.321-328

Received (6.15.2015)

Revised (9.5.2015)

Accepted (10.31.2015)