

노출 환경에 따른 목조 고건축물 기둥의 열화 차이*1

김 광 철*2† · 배 문 성*3 · 이 전 제*3

Difference of Deterioration According to Exposed Condition of Column in Wooden Traditional Building*1

Gwang-Chul Kim*2 · Mun-Sung Bae*3 · Jun-Jae Lee*3

요 약

목조 고건축물의 안전성 평가를 위해서는 먼저 부재의 성능평가가 선행되어야 한다. 지금까지의 목재 부재의 성능평가는 육안에 의한 경험적 방법에 의존하였다. 하지만 과학적이고 합리적인 비파괴 방법을 적용하여 구조 부재의 성능을 평가할 수 있다면 구조물의 안전성 해석은 더욱 정확해지고 합리적이 될 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 목조 고건축물의 여러 구조 부재 중 기둥에 대해 비파괴 평가법을 적용하여 구조부재의 성능 평가에 대한 가능성을 알아보았다. 이 결과를 이어지는 연구에서 구조물의 안전성 해석의 기초자료로 사용할 예정이다. 특별히 기둥의 노출 환경에 따른 열화의 진행정도를 비파괴 평가법으로 측정하였다. 그 결과 실제 육안에 의한 열화의 관찰과 유사한 결과를 나타내어 비파괴 방법의 적용 가능성을 보여주었다.

ABSTRACT

Capacity assessment of structural member must be ahead of the safety assessment of wooden traditional building. Capacity assessment of structural member has been dependent on empirical method with visual inspection even now. Safety assessment of building, however, can be more correct and reasonable provided non-destructive evaluation technique that scientific and logic would be used to evaluate the capacity of structural member.

*1 접수 2002년 5월 13일, 채택 2002년 9월 2일

본 연구는 2000년도 한국과학재단 연구비(과제번호:R01-2000-00394) 지원에 의한 연구 결과의 일부임.

*2 이산대학, Iksan National College, Iksan 570-752, Korea

*3 서울대학교 농업생명과학대학, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

† 주저자(corresponding author) : 김광철(e-mail: gckim@iksan.ac.kr)

For that purpose, non-destructive evaluation technique was applied to column among many structural members of wooden traditional building to examine the possibility of capacity assessment of structural member. And then, those data will be used as a basic data for capacity assessment of structural member in a following study. Specially, deterioration progress levels of column according to exposed condition were measured. Similar results were obtained as compared with results of visual inspection, so there was a good possibility of application for non-destructive evaluation technique.

Keywords: capacity assessment, traditional building, non-destructive evaluation, safety assessment, exposed condition, deterioration

1. 서 론

전통목조건축물의 보존을 위해서는 올바른 전통건축기술의 계승발전과 기존의 건축물에 대한 정확한 안전진단 및 보존대책이 필연적으로 요구되는데 이를 위해서는 현존하는 전통목조건축물에 대한 조사, 연구를 체계적으로 진행하여 우리 전통목조건축에 관한 기술을 집대성해야 한다. 이 작업은 방대한 데이터의 축적 및 자료에 대한 철저한 검증을 요하는 힘든 작업으로 몇 년 내에 가시적인 결과를 나타내는 그러한 작업이 아니다. 하지만, 고 건축물이 하나의 예술품만으로 가치를 인정받는 것이 아니고 조상들의 열과 혼, 그 시대의 삶이 담겨 있는 종합적 가치품임을 인정한다면 조금이라도 빨리 과학적이며 객관적인 안전진단 기준을 확립하고 이를 이용하여 전통 건축물의 보존 및 대책을 수립해야 할 것이다. 한편, 현존 전통건축물이라 하더라도 오랜 세월을 거치면서 변형됐을 가능성도 배제할 수 없다. 따라서, 기존의 건축물에 대한 자료만 단순히 집대성하는 방법이 가지는 문제점을 해결하는 한 가지 방법으로 과학적 구조해석 방법을 우리의 전통건축물에 적용시키는 방법을 생각해 볼 수 있다. 현재의 합리적 해석 기법을 전통건축물에 적용해봄으로써 단순히 경험법칙에 의존할 경우에 생기는 오류를 바로잡을 수 있다. 이러한 과정에서 축적된 전통목조건축의 구조에 관한 정확한 지식은 현존 전통목조건축물의 수리, 복원 등의 경우에 신뢰성 있는 내구 연한을 산정할 수 있고 이를 바탕으로 정확한 보강 방법의 제시, 적절한 부재 크기의 선택 및 결구

방법의 결정 등에 있어 크게 기여할 수 있을 것이다.

