

최 종  
연구보고서

비파괴 검사법에 의한 국산재의 생물학적  
열화 평가기술 개발

Development of technique  
for estimating the biological deterioration  
in domestic wood using NDE

연구기관

서울대학교

농림부



## 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “비파괴 검사법에 의한 국산재의 생물학적 열화  
평가기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005 년 11 월 14 일

주관연구기관명 : 서울대학교  
총괄연구책임자 : 이 전 제  
세부연구책임자 : 이 전 제  
협동연구기관명 : 고려대학교  
협동연구책임자 : 김 규 혁  
협동연구기관명 : 국민대학교  
협동연구책임자 : 엄 영 근  
위탁연구기관명 : (주)바루인테크  
위탁연구책임자 : 오 정 권



# 요 약 문

## I. 제 목

비파괴 검사법에 의한 국산재의 생물학적 열화 평가기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 목재에 적용되는 비파괴평가는 주로 건전한 부재에 대하여 탄성계수 산출을 통한 강도 예측이나 등급 구분 등에 이용되어 왔다. 목재에, 특히 건축물의 목부재나 조정시설재에서 빈번히 발생하고 있는 생물학적인 열화를 탐지하고자 하는 연구는 국내외적으로 등한시 되어왔다. 열화 판단에 대한 초기적인 탐지 기술은 응력과 혹은 초음파를 이용한 매우 정성적인 것이었다. 열화의 매우 대략적인 위치 및 정도를 알 수 있을 뿐이었고, 정확도 또한 매우 떨어진다 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 목재에 적용 가능한 여러 가지 비파괴 검사법을 도입하여 목재에 나타날 수 있는 열화를 정량적으로 파악할 수 있는 열화 평가 기술을 개발하고자 하였다. 부재 내 열화의 위치 및 정도를 정확하게 파악하고자 하는 목적으로 최종적으로 CT (Computed Tomography) 기술을 도입하여 부재 내부 시각화를 이루고자 하였다.

## III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 비파괴 검사법에 의하여 목재에 나타날 수 있는 열화를 정량적으로 탐지할 수 있는 기술 개발을 위해 이루어졌다. 주요 국산수종에 나타나는 열화의 원인 및 종류, 또한 열화에 의해 나타나는 변화 등을 정확히 파악하기 위하여, 부후력 테스트 및 조직학적인 연구가 병행되어 진행되었다. 응력과, 초음파와 같은 시험체 내 음파의 투과 현상을 이용하는 방법과 X선 실험을 진행하여 열화 탐지 가능성을 확인하였고, 보조적으로 준비파괴 시험인 드릴저항실험을 병행하였다. 우선적으로 건전재 뿐 아니라 옹이, 할렬, 부후재, 충해재 등 목재의 열화가 각 시험을 통하여 어떻게 발견되는 지에 대한 기초적 연구를 진행하였다. 다음으로 초음파 및 X선 시험을 중심으로

열화의 정량적 탐지를 위해 각 시험법의 목재 적용에 대한 영향 인자를 확인하였다. 이후 인공 열화 시편을 제작하여 단계별 열화 시편에 대하여 조직변화, 비파괴 평가, 물성변화 평가를 병행하여 실시함으로써, 열화의 진행에 따른 목재의 변화를 종합적으로 파악하고자 하였다. 최종적으로는 목재 부재 내 시각화를 통해 열화를 정량적으로 탐지하고자 하였으며, CT 기술의 도입, 개발을 통해 이루어졌다. 3개년의 연구 진행 과정 동안 열화 탐지 기술을 지속적으로 발전시켰으며, 3회의 현장 적용 시험을 통하여 목조 고건축물의 기둥 부재를 중심으로 열화 탐지 가능성을 검증하고 현장 적용성을 재고하였다. 마지막으로 이러한 현장 적용 시험에 의해 산출된 결과에 대한 데이터베이스를 구축하여 주요 고건축물에 나타나는 열화의 진행에 대한 체계적인 관리가 이루어질 수 있도록 하고, 이를 통해 안전성을 예측할 수 있도록 하였다.

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구를 통해 주요 국산 수종에 대한 조직학적인 특성 생물학적 열화 원인 및 내후성, 내충성이 확인되었다. 이는 비파괴 검사에 의한 결과를 뒷받침 할 수 있는 주요한 자료가 될 수 있음을 물론이고, 이 결과 자체만으로 국산 수종 활용에 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 다양한 비파괴 검사법의 적용 결과, 초음파 및 X선 실험을 통하여 목재 내부 시각화를 이룰 수 있는 시험 방법 및 결과 산출 방법이 개발되었다. 이를 위해 각 시험법의 목재 적용 시 나타나는 영향인자가 파악되었으며, 또한 열화의 단계별 진행에 따른 조직학적인 변화 및 물성 변화가 확인되었다. 이러한 조직학적인 연구 및 제반 물성 변화에 대한 연구는 비파괴 검사결과와 상호 분석되어 상관관계가 산출되었다. 이러한 본 연구는 현장에서 목조 고건축물의 비파괴 평가를 통한 안전 진단에 이용될 수 있을 것이며, 이는 구축된 데이터베이스를 활용하고 지속적으로 데이터를 축적하는 과정에서 더욱 현실화 될 것으로 사료된다.

# SUMMARY

## (영문요약문)

### I. Subject of Research

Development of technique for estimating the biological deterioration in domestic wood using NDE

### II. Purpose and Necessity of Research

Nowadays, NDE of wood normally has been performed for prediction of the strength with the calculation of the MOE, and for grading the material lumber and so on. But the study which is for detecting the biological deteriorations of wood has not been performed frequently within the country even the exterior countries. And, the technique which is for detecting the deterioration in wood was not developed well, because it's just for the quantitative detection of deterioration. So, it's very hard to know the exact location or the grade of the deterioration in wood, and the accuracy is very low. For solving these problems, CT (Computed Tomography) was imported and developed for qualitative detection of the deterioration in wood using NDE.

### III. Contents and Range of Research

This research was performed for developing the technique which can detect the deterioration in wood qualitatively. The anatomical studies, and evaluating the durability using fungi and termites were also progressed. The NDE tests using sound wave transmission and X-ray were used, and the drilling resistance test was also used for the support of the results. The basic studies which concern,

how the various type of wood deteriorations as well as the sound wood are revealed in the results of the each methods, were firstly performed. And the impact factors which affects the test results of the NDE were confirmed. The overall researches of the various stages of artificially deteriorated wood were performed with anatomical studies, NDE tests and confirming physical properties. Consequently, CT technique was developed for qualitative detection of the deterioration in wood. The technique which can visualization of the inner state of the wood was continuously improved, and it was verified and the applicability was considered with 3 times of the field application. Finally, DATABASE program was builded with these results for safety evaluation of the wooden ancient buildings.

#### IV. Results and Effectiveness of Research

The anatomical properties, causes of the biological deteriorations and the durability against the brown-rot fungi and the termites were confirmed with this research. These results are considered to be not only the important basis for backing the NDE results but also the very useful data for using domestic wood in Korea. The technique which can visualize the inner state of wood was developed with ultrasound and X-ray tests. And, for this technique, impact factors which affect the test results caused by the anisotropy and nonhomogeneity of wood were confirmed. The correlations between the anatomical and physical properties and NDE test results were also confirmed with artificially deteriorated wood. Is is concluded that these results may be used in the safety evaluation of the wooden ancient buildings, with the DATABASE program which was builded at this study.

# CONTENTS

## (영 문 목 차)

<b>I. Summary of Research</b> .....	13
<b>1. Purpose and Necessity of the Research</b> .....	13
1. Technological point of view .....	13
2. Economical and industrial point of view .....	15
<b>2. Content and Range of the Research</b> .....	16
1. Evaluation of the anatomical properties .....	16
2. Evaluation of the physical properties .....	17
3. Detection of the deterioration using NDE .....	17
<b>II. Status of internal and external Techniques</b> .....	21
<b>1. Status of the Techniques and Problems</b> .....	21
1. Biological deterioration of the wood .....	21
2. NDE methods for wood .....	22
<b>III. Contents and Results of Research</b> .....	24
<b>1. Biological Deterioration of Domestic Wood</b> .....	24
1. Anatomical properties of the domestic wood .....	24
2. Causes of deterioration of the domestic wood .....	33
3. Determination of the termites resistance .....	45
<b>2. Detection of the Deterioration using NDE</b> .....	58
1. Replaced members in wooden ancient buildings .....	58
2. Detection of the deterioration using NDE .....	70
<b>3. Improvement of the NDE</b> .....	91
1. Application of the ultrasonic test to wood .....	91
2. Application of the X-ray test to wood .....	97

<b>4. NDE of the Artificially Deteriorated Wood</b> .....	105
1. Manufacturing the wood of various stages of deteriorated .....	105
2. NDE of the deteriorated wood .....	120
<b>5. Development of the Quantitative Detecting Technique</b> .....	182
1. Development of the ultrasonic CT for detecting deterioration .....	182
2. Development of the X-ray CT for detecting deterioration .....	194
3. NDE of the artificially deteriorated wood .....	199
4. Development of the Drilling Resistography .....	213
<b>6. Field Application of the Detecting Technique</b> .....	217
1. BUIMUN in BEOMEJO temple .....	217
2. DAEUNGJEON in JOGYEO temple .....	225
3. DAESUNGJEON in Yeosan Confucian shrine .....	255
<b>7. Development of the DATABASE program</b> .....	264
1. Introduction of the DATABASE program .....	264
2. Verification of the practicality .....	282
<b>IV. Rate of Achievement and Contribution</b> .....	288
<b>1. Rate of the Achievement</b> .....	288
1. First year .....	288
2. Second year .....	292
3. Third year .....	296
<b>2. Rate of the Contribution</b> .....	299
1. Technical point of view .....	299
<b>V. Plan for using Research</b> .....	300
<b>1. Plan for using the Research</b> .....	300
1. Determination of the use and Sorting the grade of the material lumber .....	300
2. Detecting deterioration of the members of the wooden ancient building .....	300

<b>VI. Collected scientific informations from abroad</b> .....	302
<b>1. Collected Scientific Information from Abroad</b> .....	302
1. Bending test .....	302
<b>VII. References</b> .....	303

# 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 .....	13
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 .....	13
1. 기술적 측면 .....	13
2. 경제 산업적 측면 .....	15
제 2 절 연구개발의 내용 및 범위 .....	16
1. 열화에 의한 목재의 해부학적 특성변화 평가 .....	16
2. 열화 단계에 따른 목재의 물성변화 평가 .....	17
3. 비파괴 검사법을 이용한 부재 내 열화 탐지 .....	17
제 2 장 국내의 기술개발 현황 .....	21
제 1 절 국내의 기술개발 현황 및 문제점 .....	21
1. 목재의 생물학적 열화 .....	21
2. 목재에 적용되는 비파괴 검사법 .....	22
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	24
제 1 절 주요 국산재의 생물학적인 열화 .....	24
1. 주요 국산재의 해부학적 특성 .....	24
2. 주요 국산재의 생물학적 열화 원인 .....	33
3. 자연 내후성 및 내의성 평가 .....	45
제 2 절 다양한 비파괴 평가를 이용한 열화 탐지 .....	58
1. 목조 고건축물 교체부재 .....	58
2. 비파괴 검사법을 이용한 열화 탐지 .....	70
제 3 절 비파괴 검사법의 정도 개선 .....	91
1. 초음파 검사법의 목재 적용 .....	91
2. X선 시험의 목재 적용 .....	97

제 4 절	인공열화재의 비파괴 평가 .....	105
1.	단계별 열화재의 제조 .....	105
2.	단계별 열화재의 비파괴 평가 .....	120
제 5 절	열화의 정량적인 평가 기술개발 .....	182
1.	목재 열화 탐지용 초음파 CT 개발 .....	182
2.	목재 열화 탐지용 X선 CT 개발 .....	194
3.	인공열화재의 비파괴 평가 .....	199
4.	Drilling Resistography 개발 .....	213
제 6 절	열화탐지기술의 현장 적용 .....	217
1.	범어사 불이문 .....	217
2.	조계사 대응전 .....	225
3.	여산향교 대성전 .....	255
제 7 절	DATABASE 프로그램 개발 .....	264
1.	DATABASE 프로그램 개관 .....	264
2.	실용성 검증 .....	282
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	288
제 1 절	목표 달성도 .....	288
1.	1차년도 .....	288
2.	2차년도 .....	292
3.	3차년도 .....	296
제 2 절	관련분야에의 기여도 .....	299
1.	기술적 측면 .....	299
제 5 장	연구개발결과의 활용계획 .....	300
제 1 절	활용계획 .....	300
1.	원목의 사용용도 결정 및 부재의 등급구분 .....	300
2.	목조 고건축물 주요 부재의 열화 탐지 .....	300

제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	302
제 1 절	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	302
1. 힘시험	.....	302
제 7 장	참고문헌 .....	303

# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 기술적 측면

#### 가. 목재의 열화

##### 1) 표면 열화

목재의 열화를 탐지하는데 있어서 가장 쉬운 방법은 육안 검사에 의한 방법이다. 표면의 할렬이나 충해에 의한 곤충의 탈출공 등은 특별한 검사 방법을 동원하지 않더라도 육안으로 확인이 가능하다. 부재의 단위 면적 당 탈출공의 수를 파악하거나, 할렬의 길이 및 깊이를 파악하여 열화의 양을 수치화 할 수도 있다. 또한 내부 상태에 관계없이 표면의 극심한 열화는 목재의 가치를 떨어뜨림이 자명하다 할 수 있다. 그러나 본 방법으로는 기본적으로 목재에 나타난 열화를 정확하게 파악할 수 없다. 표면 상태를 확인하는 것만으로는 내부 상태를 정확히 이해하는데 한계를 가짐이 자명하기 때문이다. 목재에 발생하는 부후 및 충해 열화에 대한 기본적인 이해를 바탕으로 비교적 정확한 내부 상태에 대한 견해를 제시할 수 있는 몇몇의 전문가들이 존재하나, 이러한 판단은 개인의 의견차가 존재할 수밖에 없는 과학적, 객관적 근거가 부족한 것이다. 최근까지도 목조 고건축물에 과학적 근거가 결여된 보수가 이루어지고 있어, 많은 부재가 무분별하게 교체 수리되고 있는 점은 이러한 문제의 반증이라 할 수 있다. 이렇게 무분별한 교체를 통해 건축물이 본래 가지고 있던 역사적 의의가 훼손되고 경제적으로도 많은 손실을 가져오게 된다.

##### 2) 내부 열화

접합부나 표면 할렬 부위로의 수분 및 균의 침입이나 흰개미 등 곤충에 의해 내부 열화가 발생할 수 있다. 열화의 진행 양상은 열화 원인에 가장 크게 좌우된다고 할 수 있으나 사용된 목재의 수종 및 주위 환경에 의해서도 크게 영향 받는다. 이러한 내부 열화는 상술한 바와 같이 육안 조사와 같은 일반적인 방법으로는 탐지가 어렵다. 인지하지 못한 상태에서 장기간 사용하게 될 경우 열화부위의 확대에 의한 인명

및 재산상의 심각한 피해가 발생할 것이 우려된다. 특히 갈색부후균에 의한 피해는 적은 중량감소에도 매우 큰 강도적 손실을 야기하는 것으로 잘 알려져 있으며, 충해에 의한 피해는 표면에는 아무 피해를 입히지 않는 가운데 내부에 공동(空洞)을 만드는 경우가 많다. 따라서 내부 열화를 파악할 수 있는 과학적인 방법이 동원되어야 함이 자명하다고 할 수 있다. 더욱이 내부에 존재하는 열화의 유무뿐만 아니라, 열화의 크기나 위치를 정량적으로 파악하는 것이 필요하다.

## 나. 비파괴 검사법

### 1) 비파괴 검사법 일반

비파괴 검사법 (Nondestructive Evaluation)이란 최종사용 성능을 손상시키지 않은 상태에서 재료의 상태를 평가하는 기술을 말한다. 많은 산업 분야에서 여러 가지 목적에 의해 비파괴 검사법이 이용되고 있다. 각종 물리적 에너지 및 현상이 이용되는데, 전자파 (X선,  $\gamma$ 선, 자외선, 가시광선, 적외선, 마이크로파), 중성자선, 기계적 진동 (진동, 음향 초음파), 자기, 열, 전기 등 거의 대부분의 물리적 에너지 및 전자유도, 침투, 누설 등의 물리적 현상이 이용된다. 비파괴 검사의 대표적인 것으로는 초음파 탐상시험(Ultrasonic Test), 방사선 투과시험(Radiographic Test), 자분탐상시험(Magnetic Test), 액체침투 탐상시험(Penetrant Test), 와전류탐상 시험(Eddy current Test), 음향방출 탐상시험(Acoustic Emission Test) 등이 있다. 물론 이들 방법들은 모든 대상물을 대상으로 적용할 수 있는 것은 아니며, 적용할 수 있는 대상물과 적용할 수 없는 대상물이 있다. 비파괴 시험은 시험체를 파괴하지 않으므로 매우 큰 장점을 지닌다고 할 수 있겠으나, 간접적인 수법을 사용하므로 정도의 차이는 있지만 어느 정도의 불확실성을 포함할 수밖에 없다.

### 2) 목재의 비파괴 검사법

비파괴 검사법은 주로 균질한 재료 위주로 개발되어 왔다고 할 수 있다. 상술한 다양한 원리를 이용한 다양한 범용 기계가 제작되고 사용되고 있다. 그러나 목재는 심, 변재 및 춘, 추재가 존재하며, 활렬, 웅이, 미성숙재 등 자체 결함을 포함하며, 함수율에 따라 비중이 크게 달라지는 등 이방성, 비균질성을 지니는 일반적 비파괴 검사를 적용하기 매우 어려운 재료이다. 목재가 많은 재료 중 대표적인 단열체이며 전기 절연체라는 것도 상술한 일반적 시험 방법의 적용을 어렵게 하는 원인이다. 이러한 난

점들 때문에 목재에는 그 적용사례가 미비하다고 할 수 있으며, 따라서 기술 및 자료가 부족하다. 이를 해결하기 위해서는 다양한 열화 원인에 따라 다르게 나타나는 비파괴 측정결과에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이러한 기본적 이해를 바탕으로 목재의 재료적 특성으로 인한 불확실성을 최소화하는 가운데 신뢰성 있는 결과를 산출하기 위한 연구가 필요하다.

## 2. 경제, 산업적 측면

### 가. 입목 상태에서의 비파괴 검사

입목 상태에서의 비파괴 검사는 사용 목적에 적합한 우량 목재자원의 육성 및 확보를 통해 목재자원의 체계적인 관리방안을 수립하기 위함이다. 자연적으로 조성된 삼림에 대해서는 목재자원을 효율적으로 사용하기 위한 사용용도의 확인이 필수적이라 할 수 있다. 또한 인공적으로 조성된 삼림에 있어서도 성장 상태를 파악하는 등의 조사가 필요하다. 비파괴 검사를 통해 혹은 생장추 및 드릴 등을 이용한 준비파괴 검사를 통해 비중, 함수율 및 연륜연대 등에 대한 사용용도를 결정하고 성장 상태를 확인하기 위한 기본적 물성치를 확인할 수 있다. 또한 역사적으로 가치가 매우 높은 입목에 대한 비파괴적인 검사를 통해 매우 큰 부가가치를 창출할 수 있다.

### 나. 공정상에서의 비파괴 검사

목재 자원의 낭비를 최소화하고 사용목적에 맞는 품질을 확보하는 것은 목재를 가공하는 과정에 있어서 필수적인 요소라 할 수 있다. 공정상에서 비파괴 검사를 이용하여 빠른 속도로 자동적으로 등급을 나누어 효율성을 높일 수 있으며, 이는 선진국에서는 이미 어느 정도 일반화되어 있다고 할 수 있다. 또한 원목에서의 최적 절단면을 결정하기 위한 내부 시각화 기술이 주로 부가가치가 높은 활엽수재를 중심으로 몇몇 연구자들에 의해 연구된 바 있다. 이처럼 공정상에서 특수한 목적에 맞추어 적절히 비파괴 검사법이 적용된다면 목재 생산라인에서의 효율을 높이고, 목재자원의 부가가치를 높이는데 기여할 수 있다.

### 다. 목조 건축물의 비파괴 검사

건축물에 사용되고 있는 부재 상태의 정확한 진단을 통해서 교체 및 보수에 관계되

는 관리를 더욱 과학적이고 객관적 사실에 근거하여 수행할 수 있다. 우리나라에는 보존 가치가 높은 목조 고건축물이 매우 많으며, 또한 관리가 제대로 이루어지지 않고 있는 건축물이 많다. 상술한 바와 같이 목재에 나타나는 내부 열화는 육안 검사로 파악하는데 한계가 있으며, 열화 원인에 따른 진행 양상 또한 매우 다르기 때문에 적절한 열화의 탐지가 필수적이라 할 수 있다. 또한 이와는 반대로 특히 중요도가 높은 목조 고건축물의 경우에 있어 무분별한 교체 및 보수 작업이 이루어지고 있는 실정이다. 건축물 자체의 문화재적인 가치를 위해서, 또한 경제적인 손실을 최소화하기 위해서는 적절한 비파괴 검사법이 적용되어야 한다.

## 제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

### 1. 열화에 의한 목재의 해부학적 특성변화 평가

#### 가. 주요 국산수종의 해부학적 특성 및 자체 결합 특성 조사

목조 고건축물의 교체부재 중 열화 피해 부재를 확보하여 우선적으로 기본 물성(함수율, 비중)을 확인하고 수종 식별을 실시하였다. 이를 통해 국내 목조 고건축물에 나타나는 주요 수종을 확인하였다. 다음으로 열화 부재의 해부학적 특성을 확인하기 위하여 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 연구를 진행하였다. 이러한 조직학적인 접근을 통하여, 국산 주요 수종의 자체 특성 및 열화에 의한 변형을 미시적 관점에서 확인하려 하였다.

#### 나. 열화에 의한 목재의 조직변화 조사

단계별로 인공 열화 시킨 목재 소시편을 이용하여 열화의 진행에 따른 목재 조직의 변화를 관찰하였다. 균사의 이동과 분포, 미세구조의 변화 및 세포벽 각 층의 저항력 변화 등의 관찰을 통하여 해부학적 관점에서 열화의 진행에 따른 변화 양상을 확인하였다. 다음으로는 이러한 목재의 조직변화와 비파괴 측정 결과 간의 관계를 규명하였다. 즉 비파괴 평가 결과 나타난 열화에 의한 효과를 해부학적인 관점에서 설명하고자 하였다.

## 2. 열화 단계에 따른 목재의 물성변화 평가

### 가. 수종별 주요 생물학적 열화 원인 및 분포 조사

상술했던 목조 고건축물의 교체 부재 중 열화 피해 부재에 나타난 갈색 및 백색 부후, 연부후, 건재가해충류 가해 및 흰개미 가해 피해에 대한 생물학적인 열화 원인을 확인하였다. 또한 아울러 야외 조경시설재에 나타난 생물학적 열화 원인을 파악하였다. 이를 통해 국내의 주요 수종들에 대하여 수종 별 주요 생물학적 열화 원인 및 그 분포를 조사하여 확인하고자 하였다.

### 나. 수종별 자연내후성 및 내의성 평가

같은 수종이라 하더라도 산지, 개체 별로 또한 개체 내에서도 심, 변재 등에 따라 자연 내후성 및 내의성에는 큰 차이가 나타나기 때문에, 이를 고려하여 자연내후성 및 내의성 평가를 실시하였다. 주요 국산 침엽수재에 대해 실험하였으며, 목재를 전국 각지에서 공수하였다. 이와 더불어 단계별 열화 시편의 제작을 위하여 균의 배양, 접종하여 인공열화 시편을 제작하여 이용하였다.

### 다. 열화 단계(정도)에 따른 목재의 제반 물성변화 평가

단계별로 열화 시킨 인공 열화 시편을 이용하여 열화에 따른 물리적 성질인 중량감소율, 평행함수율의 변화를 확인하고 역학적 성질 변화를 파악하기 위하여 휨강도 및 종압축강도 시험을 실시하였다. 또한 이를 비파괴 평가 결과와 연관시켜 물성변화와 비파괴 검사 결과와의 상관관계를 규명하고자 하였다.

## 3. 비파괴 검사법을 이용한 부재 내 열화 탐지

### 가. 다양한 비파괴법을 적용한 열화 탐지

응력파, 초음파, X선 투과 시험 및 드릴저항시험 등의 다양한 비파괴 검사법을 적용하여 각 검사법의 열화 측정 가능 여부 및 민감도를 조사하고자 하였다. 또한 건진재 뿐 아니라 목재에 자연적으로 존재하는 웅이, 할렐, 미성숙재 등과 부후, 충해 열화재가 어떻게 탐지되는지 확인하였다. 이러한 연구결과는 그 자체로 의미가 있으며, 또한 이후 정확한 열화 탐지를 위한 기초적 연구로 이용되었다.

#### 나. 비파괴 검사법의 정도 개선

열화 탐지를 위한 비파괴 검사법의 정도 개선을 위하여 각 시험법의 목재 적용 시에 나타나는 영향인자를 확인하고, 이를 결과 산출에 반영하고자 하였다. 목재의 이방성과 비균질성은 회절 및 굴절하는 초음파의 측정 결과에 크게 영향을 것으로 판단되어 확인하고자 하였으며, 또한 초음파 측정 결과의 변화 원인을 조직학적으로 규명하고자 하였다. X선 적용 시에는 이러한 문제가 나타나지 않지만 시편의 비중, 투과 길이, 연료각 등의 인자가 결과에 영향을 미치는지를 확인하고, 이를 반영하고자 실험을 진행하였다.

#### 다. 열화의 정량적 평가 기술 개발

열화의 위치 및 크기를 정량적으로 파악하기 위하여 내부 시각화가 모색되었으며, 결과적으로 측정 결과를 이용한 CT 기술이 도입되고 개발되었다. 알고리즘의 구성 후에 인위적으로 공동(空洞)을 형성시킨 시편을 제작하여 구성된 알고리즘의 타당성을 검증하였다. CT 구성 알고리즘은 목재 적용에 최적화 될 수 있도록 수정되었다. 이후 단계별로 열화 시킨 인공열화재에 대해 지속적으로 실험을 실시하여 CT 이미지를 구성하고 절단면과의 비교를 통하여 개선시켰다. 이와 더불어 열화의 진행에 따른 결함의 발현 양상을 확인하였다. 이러한 연구 방향은 기존의 계획과 다소 수정된 것으로써 초기에 고려하였던 ‘열화 판단 기준값 설정’은 1차년도에 소기의 달성을 이루게 되어, 실제 연구에서는 ‘CT 이미지 구성 및 알고리즘 개선’의 목적을 가지고 진행하였다.