하지만, 이러한 것은 기존의 전통 건축물의 부후와 파손의 안전성에 대한 과학적인 원인 진단 및 이를 위한 기준을 확립하고 난 후에 이루어질 수 있는 일이며, 본 연구에서는 이를 위해 기존의 전통 목조 건축물의 안전성을 지금까지 주로 해왔던 단순한 육안적 부후 검사나 생물학적 열화 탐지 측면에서 만의 검사가 아니라 물리적 비파괴 평가법을 적용하여 정확한 건축물의 안전성 평가를 위한 기준 수립을 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

본 연구가 추구하고자 하는 궁극적인 목적은 사라져 가는 전통 목조 고건축물의 안전한 보존을 위해 자의적이고 임의적인 안전성 진단이 아니라 과학적이며 객관적인 안전성 진단 기준을 확립하고자 하는 것이다. 이를 위해 이미 우수성과 객관성이 확보된 비파괴 검사법을 기존의 육안적 검사법과 생물학적 검사법과 병행하여, 현재 실재하고 있는 많은 문화재와 고 건축물들의 부후 정도와 안전 수준, 그리고 강도적 손실 등을 조사·점검·자료화하고, 부후 및 파손의 원인을 함께 고려하여 목조 고건축물의 안전 진단 기준 수립에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

본 연구에서는 이 중 먼저 고건축물의 여러 구조부재중 하중의 지지에 가장 큰 역할을 하는 기둥에 대해 비파괴 진단법을 적용하여 열화 탐지가 가능한지를 살펴보고 이것이 가능하다면 기둥의 노출 환경, 즉 기둥이 배치된 위치와 기둥의 높이별로 어떠한 열화의 차이가 있는지를 규명하고자 한다.

2. 재료 및 방법

해체 예정인 고건축물과 중요 문화재가 많이 분포한 곳을 선정하여 열화가 심하게 진행된 곳과 열화가 별로 진행되지 않은 곳을 선별하여 그 차이점에 대한 원인을 밝히고, 실제 사용되던 부재의 부후 및 파손의 정도, 강도 감소 등을 육안적 검사, 비파괴적 검사, 생물학적 검사를 차례로 실시하여 부후 및 파손, 강도 감소의 원인과 수준을 확인하고, 외국의 안전 진단 기준의 방법 및 체계를 점검하여 반영하고 이를 보존 대책의 수립 및 안전 판단 기준 수립에 기초 자료로 사용하고자 하였다. 하지만, 문화재라는 어려움으로 인해 쉽게 접근이 허용되지 않았고 또한 접근이 허용이 되더라도 직접적인 접촉이나 실험 진행상 많은 어려움으로 인해 향교에만 국한하여 실험을 실시하였지만 향교 역시 국내의 전통 목조 구조물로서의 특성과 형식을 충분히 갖추고 있으므로 다양한 지역의 향교를 확보할 수만 있다면 어느 정도 소기의 목적을 이룰 수 있을 것으로 판단되어 다양한 지역의 향교를 선정하여 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 전국에 널리 분포해 있는 목조 고건축물 중 향교를 대상으로 10곳을 선정하여 예비 실험과 향교 관련자들과의 충분한 토의 끝에 그 중 5곳의 향교를 정하여 정밀 추가 실험을 실시하였다. 구체적인 향교의 위치 및 특성은 Table 2와 같다.

2.1. 구조물의 육안 검사

이 방법에 의한 검사는 가장 간단한 비파괴 평가 기법이며, 구조 부재를 평가하기 위해 첫 번째로 사용되는 것으로 신속하게 개개 부재의 상대적 구조적 안전성을 정성적으로 평가할 수 있다는 장점이 있으며, 외부의 손상이나, 부후, 압입으로 인한 섬유, 깃이김, 크립, 혹은, 심한 할렬과 윤활같은 명백한 결점들을 쉽게 확인할 수 있다. 육안 검사에 의한 결과들은 그 자체로도 의미가 있지만, 그 보다는 좀더 정확한 현상 파악을 위해 육안 검사법보다 진보한 비파괴 평가 기법을 유도하기 위해 사용되는 사전 징후 파악의 목적이 더 크다고 할 수 있다. 하지만 접근이 허용되는 부

부의 검사만 가능하다는 문제점과 객관적이고 과학적이지 못하며 검사자의 주관적·경험적 수준에 의존한다는 문제점이 있음에 주목하였다.

2.2. 초음파 비파괴 진단법에 의한 목조 고건축물의 정성적 열화 평가 방법

각 향교 건물의 기둥과 보를 대상으로 초음파 비파괴 진단법을 적용하여 초음파의 통과 시간을 열화 진단의 기준으로 채택하여 열화를 진단하였다. 본 연구에는 기둥에 관한 자료만 포함하였다.

목재에 대한 비파괴 시험 기법은 금속이나, 플라스틱, 요업제품 등과 같은 균질하고 등방성의 성질을 갖고 있는 재료에 대한 것과는 아주 상이하다. 그러한 비목질 재료들은 역학적 성질이 잘 알려져 있고 제조공정이 확실하게 조절될 수 있으며, 비파괴 시험 기법이라는 것은 단순히 불연속이나, 내부 공극, 혹은 함유물을 탐지할 뿐이다. 하지만, 목재는 불규칙성이 자연적으로 발생하며 주변 환경 내에서 여러 열화적 요인에 의해 이러한 불규칙성이 더욱 유도될 수도 있다. 따라서, 목재에 대한 비파괴 기법은 목재의 역학적 성질을 측정하기 위해 목재 내에 자연적으로 생긴 불규칙성이나 주변 환경에 의해 유도된 불규칙성이 목재 부재에 어떻게 영향 하는지를 정밀하게 측정할 필요가 있다.

이러한 이유에서 본 연구는 육안에 의해 구조 부재의 전체적인 열화의 정도를 사전에 인지하고 이를 바탕으로 초음파 비파괴 진단법을 적용하여 초음파의 구조 부재 통과 시간을 열화의 기준 시간과 비교하여 열화의 유무를 정성적으로만 평가하였다.

초음파 검사는 재료를 통과하여 전파되는 고주파(20 kHz 이상)의 특성들을 해석하는 것으로서, 철근 콘크리트 구조물 내부의 결함을 탐지하기 위해 처음 사용되었지만 최근 들어 목재의 웅이나, 목리경사, 부후 등의 강도 감소 결점들을 탐지하기 위해서도 널리 사용되는 방법이다. 사용한 초음파 비파괴 진단 장치는 Pundit(Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester)라는 초음파 비파괴 측정 기였으며 구조용 기둥과 보에 대해 비파괴 실험을 실

Fig. 1. The experiment setup and method for the assessment of deterioration of wooden ancient building.

시하였다(54 kHz transducer, input sensitivity 250 μV , impedance 470 k Ω). 구체적인 장치의 그림과 측정 방법은 Fig. 1과 같다.

2.3. 향교의 기둥 부재별 일련번호

각 향교의 기둥에 대한 부재의 일련번호 부여 방식은 다음과 같다. 예를 들어 3-H-RS-3의 경우 각 문자의 의미는 순서대로 대성전-문헌 기둥-우측면 벽체-맨 우측으로부터 세 번째 기둥을 의미한다. 즉, 첫 번째 숫자는 건물의 위치를 표시는 것이며(1은 명륜당, 2는 동·서무동, 3은 대성전), 두 번째 문자는 노출

Fig. 2. Sample of the serial numbering for the field note.

기둥 혹은 벽면에 묻혀있는 기둥을 의미하고(E: 노출 기둥, H: 문헌 기둥), 세 번째 문자는 기둥의 건물내의 위치를 의미한다(F: 앞면, RS: 우측면, LS: 좌측면, B: 후면), 네 번째 문자는 각 면에서의 기둥의 위치를 의미한다(기준은 가장 오른쪽부터 시계방향으로).

이러한 비파괴 진단법에서 구조 부재의 열화의 유무 파악은 초음파의 구조 부재 통과 시간이 기준이 되며, 정확성과 합리성을 위해 목조 건축의 선진국은 열화된 시편을 충분히 확보하여 다양한 비파괴 진단 실험과 실제 횡단면을 절삭하여 육안으로 비교 분석을 통해 각 국의 환경에 적합한 열화 기준 시간을 결정하고 있다. 하지만, 국내의 경우는 이러한 충분한 실험이 진행되지 못한 상태이며, 이러한 가치 있는 결과들은 수년 내에 소수에 의해 얻어질 수 있는 결과가 아니며 각 연구자들의 연구 결과를 공유하고 정확한 통계처리를 거쳐 국내의 여러 환경에 적합한 기준을 제정해야 함을 고려하면 국내의 경우에도 관련 연구자들의 협력하에 신뢰성 있는 열화 기준을 제정할 필요성은 아주 크다 할 수 있다. 이로 인해 국내의 현실상 우리의 환경에 적합한 정확한 열화 기준 시간이 없는 이유로, 미 임산물 연구소(FPL)의 연구 결과(Ross, 1988)와 김 등(2001)를 인용하여 비교 기준을 삼았다. 미 임산물 연구소의 비교 기준은 다음과 같다.