#### 라. 비파괴 검사법의 현장 적용 시연

지속적으로 향상시킨 비파괴 검사법을 검증하고 실제 현장 적용 실험 시에 나타나는 문제를 파악하고 개선하기 위하여 연구 진행 과정 중 3회에 걸쳐 범어사, 조계사 대웅전 교체부재 및 여산향교 대성전에 대해 현장 적용 실험을 실시하였다. 현장 적용 초기에는 열화의 정성적 판단에 머물렀으나, 여산향교 대성전 실험 시에는 개발시킨 CT 구성 알고리즘을 통해 열화의 정량적인 판단을 할 수 있도록 하였다.

#### 마. DATA BASE 프로그램 개발

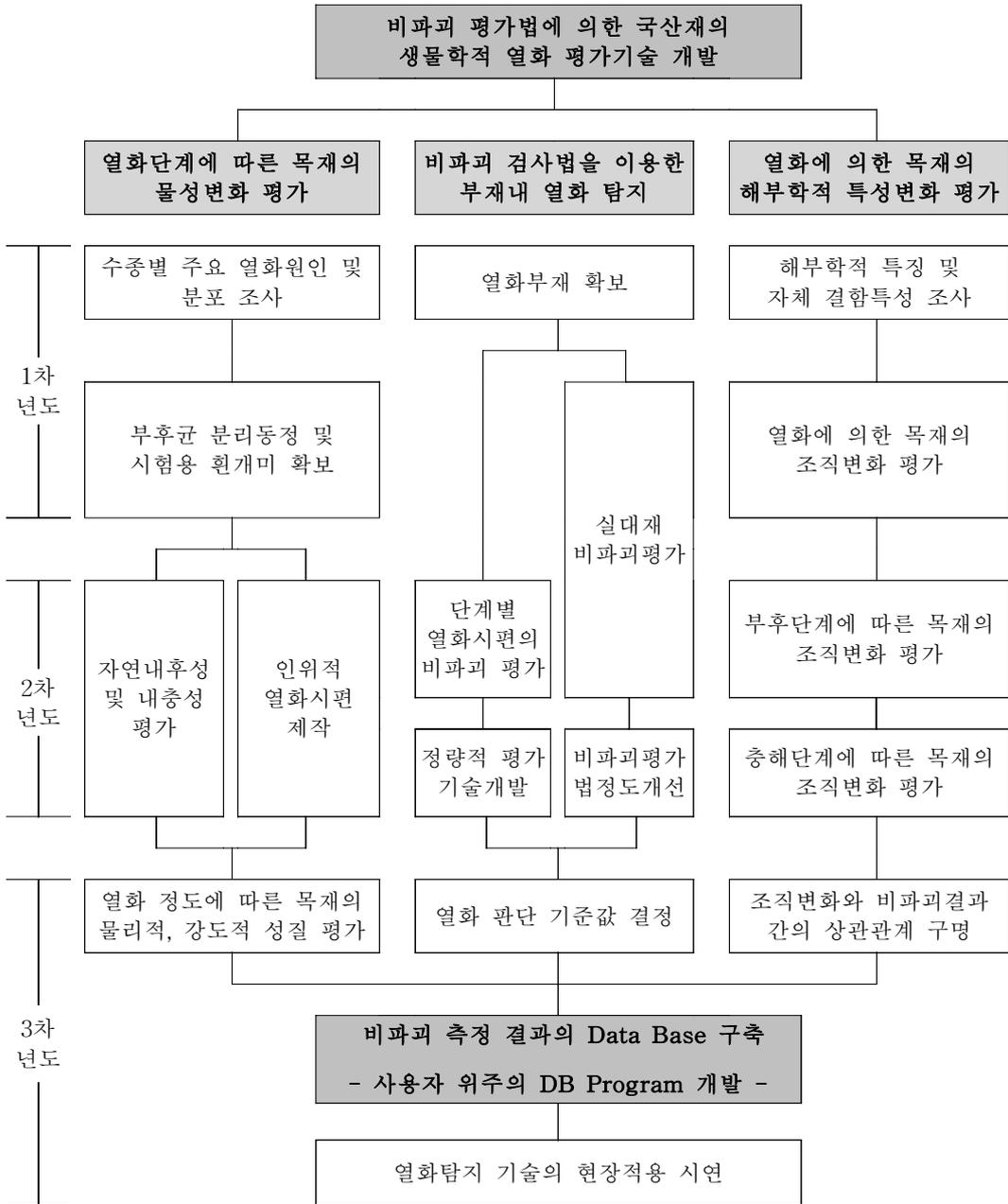
현장 적용 시연을 통해 얻어진 비파괴 검사 결과의 검사 방법 및 검사 시점에 대한

체계적인 결과의 분석을 위하여 DATA BASE 프로그램을 개발하였다. 다량의 데이터를 집적을 통해서 다양한 통계적인 수단을 동원하여 실제 건축물의 열화 속도 및 진행 양상에 대한 분석이 가능할 것으로 사료된다. 이를 통해 실제 건축물에 대한 부재의 교체 및 보수 여부를 결정하는 객관적 자료를 제공할 수 있도록 하였다.

**표 1. 연차별 연구개발 목표 및 내용**

구 분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (2002년)	비파괴법을 이용한 부재 내 열화탐지	생물학적 열화 피해 목재 확보 ▶ 목조 고건축물 교체부재 중 열화 피해부재 다양한 비파괴법을 적용한 실대재 내부 열화탐지 ▶ 각 검사법의 열화측정 가능여부 및 민감도 조사 ▶ 열화원인 및 정도에 따른 비파괴 측정결과의 변화 평가
	수종별 주요 열화원인 확인	수종별 주요 생물학적 열화원인 및 분포 조사 ▶ 수종별, 지역별 가해균류의 차이 조사 부후 원인균의 분리 동정 및 시험용 흰개미 확보
	국산수종의 조직특성 조사	주요 국산수종의 해부학적 특성 및 자체 결합특성 조사 ▶ 열화부재의 수종 및 해부학적 특성 조사
2차년도 (2003년)	비파괴법 정도개선 및 정량적 평가기술 개발	비파괴 검사법의 정도 개선 ▶ 재료 및 주변 상태에 따른 적합한 평가기술 개발 ▶ 재료 자체의 변이 및 환경조건에 의한 영향 보정 열화의 정량적(정도 및 위치) 평가기술 개발 ▶ 비파괴법에 의한 초기단계의 열화탐지 가능성 확인
	자연내후성 및 내충성 평가	주요 국산재의 자연내후성 및 내충성 평가 ▶ 수종별, 산지별 차이 및 개체 내 심변재간 차이 조사 목재를 인위적으로 가해시켜 단계별 열화시편 제작 ▶ 열화정도 및 열화위치 조정
	열화에 의한 목재의 조직변화 조사	인위적 열화시편에 대한 단계적 조직변화 조사 ▶ 부후균 균사의 목재 내 침투경로 조사 ▶ 부후단계에 따른 목재 세포의 가해상태 조사 ▶ 가해단계에 따른 흰개미의 목재 가해특성 파악
3차년도 (2004년)	열화판단 기준값 결정 및 Data Base 구축	측정결과 분석을 통한 열화판단 기준값 결정 Data Base 프로그램 개발 ▶ 열화원인 및 정도, 검사방법에 따른 Data Base 구축 열화탐지기술의 현장 적용 시연 ▶ 고건축물을 대상으로 사용부재에 대한 비파괴 평가 ▶ Data Base 프로그램의 실용성 검증
	열화에 의한 목재의 물성변화 평가	열화단계에 따른 목재의 제반 물성변화 평가 ▶ 인위적 열화시편의 물리적, 강도적 성질 평가 ▶ 물성변화와 비파괴 검사 결과와의 상관관계 구명
	재질변화와 비파괴 측정결과 간의 관계 구명	목재의 조직변화와 비파괴 측정결과간의 관계 조사 ▶ 열화 원인 및 정도(가해패턴)에 따른 관계 조사 ▶ 조직변화에 따른 비파괴 측정결과의 변화원인 구명

표 2. 연구개발 추진 체계



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내외 기술개발 현황 및 문제점

#### 1. 목재의 생물학적 열화

##### 가. 열화원인 조사

목재에 나타나는 열화의 원인에 대한 국내의 연구는 전반적으로 미비하거나 거의 전무한 실정이다. 이는 그간의 목재의 열화에 대한 실제적 판단을 몇몇 전문가들에 의한 주관적 판단에 의지해 왔으며, 객관적 연구가 그만큼 등한시되었음을 반증하는 것이다. 특히 기타 목재 가해충류 및 부후균에 관한 국내 연구는 매우 미비한 상태이며 부후균의 분리, 동정을 통한 과학적인 연구가 시급하다 할 수 있다. 충해 피해에 대한 연구는 일본흰개미 (*Reticulitermes speratus*) 및 집흰개미 (*Coptotermes formosanus*)의 대략적인 국내 분포에 관해 이 등(1998)이 보고한 것을 제외하고는 미미한 실정이다.

##### 나. 생물학적 열화에 의한 피해조사

흰개미에 의한 피해 사례에 대한 국내 연구는 이 등(1999)이 일부 남부지방 사찰에 대한 조사보고를 제외하고는 거의 없는 실정이다. 특히 입목 및 원목상태에서의 피해에 대한 조사는 전무한 상황이다. 이러한 생물학적 열화에 대한 조사는 비용 및 시간상의 제약으로 인해 전국적인 조사가 어렵다는 것이 문제점으로 사료된다. 또한 국내에서 주로 사용되는 수종에 관한 자연 내후성 및 내의성에 관한 연구가 미비하여 주요 수종간 내후성 및 내의성에 대한 비교가 불가능한 실정이다.

##### 다. 갈색부후균의 부후 기작

해외의 연구자들을 통해, 갈색부후균이 목재를 어떻게 분해하는가에 대한 이해의 중요성이 높은 관심을 받아왔다. 목재의 생물 열화에 대한 이전의 대부분의 현미경적 연구들은 주로 광학현미경에 의존한 것이었다. 그러나 1970년 이후 주사전자현미경은 높은 분해능과 초점 심도를 지니면서 또한 시료 제작도 간단한 특성 때문에 목재병리

학 분야에서 광범위하게 쓰이게 되었다. 더욱이 목재의 구성성분에 대한 생물분해는 목재와 부후균의 상호작용을 조사하기 위해 1980년대 초 수많은 연구가 이루어졌다. 전자현미경 사용법과 세포 화학적 염색 기술은 갈색부후균과 백색부후균에 의한 목재와 셀룰로오스의 분해 동안 발생하게 되는 형태학상 변화와 공격 위치를 연구하는데 사용되었다. 이를 통해 목재 부후에 있어 균사를 덮고 있는 젤과 같은 균사초(fungal sheath)의 중요한 역할을 보여주었다.

많은 연구 노력에도 불구하고 갈색부후균의 부후 기작은 아직 명확하게 증명되어 있지 않다. 여러 향상된 기술을 적용함으로써 갈색부후균의 공격에 따른 세포벽의 형태 변화와 부후의 진전에 따른 미세구조 변화에 대한 고찰은 목재 부후 과정의 전반적인 이해와 목재 부후를 효과적으로 방지하기 위한 개발에 도움을 줄 수 있을 것이다.

## 2. 목재에 적용되는 비파괴 검사법

일반적인 비파괴 검사법에 대한 내용은 상술한 바 있으므로 본 과제의 연구에 이용된 목재에 적용되는 비파괴 검사법을 중심으로 고찰하겠다.

### 가. 음향 전달 시간을 이용한 비파괴 검사

응력과 및 초음파의 재료 내 투과 시간 (TOF, Time of Flight)을 이용하여 내부의 열화 유무를 판단하는 방법이다. 장비의 사용이 간편하고 빠르며 인체에 무해하기 때문에 현장 적용이 매우 유리한 방법이라 할 수 있다. 주로 열화 유무의 판단보다는 제재목의 종축 방향의 TOF 산출을 통하여 강도적 성질을 예측하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 그만큼 위 방법은 정밀성이 떨어지고 목재 자체의 변이에 의한 영향을 구분하는 것이 거의 불가능하기 때문에, 열화가 이미 많이 진행된 후에만 정성적인 열화 유무의 판단이 가능한 것으로 사료된다. 이미 국내외적으로 특정 수종에 대한 열화 판단 기준값을 정하기 위한 연구가 많이 진행되어 있다.

### 나. 초음파 및 X선 CT

CT 기술은 의학 분야를 중심으로 지속적으로 발전되어 왔으며, 정밀한 측정을 가능하게 하는 장비의 발전과 컴퓨터 연산 능력의 향상으로 인해 이미 매우 정밀한 수

준의 인체 내부 단층의 시각화가 가능하게 되었다. 특히 X선은 재료 내부의 투과성이 우수하고 굴절 및 회절 현상이 없이 직진하며, 투과된 X선의 감쇠 정도가 재료의 밀도를 직접적으로 반영하는 등의 많은 장점을 가지고 있어 많이 응용되고 연구되어 왔다. 반면 초음파를 이용하는 방법은 회절 및 굴절 현상을 고려해야 하는 단점이 있으나 사용 방법이 비교적 간단하고 인체에 무해하다는 장점이 있어 X선과 함께 CT 영상 구성의 수단으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 이처럼 현재 초음파 및 X선을 이용한 CT 기술은 재료의 내부 상태를 비교적 매우 정확하게 확인할 수 있는 가장 훌륭한 수단으로 여겨지고 있다. 그러나 목재로의 적용을 위해서는 작업성, 경제성 및 현장 적용성이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

#### **다. 드릴저항시험**

드릴저항시험은 탐지 시 재료에 드릴구멍(약 3mm)을 생성하므로 주요 문화재에 대한 적용이 어렵고, 드릴구멍에 의한 추가적인 열화 발생에 대한 예방을 위한 사후처리대책이 필요하다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고, 드릴저항시험은 작업성, 경제성, 현장 적용성 등이 전반적으로 우수하며 비교적 정확하게 재료의 내부 상태의 직접적인 확인을 가능하게 하기 때문에 준비과괴평가로서 유용하게 사용될 수 있는 것으로 판단된다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 주요 국산재의 생물학적인 열화

#### 1. 주요 국산재의 해부학적 특성

##### 가. 고건축물 부재의 주요 수종

나주, 광주, 여수, 영광, 부산 등지에서 확보한 고건축물 부재 212개를 대상으로 수종 식별을 실시한 결과는 제2절 1항의 표2 및 3과 같다.

전체 212개 부재 가운데 침엽수재가 207개, 그리고 활엽수재가 5개로 고건축물용 부재로 주로 침엽수재가 이용되었음을 알 수가 있었다. 침엽수재의 경우 경송류 206개, 솔송나무 1개로 거의 대부분을 경송류가 차지하였는데 이러한 경송류 가운데 소나무 또는 곱솔이 202개 그리고 소나무 또는 곱솔을 제외한 수종이 4개인 것으로 드러났다. 이는 우리나라에 있어 예로부터 건축물 부재로 우리나라산 경송류인 소나무나 곱솔이 거의 대부분 사용되었음을 의미한다. 활엽수재로는 느티나무 4개, 졸참나무류인 갈참나무 1개인 것으로 밝혀졌다.

소나무와 곱솔을 제외한 다른 수종의 부재들이 차지하는 비율이 매우 미미한 점을 미루어 볼 때, 이들 고건축물의 보수 시 기존의 부재를 대신하여 교체된 것이라 사료된다.

##### 나. 해부학적 특성

###### 1) 실험 방법

고건축에서 확보한 해체부재의 수종 및 해부학적 특성 조사를 광학현미경 및 주사전자현미경 관찰용 목재 시료를 소정의 방법에 따라 제조하고 관찰하였으며, 수종 특성 조사를 위한 침엽수재 및 활엽수재별 특성 조사표를 작성하였다.

###### 가) 광학현미경 관찰용 시료 제작

광학현미경 관찰용 시료는 확보된 시편으로부터  $1 \times 1 \times 1$  (cm<sup>3</sup>)의 목편을 제조 후 autoclave에서 연화한 다음 sliding microtome으로 15~25 μm 두께로 횡단면, 방사단

면, 접선단면의 박편을 절삭하고 safranin액으로 염색한 다음 ethanol 및 xylene 계열로 탈수, 투명화 처리하고 영구 slide를 제작하였다. 박편 절삭 시 조직이 쉽게 파괴되는 경우 paraffin으로 침투시켜 박편을 절삭하고 가열을 통해 paraffin을 용융시킨 다음 xylene 및 ethanol 계열로 처리하고 염색, 탈수, 투명화 처리를 거쳐 slide를 제조하였다.

#### 나) 주사전자현미경(SEM) 관찰용 시료 제작

주사전자현미경 관찰용 시료는 확보된 시편으로부터 5~10 mm<sup>3</sup>의 목편을 준비하여 1회용 편면 면도칼로 관찰용 면을 깨끗하게 절단하고 덮개를 덮은 상태에서 천연 건조한 다음 양면 탄소 점착용 테이프로 시편을 시료대에 고정된 다음 금으로 두께 50 nm가 되도록 sputter-coating하였다.

#### 2) 실험 결과 및 고찰

많은 경송류에서는 중간 정도 내지 현저하게 발달된 압축이상재가 확인되었다. 이러한 압축이상재의 가도관의 2차벽에는 나선짜짐(spiral check)이 존재하며 이로 인해 인장강도 및 탄성계수도 비중으로부터 예상되는 수치보다 더 낮다는 보고가 있다. 또한 부후균의 균사가 방사조직 및 가도관을 따라 목재 조직 내로 침투하는 것이 자주 관찰되었으며 목재를 갹아 먹는 곤충에 의한 탈출공도 관찰되었다. 목재의 주성분인 탄수화물과 리그닌은 정도의 차이는 있지만 어떠한 종류의 부후균에 의해서도 반드시 양쪽 모두 분해를 받게 되고 결국 목재의 중량감소로 나타나게 될 것이며 목재가 부후되면 강도가 저하되기 때문에 어떠한 형의 부후재라고 할지라도 구조용재료는 적당한 것이 되지 못하는데 특히 갈색부후에서는 초기단계에서부터 강도의 저하가 심한데 휨강도(曲强度)를 비교해 보면 원래의 목재 무게에 대한 5% 무게 감소만으로도 약 절반 정도까지의 강도 감소가 일어나게 된다는 보고도 있다. 목재를 먹는 곤충에게 있어서도 목재를 구성하는 세포벽 자체가 영양원이 되기 때문에 목재 조직의 파괴에 따른 강도 저하를 피할 수가 없다. 따라서 비파괴 검사법에 의한 국산재의 생물학적 열화 평가기술 개발 시 고려되어야 할 인자로 중요한 것은 압축이상재, 부후, 충해로 여겨진다.

최종적으로 수종 식별된 목재의 해부학적 특성을 살펴보면 다음과 같다.

#### 가) 경송류

연륜계는 명확하며 춘재와 추재의 구별이 뚜렷하다. 춘재에서 추재로의 가도관 이행은 중간 내지 급한 편이며, 가도관 방사벽상의 유연벽공은 1열 배열을 나타내며 크라슐레(crassulae)가 발달되어 있다. 가도관의 세포내강을 가로지르는 트라베쿨레(trabeculae)가 가끔 관찰된다. 가도관의 세포벽에는 나선비후가 발달되어 있지 않으며, 수직수지구 주위에서는 스트랜드가도관이 관찰되기도 한다. 축방향유세포는 존재하지 않는다. 일반적으로 방사조직은 방사가도관과 방사유세포 모두로 이루어져 있으나 높이가 낮은 방사조직은 오로지 방사가도관 만으로 이루어져 있는 경우도 있다. 방사가도관에는 거치상비후가 발달되어 있다. 방사유세포의 수평벽에는 벽공이 발달되어 있지 않아 평활한 모양을 나타내며 말단벽 역시 평활하며 인덴처(indenture)가 관찰되지 않는다. 방사조직으로는 주로 단열방사조직과 방추형방사조직이 존재한다. 정상의 수직 및 수평수지구 모두 발달되어 있으며 수평수지구는 방추형방사조직의 중앙에 주로 1개 존재한다. 에피텔리움세포(epithelial cell)는 박벽이며 타일소이드(tylosoid)가 자주 관찰된다. 춘재부에 있어 가도관과 방사유세포 사이의 교분야벽공은 창상형 내지 소나무형인데 창상벽공인 경우 교분야당 1~2개, 그리고 소나무형벽공인 경우 교분야당 2~6개 존재한다. 압축이상재인 경우 연륜계는 불명확하며 춘재와 추재의 구별이 어렵고 춘재에서 추재로의 가도관 이행은 점진적인 편이며 세포간극이 자주 관찰되고 세포벽, 특히 벽공 부분에 나선재짐이 많이 발달되어 있다.

위의 특성을 근거로 창상벽공을 지니는 것은 경송류 가운데 소나무(또는 곰솔)로, 그리고 소나무형벽공을 지니는 것은 경송류 가운데 소나무(또는 곰솔)를 제외한 수종인 것으로 식별되었다.

#### 나) 솔송나무

가도관 방사벽상의 유연벽공은 1열 배열을 나타내며 크라슐레가 발달되어 있고 가도관의 세포내강을 가로지르는 트라베쿨레가 가끔 관찰된다. 가도관의 유연벽공대에서는 가리비형 토러스(scalloped torus)가 자주 관찰된다. 가도관의 세포벽에는 나선비후가 발달되어 있지 않다. 축방향유세포가 발달되어 있는데 주로 연륜계에 점재하며 염주상말단벽을 지닌다. 일반적으로 방사조직은 방사가도관과 방사유세포 모두로 이루어져 있으나 높이가 낮은 방사조직은 오로지 방사가도관 만으로 이루어져 있는 경우도 있다. 방사가도관에는 거치상비후가 발달되어 있지 않다. 방사유세포의 수평벽에

는 벽공이 잘 발달되어 있어 평활하지 못한 모양을 나타내며 말단벽 역시 벽공의 발달에 따른 염주상 모양을 나타낸다. 방사유세포의 수평벽과 말단벽 사이의 접합부에 인덴처가 발달되어 있다. 주로 단열방사조직만이 존재한다. 정상의 수직 및 수평수지가 발달되어 있지 않다. 춘재부에 있어 가도관과 방사유세포 사이의 교분야벽공은 편백형 내지 삼나무형으로 교분야당 2~3개 존재한다. 횡단면상에서 연륜계가 불명확하고 춘재와 추재의 구별이 어려우며 춘재에서 추재로의 가도관 이행은 점진적인 편인 것으로 나타났고 세포벽, 특히 벽공 부분에 나선채집이 많이 관찰되었는데 이는 압축이상재에 의한 것으로 판명되었다.

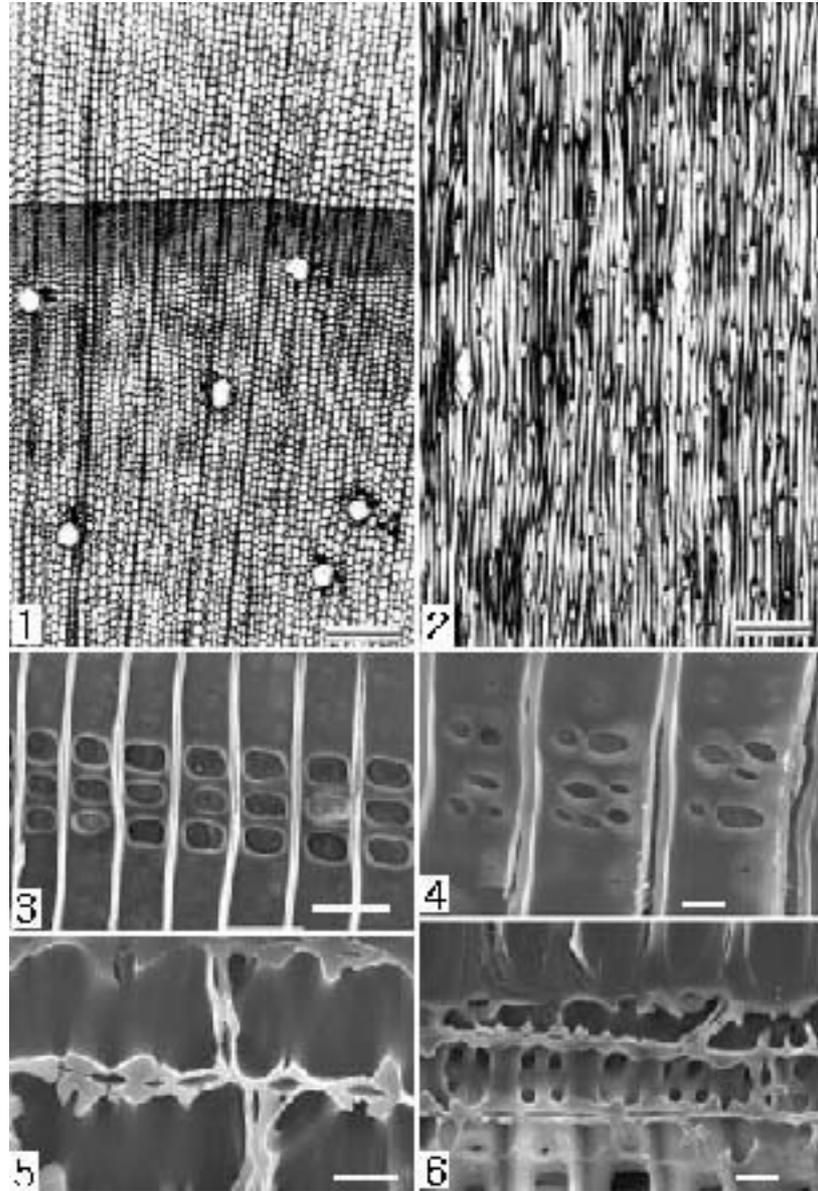
#### 다) 느티나무

환공재로 연륜계는 명확하며 춘재부 공권의 대형 관공 배열수는 1~2열이고 추재부 공권의 소형 관공은 집합관공으로 접선 내지 사상의 띠 모양으로 배열된다. 도관요소의 천공관에는 단천공이 발달되어 있으며 도관 상호간 벽공은 교호상배열을 나타내는데 춘재부 대형 도관요소에서는 결합공구가 관찰되기도 한다. 도관과 방사조직 사이의 교분야벽공은 벽공연이 뚜렷한 것으로써 도관 상호간 벽공과 비슷하다. 도관요소에 타이로시스(tyloses)와 검물질이 드물게 관찰되고 나선비후는 추재부 소형 도관요소에서만 관찰된다. 축방향유조직의 경우 독립유조직으로는 산재상, 연륜계상 그리고 수반유조직으로는 수반산재상, 주위상유조직이 발달되어 있다. 축방향유세포는 주로 스트랜드유세포로 스트랜드의 개수가 3~4개이지만 추재부 소형 관공 주위에서는 방추형유세포 및 스트랜드의 개수가 1~2개인 스트랜드유세포도 관찰되고 있다. 방사조직은 상하 가장자리에 방형 또는 직립세포가 1열 배열하는 이성방사조직으로 방사조직의 폭은 1~10열 정도이다. 도관상가도관이 존재하지 않으며 단벽공을 지니는 진정 목섬유 내지 뚜렷하지 못한 유연벽공을 지니는 섬유상가도관이 목재의 기초조직을 이루고 있는데 이들의 벽두께는 얇거나 두꺼운 편이다. 추재부 소형 도관요소와 함께 축방향유세포가 층계상 배열을 이루는 경향이 강하다. 다각형 결정이 방사조직을 구성하는 방형 또는 직립세포 및 평복세포에 모두 존재하는데 평복세포에서는 이들 결정이 방사방향으로 연속적인 배열을 나타내기도 한다. 그리고 하나의 세포내에서 크기가 뚜렷하게 다른 2부류의 결정이 관찰되는 경우도 더러 있다.