① Baseline transmission time 1,575 $\mu\text{s}/\text{m}$, ② $T_{\text{baseline}} (\mu\text{s}) = 1300 \times \text{WTD}$, 여기서, WTD는 파의 통

과 거리(m).

①과 ②의 두 값 중 작은 값을 기준으로 하여 열화의 유무를 파악하였다.

건축물의 안전성을 진단하기 위해서는 하나의 통일된 기준이 있어야 하며 안전 진단을 실시하는 방법에 조화와 상조가 있어야 한다. 즉, 본 연구에서 사용하고자 하는 방법들간에도 서로 독립적인 것이 아니라 상호 보완적인 것이다. 따라서, 먼저 육안 검사법을 이용하여 일정 수준의 부후 및 파손의 정도를 파악하고 심히 강도 손실이 우려되는 곳이나 구조적 또는 환경적 측면에서 강도 손실이 예측되는 곳에는 물리적 비파괴 검사법을 사용하여 객관적인 안전 진단을 실시하고 이어 생물학적 방법으로 부후 및 파손 원인을 규명하여 보존 대책을 수립하여야 할 것이다.

3. 결과 및 고찰

다음의 Table 1과 같은 형식으로 비파괴 검사의 결과와 생물학적 검사의 결과를 동시에 향교 각 건물의

기둥별 야장을 작성하여 열화의 정도와 원인을 분석하였고 이를 기초로 관련 연구자 누구나 손쉽게 접근 가능하고 수정하여 사용하기 편리한 자료화를 위한 작업을 진행 중에 있다.

3.1. 초음파 비파괴 진단법에 의한 목조고 건축물의 정성적 열화 평가

초음파를 이용한 비파괴 시험 및 육안에 의한 검사를 실시한 각 향교는 다음의 Table 2와 같다.

각 향교의 명륜당과 대성전, 그리고 서무동의 측정 가능한 기둥과 보의 초음파 통과 시간은 지면 관계상 포함시키지 않았다.

3.1.1. 초음파 비파괴 진단법의 적용 가능성

실제 육안으로 관찰한 여러 향교 건물내의 구조용 기둥 및 보의 보존 상태는 향교의 사용 정도와 정비례 관계가 있었다. 도심지 주위에 위치한 지역의 경우 현

Table 1. Field note for the assessment of deterioration of local school annexed confucian shrine of Ye San, Dae Sung Jun

* 1 : NDE : Non-Destructive Evaluation, * 2 : BDE : Biological Decay Evaluation, * 3 : TT : Transmission Time,
 * 4 : TN : Total Number of insected hole, * 5 : D or S : Deterioration or Sound, * 6 : DD : Degree of Decay,
 * a : diameter of insected hole, * b : number of insectef hole

Table 2. Each local school annexed to the confucian shrine

* Local school annexed to the confucian shrine that additional specific experiment was carried.

재에도 그 지역 주민들에게 한학을 가르치거나 예식장 등의 공용 시설로 사용하고 있어서 책임자들의 지속적인 관리와 보수 유지로 인해 상당히 보존 상태가 양호한 반면, 시골로 갈수록 관리 책임자들이 전업 관리자가 아닌 농업을 주로 하시는 그 지역의 나이 드신 분들이나 주위의 존경을 받는 분들이 관리를 맡고 있어 도시에 비해 그 보존 상태는 아주 열악한 상태였다. 특히 각 지역 명을 가진 향교일지라도 실제의 위치가 그 지역과 동떨어진 경우, 예를 들어 연산향교나 익산 향교(이들 향교는 시내와 아주 동떨어진 위치에 있다) 등의 보존 상태는 최악의 상황으로서 육안으로도 구조용 부재의 열화 상태가 얼마나 심각한지를 볼 수 있었으며 이는 곧 이어 초음파 비파괴 시험의 결과를 가지고 과학적으로 증명할 수 있었다.

하지만, 초음파 비파괴 방법의 경우 두 가지 정도의

한계점에 직면하게 되었는데, 첫째, 음파를 이용한 여러 비파괴 측정법의 경우 센서를 접촉시킬 수 있는 양면에 접근이 가능해야 한다는 것이다. 즉, 목조 고건축물의 경우 측면 벽체에는 창문이나 개구부 등이 거의 없으며 기둥이 벽면에 반 이상 묻혀 버리는 구조이기 때문에 측면 구조 부재의 경우 귀통이의 부재를 제외하고는 측정이 불가능하다는 문제점을 안고 있다. 막혀 있는 벽체를 통과해 센서를 연결할 방법이 없는 것이다. 따라서 측면 벽체의 경우 양면 접근이 불필요한 drilling resistance법이나 screw withdrawal법 등의 사용을 필요로 하며, 이는 구조 부재의 잔존 강도를 평가하는 위의 방법들을 적용하면서 파편을 관찰함으로써 부수적으로 얻어질 수 있는 결과이다. 따라서, 본 연구에서는 측면 벽체에 개구부가 있는 몇몇 향교의 경우에만 측면 벽체의 구조부재에 대해 초음