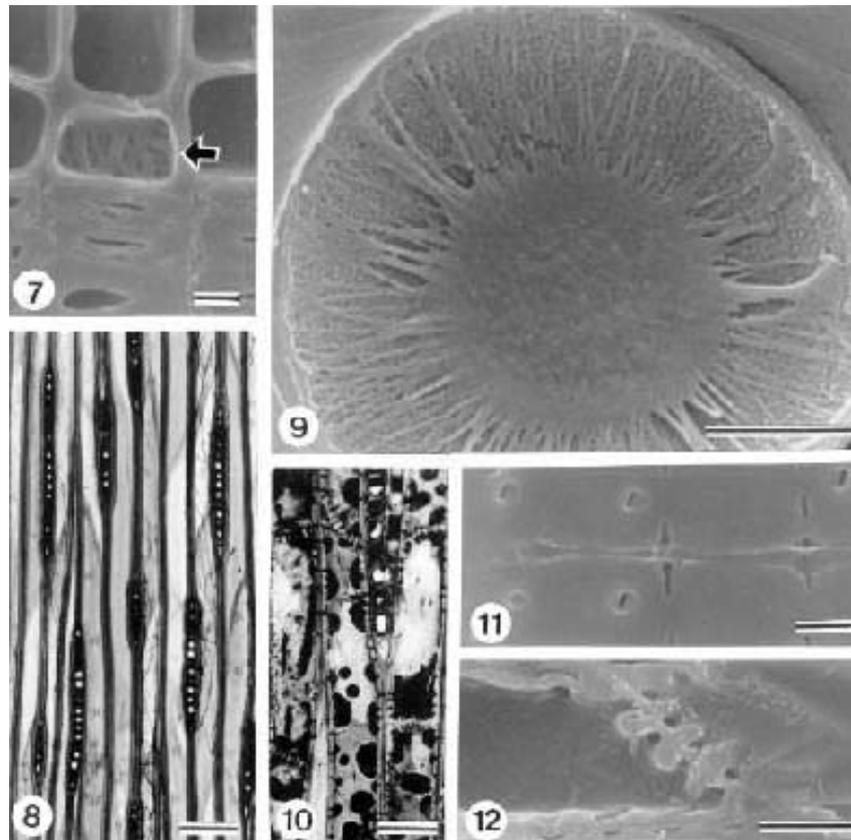
라) 졸참나무류

환공재로 연륜계는 명확하다. 춘재부 대형 공권의 관공은 원형으로 1~2열의 배열을 이루고 추재부 공권의 관공은 각형으로 고립 내지 2~3개 복합되어 화염상으로 배열된다. 도관요소의 천공판에는 단천공이 발달되어 있으며 도관 상호간 벽공은 교호상배열을 나타낸다. 도관과 방사조직 사이의 교분야벽공은 벽공연이 불명확하거나 인지되지 않는 것으로 원형 내지 각형, 수평상 내지 수직상 등 다양한 모양을 나타낸다. 도관요소에 타일로시스가 현저하게 발달되어 있으나 나선비후는 관찰되지 않는다. 축방향유조직의 경우 독립유조직으로는 산재상, 단점선상, 대상 그리고 수반유조직으로는 수반산재상유조직이 발달되어 있다. 축방향유세포는 스트랜드유세포로 스트랜드의 개수가 5~8개이다. 명확하게 크기가 다른 2부류의 방사조직이 발달되어 있는데 방사조직은 주로 평복세포로만 이루어진 동성방사조직이나 상하 가장자리에 방형 또는 직립세포가 1열 배열하는 이성방사조직 역시 관찰되기도 한다. 주위상가도관이 존재하며 뚜렷한 유연벽공을 지니는 섬유상가도관이 목재의 기초조직을 이루고 있는데 이들의 벽두께는 매우 두꺼운 편이다. 다각형 결정이 축방향의 스트랜드유세포에 주로 존재한다.

위의 특성을 근거로 하여 볼 때 참나무속 수종 가운데 상수리나무류가 아니라 졸참나무류에 속하는 것으로 갈참나무에 해당되는 것으로 식별되었다.



**Fig.1. Anatomical characteristics of hard pine.** -1 & 2: Normal axial and horizontal resin canals in transverse and radial surfaces , -3 & 4: Fenestriform and pinoid cross-field pittings in radial surfaces, -5 & 6: Dentate ray tracheids in radial surfaces. -- Scale bar of Fig. 1 & 2 = 200  $\mu\text{m}$ , of Fig. 3 = 50  $\mu\text{m}$ , of Fig. 4, 5 & 6 = 10  $\mu\text{m}$ .



**Fig.2. Hemlock.** - 7: Axial parenchyma cell (arrow). - 8: Uniseriate rays. - 9: Torus extension. - 10 & 12: Nodular end walls in axial and ray parenchyma cells. - 11: Taxodioid cross-field pits. -- Scale bar of Fig. 2 = 200  $\mu\text{m}$ , of Fig. 3, 4, 6 & 8 = 100  $\mu\text{m}$ , of Fig. 5 & 10 = 50  $\mu\text{m}$ , of Fig. 7, 11, & 12 = 10  $\mu\text{m}$ , of Fig. 9 = 5  $\mu\text{m}$ .

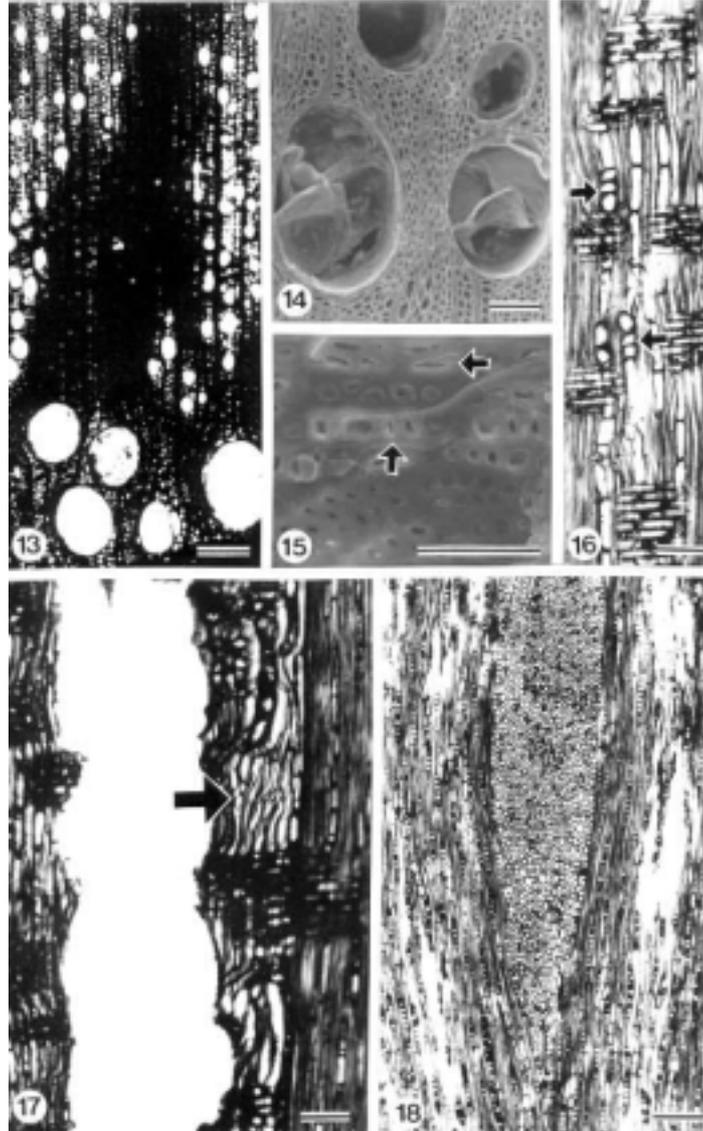
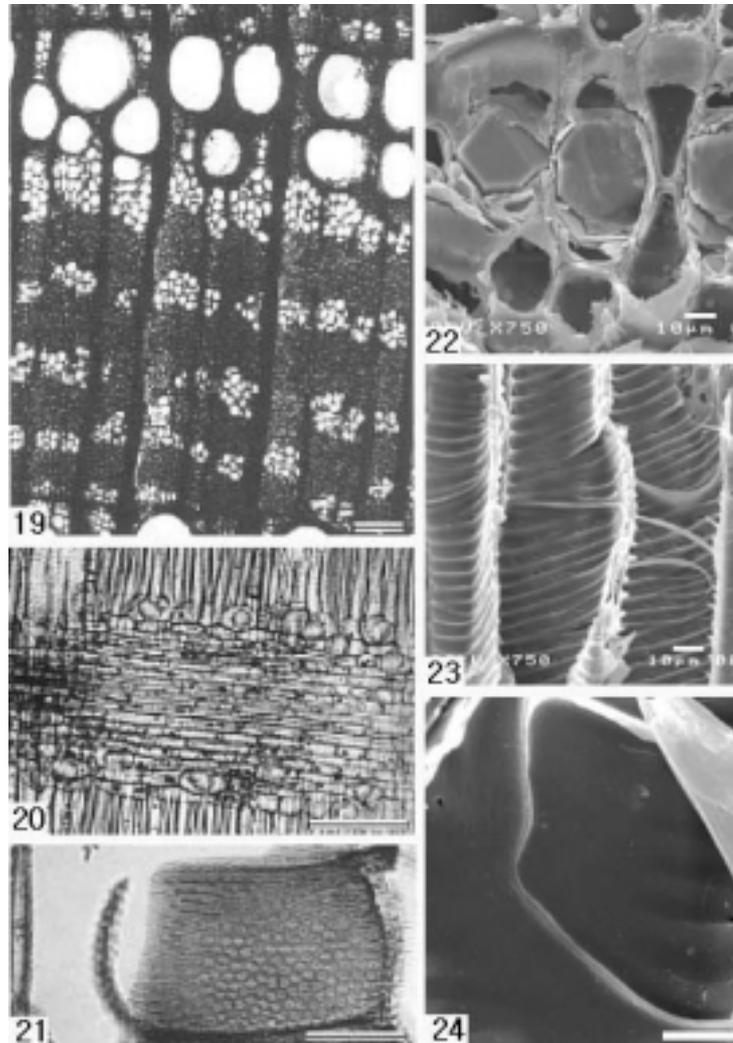


Fig.3. White oak (*Prinus* Section of subgenus *Lepidobalanus*). - 13: Ring-porous wood and latewood vessels in diagonal to dendritic pattern. - 14: Tyloses in vessels. - 15: Vessel-ray pits with much reduced borders to apparently simple, horizontal to vertical. - 16: Prismatic crystals in parenchyma strands (arrow). - 17: Vasicentric tracheids adjacent earlywood vessel (arrow). - 18: Rays of two distinct sizes. -- Scale bar of Fig. 13 & 18 = 200  $\mu\text{m}$ , of Fig. 14, 16 & 17 = 100  $\mu\text{m}$ , of Fig. 15 = 50  $\mu\text{m}$ , of Fig. 7, 11, & 12 = 10  $\mu\text{m}$ , of Fig. 9 = 5  $\mu\text{m}$ .



**Fig.4. Zelkova tree.** - 19: Ring-porous wood and latewood vessels in tangential bands. - 20 & 22: Prismatic crystals in ray cells. - 21: Coalescent pit aperture in vessel element. - 23: Spiral thickenings in latewood vessel elements. - 24: Simple perforation plate in vessel. -- Scale bar of Fig. 19 & 20 = 200  $\mu\text{m}$ , of Fig. 21 = 100  $\mu\text{m}$ , of Fig. 22, 23 & 24 = 10  $\mu\text{m}$ .

## 2. 주요 국산재의 생물학적 열화 원인

### 가. 고건축물의 생물학적 열화 원인



Fig.6. Geographical locations of old wooden buildings which biological deteriorations were investigated.

용주사(경기 화성), 청룡사(경기 안성), 수덕사(충남 예산), 해미읍성(충남 서산), 범주사(충북 보은), 금산사(전북 김제), 실상사(전북 남원), 대흥사(전남 해남), 화엄사(전남 구례), 쌍계사(경남 하동), 진주성(경남 진주), 범어사(부산직할시), 통도사(경남 양산), 직지사(경북 김천), 부석사(경북 영주), 봉정사(경북 안동), 하회마을(경북 안동), 월정사(강원 평창), 죽서루(강원 삼척), 선교장(강원도 강릉), 오죽헌(강원도 강릉), 기타 시도유형문화재인 민간가옥 다수를 대상으로 목부재의 생물학적 열화 원인을 조사하였다. 생물학적 열화 원인의 지리적 분포 차이를 조사하기 위하여 조사 대상 고건축물을 제주도(제주도)를 제외한 전국에서 고르게 선택하였는데, Fig.5는 조사 대상 고건축물의 지리적 분포를 보여준다.

부후, 연부후, 건재가해충류의 가해 여부는 고건축물의 성격상 목부재의 외부 노출부분을 대상으로 육안적으로 판정하였다. 흰개미(termites) 가해 여부는 망치를 이용하여 목부재의 표면을 두드려 내부 공동 여부를 확인하고, 공동이 확인된 경우 송곳으로 공동 부위를 찔러 내부 피해 상태를 확인함에 의해 평가하였다.

모든 조사 대상 건축물에서 정도에 차이는 있었지만 부후(Fig.6), 연부후(Fig.7), 건재가해충류 가해(Fig.8)가 관찰되었으나 흰개미 가해(Fig.9)는 주로 남부지방의 조사 대상 고건축물에서 관찰되었다. 지역에 따른 생물학적 열화 종류의 차이는 거의 없었으나 남부지방에서는 중부지방에 비하여 건재가해충류 및 흰개미 가해가 많은 것으로 관찰되었다. 고건축물 목부재의 생물학적 열화 정도는 건축물의 유지 및 관리 상태에

따라 상이하였는데, 일반적으로 고건축물의 문화재 지정 종목, 즉 중요성에 따라 국보, 보물, 시도유형문화재 순으로 보존 상태가 양호하였다. 또한 사찰의 경우에는 대웅전 등 주요 건축물의 보존 상태는 비교적 양호하였으나 승방 등 부속건물의 보존 상태는 일반적으로 불량하였다. 그리고 목부재의 수명, 즉 부재로 사용된 후 경과 연수에 따른 열화 종류의 차이가 존재하였는데 경과 연수가 오래된 고목재일수록 심각한 연부후와 건재가해충류의 피해가 비생물열화인 기상열화와 함께 관찰되었다.

부후와 연부후는 건축물의 북쪽 목부재들이 남쪽 목부재보다 심각하였는데, 이러한 차이는 강우 접촉 등에 의해 젖었던 목부재의 건조가 햇빛이 잘 드는 남쪽이 북쪽에 비하여 빠르기 때문이라 사료된다. 또한 동쪽 목부재들이 서쪽 목부재에 비하여 부후 및 연부후가 비교적 심각하였는데, 이 역시 강우 접촉 등에 의해 젖었던 목부재의 건조가 편서풍에 노출된 서쪽이 반대편인 동쪽에 비하여 빨리 건조되기 때문이라 사료된다.



Fig.6. Typical decay damages observed in old wooden buildings.



Fig.7. Typical soft rot damages observed in old wooden buildings.



Fig.8. Typical insect damages observed in old wooden buildings.



Fig.9. Typical termite attacks observed in old wooden buildings.



Fig.10. Decay damages of wood members by increased moisture contents due to direct rain wetting.

### 1) 부후의 원인

고건축물의 목부재를 대상으로 조사한 부후 원인은 거의 전부가 목부재의 재젖음(rewetting)에 의한 목재 함수율 상승과 관련이 있었다. 목부재 재젖음 원인은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 직접적으로 강우에 노출되어 목부재가 젖는 경우인데, 추녀뿌리를 받치는 기둥인 활주(活柱)를 포함한 기둥의 밑 부분, 서까래 및 도리의 끝 부분에서 강우에 의한 재젖음으로 인한 부후가 주로 관찰되었다(Fig.10). 둘째, 지붕을 통한 강우의 누수 현상으로 목부재가 젖는 경우인데, 이 경우에는 지붕 하부 목부재, 예를 들어 서까래 등이 부후되거나 또는 부후 전단계로 심하게 변색됨이 관찰되었다(Fig.11). 지붕을 통한 누수는 Fig.12에서 볼 수 있듯이 기와가 파괴되어 강우가 건물 내부로 스며드는 경우, 기와 교체 시 기존 기와와 규격이 맞지 않는 기와가 사용되어 기와간의 맞물림이 부정확하여 틈새로 강우가 스며드는 경우, 그리고 동파로 인해 발생하는 기와 균열(crack) 부위를 통한 강우가 스며드는 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다. 김과 이(1990)에 의하면 기존 고기와에 비하여 강도를 높이고 흡수율을 낮추기 위하여 점토 구성 비율이 높을 뿐 아니라 소성온도(燒成溫度) 미달로 소결(燒結)이 불충분한 현대 기와에서 동파현상이 많이 발생한다고 한다.



Fig.11. Decayed and discolored rafters due to rain seepage through roof.



**Fig.12. Various examples of roof tile's breakage.**

참고로 우리나라에 현존하는 건물 가운데 두 번째로 오래된 경북 영주의 부석사 무량수전의 경우, Fig.13에서 살펴볼 수 있듯이 지붕을 통한 누수로 일부 서까래가 심하게 젖으면서 검게 변색되는 것이 장마철이 지난 직후에 관찰되었다. 목재 가해균의 천이 특성상 먼저 변색균이 목재를 가해하고 다음으로 부후균이 가해하는데, 이러한 변색은 조만간 부후균 가해가 시작될 수 있음을 의미한다.



**Fig.13. Heavily discolored rafters observed in buseoksa muryangsujeon after summer rainy season.**

셋째, 마루 하부로부터 올라오는 습기를 흡착하여 목재가 젖는 경우인데, 시도 유형 문화재인 민간 고가에서는 마루가 썩어 내려앉은 경우가 일부에서 관찰되었으나 국보 또는 보물급 건축물의 경우에는 내부로 들어갈 수 없었던 관계로 세 번째 재젖음 원인에 따른 목부재 피해는 관찰이 불가능하였다. 이러한 원인에 따른 목부재의 재젖음은 마루 밑 공간(crawl space)의 공기 유통을 원활하게 해줌에 의해 예방할 수 있다 (Fig.14). 그러나 고건축물 보수 공사시 마루 밑 공간을 Fig.15에서 볼 수 있듯이 완전히 막아 놓거나 또는 막으면서 몇 개의 환기구를 설치하는 경우가 많이 관찰되었다. 이처럼 소형 환기구 몇 개를 설치하는 것으로는 마루 밑 공간의 습기 배제가 제대로 이루어질 수 없기 때문에 마루 받침목, 장선, 멩에 등의 부후를 피할 수 없다고 본다.



Fig.14. Examples of open crawl space under floor.



Fig.15. Examples of fully closed crawl space and closed crawl space with ventilating openings.

마지막으로 강우와 직접 접촉으로 인해 기둥 밑 부분이 부후되었을 때 부후 부위를 잘라내고 새로운 목재를 끼어 넣는 동바리 이음 방식에 대한 문제점을 지적할 수 있

다. 새로이 끼워 넣은 목재도 얼마간 시간이 지나면 다시 부후되는 경우가 빈번하게 관찰되었는데(Fig.16), 이는 근본적인 부후 원인, 즉 강우 직접 접촉에 의한 함수율 상승 문제를 해결하지 않기 때문이다. 따라서 동바리 이음 형식으로 기둥 밑 부분의 부후 문제를 보수할 때는 최소한 교체 부재는 방부처리 목재를 사용하여야 할 것이다.



**Fig.16. Deteriorated supporting post in 'dongbari' connection.**

#### 2) 연부후의 원인

연부후는 비도장 상태의 오래된 기둥이나 외부로 노출된 들보에서 주로 관찰되었는데, 이러한 연부후는 강우 직접 접촉에 의한 목부재의 재젖음이 발생 원인이라고 할 수 있다.

#### 3) 건재가해충류 가해의 원인

고건축물의 많은 목부재에서 건재가해충류의 탈출공(exit hole)이 관찰되었는데, 건재가해충류가 목부재를 가해한 이유는 단순히 그 지역에 가해충류가 존재하였기 때문이라 할 수 있다. 가해충류의 종류는 단순히 목부재 외부에서 관찰되는 탈출공의 모양과 크기만 가지고는 판정하기 곤란하였으나 전분 함량이 많은 활엽수 신재(new wood)를 가해하는 가루나무좀류와 고목재(old wood)에서 문제가 되는 빗살수염벌레(death watch beetles; Anobiidae)가 가해충류의 주종을 이룰 것이라 사료된다.

#### 4) 흰개미 가해의 원인

주로 남부지방에서 흰개미에 의한 목부재의 가해가 관찰되었는데, 흰개미 가해가 있었던 이유도 단순히 그 지역에 흰개미가 존재하기 때문이라 할 수 있다.

#### 나. 야외 조경시설재의 생물학적 열화원인

서울을 비롯한 수도권 지역의 근린공원과 어린이 놀이터에 조경시설재로 사용된 목재를 대상으로 생물학적 열화 원인을 조사하였다. 고건축물 목부재를 대상으로 한 열화 원인 조사에서와 마찬가지로 부후, 연부후, 건재가해충류의 가해 여부는 조사 대상 조경시설재의 외부 노출부분을 대상으로 육안적으로 판정하였다. 흰개미(termites)의 가해 여부는 망치를 이용하여 목부재의 표면을 두드려 내부 공동 여부를 확인하고, 공동이 확인된 경우 송곳으로 공동 부위를 찔러 내부 피해 상태를 확인함에 의해 평가하였다.

조사 결과, 정도가 다양한 부후 및 연부후 피해는 관찰되었으나 건재가해충류의 가해는 전혀 관찰되지 않았다. 흰개미 가해는 극히 일부 오래된 조경시설재에서 관찰되었다. 건재가해충류중 가루나무좀의 가해가 전혀 관찰되지 않은 이유는 이들이 선호하는 남양재 Lauan류 및 활엽수가 조경시설재로 거의 사용되고 있지 않기 때문이고, 빗살수염벌레의 가해가 관찰되지 않는 이유도 목재가 조경시설재로 본격 사용된 기간이 짧기 때문이라 사료된다.

조경시설재에서 가장 문제가 되는 생물학적 열화 원인은 부후였는데, 부후의 원인은 미처리 목재의 사용, 방부처리목재 대신 페인트나 니스 등 도막형성도료 및 발수제(water repellent)나 방부성 발수도료(water repellent preservative) 등 침투성도료 표면도장 목재의 사용, 불량 방부처리목재의 사용, 방부처리목재의 잘못된 사용 때문으로 나타났다.

Fig.17에서 볼 수 있는 미처리 목재를 조경시설재로 사용하는 경우는 극히 드물었으나 목재표면을 단순히 침투성도료나 도막형성도료로 도장한 목재를 사용하는 경우가 많았다. 표면도장의 효력은 장기간 지속되는 것이 아니므로 일정 기간 간격으로 재도장을 해주어야 하나 그렇지 못하기 때문에 Fig.18에서 볼 수 있듯이 도장된 목재가 시설된 지 얼마 지나지 않아 심하게 부후되어 경우에 따라서는 버섯(자실체)이 형성된 경우가 종종 관찰되었다. 또한 미처리 목재와 표면 도장 목재를 직접 토양과 접촉하여 사용하는 경우도 Fig.19에서와 같이 종종 관찰되었는데, 이러한 토양접촉은 Fig.18의 상황, 즉 토양과 접촉하지 않는 상황에 비하여 조속한 부후를 초래하게 된다.

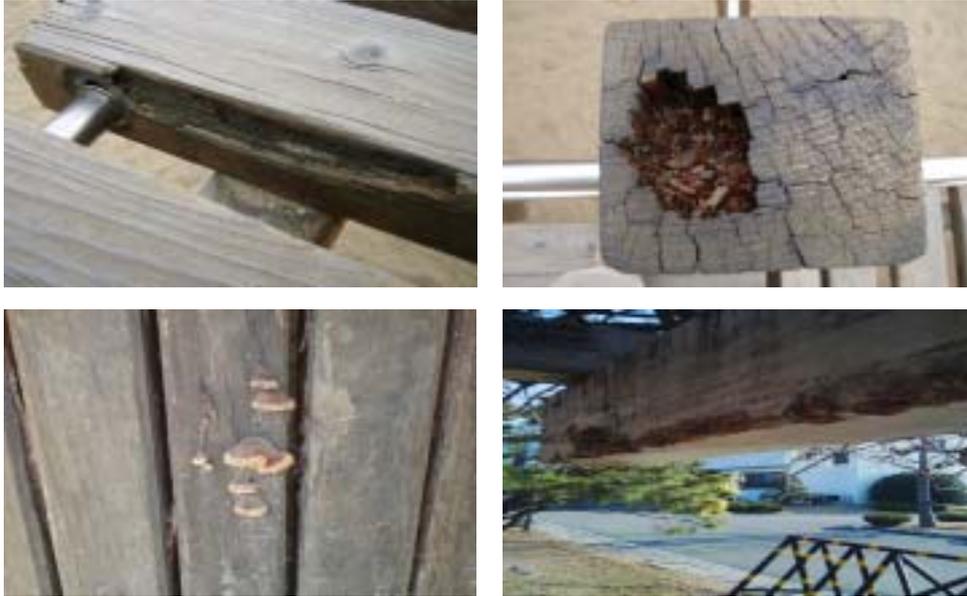


Fig.17. Decay damages of untreated wood used as landscape materials.