파 비파괴 시험법을 적용하였으며 육안적 관찰과 비교하였다. 정면과 후면 역시 개구부가 있는 기둥은 측정이 가능하지만 개구부와 멀리 위치해 센서의 선이 닿지 않는 곳은 측정이 불가능하며 노출 기둥이외에 벽에 묻힌 기둥의 경우 원하는 일정한 중심각으로 측정이 불가능하기 때문에 가능한 많은 측정을 하였지만 완전한 기둥의 대표값은 아닐 수 있음에 주의하였다.

두 번째 문제점으로, 음파의 통과 시간을 근거로 열화가 있는 곳의 통과 시간은 건전한 부위에 비해 더 길다는 가정 하에 열화의 유무를 파악하는 본 방법으로는 내부 열화의 정도 즉, 열화의 크기를 정량화 하는데 있어서의 문제점을 안고 있다. 즉 여러 번의 실험을 통해 얻어진 통과 시간의 결과를 통해 열화 유무의 존재 기준을 설정하고 이보다 길면 열화가 존재하고 이보다 짧으면 열화가 존재하지 않는다는 결과 해석만으로는 결론적 결과 도출은 불가능하고 열화의 존재에 대한 현상학적 결과만이 도출되어 추가적인 정량화 방법이나 음파에 대한 여러 특성을 수집하여 결과를 해석할 필요가 제기되었다.

전국의 모든 향교는 국립 교육기관의 역할을 수행함으로써 국가의 간섭과 통제를 받던 곳이었다. 그로 인해 각 향교가 거의 엇비슷한 구조로 구성되어 있으며, 특히 건물의 배치 상황은 상당히 유사하다. 따라서 몇몇 대표적인 향교를 선별하여 각 구조부재의 노출 환경에 따른 열화의 유무와 정도를 정확히 파악할 수 있다면 이후의 관련 전통 목조 건축물의 연구에 도움이 될 것으로 판단되어 해석을 실시하였다.

지면상의 문제로 전체 자료를 제시하지 못하고 이중 정밀 추가 실험을 실시한 향교 5곳의 대성전 기둥 중 수원 향교 한 곳만 Fig. 3에 제시하였다. 미 임산물 연구소의 열화 기준 시간과 비교하여 그 보다 값이 작으면 열화가 없는 곳이며 그 보다 큰 값은 열화가 진행된 곳으로 해석하였다.

Fig. 3을 보면 수원 향교 대성전의 노출 기둥의 각 위치별 초음파 통과 시간이 21개 측정 위치 중 6곳만이 열화의 기준 값보다 높게 나타나고 있으며, 이는 전체적으로 이 기둥의 열화 진행 정도가 약함을 의미하고 이는 실제 육안으로 관찰한 결과도 동일하게 나타났다. 그림에서 나타난 가로선 보다 위에 있는 것이 열화가 진행된 곳으로 판단할 수 있다.

Fig. 3. Exposed column of a local school annexed to the confucian shrine in Suwon.

이에 반해 제천 향교 대성전의 경우 수원 향교의 기둥에 비해 열화 기준 시간 보다 높게 나타나는 경우가 거의 대부분이며 역시 육안으로 관찰한 열화 역시 심각히 진행된 상태였다.

익산 향교의 경우 측정의 정확도를 높여보기 위해 측정 위치를 다른 향교에 비해 세분화하여 더 많은 위치에서 초음파 통과 시간을 측정하였다. 전체적으로 열화기준을 초과하는 경우의 수는 제천에 비해 작았지만 열화가 진행된 정도에 있어서, 즉 통과시간의 절대 크기에 있어서 매우 큰 값이 얻어졌으며 실제 육안으로 관찰한 경우에도 몇몇 이긴 하지만 열화가 진행된 곳의 정도가 다른 향교에 비해 아주 심하였다. 연산 향교 역시 익산향교나 여산 향교처럼 열화의 범위나 육안적으로 관찰한 정도에 있어서 아주 심한 곳으로 나타났다.

Table 3. Statistical significant for the columns of each a local school annexed to the confucian shrine

3.1.2. 노출 환경에 따른 기둥의 열화 분석

각 노출 환경에 따른 구조 부재(기둥)에 대한 초음파 통과 시간의 차이를 다음의 Table 3에 각각 명륜당과 대성전을 구별하여 유의 수준과 함께 제시하였다. 분산분석(일원배치법)을 실시하여 유의성을 검증하였다.

명륜당 기둥에 대한 분산 분석의 결과를 보면 노출 환경에 따른 차이가 있는 곳으로는 주로 향교의 보존 상태가 양호한 곳이 많으며 노출 환경에 따른 차이가 없는 곳은 보존 상태가 열악한 향교의 경우에 많았다. 이는 각 부재들간의 열화의 정도는 차이가 있지만 보존 상태가 열악한 곳의 건물 자체가 워낙 열화가 많이 진행되어 모든 부재가 열화로 정의되었기 때문에 통계적으로 유의성이 없는 것으로 나타난 것으로 판단된다. 특히 명륜당은 대성전에 비해 관리가 덜 되기 때문에 열화가 더 심하게 진행된 상태로 방치된 곳이 많았다.

대성전 기둥의 경우 관리 유지가 잘 되고 있기 때문에 건물의 앞, 측면, 뒷면에 따른 부재의 열화 진행 정도는 노출 환경에 따른 차이만으로 볼 수 있다. 즉, 전면에 배치된 기둥들의 경우 모든 향교의 남향 배치로 인해 강렬한 햇빛에 노출되기 때문에 뒷면의 기둥에

비해 건조 할렬이 심하였으며 이는 초음파의 통과 시간의 차이로 확인할 수 있었다. 단, 대형 구조용 원목의 경우 외기 노출에 의한 열화에 대한 자료가 충분치 못하여 노출 환경에 따른 열화의 차이에 대한 고찰을 거치지 못하였으며 향후 보완할 예정이다.

본 연구의 결과의 해석을 통해 구조부재의 노출 환경 즉 구조물의 전면과 후면, 그리고 측면 어디에 배치되어 있는지에 따라 표면 열화 및 내부 열화의 차이가 어느 정도 존재함을 알 수 있었다. 하지만 정확한 차이는 drilling resistance 등의 직접 천공에 의한 검증을 거쳐야 논의할 수 있을 것으로 생각한다.

다음의 Table 4와 5는 노출 환경에 따른 초음파 통과 시간에 있어 유의성이 있는 것으로 분석된 향교의 건물들에 한해 추가적으로 t 검정을 실시하여 유의성이 있다면 즉, 노출 환경에 따른 차이가 있다면 어느 곳에 배치된 부재에 영향이 더 큰가를 통계적으로 비교하기 위해 분석을 실시한 결과이다. 노출 환경에 따른 차이가 있는 곳으로 분석된 향교 중 측면 구조 부재가 측정 가능했던 곳은 과천 향교 하나였다.

과천 향교의 경우 앞면과 측면의 구조 부재간에는 큰 차이가 없지만 측면과 뒷면, 그리고 앞면과 뒷면의 구조 부재간에는 통과 시간의 차이가 심하였다. 특히 뒷면의 초음파 통과 시간이 가장 길게 나타난 것은 명

Table 4. Statistical significant for the columns of Myung Reun Dang of a local school annexed to the confucian shrine(using t-distribution)

Name	Significance		
	Front-Side	Side-Back	Front-Back
Gwacheon	$t_s=0.98^{ns}$, $t_{0.05}=2.03$	$t_s=3.15^s$, $t_{0.01}=2.78$	$t_s=2.09^s, t_{0.05}=2.03$, $t_{0.01}=2.73$
Suwon	-	-	$t_s=5.77^s, t_{0.01}=2.71$
Choongju	-	-	$t_s=3.85^s, t_{0.05}=2.82$
Pyeongtaek	-	-	$t_s=4.62^s, t_{0.05}=2.82$

Table 5. Statistical significant for the columns of Dae Sung Jun of a local school annexed to the confucian shrine(using t-distribution)

Name	Significance		
	Front-side	Side-back	Front-back
Yeosan	-	-	$t_s=3.35^s, t_{0.01}=2.67$
Choonhju	-	-	$t_s=4.04^s, t_{0.05}=2.71$
Pyeongtaek	-	-	$t_s=3.47^s, t_{0.05}=2.67$