Fig.18. Decay damages of surface-coated wood with various film-forming and penetrating finishes.



Fig.19. Ground contact uses of untreated and surface-coated wood.

최근 많은 양의 방부처리목재를 조경시설재로 사용함에도 불구하고 부후로 인하여 예상외로 사용수명이 짧은 경우가 종종 관찰되는데, 그 이유를 다음의 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 첫째는 방부처리목재의 처리도(방부제 침윤도와 흡수량)가 산림청 고시 제 2004-62(2004)에 제시된 처리도 적합기준에 미달되는 불량 방부처리목재가 시설되기 때문이다(Fig.20). 현재 국내에서 조경시설재로 사용되는 목재 중 라디에타 소나무(*Pinus radiata*)를 제외하고는 자상처리(incising)없이 산림청 고시의 처리도 적합기준을 만족시킬 수 없기 때문에 앞으로 양질의 방부처리목재 생산을 위한 처리용 수종 선정 및 난주입 수종의 처리도 개선을 위한 자상처리의 적용에 대하여 심각하게 고려하여야 한다고 본다.



**Fig.20. Decay damages of preservative treated wood due to poor preservative treatbility.**

둘째는 방부처리가 제대로 된다고 하여도 방부처리목재를 시설 현장에서 치수에 맞게 절단하고, 또한 천공을 하면서 내부의 미처리 부위가 노출되기 때문이다(Fig.21). 앞으로는 현장 치수에 맞게끔 미리 절단 또는 천공 후 방부처리를 실시하여야 할 것이다.



**Fig.21. Untreated interior exposed by cutting or boring of preservative-treated wood at construction site.**

### 3. 자연 내후성 및 내의성 평가

#### 가. 자연내후성 평가

##### 1) 연구 방법

##### 가) 목재 시편의 준비

일반적으로 목재의 자연내후성 정도는 심재 내 존재하는 독성 추출물의 종류와 양에 좌우되는데 이러한 특징을 부여하는 독성 추출물은 동일 수종이라 할지라도 산지별, 동일 산지 내에서도 임목 개체별, 동일 임목 내에서도 부위별로 그 양이 상이하기 때문에 이를 고려하여 sampling을 실시하였다.

주요 국산 침엽수인 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 낙엽송(*Larix kaempferi*)의 자연내후성을 평가하였는데, 산지별 차이를 알아보기 위하여 Fig.22에서 볼 수 있듯이 소나무는 5개 산림조합 목재집하장(경기 화성, 강원 평창, 경북 봉화, 충북 제천, 전북 남원), 낙엽송은 6개 산림조합 목재집하장(경기 가평, 강원 평창, 경북 봉화, 충북 제천, 경남 함양, 충남 금산), 잣나무는 1개 산림조합 목재집하장(경기 가평)에서 필요한 제재목을 구입하였다. 동일 산지 내에서도 임목 개체별 차이를 알아보기 위하여 각 산림조합 목재집하장에서 수종 별로 5개 제재목을 서로 다른 제재목 묶음에서 골랐는데, 이는 선정된 각각의 제재목이 서로 다른 원목에서 채취되었음을 최대한으로 보장하기 위함이었다.

1개 제재목 내에 변재와 심재를 모두 포함하는 제재목을 선정하여 동일 임목 내에서도 부위별 차이에 의한 변이를 없애기 위하여 자연내후성이 가장 우수한 심재부 최외각에서 횡단면 치수가 2cm × 2cm이고 길이가 1cm인 내후성 평가용 시편을 필요량 채취하였다. 각 수종의 심·변재 구분은 소나무류인 소나무, 잣나무는 미국 방부협회 표준규격 AWPA M2-01 (AWPA, 2001)에 제시된 정색방법에 의거하여 변재와 심재를 구분하였다. 또한 재색 차이에 의한 변·심재의 구분이 명확한 낙엽송은 육안적 재색 차이에 의거하여 변재와 심재를 구분하였다.



Fig.22. Sampling sites of *P. densiflora* (■), *P. koraiensis* (▲) and *L. kaempferi* (●). The site numbers are 1: Gapyeong, Gyeonggi-do, 2: Hwaseong, Gyeonggi-do, 3: Gumsan, Chungcheongnam-do, 4: Namwon, Jellabuk-do, 5: Hamyang, Gyeongsangnam-do, 6: Bonghwa, Gyeongsangbuk-do, 7: Jecheon, Chungcheongbuk-do, and 8: Pyeongchang, Gangwon-do.

#### 나) 자연 내후성 평가

소나무, 잣나무 및 낙엽송 심재의 자연내후성 시험은 토양(soil) 대신에 질석(vermiculite)을 사용한 점과 공시균으로 갈색부후균인 *Gloeophyllum trabeum* (ASTM 공시 갈색부후균)과 *Fomitopsis palustris* (KS와 JIS 공시 갈색부후균)만 사용한 점을 제외하고는 미국재료시험협회 표준규격 ASTM D2017-81 (ASTM, 1996)의 자연내후성 평가 시험법에 의거하여 실시하였다.

#### 2) 연구 결과

미국재료시험협회 표준규격 ASTM D 2017-81 (ASTM, 1996)에 의거한 자연내후성 등급표를 Table 1에 제시하였다. 대표적인 갈색부후균인 *Fomitopsis palustris*와 *Gloeophyllum trabeum*을 이용한 자연내후성 시험 결과, 공시균에 관계없이 잣나무, 소나무, 낙엽송의 순으로 자연내후성이 높은 것으로 조사되었다(Table 2).

**Table 1. Criteria for classifying natural resistance of wood to decay fungi according to D 2017-81.**

Average weight loss (%)	Average residual weight (%)	Description
< 10	90 < 100	Highly resistant
11 < 24	76 < 89	Resistant
25 < 44	56 < 75	Moderately resistant
> 45	< 55	Slightly resistant or nonresistant

**Table 2. Mean weight losses of different wood species in ASTM D-2017-81 tests with fungi tested.**

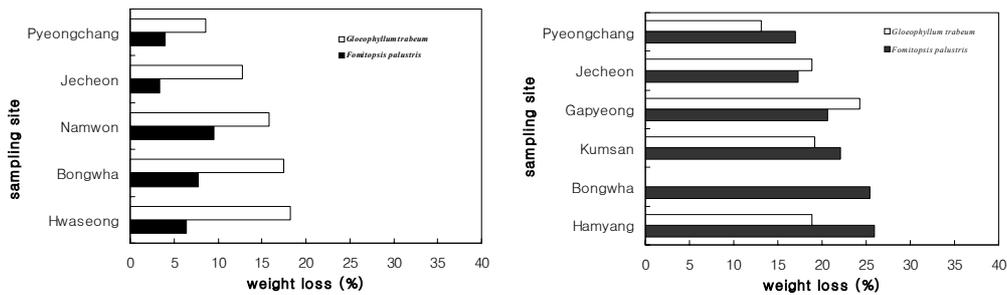
Species	Weight loss (%)		Durability class
	<i>Fomitopsis palustris</i>	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	
Red pine	6.21 a <sup>*1</sup>	14.59 a	Highly resistant ( <i>F. palustris</i> ) Resistant ( <i>G. trabeum</i> )
Korean pine	0.70 b	4.58 b	Highly resistant
Japanese larch	21.38 c	18.84 c	Resistant

<sup>\*1</sup>Same letters followed by numbers in each column are not significantly different ( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan's multiple range test.

미국재료시험협회의 내후성 등급분류에 의하면 잣나무는 매우 강함 (highly resistant), 낙엽송은 강함 (resistant)으로 나타났으며, 소나무는 공시균의 종류에 따라 다소 차이가 있어 매우 강함과 강함으로 평가되어 주요 국산 침엽수재의 자연내후성은 일반적으로 강한 것으로 나타났다. 낙엽송이 소나무보다 자연내후성이 낮게 조사된 결과는 기 수행된 여러 연구들의 결과와 일치한다. Viitanen 등(1997)은 *G. trabeum*을 이용한 낙엽송과 소나무의 자연내후성 비교실험 결과, 본 시험과 유사하게 소나무의 자연내후성이 우수함을 보고하였다. 또한 Björkman(1944)과 Viitanen 등

(1993) 역시 낙엽송의 자연내후성이 소나무 심재보다는 약하나 소나무 변재보다는 강한 것으로 보고한 바 있다. 이와 같은 결과는 자연내후성 정도에 영향을 미치는 심재 내 추출물중 수지산(resin acid)이 균류의 성장 억제제로 작용하는데(Saranpaa and Piispanen, 1993), 그 함량이 낙엽송 심재의 경우 약 0.1% 정도로 소나무류의 평균 함량 4.0%에 비하여 매우 낮기 때문인 것으로 사료된다(Viitanen *et al.* 1997).

소나무는 *F. palustris*에 대해서는 강한 내후성을 보이나 *G. trabeum*에 대해서는 *F. palustris*에 의한 중량감소보다도 2배가 넘는 중량감소를 보였다. 잣나무 역시 두 공시균에 의한 중량감소의 차이가 약 6배 정도로 상당히 크게 나타나 소나무와 유사한 경향을 보였으나, 낙엽송은 *G. trabeum* 보다 *F. palustris*에 의한 중량감소가 더 높은 것으로 조사되어 수종의 자연내후성은 시험에 사용된 공시균 종류에 따라 상이할 수도 있음을 알 수 있었다.



**Fig. 23. Mean weight loss of red pine (left) and Japanese larch (right) according to ASTM D-2017 in each sampling sites.**

각 수종의 자연내후성은 동일 수종이라도 산지에 따라 그 정도가 상이하게 나타났 다(Fig.23). 이는 산지간의 상이한 생육조건이 목재 생장에 직접적인 영향을 미쳐 동 일 수종이라도 산지별로 심재 내 독성추출물 함량, 리그닌 양, 투과성, 목재 내 질소 함량, 생장률 등이 상이하기 때문이라 사료된다.

Table 3. Difference of natural durability according to sampling sites in each species at each level of fungi tested as compared by a Duncan's multiple range test of mean values ( $\alpha = 0.05$ ).

Species	Fungi	Sampling site				
		Pyeongchang	Jecheon	Namwon	Bongwha	Hwaseong
Red pine	<i>F. palustris</i>					
	<i>G. trabeum</i>			—————		
Japanese larch	<i>F. palustris</i>	—————	—————	—————	—————	—————
	<i>G. trabeum</i>	—————		—————		

동일 산지 내에서도 개체간 자연내후성 차이가 관찰되었는데(Table 4), 이는 심재 부위에 따른 자연내후성 차이에 기인한다. 일반적으로 심재의 자연내후성은 횡단방향의 경우 변재부와의 경계 쪽으로 갈수록, 수축방향의 경우 상부로 갈수록 증가된다. 따라서 동일 산지 내에서 임목 개체간 중량감소율이 상이한 이유는 목재 시험편의 제조과정 중 선정된 제재목의 부위가 상이하기 때문이다.

**Table 4. Weight loss of each board of test species in sampling sites according to ASTM D-2017.**

Species	Sampling site	Board No.	Weight loss (%)			
			<i>Fomitopsis palustris</i>		<i>Gloeophyllum trabeum</i>	
Red pine	Bongwha	1	1.00*	c	41.36	a
		2	0.32	c	0.18	d
		3	0.40	c	1.63	d
		4	24.03	a	26.75	b
		5	13.01	b	17.52	c
	Hwaseong	1	1.88	c	13.52	b
		2	0.66	c	16.55	b
		3	19.38	a	27.67	a
		4	7.67	b	16.22	b
		5	2.43	c	17.4	b
	Jecheon	1	2.10	b	12.82	ab
		2	2.24	b	6.82	b
		3	1.97	b	16.7	a
		4	6.75	a	10.73	ab
		5	3.62	ab	16.96	a
	Namwon	1	14.29	b	10.97	bc
		2	3.41	d	27.93	a
		3	17.68	a	21.95	a
		4	2.41	d	4.81	c
		5	9.97	c	13.13	b
Pyeongchang	1	0.29	b	0.25	b	
	2	1.10	b	0.37	b	
	3	1.05	b	2.43	b	
	4	0.80	b	20.97	a	
	5	16.73	a	18.97	a	

\* Values are mean of 6 replicates. Same letter followed by the numbers in each column are not significantly different( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan's multiple range test.

**Table 4. Continued.**

Species	Sampling site	Board No.	Weight loss (%)			
			<i>Fomitopsis palustris</i>		<i>Gloeophyllum trabeum</i>	
Japanese larch	Bongwha	1	31.37	a	25.12	a
		2	24.43	b	21.51	a
		3	29.73	a	27.65	a
		4	23.25	bc	22.72	a
		5	18.50	c	13.35	b
	Gapyeong	1	22.19	b	20.71	a
		2	18.76	c	16.63	c
		3	20.33	bc	28.00	b
		4	25.83	a	35.94	a
		5	16.00	d	20.03	c
	Hamyang	1	36.57	a	30.55	a
		2	16.44	c	9.31	b
		3	19.48	c	14.97	b
		4	28.42	b	23.34	a
		5	28.67	b	26.22	a
	Jecheon	1	16.62	b	20.85	a
		2	16.19	b	15.57	b
		3	16.70	b	18.27	ab
		4	16.97	b	18.75	ab
		5	19.97	a	29.67	a
	Gumsan	1	21.28	bc	19.66	b
		2	30.14	a	24.54	a
		3	17.92	c	17.84	b
		4	22.14	b	18.44	b
		5	18.94	bc	15.38	b
Pyeongchang	1	15.40	b	13.75	a	
	2	23.20	a	14.13	a	
	3	16.35	b	13.49	a	
	4	15.89	b	10.66	a	
	5	13.83	b	13.71	a	

## 다. 자연내의성 평가

### 1) 연구방법

#### 가) 목재 시편의 준비

목재의 자연내의성도 자연내후성과 마찬가지로 동일 수종이라 할지라도 산지별, 동일 산지 내에서도 임목 개체별, 동일 임목 내에서도 부위별로 상이하기 때문에 이를 고려하여 sampling을 실시하였다.

주요 국산 침엽수인 소나무 (*Pinus densiflora*), 잣나무 (*Pinus koraiensis*), 낙엽송 (*Larix kaempferi*)의 자연내의성을 평가하였는데, 산지별 차이를 알아보기 위하여 자연내후성 평가에서와 마찬가지로 소나무는 5개 산림조합 목재집하장, 낙엽송은 6개 산림조합 목재집하장, 잣나무는 1개 산림조합 목재집하장에서 필요한 제재목을 구입하였다. 동일 산지 내에서도 임목 개체별 차이를 알아보기 위하여 각 산림조합 목재집하장에서 수종 별로 5개 변재부 제재목을 서로 다른 제재목 묶음에서 골라는데, 이는 선정된 각각의 제재목이 서로 다른 원목에서 채취되었음을 최대한으로 보장하기 위함이었다. 1개 제재목 내에 변재와 심재를 모두 포함하는 제재목을 선정하여 동일 임목 내에서도 부위별 차이에 의한 변이를 없애기 위하여 심재와 접하는 변재부에서 횡단면 크기가 6mm × 25mm이고 길이가 25mm인 시편을 필요량 준비하였다.

#### 나) 자연내의성 평가

자연내의성 평가는 미국목재보존협회 표준규격 AWPA E1-97 (AWPA, 2001)에 의거하여 실시하였으며, 경상남도 사천시 일대 야산에서 채집된 일본 흰개미 (*Reticulitermes speratus*)를 공시 흰개미로 사용하였다.

### 2) 연구결과

흰개미 가해 4주후 소나무, 잣나무, 낙엽송의 중량감소율을 Table 5에 제시하였다. 수종별 자연내의성은 소나무, 낙엽송, 잣나무 순으로 강하게 나타났다. 흰개미 가해에 의한 각 수종 간 중량감소율 차이는 통계학적으로 유의성이 인정되었으나, 실제 수종 간 중량감소율 차이는 5% 이내로서 그리 크지 않았다. 기 수행된 연구에 의하면 흰개미에 대한 자연내의성 정도는 비중과 밀접한 관련이 있는데, 즉 비중이 높을수록 자연내의성이 강한 것으로 보고된 바 있다(Arango 등, 2004). 하지만 본 연구의 공시수

종인 소나무, 잣나무, 낙엽송의 기건비중은 각각 0.47, 0.45 및 0.54로써 그 차이가 0.1 미만이므로 본 연구의 결과와 유사하게 실제 수종 간 중량감소의 차이가 크지 않았다.

**Table 5. Results of laboratory evaluation of different wood species exposed to 400 subterranean termites of *Reticulitermes hesperus*.**

Species	Weight loss (%)	Remark
Red pine	19.81 b*	
Korean pine	24.56 a	
Japanese larch	22.72 ab	

\*Same letters followed by numbers in each column are not significantly different ( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan's multiple range test.

일반적으로 소나무가 다른 침엽수에 비하여 자연내의성이 약한 것으로 알려져 있으나 본 연구의 결과에 의하면 잣나무 및 낙엽송보다 자연내의성이 강한 것으로 나타났다. 또한 동일 수종이라도 산지에 따른 자연내의성의 차이가 관찰되었는데 소나무의 경우 봉화, 화성, 평창, 제천, 남원산 소나무의 순으로 자연내의성이 강하였으며, 낙엽송의 경우는 평창, 함양, 제천, 금산, 봉화, 가평 순으로 강하였다(Fig.24, Table 6). 또한 동일 산지 내에서는 소나무 화성, 낙엽송 제천에서 채취된 시험편을 제외하고는 개체별 자연내의성의 차이가 통계적으로 인정되지 않아 각 수종의 산지별 변재부의 termite 가해 예민도는 거의 동일한 것으로 사료된다(Table 7).

본 연구로부터 공시수종 모두 수종, 산지, 개체별 상관없이 4주 배양기간 후 약 20% 전후의 높은 중량감소를 보여 이들을 목제품, 조경시설물 및 옥외 구조용재 등으로 장기간 사용할 경우 흰개미 가해에 의한 붕괴 위험성이 매우 높으므로 이들의 사용수명연장을 위해서는 목재의 사용환경 범주에 적합한 방부처리가 반드시 수반되어야 한다.

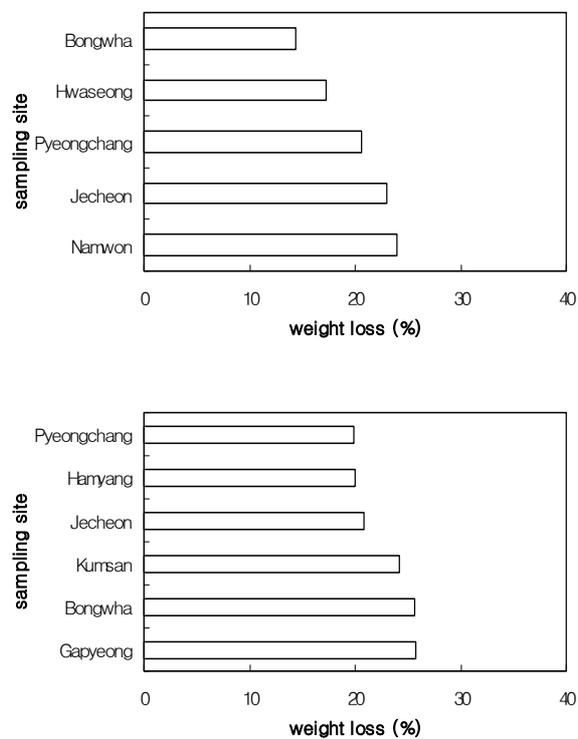


Fig.24. Mean weight loss of red pine (left) and Japanese larch (right) according to AWPA E1-97 in each sampling sites.

Table 6. Difference of susceptibility to attack by subteranean termites according to sampling sites in each species at each level of fungi tested as compared by a Duncan's multiple range test of mean values ( $\alpha = 0.05$ ).

Species	Sampling site				
	Bongwaha	Hwaseong	Pyeongchang	Jecheon	Namwon
Red pine	—————			—————	
Japanese larch	Pyeongchang	Hamyang	Jecheon	Gumsan	Bongwaha Gapyeong
	—————		—————		—————

Table 7. Weight loss of each board of test species in sampling sites according to AWPA E1-97.

Species	Sampling site	Board No.	Weight loss (%)	
Red pine	Bongwha	1	16.86*	a
		2	17.49	a
		3	13.28	a
		4	10.99	a
		5	13.35	a
	Hwaseong	1	7.19	b
		2	23.08	a
		3	20.24	a
		4	20.38	a
		5	15.11	ab
	Jecheon	1	26.74	a
		2	22.33	a
		3	21.13	a
		4	23.28	a
		5	21.59	a
	Namwon	1	28.63	a
		2	26.43	a
		3	18.73	a
		4	21.84	a
		5	23.86	a

**Table 7. Continued.**

Species	Sampling site	Board No.	Weight loss (%)		
Red pine	Pyeongchang	1	27.02	a	
		2	16.47	a	
		3	19.72	a	
		4	21.13	a	
		5	18.47	a	
	Gapyeong	1	18.35	a	
		2	30.07	a	
		3	26.32	a	
		4	26.95	a	
		5	21.11	a	
	Japanese larch	Bongwha	1	17.87	a
			2	19.06	a
			3	23.28	a
			4	18.37	a
			5	25.69	a
Gapyeong		1	21.84	a	
		2	24.82	a	
		3	28.55	a	
		4	29.87	a	
		5	23.39	a	
Hamyang		1	17.18	a	
		2	18.36	a	
		3	20.94	a	
		4	23.54	a	
		5	20.13	a	
Jecheon	1	33.49	a		
	2	25.92	ab		
	3	23.50	b		
	4	25.93	ab		
	5	19.27	b		

**Table 7. Continued.**

Species	Sampling site	Board No.	Weight loss (%)	
Japanese larch	Gumsan	1	25.82	a
		2	23.99	a
		3	24.08	a
		4	21.53	a
		5	25.52	a
	Pyeongchang	1	12.59	a
		2	20.56	a
		3	21.25	a
		4	25.17	a
		5	19.92	a

\*Values are mean of 6 replicates. Same letter followed by the numbers in each column are not significantly different ( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan's multiple range test.

## 제 2 절 다양한 비파괴 평가를 이용한 열화탐지

### 1. 목조 고건축물 교체부재 이용 실험

#### 가. 부재 확보 현황

문화재청과 협조하여 전국에 산재되어 있는 문화재 보수공사 현장에서 교체된 열화부재를 확보하고, 이를 실험재료로 활용하였다. 확보된 부재를 출처 및 부재 종류별로 구분하고, 각 부재의 사진 및 치수를 분류번호와 함께 기록하였다. 부재의 표면상태 및 필요에 따라 일부를 절단한 절단면을 육안으로 관찰함으로써 각각의 열화원인을 확인하였다.

함수울, 비중, 수중식별용 시험편 제작을 위하여 부재의 끝부분을 길이방향으로 약 10cm 절단하였다. 가능한 한 열화나 응이 등과 같은 결함이 포함되어 있지 않은 위치에서  $2.5 \times 2.5 \times 10$  (cm<sup>3</sup>) 시편을 4~5개 제작하고, 그 중 하나는 함수울 및 전건비중 측정에 사용하였으며, 남은 시편은 국민대학교에서 수중식별 및 해부학적 특성을 위해 이용하였다. 확보하여 과제 수행에 이용한 고건축물 열화 피해부재의 종류 및 개수는 Table 1과 같다.

Table 1. 고건축물 열화부재 확보 현황

지역	문화재명	부 재 종 류					계
		기둥	보	서까래	인방	기타	
광주	고씨삼강문	10	11	2	0	1	24
	고원희가옥	11	5	29	0	3	48
나주	최석기가옥	21	45	3	9	5	83
여수	홍국사	8	1	1	5	6	21
	연암김씨종택	3	1	4	0	5	13
영광	이규헌가옥	10	1	2	3	1	17
	영광향교	6	0	5	1	3	15
계		69	64	46	18	24	221

나. 수종 식별

Table 14. 고건축물 부재별 수종 식별 결과

고건축물명	부재	번호	수종	비고
최원희 가옥 (나주)	기둥	2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		7	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		8	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		9	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 탈출공
		10	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		11	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		12	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		13	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		15	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		16	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	18	경송류(소나무 또는 곶솔)		
	19	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
	20	경송류(소나무 또는 곶솔)		
	21	경송류(소나무 또는 곶솔)	탈출공	
	보	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		7	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		8	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		9	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		10	경송류(소나무 또는 곶솔)	
11		경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
12		경송류(소나무 또는 곶솔)		
13		경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 군사	
15		경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
16	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재		
17	경송류(소나무 또는 곶솔)			
18	경송류(소나무 또는 곶솔)			
19	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 군사		
20	경송류(소나무 또는 곶솔)			
21	경송류(소나무 또는 곶솔)			
22	경송류(소나무 또는 곶솔)	군사		
25	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재		
26	경송류(소나무 또는 곶솔)			
27	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재		
28	경송류(소나무 또는 곶솔)			

고건축물명	부재	번호	수종	비고
최원희 가옥 (나주)	보	29	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		30	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		31	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		32	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		33	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사
		34	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		35	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		36	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		37	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		38	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		40	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		41	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		42	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		43	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	44	경송류(소나무 또는 곶솔)		
	서까래	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사, 압축이상재
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	인방	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		7	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		8	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		9	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	기타	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
2		경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
3		경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
4		경송류(소나무 또는 곶솔)		
5		경송류(소나무 또는 곶솔)		
고원희 가옥 (광주)	서까래	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		3	경송류(소나무 또는 곶솔 제외한 경송)	압축이상재
		4	경송류(소나무 또는 곶솔 제외한 경송)	압축이상재
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		7	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		8	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		9	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 탈출공
		10	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		11	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		12	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		13	경송류(소나무 또는 곶솔 제외한 경송)	균사, 탈출공
		14	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		15	경송류(소나무 또는 곶솔)	

고건축물명	부 재	번 호	수 종	비 고	
고원회 가옥 (광주)	서까래	16	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		17	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 균사	
		18	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		19	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		20	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		21	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사	
		22	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		23	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		24	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		25	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		26	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사	
		27	경송류(소나무 또는 곶솔)		
	28	경송류(소나무 또는 곶솔)			
	29	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재		
	기둥	1	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 탈출공	
		8	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		10	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		11	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		보	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
			2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
			3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	5		경송류(소나무 또는 곶솔)		
	기타	1	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)		
고씨 삼강문 (광주)	기둥	1	느티나무		
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		5	느티나무		
		6	느티나무		
		7	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		8	느티나무		
		9	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사	
		10	경송류(소나무 또는 곶솔)		
	보	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)		
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
7		경송류(소나무 또는 곶솔)			
8		경송류(소나무 또는 곶솔)			

고건축물명	부재	번호	수종	비고
고씨 삼강문 (광주)	보	9	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		10	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		11	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	서까래	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	군사
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 군사
기타	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 탈출공	
이름없음	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
	2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
인규?	인방	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
홍국사 (여수)	기둥	?	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		8	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	인방	2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	기타	5	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 군사
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 군사
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	보 서까래	6	경송류(소나무 또는 곶솔)	군사
		1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
향교 (영광)	기둥	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	서까래	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		5	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	기타	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
2		경송류(소나무 또는 곶솔)		
3		경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
연안김씨 종택 옆집 (영광)	기둥	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	보	3	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 군사
	기타	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	

고건축물명	부재	번호	수종	비고
연안김씨 종택 (영광)	보	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	서까래	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	기타	2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 탈출공
3		경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재	
이규현 가옥 (영광)	기둥	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		4	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		6	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		7	경송류(소나무 또는 곶솔)	균사
	보	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	서까래	2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
		1	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	인방	2	경송류(소나무 또는 곶솔)	
		3	경송류(소나무 또는 곶솔)	탈출공
1		경송류(소나무 또는 곶솔)		
범어사 (부산)	나한전 앞(2)	1	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	불이문 뒷기둥	2	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	일주문 맨 우측	3	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	종각 (밑에 있는 상점)	4	줄참나무류(갈참나무)	
	관음전 기둥	5	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재, 포자
	불이문 두번째	6	경송류(소나무 또는 곶솔)	압축이상재
	대웅전 기둥	7	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	천왕문	8	경송류(소나무 또는 곶솔을 제외한 경송)	압축이상재, 균사
	나한전 짧은 기둥	9	경송류(소나무 또는 곶솔)	
	불이문 앞쪽 우측	10	솔송나무	압축이상재

Table 3. 수종별 고건축물 부재의 수

수종	부재의 수
경송류(소나무 또는 곶솔)	202
경송류(소나무 또는 곶솔을 제외한 경송)	4
느티나무	4
줄참나무류(갈참나무)	1
솔송나무	1

#### 다. 기본 물성(함수율, 비중) 측정

각각의 열화부재에 대한 함수율 및 비중을 측정하여 기록하였다. 전체 부재에 대한 함수율 및 비중의 분포를 Fig.1, 2에 나타내었다. 비중은 대략 0.4~0.5 (g/cm<sup>3</sup>)의 범위에서 나타났는데, 이는 국산 소나무의 전건비중과 거의 일치한다. 0.6 g/cm<sup>3</sup>이상의 비중을 가진 부재가 일부 나타났는데 이는 활엽수인 느티나무가 일부 포함되어 있기 때문으로 판단된다.

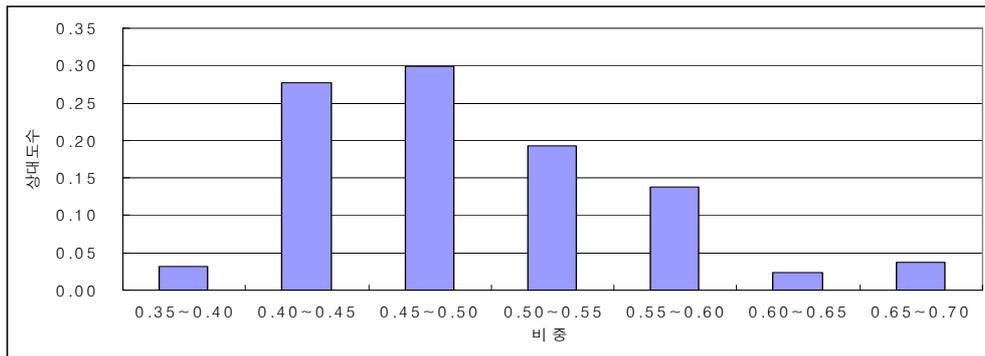


Fig.1. 열화부재의 비중 분포

함수율은 대략 13~16% 정도의 범위에서 나타났는데, 이는 부재가 오랜 사용과정에서 완전히 천연건조 되었기 때문으로 생각된다. 또한 부재의 교체 과정에서 장기간 외부에 방치됨에 따라 본 측정에서 얻어진 함수율에는 실제 구조물 내에서의 수분분포도 반영되지 않은 것으로 사료된다.

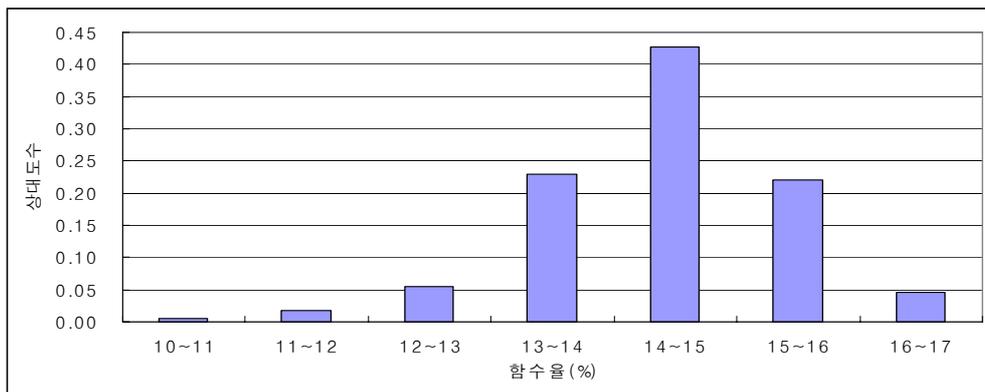


Fig.2. 열화부재의 함수율 분포

**라. 생물학적 열화 원인 조사**

Table 4에서 보여주는 전라남도 일원 8개 고건축물의 해체 부재 (기둥, 보, 서까래, 인방, 기타 부재) 214개의 열화 원인을 정밀 조사한 결과, 연안김씨 종가 옆집 해체 부재에서 흰개미 가해가 발견되지 않은 것을 제외하고는 고건축물 목부재의 외부 노출부분을 대상으로 생물학적 열화 원인을 조사한 결과에서와 마찬가지로 부후(Fig.3), 연부후(Fig.4), 건재가해충류 가해(Fig.5), 흰개미 가해(Fig.6)가 전부 관찰되었다. 그리고 많은 부재에서 상기한 생물학적 열화가 한 부재 내에서 복합적으로 관찰되었다. 여기서 연안 김씨 종가 옆집의 해체 부재에서 흰개미 가해가 발견되지 않은 것은 Table4에서 볼 수 있듯이 조사 대상 해체 부재가 총 5점으로 매우 적었던 것에 기인한다고 판단된다.

**Table 4. 조사대상 고건축물별 해체 부재의 종류와 숫자.**

고건축물	소재지	기둥	보	서까래	인방	기타
고씨 삼강문	광주광역시	10(0, 1)	11(1,0)	2	0	1
고원희 가옥	광주광역시	9	4	29	0	3
최원희 가옥	전남 나주시	20(1, 11)	41(8, 19)	3	9(1,7)	5(0,4)
연안김씨 종가	전남 영광군	1	1	4	0	2
연안김씨 종가 옆집	전남 영광군	1	1	0	0	3(0,2)
홍국사	전남 여수시	7	1	1	4	9(1,4)
이규현 가옥	전남 영광군	8	1	2	4(0,3)	1
영광향교	전남 영광군	6(0, 6)	0	5	1	3(1,0)

(주) 괄호 안의 숫자 중 첫 번째 숫자는 생물학적 열화가 전혀 없는 부재의 숫자이고, 두 번째 숫자는 부후나 흰개미의 가해가 없이 연부후나 건재가해충류의 가해만 발견된 부재의 숫자임.



**Fig.3. Typical decay damages observed in dismantled wood members of old wooden building.**



**Fig.4. Typical soft rot damages observed in dismantled wood members of old wooden building.**



**Fig.5. Typical insect damages observed in dismantled wood members of old wooden building.**



**Fig.6. Typical termites damages observed in dismantled wood members of old wooden building.**

조사된 해체 부재중 부후균 가해재 135개(63.1%), 연부후균 가해재 66개(30.8%), 흰개미 가해재 86개(40.2%), 건재가해충류 가해재 178개(83.2%)로 나타나 모든 생물열화의 복합 피해가 관찰되었다(Table 5). 참고로 전국의 목조 사찰문화재 60개소의 목부재 외부 노출부분을 대상으로 생물열화 원인을 조사한 이 등(1999)은 조사 대상 부재

중 7 %만 온전하고 나머지는 부후(29%), 건재가해충류(26%), 흰개미(38%)의 피해를 받았다고 보고하였다. 해체 부재의 거의 전부가 침엽수인 관계로 부후는 전부 갈색부후였다. 흰개미 피해는 고건축물 부재를 대상으로 한 육안관찰시 잘 관찰되지 않았으나 실제 해체부재 조사 시는 흰개미 피해가 예상외로 심각하여 향후 부후 탐지를 위한 비파괴검사 기술 개발도 중요하지만 흰개미 가해 탐지를 위한 비파괴검사 기술 개발도 매우 중요함을 알 수 있었다.

**Table 5. 조사대상 고건축물별 열화 종류의 비율(%).**

고건축물	소재지	부후	연부후	건재가해충류 피해	흰개미 피해
고씨 삼강문	광주광역시	83.3	58.3	79.2	75.0
고원희 가옥	광주광역시	100.0	8.9	100.0	35.6
최원희 가옥	전남 나주시	20.5	38.5	67.9	19.2
연안김씨 종택	전남 영광군	100.0	25.0	87.5	75.0
연안김씨 종택 옆집	전남 영광군	60.0	40.0	100.0	0.0
홍국사	전남 여수시	82.6	30.4	95.7	60.9
이규현 가옥	전남 영광군	68.8	18.8	87.5	87.5
영광향교	전남 영광군	86.7	26.7	86.7	20.0

부재별 열화원인의 비율을 보여주는 Table 6에서도 볼 수 있듯이 부후는 예상대로 기둥과 서까래에서 비율이 가장 높았는데 이는 기둥이나 서까래가 보나 인방보다 재젓음 확률이 높기 때문이라 할 수 있다. 연부후는 보나 인방보다 기둥에서 많이 발생하였는데, 이 역시 강우 직접 접촉에 따른 재젓음 확률의 부재 종류별 차이에 기인한다고 판단된다. 서까래에서 연부후가 전혀 관찰되지 않은 것은 예상 밖이었는데, 이는 조사 대상 모든 서까래에서 부후가 관찰된 것과 연관이 있다고 판단되었다. 즉, 서까래에서 표면의 연부후가 심각한 부후에 의해 가려지기 때문에 별도로 연부후 피해가 관찰되지 않았으리라 사료된다. 또한 일반적으로 지면과 가까운 습한 기둥과 토대 등을 가해하는 것으로 알려진 흰개미가 서까래 등 건축물 전체를 가해함을 확인할 수

있었다. 이는 비파괴검사를 통한 목조건축물의 생물열화 진단 시 흰개미 가해 여부를 토양과 멀리 떨어진 서까래에 대해서도 조사하여 함을 말해주는 좋은 증거라 할 수 있다.

**Table 6. 조사대상 고건축물의 부재별 열화 종류의 비율(%).**

목부재	부후	연부후	건재가해충류 피해	흰개미 피해
기둥	64.5	50.0	85.5	46.8
보	41.7	30.0	75.0	38.3
서까래	97.8	0.0	95.7	41.3
인방	44.4	36.7	72.2	38.9
기타	60.7	17.9	82.1	28.6

해체부재의 열화정도는 경미한 것부터 심한 것까지 다양하였는데, 열화정도가 심각한 것은 부재를 완전히 교체하여야 하지만 열화정도가 경미한 것은 반드시 교체할 필요가 없다고 본다. 비파괴검사에 의해 부재의 잔존강도를 예측하여, 만일 부재의 예측 잔존강도가 설계응력 보다 높으면 부재를 교체하는 것보다는 현장에서 구제처리를 실시한 후 보강처리를 실시하는 방법을 사용하여야 할 것이다. 따라서 부재의 열화 상태를 진단하는 비파괴검사법 만이 아니라 열화부재의 잔존강도를 예측할 수 있는 비파괴검사법의 개발도 고건축물의 유지 및 관리 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 참고로 Table 4에 의하면 전체 해체 부재의 6%에 해당하는 부재에서 생물학적 열화가 전혀 발견되지 않았으며, 또한 목부재의 구조적 약화와 크게 관련되지 않는 연부후 및 건재가해충류 피해 부재도 27% 정도 포함되어 있었다. 특히, 최원희 가옥의 경우 생물학적 열화가 전혀 발생하지 않은 부재와 연부후 및 건재가해충류 피해 부재의 비율이 각각 13%와 55%로 매우 높았다.

## 2. 비파괴 검사법을 이용한 열화 탐지

### 가. 응력파 및 초음파

#### 1) 전달 시간(TOF, Time of Flight) 측정

확보된 열화 부재 중 기둥, 보 부재와 같이 비교적 단면이 큰 부재를 중심으로 비파괴 평가를 실시하였다. 비파괴 평가는 각 단면을 기본 단위로 하여 수행되며, 단면의 형태 및 크기에 따라 하나의 단면에 3~5회의 시험을 실시하였다(Fig.7). 각 단면의 길이방향 간격은 10cm로 하였다. 하

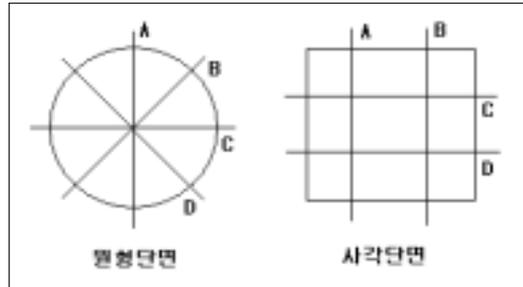


Fig.7. 단면형태에 따른 비파괴 평가

나의 부재에 대해 대략 60~100개의 위치에서 비파괴 시험이 실시된다.

먼저 부재의 표면에 붙어있는 먼지 및 이물질을 제거하고, 각각의 측정위치를 부재 표면에 표시하였다. 다음으로 각 측정위치에서의 측정거리 (부재 통과길이)를 정확하게 측정하여 기록하였다.

본 연구에서 사용된 초음파 실험 장치 (PUNDIT-plus)는 음파의 전달 시간을 측정하는 것으로서 한 탐촉자에서 음파를 발생시키고 다른 탐촉자에서 신호를 수신하는 방식으로 출력전압 1.2kV를 사용하였고, 공진 주파수 54kHz, 직경 50mm의 종파 압전 탐촉자를 송신과 수신에 사용하였으며 그리스를 couplant로 사용하였다. 응력파 실험 장치 (Metriguard 239A) 역시 초음파 실험 장치와 그 원리는 유사하나 음파를 발생시키는 탐촉자 대신 시편에 직접 충격을 주는 해머를 사용하여 발생하는 음파의 전달 시간을 측정한다.

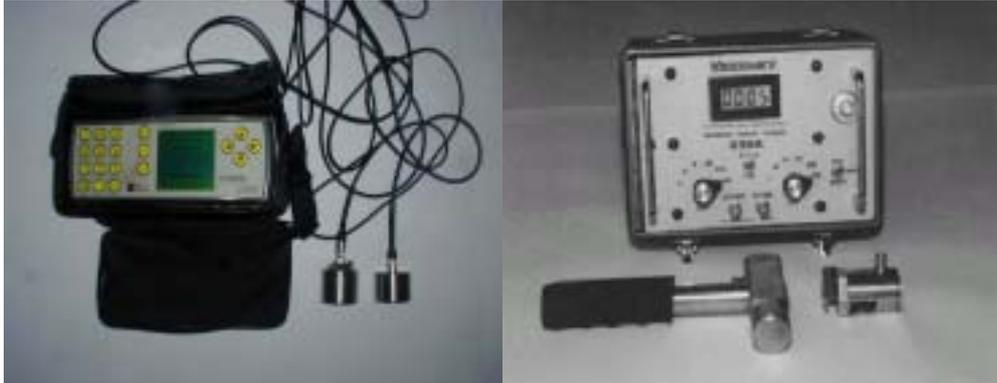


Fig.8. Ultrasonic(left) and accelerometer(right) stress wave tester for NDT.

2) 실험 결과

이전의 연구에서는 음파가 전달되는 속도의 역수를 이용하여 열화 정도를 평가하는 기준을 제시하였는데, 본 연구에서는 이 값을 다시 속도로 환산하여 부재의 열화여부를 판단하는데 사용하였다(Table 7). 여기서 열화정도를 나타내는 열화율(Fig.14)은 드릴저항 시험에 의해 측정된 값으로 드릴날이 부재를 통과한 전체 길이에 대한 열화된 길이의 비로써 구해진다.

Table 7. 음파전달 속도를 이용한 열화의 판단 기준.

열화율(%)	응력과			초음파		
	~12	12~17	17~	~8	8~15	15~
1/속도( $\mu\text{s}/\text{m}$ )	~1800	1800~2200	2200~	~800	800~950	950~
속도(m/s)	556~	455~556	~455	1250~	1050~1250	~1050

응력과 및 초음파 전달속도 측정은 확보된 열화부재 중에서 단면이 큰 부재 (주로 기둥 및 보부재)를 위주로 하여 60개의 부재를 선정하여 실시하였다. 하나의 부재에 대하여 측정된 결과를 Fig.9~12에서와 같이 하나의 그래프에 나타내었으며, Table 7의 기준을 적용하여 대략적인 열화의 위치를 확인하였다.

Fig.9, 10는 고씨삼강문에서 확보한 기둥 8번 부재(고삼-기-8)에 대한 초음파 및 응력과 측정결과이며, 전체적으로 부재에 열화가 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 3, 9,

16, 17의 C번 위치는 다른 부재와의 접합을 위해 홈이 파여져 있는 부분으로 전달속도를 0으로 나타내었다.

초음파 측정결과의 경우에는 전체적으로 기준보다 2배정도 높은 값을 나타내어 열화여부를 확실하게 확인할 수 있었으나, 응력파의 경우에는 1C, 5A, 17D 위치에서 기준보다 조금 낮은 값을 나타내었고 전체적으로도 각 측정결과 사이의 편차가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 초음파의 경우 기계에서 일정한 주파수와 세기를 가지는 초음파를 발생시켜 부재에 전달하고 이러한 초음파가 부재를 통과하는 시간을 측정하게 되므로 건전한 재료에 대해서는 비교적 일정한 결과를 얻을 수 있으나, 해머를 이용하여 재료 표면에 직접 충격을 가하는 응력파의 경우에는 매번 발생하는 응력파가 조금씩 다르며 도착되는 파를 탐지하는 센서의 감지부분의 크기가 작기 때문에 약간의 측정위치 변화에도 민감하게 반응하는 것으로 사료된다. 이러한 응력파 측정결과의 변이를 줄이기 위해 각 측정위치에서 총 10회 측정하여 그 평균값을 측정결과로 사용하였다.

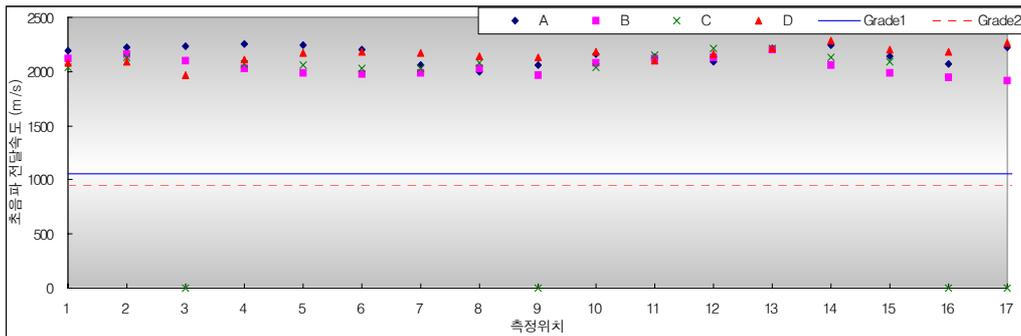


Fig.9. 초음파 전달속도(m/s) 측정 결과(고삼-기-8)

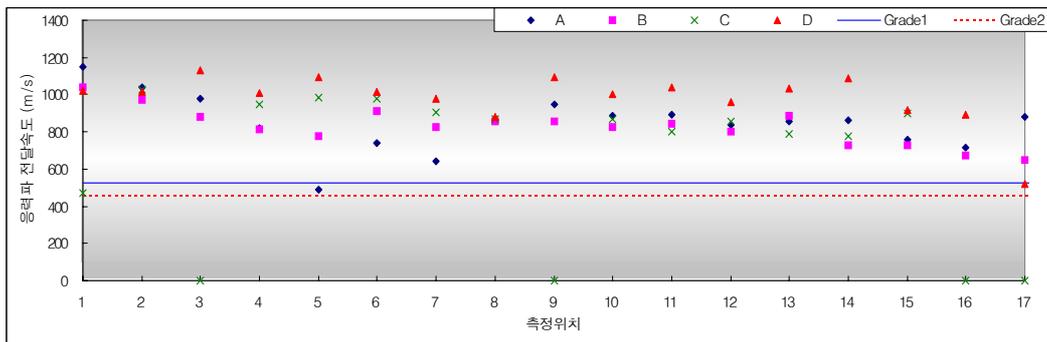


Fig.10. 응력파 전달속도(m/s) 측정 결과(고삼-기-8)

Fig.11, 12은 고씨삼강문에서 확보한 기둥 2번 부재(고삼-기-2)에 대한 초음파 및 응력과 측정결과이며, 부재 전반에 걸쳐 열화가 존재함이 확인되었다. 초음파의 경우에는 6~7, 10~16 단면의 일부분(B, C위치)에 걸쳐 열화가 존재는 것으로 나타난 반면에, 응력과의 경우에는 전체적으로 기준 이하의 값을 나타내었고 일부 위치에서 기준보다 조금 높게 나타났다. 또한, Fig.11의 건전한 부재의 경우에 전체적인 속도가 800m/s 이상으로 나타났으나 Fig.12의 경우에는 기준보다 높게 나타난 경우에도 대부분 800m/s 이하의 값을 가짐을 확인할 수 있는데, 이는 앞서서도 언급하였듯이 응력과의 경우 다양한 형태의 파가 여러 경로를 통해 전달됨으로 인해 단면 내에 특정 부위에 열화가 존재하는 경우에도 전체 단면의 측정결과에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

비교적 단순한 전달경로를 가지는 초음파의 경우에는 전달경로 상에 열화의 존재 유무가 측정결과에 직접적으로 영향하며, 따라서 동일한 단면 내에서도 열화가 포함되어 있을 경우 각 측정결과 사이의 편차가 매우 크게 나타나는 것으로 생각된다. 또한, 초음파는 재료의 표면 열화로 인해 탐촉자와 재료 사이의 접촉이 완전하지 못할 경우에 재료 내부의 열화 상태와 무관하게 전달속도가 0에 가깝게 나타나는 것으로 확인되었다.

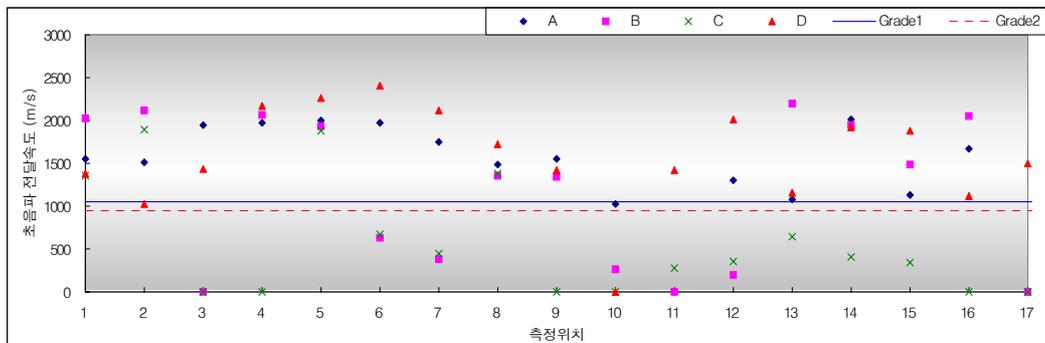


Fig.11. 초음파 전달속도(m/s) 측정 결과(고삼-기-2)

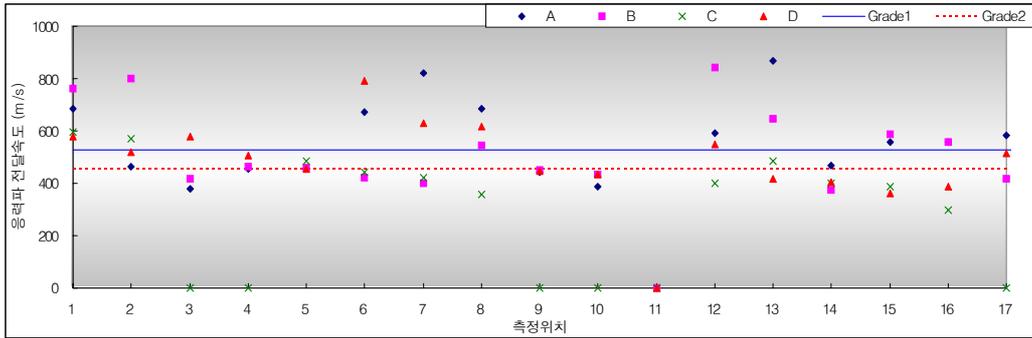


Fig.12. 응력과 전달속도(m/s) 측정 결과(고삼-기-2)

이상과 같은 각각의 부재에 대한 응력과 및 초음파 전달속도 측정결과는 이후의 비파괴 검사법을 적용하기 위한 부재 및 적용 위치의 선정에 활용되었다.

#### 나. 드릴저항시험법

##### 1) 실험 방법

드릴저항법은 재목이나 목재 내의 밀도 측정이나 부후를 탐지하는데 널리 사용되어 왔던 준비파괴 시험법이다. 시험 후에 시편 내에 작은 직경의 구멍 (3mm)이 남기 때문에 준 비파괴 시험법으로 분류된다. 하지만, 이 구멍은 잔존 단면적에 대한 구조적 영향이 무시할 만큼 충분히 작으며, 부후의 원인이 접근하지 못하도록 봉해질 수 있기 때문에 문화재적 가치가 아주 높은 경우가 아니라면 적용 가능한 방법이다. 드릴저항법은 관통에 대한 저항이 재료의 밀도와 상관관계가 있다는 전제 하에 사용된다. 드릴 저항은 재료를 관통하는데 소요되는 동력을 측정하여 결정한다.