륜당이나 대성전 모두 뒷면의 습도가 높은 것과 관련 지어 볼 때 눈에 보이는 표면 할렬의 징후가 약할지라도 내부의 열화 원인이 존재한다는 암시로 파악된다. 이 역시 기존의 육안에 의한 표면만의 열화 진행 검사법이 간과할 수 있는 한 측면을 보여 주는 것이라 할 수 있을 것이다. 수원 향교 역시 파천 향교과 동일하게 뒷면의 구조 부재의 통과 시간이 더 크게 나타났다. 하지만, 충주 향교와 평택 향교의 경우 그 차이가 크지는 않지만(절대 오차 7%) 오히려 앞면 부재의 통과 시간이 더 긴 것으로 나타났다. 이는 표면 함수율 측정의 결과와 충주와 평택 향교의 명륜당 배치가 후면에도 충분한 햇빛이 들어 올 수 있는 구조임을 종합해 보면 앞면과 뒷면의 차이가 심하지 않을 수도 있다고 판단된다. 또한 전체적으로 충주 향교와 평택 향교는 보존 상태가 우수한 편에 들기 때문에 획일적인 노출 환경에 따른 비교는 무의미하며, 노출 환경에 따른

Fig. 4. Exposed column of a local school annexed to the confucian shrine in Yeusan.

구조 부재의 열화의 정도 차이는 열화가 심한 향교에 국한해서 진행해야 진정한 의미를 가질 수 있을 것이다.

대성전의 경우 모든 향교의 배치 구조상 산이나 언덕을 바로 등지고 위치해 있는 관계로 햇빛에 노출되는 시간이 거의 없다. 실제 표면 함수율을 측정한 결과에서도 뒷면의 함수율이 월등히 높게 나타나고 있다. 그로 인해 건조에 의한 표면 할렬은 거의 없지만 습한 환경으로 인한 내부에서의 여러 복합 원인에 의한 열화가 진행되어 있을 수도 있겠지만 초음파 통과 시간을 측정해 보면 앞면의 부재에 대한 통과 시간이 월등히 길다. 이는 표면의 건조에 의한 할렬이 내부로의 진행을 일으켜서 일어날 수도 있으며 양분을 얻으려고 하는 균류나 곤충의 영향에 의한 것일 수도 있다. 어떤 경우이든 대성전의 경우 모든 향교에서 앞면에 노출된 부재의 열화 진행 정도가 뒷면에 비해 월등히 큰 것으로 육안이나 초음파 비파괴 진단법의 결과로도 관측된다. 다음의 Fig. 4는 여산 향교의 대성전 기둥의 그림으로서 위와 같은 심각한 대성전 앞면 기둥의 열화 진행 상태를 보여 주는 것이다.

3.1.3. 높이에 따른 기둥의 열화 분석

다음의 Table 6과 Fig. 5는 앞에 노출된 대성전 기

Fig. 5. Front of Dae Sung Jun in Iksan and Yeonsan.

Table 6. Statistical significant according to the height of the columns for Dae Sung Jun of a local school annexed to the confucian shrine

Name	Significance			
	3-E-F-1	3-E-F-2	3-E-F-3	3-E-F-4
Yeonsan	$F_s=1.70^{ns}$, $F_{0.05}=2.41$	$F_s=4.64^s$, $F_{0.01}=3.43$	$F_s=0.63^{ns}$, $F_{0.05}=2.41$	$F_s=1.93^{ns}$, $F_{0.05}=2.41$
Iksan	$F_s=9.48^s$, $F_{0.01}=3.14$	$F_s=17.15^s$, $F_{0.01}=3.14$	$F_s=8.68^s$, $F_{0.01}=4.46$	$F_s=9.35^{ns}$, $F_{0.01}=4.46$

등들의 높이에 따른 초음파 통과 시간의 유의성을 검증한 것이다. 이를 위해 대성전 노출 기둥의 경우 한 단면에 대해 다른 곳과 달리 9곳에서 40° 간격으로 측정을 하였다.

연산 향교의 경우 노출 기둥 중 가운데 두 개의 기둥만이 높이에 따른 통계적 유의성을 보였으며 익산 향교의 경우 맨 좌측의 기둥만 제외한 나머지 세 개의 기둥에서 높이에 따른 차이를 볼 수 있다. 각 기둥에서의 초음파 통과 시간은 가장 아래 부분과 맨 윗부분의 통과 시간이 가장 길게 나타났다. 이는 대부분의 목구조물의 열화가 부재의 끝면 즉 지면과 접하는 부분이나 혹은 접합부에서 발생한다는 여러 보고들과 일치하는 것으로 보존처리 시에 반드시 숙지해야 할 사항이다.