건전한 경우 목재는 단단한 세포벽을 가지고 있으나 부후가 진행될수록 목재 세포는 물리적, 화학적인 변화를 일으키게 된다. 초기 부후의 경우 목재는 밀도의 변화가 일어나기 시작하고 점차 부후가 심각하게 진행된 경우에는 구조적인 파괴를 가져올 정도로 밀도가 현격하게 저하된다. 이렇게 변화된 목재 밀도는 드릴 저항 시험기 (IML-RESI F400)를 통하여 밀도변화를 측정할 수 있는데 이 실험 기기는 특히 입목, 구조용 목재, 목전주 등에 주로 사용가능하며 드릴이 실험 시편에 들어갈 때 발생하는 저항을 정성적으로 나타낸다. 드릴이 일정 토크를 가지고 목재 내부로 들어갈 때 발생하는 저항은 목재 내부의 상태를 대변해 주는데 세포벽의 구조적 상태나 춘재와 추재 사이의 밀도 변화 그리고 부후 및 웅이 등과 같은 결함의 위치나 크기 등을 나

타낸다.



Fig13. The device of drilling resistance(IML-RESI).

2) 실험 결과

가) 열화율

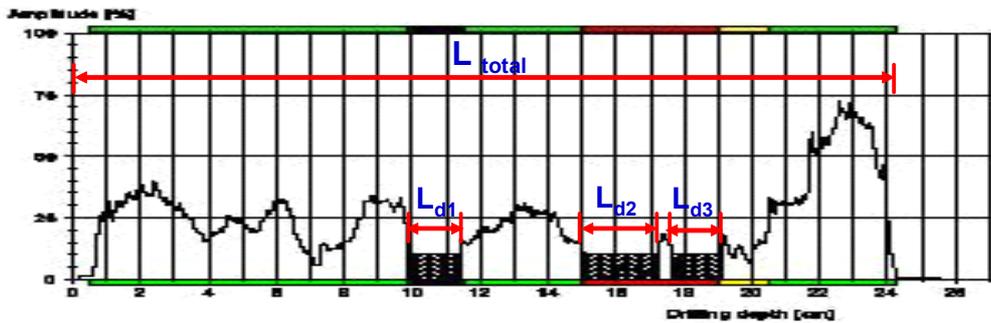


Fig14. Resistograph by drilling resistance test.

드릴 저항 시험기를 통해서 얻어지는 Resistograph (Fig.14)의 세로축은 드릴이 목재 내부로 침투 될 때 발생하는 상대적인 저항 값을 나타내고 있으며 진폭의 고저를 분석하여 열화의 유무 및 길이를 파악할 수 있고 가로축은 드릴이 목재 내부로 침투하여 들어간 길이(cm)를 보여준다. 이렇듯 Resistograph에서 나타나는 상대 밀도 그래프의 진폭 변화를 통해서 열화 된 길이를 정확하게 알 수 있으며 이를 통하여 열화

율(%)을 계산할 수 있다.

우선 드릴이 지나간 전체 거리는 응력파와 초음파가 전달된 거리와 같다고 가정을 하고 전체 전달 거리에 대한 열화길이의 비로 열화율을 계산하며 열화율은 아래와 같은 식 1로 계산될 수 있다.

$$R_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_{d(i)}}{L_{total}} \times 100 (\%) \quad (\text{식 1})$$

where,

$R_d$  : Ratio of deterioration (%)

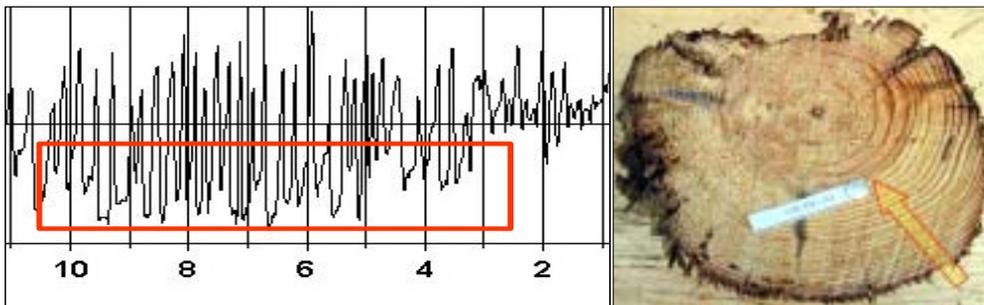
$L_d$  : Length of deteriorated part (m)

$L_{total}$  : total path length (m)

$i$  : 1, 2, 3,.....

#### 나) 드릴 저항의 패턴 분석

아래에 보여주는 그림들(Fig.15~21)은 드릴 저항 시험법을 통해 목재 내부를 나타내고 있다.



**Fig.15. Resistograph and an enlarged photo with narrow annual rings in sound part.**

단면에서 볼 수 있듯이 매우 좁고 치밀한 연륜을 보여주며 Resistograph에 잘 나타나 있다(Fig.15). 즉, 춘추재의 상대적인 밀도차이가 분명하게 구분되어 밀도에 의한 춘추재의 구분이 매우 쉽다는 것을 알 수 있다. Resistograph에서 추재의 경우 목재의 높은 저항값에

의해 상대적인 밀도가 매우 높게 나타났으며 춘재의 경우는 이와 반대 경우로 나타났다. 이러한 이유는 목재의 목부는 방사방향으로 두께를 더해가며 성장하기 때문이다. 즉, 봄에서부터 여름사이에 얇은 벽을 가지지만 커다란 크기의 세포가 생성되며 생성된 조직이 이 기간 동안 많은 공극을 가지게 되어 낮은 밀도를 가지기 때문이다.

수 부근에 넓은 연륜폭을 지니고 있으며 하나의 연륜내에서 밀도는 연속적으로 떨어지는 경향을 보이고 있으나 밀도의 변화가 뚜렷하게 나타나지는 않는다(Fig.16). 이러한 이유는 드릴 저항 실험을 실시할 때 드릴이 수 부근의 춘재에 접선 방향으로 침투하였기 때문이다. 이러한 경우, 드릴을 통한 목재 내부의 상대 밀도 값이 낮게 나오기 때문에 초기 부후 상태로 오해하기 쉬우니 각별한 관찰이 필요하다.

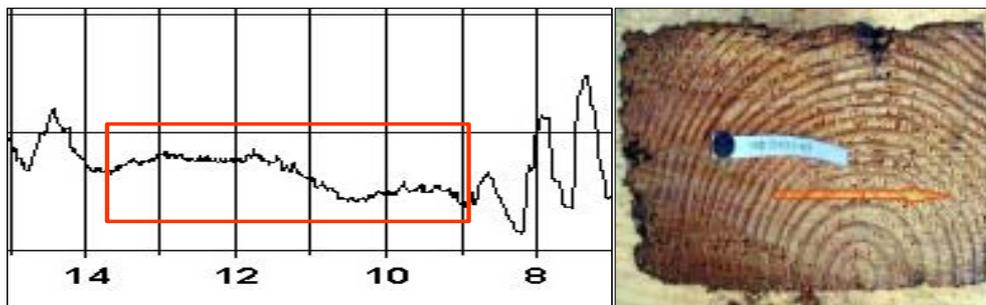


Fig.16. Resistograph and an enlarged photo around the pith in sound part.

단면 사진(Fig.17)을 보면 매우 넓은 연륜폭을 가지고 있으며 춘추재 사이의 상대 밀도 차이가 그리 크게 나타나지는 않았다. 연륜의 폭이 커지면 커질 수록 상대적으로 춘재의 비율도 증가하게 되어 전체적인 관점에서 밀도가 낮게 나타날 수 있다.

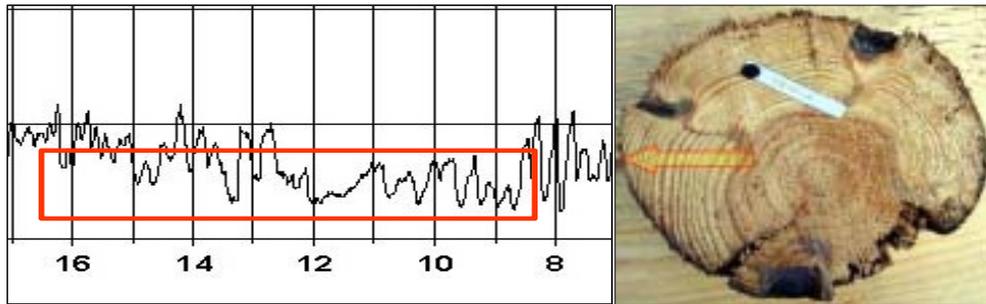


Fig.17. Resistograph and an enlarged photo with wide annual rings  
in sound part.

부후에 의한 열화가 목재 내부에 존재할 경우, 가장 눈에 주목할 만한 점은 목재 단면의 변색이다. 위의 단면 사진(Fig.18)에서도 청색, 갈색 변색균에 의한 목재 단면의 색이 변하였으며 단면 전체에 걸쳐 넓게 퍼져 있으며 목재 부후균인 백색, 갈색 부후균에 의한 영향 또한 확인 할 수 있었다. 단면의 우측 부분에는 상당한 크기의 공극이 발견되는데, 이러한 요인에 의해 결국 밀도가 저하되며 목재의 전체적인 성능을 감소시키게 된다. Resistograph를 살펴보면, 작은 돌기 모양의 드릴에 의한 목재의 상대 밀도가 나타나는데 이러한 부분은 부후균에 의해 침해되고 남겨진 추재 부분들이다. 일반적으로 변색균은 목재의 강도를 저하시키지는 않지만 목재 자체의 상품적 가치를 저하시킨다. 그러나 목재 부후균의 경우는 변색균과는 다른 영향을 미치는데 백색 부후균의 경우, 목재의 중량은 크게 감소시키지만 강도에는 큰 영향을 미치지 않고 갈색 부후균은 그와 반대의 영향을 목재에 미친다. 왜냐하면, 부후균이 목재의 세포벽 성분을 분해시켜 조직의 구조를 파괴하기 때문이다. 따라서, 위의 단면 사진을 보면, 변색균과 부후균 모두 목재에 침입하여 영향을 주고 있음을 알 수 있지만, Resistograph를 살펴보면 밀도가 크게 저하된 것으로 보아 특히 갈색 부후균에 의한 영향이 심각했음을 추정할 수 있으며 목재의 강도가 크게 저하되어 심한 경우 부재의 파괴에 의한 건축물의 안전성에도 심각한 결과를 초래할 수도 있을 것이다.

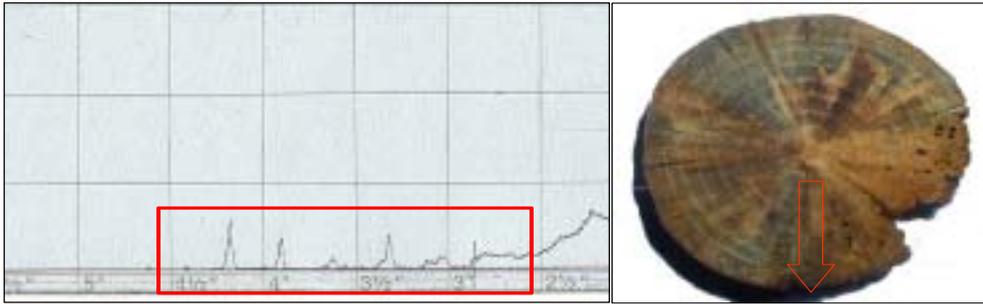


Fig.18. Resistograph of deteriorated part caused by decay fungi.

드릴 저항 실험 시 드릴이 극도로 높은 밀도를 갖거나 매우 단단한 목재 조직과 만나게 되면 상대 밀도는 일반적인 추재에 비해 매우 높은 값을 기록하게 된다. Resistograph에서 알 수 있듯 목재 내부의 상대 밀도가 거의 끝까지 올라갔음을 알 수 있으며 이러한 점은 우측의 단면 사진을 통해 명확히 확인할 수 있었다(Fig.19).

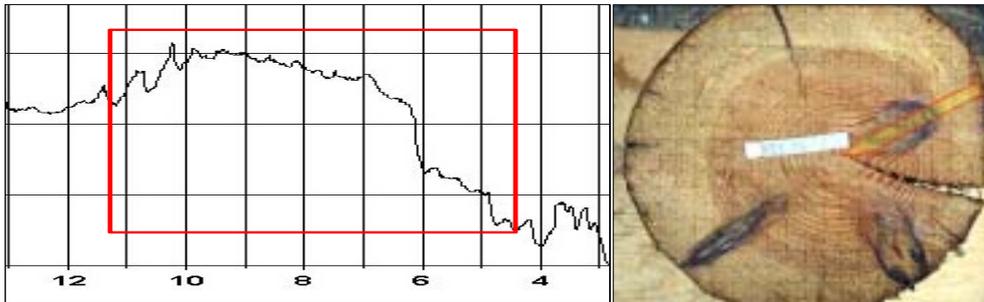


Fig.19. Resistograph and an enlarged photo with a knot.

단면 사진(Fig.20)에서 알 수 있듯이 내부에 매우 커다란 크기의 공극이 목재 절반에 걸쳐 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 상태는 주로 흰개미에 의해 발생하는 것으로 공극 사이에 남아 있는 부분은 주로 추재가 남게 된다. 이것은 Resistograph에서도 발견할 수 있으며

남아있는 상대 밀도는 추재에 의한 것임을 또한 알 수 있다. 부후균에 의한 열화와 마찬가지로, 흰개미에 의한 목재의 열화 역시 부재 하나의 파괴에만 그치는 것이 아니라 건축물 전체 안전성에 대한 심각한 영향을 미칠 수 있다.

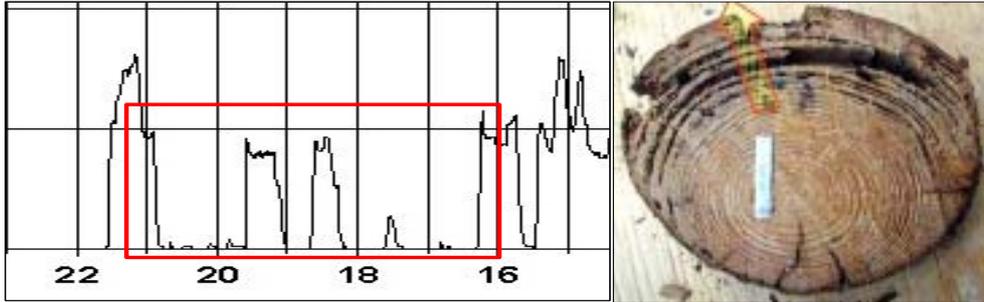


Fig.20. Resistograph and an enlarged photo caused by invasion of insects.

앞서 설명한 흰개미에 의한 피해와는 다른 경향을 단면사진과 Resistograph에서 확인 할 수 있다(Fig.21). 가장 두드러진 차이점은 Resistograph에서 상대 밀도 분석에 의해 공극이 단 한군데만 존재하며 다른 부분은 매우 건전한 상태를 보이고 있다는 점이며 이는 단면 사진을 통해서도 확인 할 수 있다. 즉, 흰개미나 부후균에 의한 열화와 달리 목재 내부로 진행되어 있는 크랙은 그 범위가 매우 좁아 쉽게 구분이 되며 특히 다른 부분의 열화에는 어떠한 영향도 미치지 않기 때문에 심각한 열화의 요인으로서는 구분 될 수 없다. 하지만, 크랙을 통해 흰개미나 다른 곤충 그리고 변색균과 부후균의 목재 내부로의 침입이 매우 용이해 자칫 심각한 상태의 열화를 야기할 수 있는 가능성이 매우 높으므로 사전에 미리 발견하여 신속한 보존 대책을 강구하는 것이 유리할 것이다.

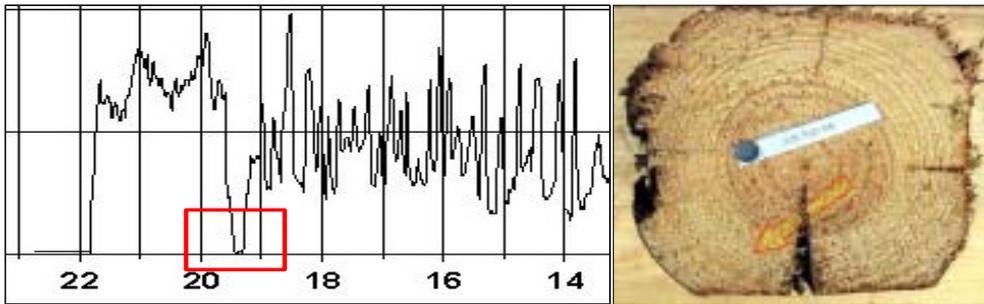


Fig.21. Resistograph and an enlarged photo with a check.

다) 교체부재 결과

응력과 및 초음파 전달시간 측정을 통해 열화가 확인된 3개의 부재를 대상으로 모든 측정위치에 대해 드릴저항 시험을 실시하여 드릴날이 부재를 통과함에 따라 연속적으로 얻어지는 드릴저항력을 Fig.22와 같이 나타내었다.

Fig.22의 드릴저항 시험 결과를 보면, 표면과 가까운 부분에서 급격하게 드릴저항력이 감소되는 부분이 확인되고, 드릴저항력이 감소된 위치에서도 중간에 약간의 드릴저항력이 나타나는 부분이 있음을 확인할 수 있다. 이는 추재보다는 연한 조직을 가지고 있는 춘재를 주로 가해하는 흰개미에 의한 열화로 판단된다. 부후에 의한 피해는 대부분의 경우 드릴저항력의 감소가 넓은 범위에 걸쳐 완만하게 나타나고 춘재와 추재 사이의 차이가 크게 확인되지 않지만, 충해에 의한 경우에는 곤충이 목재 내부를 가해하면서 통과하기 때문에 목재 내부에 공극이 발생하고 그림에서와 같이 급격한 드릴저항력의 감소를 보인다.

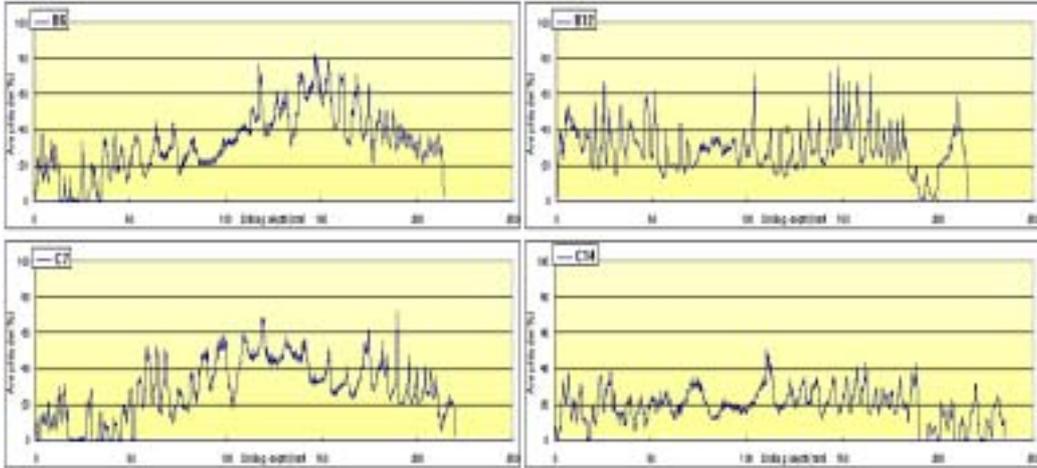


Fig.22. 위치별 드릴저항 시험 결과(고삼-기-2)

#### 다. X선 투과 시험

##### 1) 실험 방법

##### 가) 실험 장치

음파 전달속도 측정을 통해 열화의 존재가 예상되는 위치에 대해서 X-ray 투과시험을 실시하였다. 측정에는 Softex K-4장치(Fig. 23)가 이용되었다.



Fig.23. X-ray apparatus  
for confirming the inner status of wood.

X-ray source 와 control unit으로 이루어 졌으며 X-ray 발생시 가해주는 전압과 전류 그리고 방사시간을 적절히 조정함으로써 보다 선명한 필름을 얻을 수 있다. Table 8은 본 연구에서 실시한 X선 실험에서 시편의 상태 (건전재, 옹이, 충해, 부후)에 따른 X선 실험 조건이다.

나) 실험 조건

**Table 8. The control of X-ray radiation for analysis internal deterioration.**

Spec.	Transmission distance (mm)	X-ray Generator condition			Development time (min)	Development temp. (°C)	Distance of btw spec. & X-ray source (mm)
		kV	mA	Exposure time(sec)			
Knot	152	63.6	5	120	3	30	318
Crack	150	63.6	5	100	3	30	320
Decay	120	63.6	5	120	3	30	350
Insect	120	63.6	5	100	3	30	350
Insect	198	63.6	5	100	3	30	272

목재는 기본적으로 주기적인 밀도차가 나타나는 춘추재가 존재하며, 또한 심변재의 구별이 있는 비균질성, 이방성 재료이다. 열화나 부후가 나타나지 않는 건전재의 경우라도 이러한 춘추재, 심변재의 밀도 변이가 있기 때문에 X선 투과사진을 이용하여 목재 내부를 정확히 파악하기는 다른 재료에 비하여 많은 난점이 있다. 따라서 X선 투과사진에 나타나는 목재의 내부 상태를 조사하여 기둥에 존재하는 열화를 평가하고자 실제 목조 고 건축물에서 확보한 기둥 부재중 옹이, 할렬, 부후, 충해를 나타내고 있는 기둥을 선별하여 X선을 이용한 열화 패턴 분석 실험을 하였다.

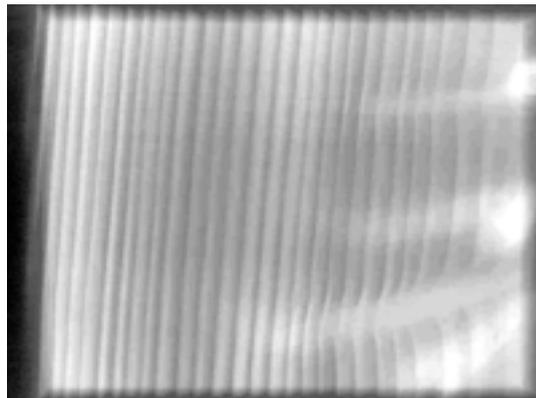
2) 실험 결과

본 연구에서는 X선을 이용하여 내부 열화를 올바르게 평가하기 위해 각 열화에 따른 X선 사진의 특징을 우선적으로 분석하였다. 또한 예비실험을 통하여 최적 방사의 세

기와 노출시간을 결정하고 시편의 두께, 시편과 X선원의 거리, 필름 현상온도, 현상 시간을 고려하여 최적의 화상을 얻을 수 있었다. X선 투과사진은 목재의 밀도차를 사진의 명암차로 나타낸다. 즉 밀도가 낮은 부분을 투과하는 X선은 감쇠가 적게 일어나서 필름을 많이 감광시킴으로써 필름에 어두운 부분으로 나타나게 되며, 밀도가 높은 부분을 통과하게 되면 사진에는 밝은 부분으로 나타난다. 이렇게 밀도의 차이가 화상으로 나타나게 됨으로써 목재 내부의 많은 부분을 시각화 할 수 있게 되는 것이다.

#### 가) 건전재

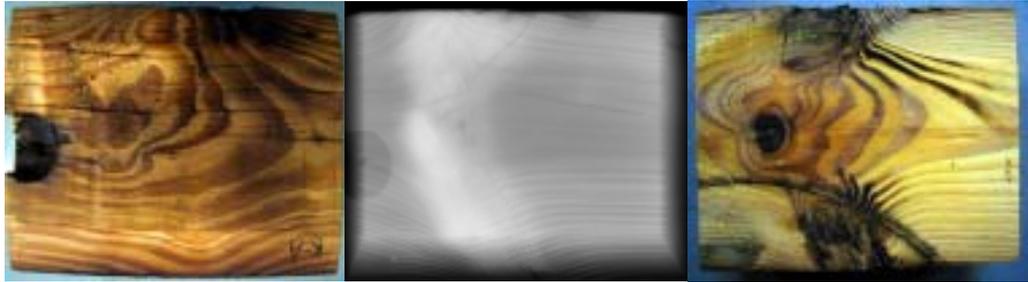
Fig.24.에서와 같이 건전재에서 가장 먼저 발견되는 특징은 연륜이다. 수심을 중심축으로 하는 내부가 건전한 목재의 경우 연륜이 매우 정확히 나타남을 알 수 있었다. 춘재의 경우 추재에 비해 밀도가 낮고 폭이 비교적 넓다. 이 때문에 추재부보다 감광이 많이 일어나서 명도가 짙게 나타나게 된다. 또한 사진의 오른쪽으로 4개의 흰 줄 무늬와 같은 부분이 용이이며, 그 외에도 상대적인 명도차를 봄으로써 목재 내부의 상태를 가늠할 수 있다.



**Fig.24. X-ray image of sound wood**

#### 나) 용이

일반적으로 목재 내 용이의 밀도는 주위보다 높기 때문에, X선 사진에서 상대적으로 밝은 부분으로 나타난다. 또한 용이는 목재 내의 다른 변이에 비해 국소적으로 큰 밀도의 변화를 가지고 있는 부분이기 때문에, 비교적 분석이 용이하고 위치도 쉽게 탐지할 수 있다. 이러한 분석을 통하여 용이의 크기, 방향 등을 예측하고 시각화하는 것이 가능하다.



(a) surface

(b) X-ray image

(c) cross section

**Fig.25. X-ray image of knot**

음파의 전달시간 측정을 통해서 용이의 대략적인 크기와 위치를 예상을 할 수는 있지만 정확한 평가는 불가능하며 또한, 육안적 검사 역시 용이가 어느 방향으로 얼마나 깊이 존재하고 있는가를 확인할 수 없어 용이의 정확한 탐지는 원칙적으로 불가능하다. Fig.25의 (a)는 X선 실험을 한 목재 표면의 사진이다. 표면에서는 사진에서 나타난 바와 같이 어떠한 용이의 흔적도 발견할 수 없다. 그러나 (b)의 X선 사진에서는 내부의 용이가 정확히 탐지되었으며, 이는 단면을 잘라 확인한 (c)의 사진을 통해 명확히 확인할 수 있다. 이런 면이 육안적으로 관찰되지 않는 목재의 내부 특징들을 탐지해 내는 X-ray의 기본적인 장점이다.