각 구조 부재는 햇빛이나 비등의 외기 조건에 노출된 바가 각기 상이하며 지역별 환경적 차이도 존재하고, 특히 6.25를 전후한 건물의 소실로 인해 통일되지 않은 방식과 재료를 이용한 개·보수를 통해 상당한 구조적 차이 역시 존재한다. 예를 들어 충북 지역의 도백이 관리하는 청주 향교의 경우 향교 건물 전체가 6.25 이후 새로이 지어지고 충북 지역의 향교중 유

지·관리에 책정된 예산이 풍부한 관계로 보존 상태가 아주 우수하지만, 같은 지역의 제천이나 충주 향교의 경우 전문가가 아닌 사람을 통한 부분적 개·보수와 유지 보수에 관한 예산의 미비로 인해 보존 상태가 청주 향교에 비해 뒤떨어져 있다. 또한 여러 복합적 요인들의 영향으로 인해 같은 건물의 같은 노출 환경 내에서도 표면 열화의 진행 상태가 아주 상이한 결과를 낳고 있는 상황이다. 이에 대한 충분한 논의가 필요하다. 따라서, 각 구조물의 역사적 배경과 현재의 상황을 종합적으로 분석하고 고려하여 구조물의 안전성에 대한 진단을 실시해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

열화의 유무 파악에 관련된 여러 방법들을 고려해 보고 기존의 연구 결과들을 종합해 보면 비파괴 시험법 중 어느 것을 선택하느냐 하는 것은 중요한 문제가 아니며 오히려 한 가지 방법만으로 국한하는 것보다는 현실에 맞게 여러 방법을 혼합 적용하여 결과를 해석해야 할 것으로 판단된다. 즉, 육안에 의한 검사법

으로 일차적인 안전 진단을 실시한 후 초음파 시험법이나 기타 비파괴 방법을 적용하고 심하게 부후된 부분 등에는 생물학적 열화 탐지나 실제 천공이 가능하다면 천공 표본 시험법을 적용하여 안전성을 평가하고 보존 대책을 수립해야 할 것이다.

본 연구에서는 기둥의 배치 위치에 따른 열화의 차이를 초음파 비파괴 진단법으로 진단할 수 있음을 규명하였다. 또한 기둥의 높이 별로는 지면과 접한 부분과 맨 윗부분에서 열화가 가장 많이 진행되었음을 알 수 있었다. 하지만 이러한 열화의 탐지에서 전체 구조물의 안전성 해석을 위한 정량적 성능평가는 불가능하였으며 오로지 정성적 열화 탐지만 가능하였다.

따라서, 이어지는 연구에서는 충주 향교 등의 몇몇 곳에서 보수 공사 중인 부재를 입수하여 열화된 부재에 대해 직접 천공을 실시하여 부재의 정량적 강도 평가를 실시하고, 아울러 문헌상에 드러나는 우리나라의 고 건축물에 주로 사용된 대표 수종들에 대해 건전한 상태의 재료를 구입하여 인위적인 결함을 형성시킨 후 이에 대해 초음파 비파괴 진단 실험 및 천공 저항 실험, 그리고 생물학적 열화 촉진 실험 등을 실시하여 부재의 열화 정도를 정량적으로 파악하기 위한 방법을 모색할 것이다.

참 고 문 헌

- Ross, R. J. 1985. Stress wave propagation in wood products. In: Proceedings, 5th nondestructive testing of wood symposium. Pullman, WA: Washington State University: 291~318.
- Ross, R. J. and Pellerin, R. F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*, 38(5): 39~45.
- Rutherford, P. S., Hoyle, R. J., De Groot, R. C., and Pellerin, R. F. 1987. Dynamic vs. static MOE in the transverse direction in wood. In: Proceedings, 6th nondestructive testing of wood symposium. Pullman, WA: Washington State University: 67~80.
- Sharp, D. J. 1985. Nondestructive testing techniques for manufacturing LVL and predicting performance. In: Proceedings, 5th nondestructive testing of wood symposium. Pullman, WA: Washington State University: 99~108.
- 김광철, 배문성, 이전제. 2001. '목조 고건축물의 안전성 평가(T)-Ultrasonic method를 이용한 목조 고 건축물의 정성적 열화 평가' 한국 목재 공학회 학술 발표 요지집. 36~42
- 김사덕, 이용희, 윤희상. 1994. 목조문화재 파손요인에 관한 연구. *보존과학연구*. 15: 125~155.
- 박상진, 안희균. 1982. 화암사 고목재의 구조와 수종. *전남대 연습림보고*. 5: 87~102.
- 박상진. 1983. 범어사 및 무량사 고건축재의 구조와 수종. *보존과학연구*. 4: 59~69.
- 박상진, 정기호, 김재우. 1999. 고려대장경 경판전 기둥의 재질. *한국목재공학회지*. 27(1): 1~8.
- 박왕희. 1998. 한국의 향교 건축. *문화재 관리국*. 13~676.