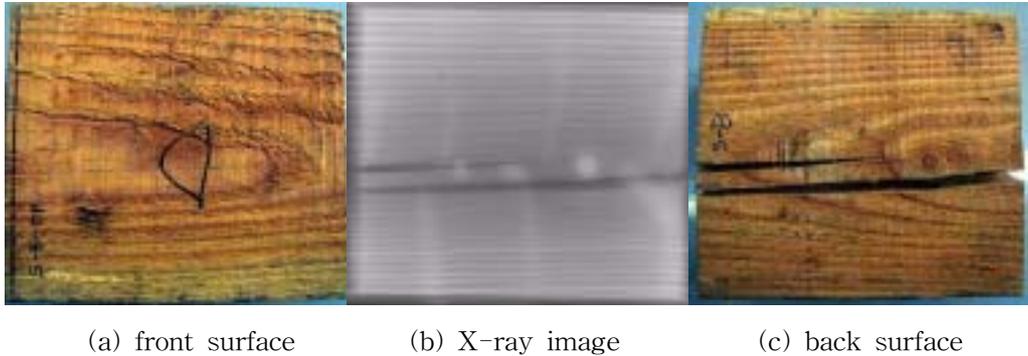
같은 크기와 밀도를 갖는 용이가 존재한다하더라도 그 배향에 따라 사진에 나타나는 모습은 매우 다르다. X선 방사의 방향에 평행하여 긴 용이는 좁은 범위에서 매우 밝게 나타나며, X선 방사 방향과 수직인 용이는 넓은 범위에서 상대적으로 어둡게 나타난다. 그러므로 정확한 내부의 파악을 위해서 X선 검사는 다양한 각도에서 여러 번 이루어져야 한다.

#### 다) 할렬

목재 표면에 나타나는 할렬은 그 크기가 주목할 만큼 작지 않다면 육안으로도 쉽게 관찰할 수 있다. 하지만, 할렬의 깊이는 육안으로 측정하기 어려운 경우가 많고, 다양한 결함들이 복합적으로 나타나면 더욱 어렵게 된다.

Fig.26의 (a)는 시편의 앞면, 즉 X선 선원에 노출된 부분의 시편 표면 사진이다. 표면이 거칠어 보이는 점을 제외하고는 큰 결함을 발견하기 어려운 건전재의 모습이다. 그러나 (b)의 X선 투과사진에서는 중앙을 관통하여 큰 크기의 할렬이 발견되었으며

이는 (c)사진의 시편 뒷면을 보면 확실히 알 수 있다.



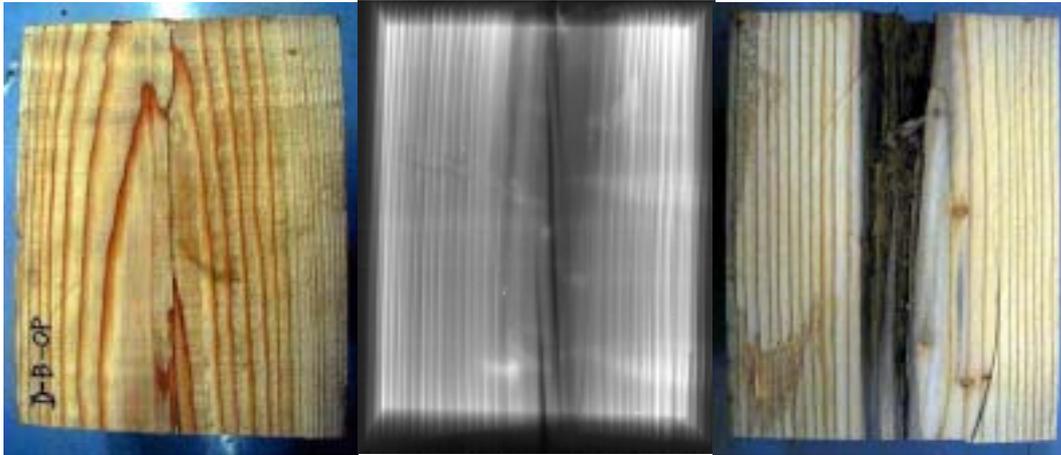
**Fig.26. X-ray image of crack**

실제로 현장에서 비파괴 평가를 수행할 때에 (c)사진과 같은 결점 부분이 밖으로 노출되어 있어 육안으로 확인이 가능하다면 굳이 X선 실험을 행할 필요는 없다. 그러나 여러 가지 요인으로 인해 표면 상태를 확인할 수 없는 경우가 많으며 이런 경우에 있어 X선 실험이 매우 유용하다는 것을 Fig.26을 통해 확인할 수 있으며 할렬이 목재 내부로 얼마나 진행되어 있는지 역시 확인이 가능하다. 또한 할렬과 더불어 (a)와 (c)의 사진으로는 관찰이 어려운 웅이까지 정확히 관찰할 수 있었다.

일반적으로 할렬은 매우 작은 크기인 경우가 많고 이런 경우 단지 필름의 잡음 정도로 표현되는 경우가 많다. 즉 목재에 잔금이 나타나는 정도의 미세한 할렬은 감지하기 어려우며 또한 갈라짐의 방향이 X선 방사의 방향에 수직일 경우는 어렵게 된다. 하지만, 필름에 직접 접촉하는 면에 위치하고 있는 할렬은 그 모양이나 크기가 매우 선명하게 나타난다. X선 투과 사진은 필름에서 가까운 부분에 더 많이 영향을 받기 때문이다.

라) 부후

Fig.27에서 X선 사진과 두장의 사진을 보여주고 있다. (a)의 사진을 살펴보면, 외관적으로는 열화를 전혀 탐지할 수 없는 매우 건전한 상태라고 할 수 있다. 하지만, 가운데 (b)의 X선 사진과 종단면을 찍은 (c)사진을 보면 시편 내부가 부후로 인하여 심하게 열화 되어 있음을 확인 할 수 있으며 (b) 사진의 가운데 부분의 진하게 보이는 할렬은 필름 쪽 면에 존재하는 표면 할렬이다.



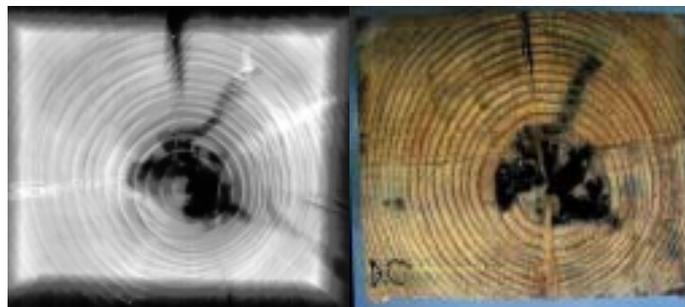
(a) surface

(b) X-ray image

(c) cross section

**Fig.27. X-ray image of decay**

Fig.27(b)의 X선 투과 사진을 통해 시편 내부의 부후의 길이와 폭을 알 수 있으며 Fig.28을 이용하면 목재 내부에 존재하는 부후의 정확한 크기와 위치를 확인 할 수 있다. 이것은 앞서 언급했듯이 다양한 방향에서 X선 실험을 할 경우 내부에 존재하고 있는 부후의 정확한 위치와 크기를 정확히 탐지할 수 있을 것이다.

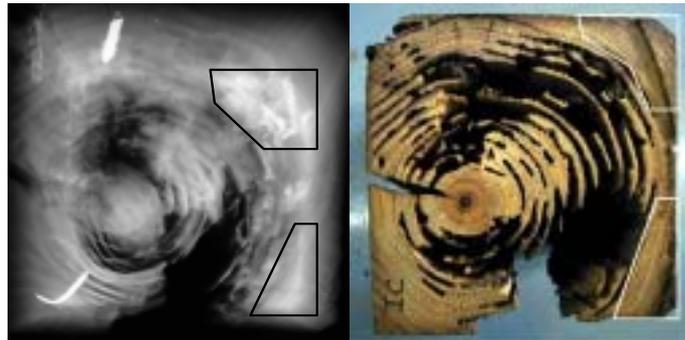


**Fig.28. The cross section of decay specimen.**

마) 충해

목재에 나타나는 흰개미와 같은 충해에 의한 열화는 주로 목재 내부에 빈 공간을 형성한다. 흰개미는 주로 목재의 춘재부를 공격하게 되는데 Fig.29은 심하게 피해를 받은 목재의 한 예가 된다. 목재 내부에 빈공간이 생길 경우 전체적으로 밀도의 저하가 일어나게 되며 이런 것이 X선 촬영에 탐지되어 피해의 정도와 규모를 알 수 있게

된다. 시편에서 충해에 의한 빈 공간은 (a)의 사진에서도 볼 수 있듯이 명암의 차이가 극명하게 나타난다. X선 투과사진을 보면 전체적으로 환하게 보인다. 하지만, 건전한 부분이라고 보기에 는 어려운데 그것은 앞서 제시한 건전한 경우에서 보이는 뚜렷한 연륜을 찾아볼 수 없다는 것으로 우선 확인할 수 있다. 그러나 사진에서 보이는 박스 안의 특히 밝게 보이는 부분은 춘추재의 차이가 거의 없어 마치 옹이처럼 명암차이가 극명하게 나타난다. 이것으로 옹이는 아니지만 연륜폭이 매우 좁아 밀도가 높은 경우 마치 옹이처럼 나타날 수도 있음을 확인할 수 있다.



(a) X-ray image

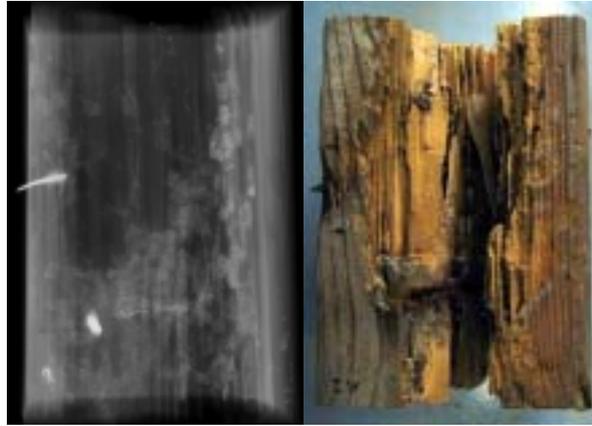
(b) surface

**Fig.29. X-ray image of insect (cross section).**

건전한 시편의 경우 우선 연륜의 차이가 뚜렷하여 춘추재를 구분할 수 있으며 옹이도 마찬가지로 배향과 크기 등을 정확히 분석해 낼 수 있었다. 하지만, 아래의 X선 사진의 경우 연륜의 구분이 전혀 없으며 마치 물감이 번져 있는 듯한 이미지를 보이고 있다. 이러한 경우, 비록 국소적으로 밝은 부분이 나타난다 해도 건전한 하다고 볼 수 없다.

Fig.30은 Fig.27과 같은 시편의 종단면 사진이다. 시편이 심각하게 피해를 입어 목질 부분과 빈공간의 부분이 명확하게 드러난다. 부분적으로 두 개 정도의 철물이 촬영되어 상대적인 밀도차를 극명히 나타내고 있다. 그런데 Fig.29에서와 같이 필름에 전체적으로 얼룩이 진 듯한 비교적 명도가 밝은 부분이 넓게 분포하고 있다. 이는 만들어진 빈 공간에 흰개미에 의해 분비된 물질의 덩어리라 여겨지며 이는 공간 안의 내부를 긁어내어 확인하였다. 이렇게 분비물을 남기게 되면 본 시편과 같이 심각한 피해가 아닌 경미한 피해라면 충해의 탐지가 어려워지는 요인이 될 수 있다. 이는 옹이

와 같은 목재 내에 밀도가 높은 부분의 패턴을 파악하고 분석하여, 즉 건전재의 특성을 확실히 이해한 후라면 충분히 탐지해 낼 수 있다.

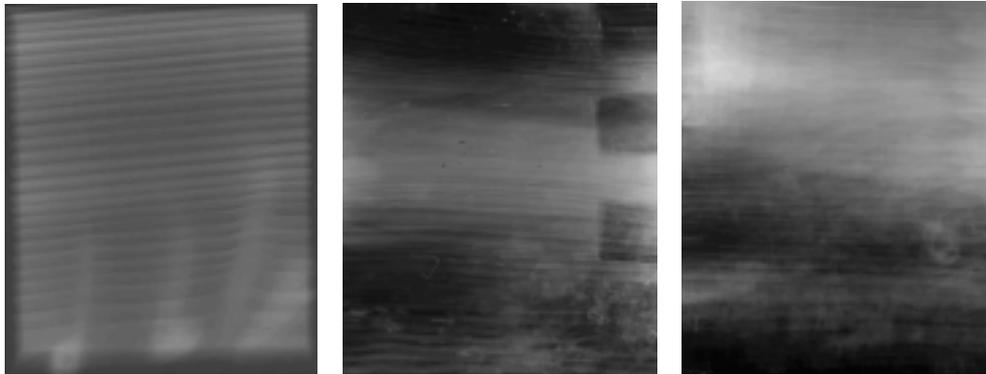


(a) X-ray image (b) surface

**Fig.30. X-ray image of insect (vertical section).**

바) 기타

X-ray 투과장치를 이용한 부재 내부의 열화탐지는 현재 진행 과정에 있다. Fig.31에는 건전재와 열화된 부재를 대상으로 측정한 시험결과의 예를 나타내었다.



(a) 건전재(옹이) (b) 열화재 (접합부) (c) 열화재 (옹이)

**Fig.31. X-ray 투과사진**

(a)는 건전재의 경우로 목리 및 옹이의 위치를 정확하게 확인할 수 있었다. (b)와 (c)에는 열화된 부재의 경우를 나타내었는데, 특히 (b)사진의 오른쪽에는 부재의 접합을

위해 흡을 관 부분이 확연히 나타났으며, (c)사진의 윗부분은 옹이로 인해 X-ray가 잘 투과하지 못하였음을 확인할 수 있다. (b), (c) 사진 모두에서 열화가 존재하는 경우에는 사진이 선명하지 못하고 목리가 희미하게 나타났다. 정확한 열화의 원인과 위치, 정도를 탐지하기 위해서는 좀 더 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 제 3 절 비파괴 검사법의 정도 개선

#### 1. 초음파 검사법의 목재 적용

본 연구는 목재의 비파괴 평가 방법으로 사용되고 있는 초음파 검사의 정도 개선을 위하여, 초음파 전달 속도에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위한 목적으로 실행되었다. 목재는 천연재료이기 때문에 자연적으로 갖고 있는 특성이 비파괴검사에서는 열화로 판명될 수 있다. 더구나 실제 열화가 발생하면 열화와 자연특성의 구별이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 목재가 갖고 있는 자연적인 특성에 대한 초음파 전달 속도에 영향을 미치는 인자를 찾고, 해부학적 실험을 통해 원인을 파악하였다.

##### 가. 초음파의 목재 적용에의 영향인자 및 조직학적인 규명

###### 1) 목재의 이방성

###### 가) 실험 방법

국산재 소나무(Domestic Red Pine) 원목을 disk형으로 잘라 결점이 없는 부분, 미성숙재 부분이 포함되지 않도록 하여 지름 8cm, 10cm 원형으로 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 방사방향이 0°가 되도록 하여 10°간격으로 이동하면서 18번 초음파 전달 속도를 측정하였다(Fig.1).

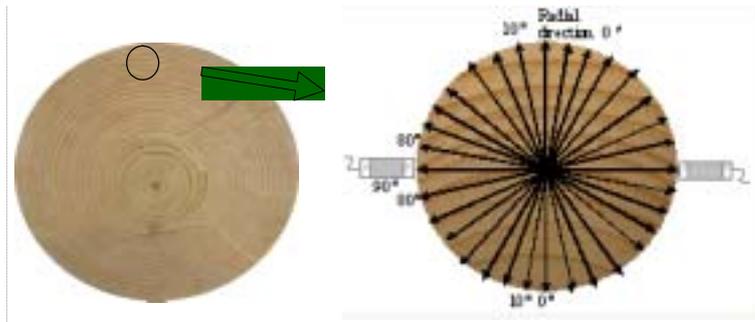


Fig.1. 목재의 이방성에 따른 초음파 전달속도 측정방법

###### 나) 실험 결과

Fig.2에는 연륜각에 따른 초음파 전달 속도의 측정 결과를 나타내었다. 연륜각 0°, 즉 방사방향의 초음파 전달 속도가 가장 빠르고, 연륜각이 커짐에 따라 느려져

60°~70°부근에서의 가장 작은 것을 알 수 있다. 이러한 속도 차이는 방사 방향으로 존재하는 방사조직에 기인하는 것으로 판단된다. 다시 말해 초음파가 방사 방향으로 진행할 때는 초음파 전달 방향과 같은 방향으로 배향하고 있는 방사 조직을 따라 파가 진행함에 따라 속도가 커지지만, 그렇지 않을 경우에는 방사조직이 파의 진행 방향과 다르기 때문에 경계면을 만들고 이 경계면이 초음파 전달을 방해하기 때문인 것으로 판단된다.

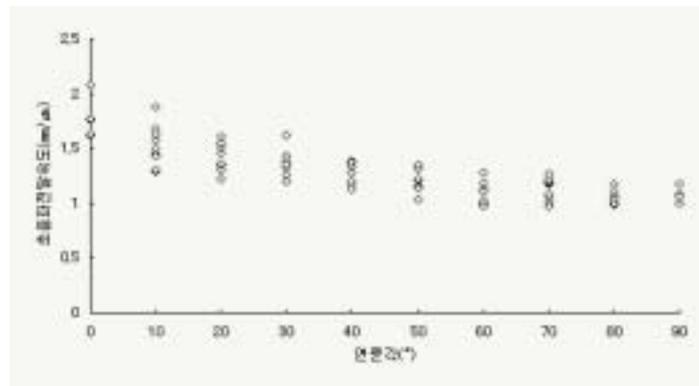


Fig.2. 목재의 이방성에 따른 초음파 전달 속도

## 2) 목재의 비균질성

### 가) 실험 방법

목재의 성장 조건에 따른 영향 인자를 평가하기 위해서 본 연구에서는 정상재와 이상재, 성숙재와 미성숙재 상호간의 초음파 속도를 비교 분석하였다. Fig.3과 같이 직육면체 형태의 시편을 제작하였으며, 제작된 시편은 육안 구분을 통해 정상재와 이상재를 구분하고, X-ray 필름 판독을 통해 심,변재를 구분하였으며, 15연륜에서 마지막 연륜까지 각 만재 부분의 가도관 길이 측정을 통해 성숙재와 미성숙재를 구분하였다.

이렇게 구분된 영역을 절단하고 나누어진 각 부분에 대하여 초음파 전달 속도를 측정하였다. 이 때 실험의 변이를 줄여 정확성을 높이기 위하여 목재 중심부인 수에서 5연륜은 측정에서 제외시켰고, 정상재, 이상재, 대응재는 성숙재 부분에서만 측정하였다.

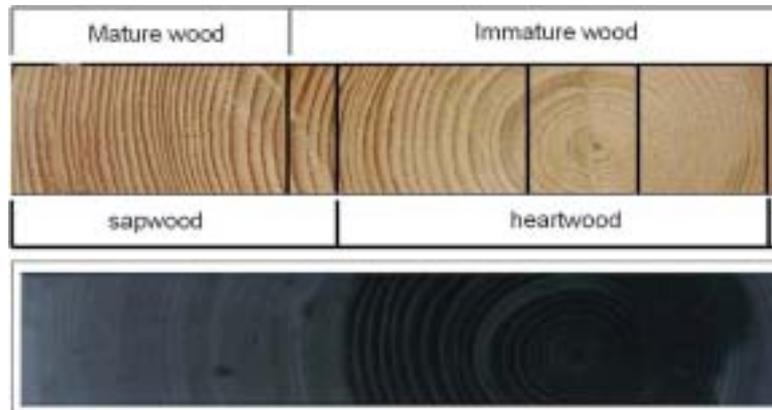


Fig.3. Non-homogeneous parts of wood

나) 실험 결과

(1) 성숙재, 미성숙재

Table 1은 성숙재와 미성숙재에 대한 초음파 전달 속도 측정 결과를 보여주고 있다. 성숙재에서의 초음파 전달 속도는 미성숙재에서의 초음파 전달속도보다 약 10%정도 빠르게 나타난 것을 볼 수 있다.

Table 1. Ultrasonic velocitie of mature and immature wood(m/s)

	Average	Min.	Max.	Microfibril angle(°)	Thickness of cell wall( $\mu\text{m}$ )
Mature wood	2120	1980	2320	11.2	2.58
Immature wood	1940	1740	2200	23.5	2.53

성숙재와 미성숙재의 해부학적인 차이는 크게 세포벽의 두께, 세포 길이, 마이크로 피브릴 경각을 들 수 있다. 본 연구에서 측정된 초음파 진행 방향은 목리에 수직인 방향이므로 목리에 평행하게 배열하고 있는 세포의 길이는 영향하지 않는다. 또한 세포벽 두께는 Table 1에서 보듯이 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 성숙재와 미성숙재의 초음파 전달 속도 차이는 마이크로 피브릴 경각에 따른 것으로 판단된다.

마이크로피브릴은 세포벽을 구성하는 미세 섬유로 목리 방향과 경사지게 배열된다. 본 실험 결과에서는 성숙재의 마이크로 피브릴 경각이 미성숙재의 50% 정도에 불과한 것으로 나타났다. 즉, 마이크로 피브릴 경각이 작아지면 상대적으로 초음파 전달 속도는 커지게 되는 것으로 판단된다.

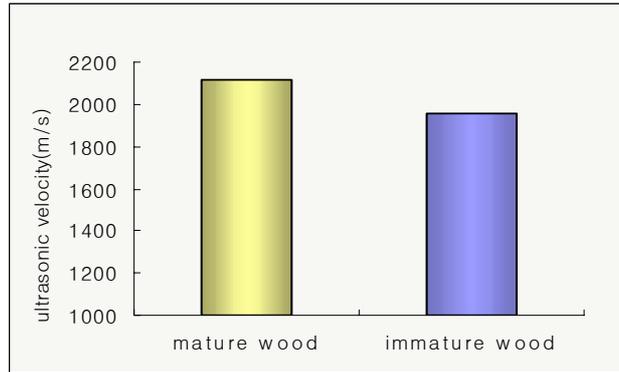


Fig.4. 성숙재, 미성숙재의 초음파 전달 속도

(2) 이상재, 정상재

정상재와 이상재, 대응재에 따른 초음파 전달 속도는 이상재에서의 속도가 가장 느리고 정상재, 대응재 순으로 빠르게 나타나는 것을 볼 수 있다(Table 2).

Table 2. Ultrasonic velocities of normal, reaction and opposite wood(m/s)

	Average	Min.	Max.	Microfibril angle(°)	Thickness of cell wall( $\mu$ m)
Normal wood	2120	1980	2320	11.2	2.58
Reaction wood	2060	1980	2110	29.6	3.30
Opposite wood	2180	1880	2450	13.2	2.80

그러나 그 차이가 작기 때문에 각 개체간 유의성 검정을 통하여 유의성을 확인하였

다. 결과적으로 정상재와 이상재는 초음파 전달 속도에서 차이가 있는 것으로 나타났으며, 나머지 개체 간에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 정상재와 이상재는 해부학적으로 매우 다른 특성을 지닌다. 이상재는 정상재에 비해 세포벽이 두껍고, 비중이 크며 마이크로피브릴 경각이 크다. 이러한 특성은 Table 2에서 확인할 수 있다. 세포벽이 두껍고 밀도가 커짐에 따라 초음파 전달 속도는 빨라져야 한다. 그러나 이상재의 경우 세포벽의 두께는 정상재의 1.3배 정도(Fig.6)되지만 상대적으로 마이크로피브릴 경각은 2.6배 크기 때문에 초음파 전달 속도는 이상재가 정상재보다 작게 나온 것을 알 수 있다.



Fig.5. 정상재, 이상재, 대응재의 초음파 전달속도

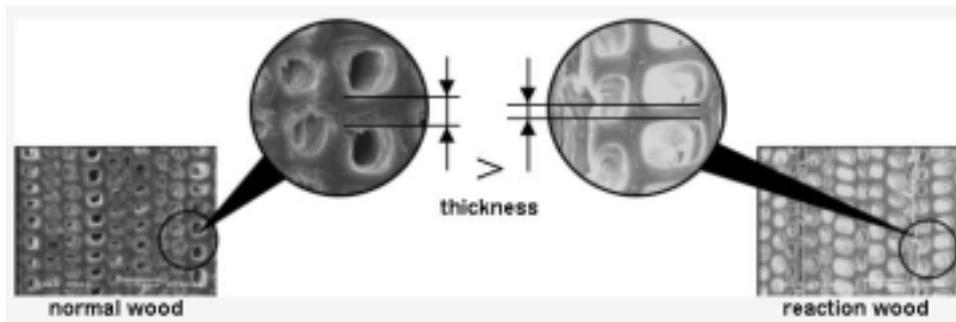


Fig.6. Thickness of the cell wall on normal and reaction wood

### (3) 심재, 변재

마지막으로 심재와 변재에 따른 초음파 전달 속도를 평가하기 위하여 미성숙재 내에서의 심재와 변재를 구분하여 초음파 전달 속도를 측정하였다. Fig.7에서 보듯이 심재와 변재간에는 속도 차이는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 심재와 변재의 해부적인 확인 결과, 세포벽의 두께나 피브릴 경사각이 거의 동일하며 단지 추출물이나 재색 차이만이 존재했다. 따라서 이들의 차이인 재색이나 추출물은 초음파 전달 속도에 영향하지 않는 것으로 판단된다.

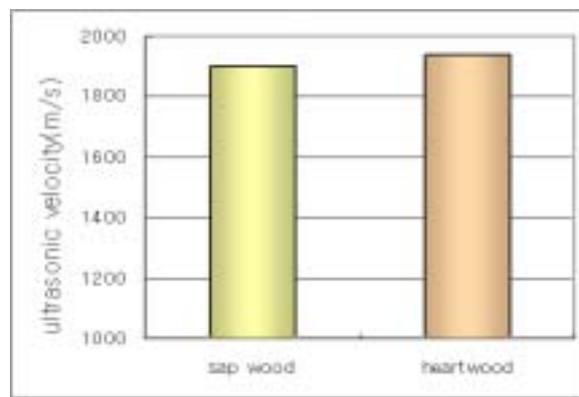


Fig.7. 심재, 변재의 초음파 전달 속도 확인

## 2. X선 시험의 목재 적용

### 가. X선의 목재 적용에의 영향인자

#### 1) 실험 재료 및 방법

##### 가) 재료

목조 고건축물(나주 최석기 가옥)의 기둥, 보의 교체부재를 확보하여 본 연구의 재료로서 이용하였다. 시편은 다양한 밀도 변이를 두기 위하여 수를 포함하여 제작하였고, 연륜각을 고려하기 위하여 일정 목리각을 갖는 경사재를 제작하였다. ‘경사재’는 연륜각에 따른 X선 투과량의 차이를 확인하기 위해 10° 간격으로 제작하였으며, 10° 18개, 20°, 30°, 40° 각 10개이다.

**Table 3. Basic properties of specimen using in this study.**

Species	Size (mm)	Moisture Condition	Quantity (piece)	Average specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )
<i>Pinus densiflora</i>	20×20×50	air dried	178	0.537

**Table 4. The numbers and specific gravities of specimens.**

	Flatsawn type	Pith type	Slope type (°)				Total
			10	20	30	40	
Quantity (piece)	111	19	18	10	10	10	178
Average Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	0.541	0.484	0.528	0.573	0.564	0.554	0.537
Standard Deviation	0.050	0.036	0.039	0.044	0.043	0.048	0.051

## 나) 실험방법

### (1) X선 직접 촬영법

실험은 일반적인 X-ray Radiography와 같이 촬영, 현상, 스캔의 순으로 이루어졌고, 이후 컴퓨터를 이용하여 스캔 한 데이터의 필름 명도를 분석하였다. 촬영에는 SOFTEX K-4 장비를 이용하였다. 본 장비에는 일반적으로 투과시험용 X선관에 타겟 금속으로 쓰이는 텅스텐(W)이 사용되었으며, anode각은  $19^\circ$ 이다. 관전압과 관전류의 방사 범위는 각 0~62.5 (kVp), 0~5 (mA)이며, 방사 시간은 자유롭게 조정이 가능하다. 방사 선원은 일반적인 fan beam 타입이며, 별도의 집속기(collimator) 등은 사용하지 않았다. 현상은 자동 현상기인 Max-Rhein MR-PA, 필름 스캔은 UMAX powerlook 2001XL을 이용하였다.

### (2) X선 초기 전(全)강도

필름에 나타나는 상대적인 명암값을 정량적인 X선 강도로 환산하여 목재의 밀도 측정에 이용하였다. 전압 40kVp, 전류 2mA, 방사시간 80sec, 거리 471mm에서의 X선 전강도를 100으로 하고, 이를 기준으로 방사시간을 18단계(0~100sec)로 변화시켜 상대 강도를 산출하였다. 이를 통해 필름 명도와 X선 강도간의 상관관계를 확인하였다.

X-ray Radiography에서 초기 X선 전(全)강도는 X선 발생 장치에서의 전압(kVp), 전류(mA), 노출시간(sec)에 의해 결정되며, 필름과 X선원(초점) 간의 거리에도 영향을 받는다. 시험 시편이 없는 상태에서 공기 중을 통과한 X선 강도를 정확히 산출하기 위하여, 거리를 고정된 상태에서 각 인자를 독립적으로 변화시키면서 실험하였다. 다음으로, 거리 471mm에서 전압 9단계(10~60kVp), 전류 5단계(1~5mA)로 변할 때의 X선 상대 강도를 산출하였다.

### (3) 감쇠계수 확인

Beer's law(식1)에 의하면 목재의 밀도는 X선의 초기 강도( $I_0$ )와 감쇠 후 강도( $I$ ), 감쇠계수( $\mu$ ), 투과 길이( $t$ )를 이용해 산출할 수 있다(식2). 여기서 감쇠계수( $\mu$ )는 물질의 고유한 특성으로 변하지 않으며, 투과 길이( $t$ ) 및 밀도( $\rho$ )에 독립적이기 때문에 서로 영향을 미치지 않는다.

$$I = I_0 \times e^{-\mu t} \quad (\text{식1})$$

$$\rho = \ln(I_0 / I) / \mu t \quad (\text{식2})$$

where

I = intensity of the transmitted X-ray

I<sub>0</sub> = intensity of the incident X-ray

μ = mass attenuation coefficient

ρ = density

t = thickness of sample

상술한 방법을 통해 필름 명도를 초기 강도 및 감쇠 후 강도로 환산하고, 측정된 시편의 길이 및 비중 데이터를 이용하여 각 시편의 감쇠계수를 산출하였다. 그 후 촬영되는 시편의 비중, 연료각에 따라서, 또한 투과길이에 변화를 주어 감쇠계수를 산출하여, 감쇠계수에 영향을 주는 인자를 확인하였다. 먼저 연료각이 동일한 비중 0.44~0.64 (g/cm<sup>3</sup>)의 시편을 선정하여 비중 변화에 따른 감쇠계수의 변화를 확인하였다. 다음으로 비중 및 연료각이 동일한 시편을 선정하여 1~10개로 적층해서 10단계로 투과거리를 다르게 한 후 감쇠계수를 산출하였다. 마지막으로 '경사재' 및 정목재에서 밀도가 동일한 시편을 이용하여 0° ~90° 의 10단계로 연료각의 변화를 주고, 감쇠계수를 산출하였다. 50° ~80° 의 시편은 40° ~10° 의 시편을 90° 회전시켜 실험하였으며, 같은 방법으로 정목재 0° 시편을 90° 시편으로 이용하였다.

## 2) 실험 결과

### 가) X선 강도의 정량화

#### (1) 초기 X선 강도의 결정

전압, 전류 및 X선원과 필름 간 거리를 일정하게 유지한 상태에서 노출시간만을 다르게 하여 상대강도를 산출하였다. 노출 시간이 X선 전강도에 비례할 것이 자명하기 때문에 필름 명도와 초기 X선 상대강도의 상관관계 분석에 이용하였다.

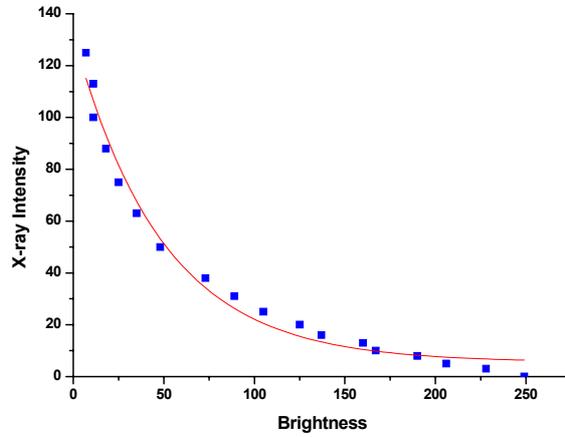


Fig.8. The relation between Brightness and X-Ray Intensity (40kVp, 2mA, 471mm)

0~100sec까지 18단계의 노출시간 차이에 대한 실험 결과가 Fig.8에 제시되어 있다. 노출시간을 증가시킬수록 X선 전강도는 증가하고, 필름에 많은 감광이 일어나 필름 명도가 어두워진다. 두 변수 간의 관계가 그림에서처럼 지수함수적으로 나타났으며 R<sup>2</sup>값 0.995의 높은 상관관계로 명도에 대한 X선 상대강도의 관계식(식3)을 산출하였다.

$$y = -34.8 \times \ln(x) + 188 \quad (\text{식3})$$

(2) 다양한 방사 조건에 따른 X선 강도

X선 장비의 제어기에서 직접적으로 방사 강도에 영향을 주는 것은 전류와 전압의 세기라고 할 수 있다. 노출시간 및 필름, 선원 간 거리를 고정한, 전류, 전압 각 5단계의 변화에 따른 X선 강도 산출값을 Fig.9에 제시했다. 1mAs의 약한 전류 값을 제외한 모든 전류 값에 대해서 약 20kV에서 45kV까지는 전압의 증가에 따라 X선의 강도가 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

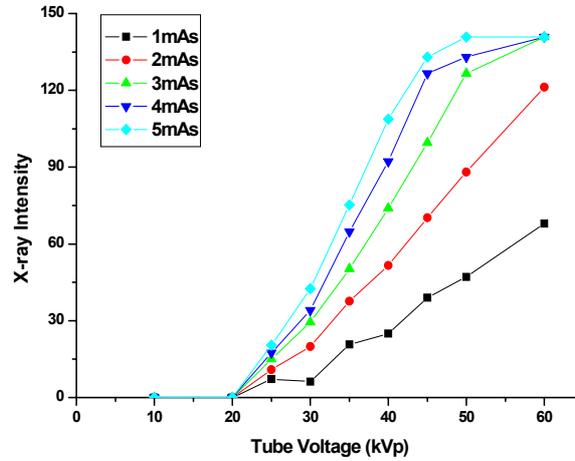


Fig.9. Variation of X-Ray Intensity due to Voltage, Current changes in X-Ray apparatus

그러나 10~20kV 부근의 낮은 전압에서는 X선의 강도를 감지할 수 없었고, 45~60kV 부분에서는 특히 4~5mA의 높은 전류가 흐를 경우에는 X선의 강도가 더 이상 증가하지 않았다. 이는 X선을 수신하는 필름 명도의 resolution이 X선 강도의 resolution보다 작기 때문에 나타난 결과라 사료된다. 즉, 매우 낮은 X선 전강도의 노출은 필름 명도가 너무 높게 나타나 판별이 어렵고, 반대의 경우는 너무 어둡게 나타나 지속되는 X선 강도의 증가를 나타내주지 못하는 것이다. 이렇게 필름 resolution의 범위를 넘어서는 범위의 전압, 전류 값에 대해서, 전압의 변화에 따라 X선 강도가 선형적으로 나타난 구간을 이용, 외삽의 방법을 통해 X선 강도를 산출하였다. 이를 통해 관전압과 관전류의 변화에 따른 X선 강도의 변화를 정량화 시킬 수 있었다.

나) 비중, 투과 길이, 연료각에 따른 감쇠계수

(1) 비중

시편의 비중에 따른 감쇠계수의 차이를 확인하기 위하여 55개 시편에 대하여 분석하였고 그 결과를 Fig.10에 제시하였다.  $0.44 \text{ g/cm}^3$ 에서  $0.64 \text{ g/cm}^3$  사이의 변이를 가지는 모든 시편들에 대해서 감쇠계수는 약 0.04의 값이 나타났으며 비중 차이에 대한 어떠한 상관관계도 발견되지 않았다.

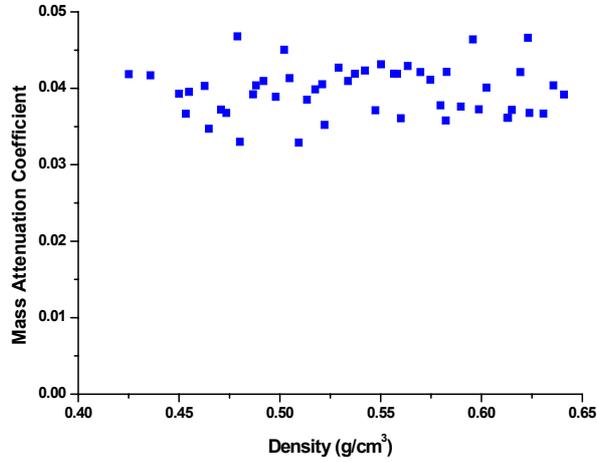


Fig.10. The relation between Density and Mass Absorption Coefficient

(2) 투과 길이

시편 비중에서의 결과와는 달리 X선 투과 길이에 따른 감쇠계수의 변화는 함수적으로 나타났다. 시편 두께를 10단계로 다르게 한 결과, Fig.11에서와 같이 시편의 두께가 증가함에 따라 감쇠계수도 과소평가되는 경향이 나타났다.  $R^2$ 값 0.925의 비교적 매우 높은 상관관계로 시편의 두께 변화에 따른 감쇠계수의 변화식을 산출했다(식4).

$$y = -0.0075\ln(x) + 0.0622 \quad (\text{식4})$$

where

x = thickness of specimen

y = mass attenuation coefficient

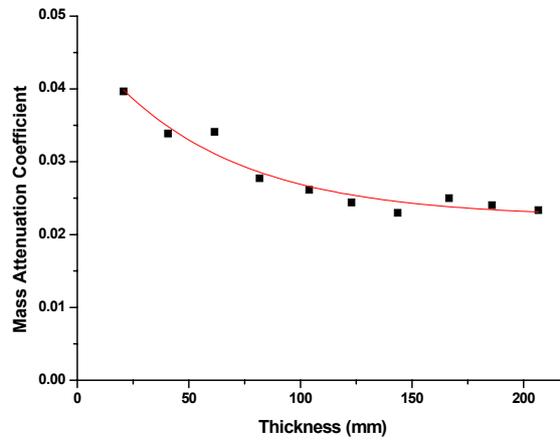


Fig.11. The relation between Thickness and Mass Absorption Coefficient

(3) 연륜각

목재의 이방성을 나타내는 연륜각의 변화에 따른 감쇠계수의 변화가 Fig.12에 제시되어 있다. 시편 비중 변화에 따른 감쇠계수 변화의 관계(Fig.10)에서처럼 감쇠계수는 전체적으로 약 0.04의 값이며, 연륜각의 변화에 따른 어떠한 관계도 나타나지 않았다.

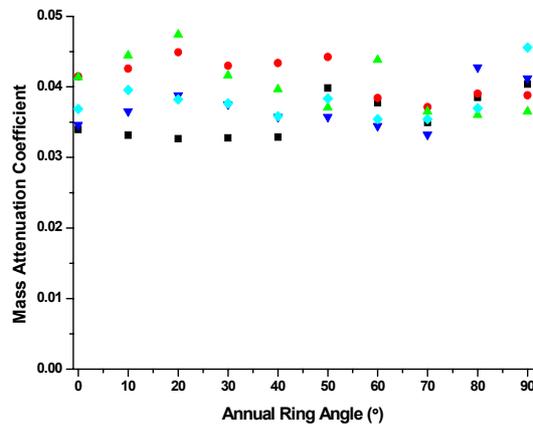


Fig.12. The relation between Annual Ring Angle and Mass absorption Coefficient

다) 검증

마지막으로, 지금까지의 분석 결과를 바탕으로 48개 시편에 대해 밀도를 예측하고 이를 실측값과 비교하여, 예측값의 정확성을 검증하였다(Fig.13). 예측값과 실측값에 대한 t-검정 결과 95%의 유의수준에서 두 표본 간의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이를 통해 산출된 예측식의 정확성을 확인할 수 있었다.

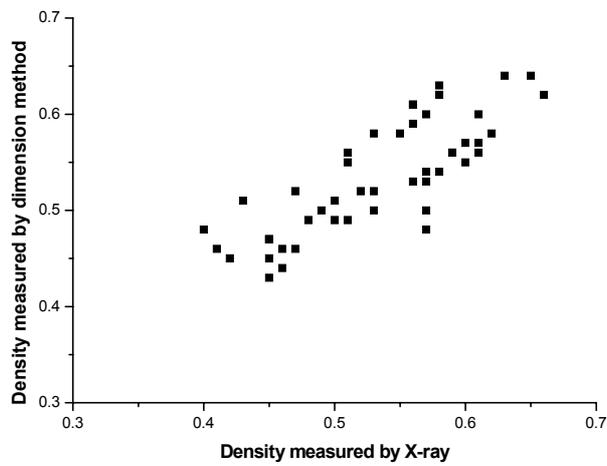


Fig.13. Comparison of X-ray measurement density and actual density ( $R^2=0.55$ ).

## 제 4 절 단계별 인공열화재의 비파괴 평가

### 1. 단계별 열화재의 제조

#### 가. 부후균의 분리 동정 및 흰개미 확보

##### 1) 연구방법

전국 19개 지역에서 현재 부후가 진행되는 것으로 의심 또는 판단되는 다양한 야외용 목제품의 지상부로부터 균 분리용 core 또는 소형 칩(chip)을 생장추 또는 소형 칼을 이용하여 채취하였다(Table 1). 시편을 채취한 목제품의 대부분은 방부처리가 되지 않은 침엽수였으며 경남 남해, 강원 동해 등 해안과 접한 지역에서는 일부 활엽수로부터 채취된 시편을 이용하였다. 채취 후 균 분리용 시편을 비닐 주머니에 넣어 수분 손실을 최소화한 후 냉장 상태로 표면오염균 등 성장속도가 빠른 균의 성장을 억제하면서 실험실로 가져왔다. 채취한 시편의 표면을 매우 약하게 화염멸균하고, 부후균 분리를 위한 선택배지인 benomyl 4ppm이 첨가된 2% malt extract agar 배지에 접종한 후 실온에서 계대배양을 반복하여 순수한 단일 균으로 분리하였다. 분리된 균은 우선 형태학적 특징에 의해 그룹화 후(Nobles, 1965; Stalpers, 1978), DNA sequence data를 비교하는 분자생물학적 방법으로 최종 동정을 실시하였다. 동정된 모든 부후균은 Bavendamm 및 RBBR 시험을 이용하여 갈색부후균 또는 백색부후균으로 분류하였다.

#### 가) 선택배지의 제조

목재 부후균을 분리하기 위해서는 1000ml의 2차 증류수에 20g의 Difco malt extract, 15g의 Difco agar를 첨가하여 만든 2% MEA 배지(Wilcox and Dietz 1997)와 2% MEA배지에 4ppm의 benomyl을 첨가한 BMEA 배지를 사용하였다(Clubbe and Levy 1977).

#### 나) DNA 추출, PCR, DNA sequencing

분리된 균들을 2% MEA 배지 상에서 25℃ 온도조건으로 균종에 따라 5~7일간 배양한 후 Lim 등(2005)이 사용한 방법을 이용하여 균사체로부터 DNA 추출하였다. Universal combination primer인 ITS5/ITS4를 사용하여 28S rDNA region을 증폭한 후 ethidium bromide(5 $\mu$ l/100ml)가 첨가된 1% agarose gel을 이용하여 확인하였다.

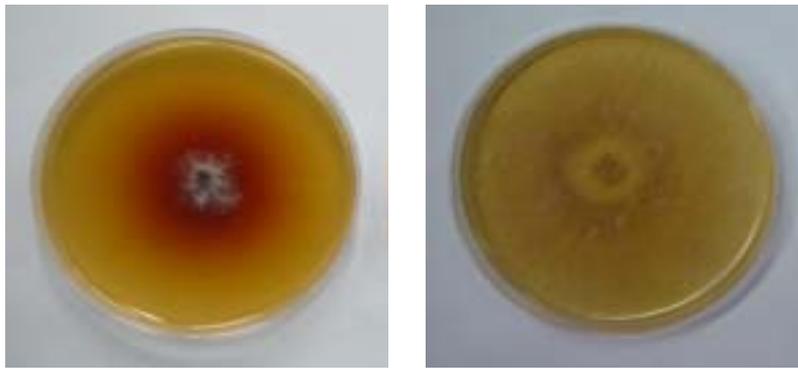
증폭된 PCR 산물은 PCR purification kit(Qiagen, Mississauga, ON, Canada)를 통해 primer를 제거한 후 염기서열을 밝혔다.

#### 다) Phylogenetic 분석

각 염기서열은 GenBank의 Blast Search를 통해 가장 유사도가 높은 균들의 염기서열을 획득 후 ClustalW algorithm (Higgins et al., 1991)와 PHYDIT program version 3.2 (<http://plasza.snu.ac.kr/~jchun/phydit/>)를 이용하여 계통분류학적 분석을 하였다.

#### 라) Bavendamn 및 RBBR 시험

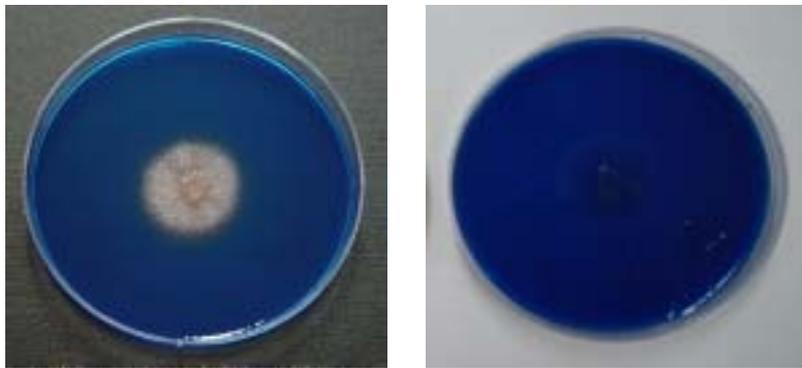
동정된 균들을 gallic acid, tannin acid, rhemazol brilliant blue R(RBBR)이 각각 0.5%, 0.5%, 0.05% 함유된 2% MEA 배지에 접종한 후 상온에서 일정기간 배양하여 백색부후균의 리그닌 분해효소에 의한 배지 고유의 색 변화로부터 갈색부후균 및 백색부후균을 구별하였다(Wang and Zabel, 1990; Glenn and Gold, 1983). 백색부후균은 리그닌을 분해하는 과정에서 phenol oxidase laccase를 분비하는데 이 효소가 배지 내에서 산화환원반응을 일으켜 색이 변하는 것인데, Fig.1에서와 같이 gallic acid와 tannin acid의 경우는 반응을 통해 갈색의 발색물질로 변화하기 때문에 배지가 갈색 빛으로 변하는 것이고, RBBR의 경우는 파란색을 띠는 발색물질을 파괴하기 때문에 배지의 색깔이 투명해지는 것이다.



Bavendamn test with gallic acid media:  
white-rot fungus (left) and brown-rot fungus (right)



Bavendamm test with tannin acid media:  
white-rot fungus (left) and brown-rot fungus (right)



RBBR test: white-rot fungus (left) and brown-rot fungus (right)

**Fig.1. Bavendamm and RBBR tests for distinguishing white rot and brown rot fungus.**

## 2) 연구결과

형태학적 방법 및 DNA sequence 방법을 통해 전국 19개 지역의 야외 목제품으로부터 총 163개의 균을 분리하여 30속 49종의 균을 획득하였다(Table 1). 균의 다양성은 서울이 17종으로 가장 높았으며 그 다음으로 양평, 과천, 남해에서 각각 12종, 7종 6종으로 나타났다. 여주, 순천, 군산, 강릉에서 각 5종, 동해, 목포, 둔내, 부산에서 각 4종, 성남, 안면도에서 2종이 분리·동정되었고, 구례, 진주, 평창, 봉화, 청주에서는 1종만 분리되었다.

분리 균들의 동정 결과는 Fig.2에 보여주는 계통수(phylogenetic tree)에 의해 보다 확실해진다. 모든 분리균의 계통분류학적 위치는 기 수행된 연구결과(Hibbett and Thorn 2001; Lim 2001; Larsson et al. 2004)와 일관되게 나타났으며, 분리균의 2/3가 구멍장이버섯류(polyporoid clade)에 속하였다. 갈색부후균은 11속 18종이 분리·동정되었는데 분리빈도는 Table 1에서 볼 수 있다. *Gloeophyllum* 속(9.2%)의 *Gloeophyllum trabeum*이 7.4%로 가장 높은 분리빈도를 나타내었고 다음으로는 *Sistotrema*속(7.9%)의 *Sistotrema brinkmanii*(6.1%)가 높은 빈도로 분리되었다. 그밖에 비교적 분리빈도는 낮지만 *Antrodia serialis*, *Coprinellus domesticus*, *Cystidiophorus castaneus*, *Fomitopsis pinicola*, *Sistotrema oblongisporum*, *Tapinella panuoides*, *Tulasnella pruinosa* 등의 다양한 균이 분리되었다. 본 연구결과의 특이점은 한국산업규격(KS) 및 일본산업규격(JIS) 목재방부제 관련 규격의 공시 갈색부후균인 *Fomitopsis palustris*가 전혀 분리되지 않았다는 것이다. 이처럼 전국에 분포된 다양한 종류의 목제품으로부터 분리된 부후균 중 방부제 효력 시험용 공시 균주가 분리되지 않은 것은 공시균 선정에 문제가 있음을 시사하는 것이라 할 수 있다. 백색부후균은 총 19속 31종으로 치마버섯이라 불리는 *Schizophyllum commune* 19.0%, 한국산업규격(KS) 및 일본산업규격(JIS) 목재방부제 관련 규격의 공시 백색부후균인 *Trametes versicolor*(구름버섯)가 14.7%로 높은 분리빈도를 나타내었다. 다음은 *Bjerkandera adusta*(줄버섯), *Ceriporia lacerata*, *Phanerochaete sordida*(유색 고약버섯), *Peniophora* sp.가 각각 8.6, 4.3, 3.7, 3.1%의 순으로 나타났다. 그밖에 *Crustoderma* 속, *Hypochnicium* 속, *Irpex* 속, *Phlebia* 속, *Schizopora* 속, *Sistotrema* 속, *Tapinella* 속 등의 다양한 균이 분리되었다.

본 연구에서 분리·동정된 부후균들의 대부분은 국내 산림에서 채집된 자실체로부터 동정된 균들이다(Jung 1994, 1995; Lee and Lee 2000; Lim 2001). 그러나 *Ceriporia lacerata*, *Crustoderma* spp., *Gloeophyllum trabeum*, *Hyphoderma praetermissum*은 본 연구에서 처음으로 분리·동정되었는데, *Ceriporia lacerata*와 *Crustoderma* spp.는 외국에서 부후 목재로부터 분리·동정되었고(Ginns and Lefebvre 1993; Suhara et al. 2003) *Gloeophyllum trabeum*와 *Hyphoderma praetermissum*은 사용중인 다양한 목제품으로부터 분리·동정된바 있다(Duncan and Lombard 1965; Viitanen and Ritschkoff 1991; Wilcox and Dietz 1997; Lim et al. 2005). 이들은 부후된 목재 혹은 건조된 목제품을 선호하기 때문에 산림에서 자실체를

잘 형성하지 않는다. 일반적으로 자실체가 형성되기 전에 썩은 목재품을 폐기하기 때문에 이들의 자실체는 목재품에서도 관찰할 수가 없었기 때문에 자실체를 이용하여 수행된 연구에서 이들의 존재가 언급되지 않았을 것이라 사료된다. 그러므로 본 연구 결과는 자실체를 형성하는 부후균과 실제 사용중인 목재품을 가해하는 부후균을 구별하는데 유용한 자료가 될 것이다.

다양한 목재품으로부터 많은 다공성 부후균(polypore Basidiomycete)이 보고되었다(Lemke 1964; Scheffer et al. 1984; Ginns 1986). 본 연구에서는 대표적으로 *Bjerkandera adusta*, *Ceriporia lacerata*, *Gloeophyllum trabeum*, *Trametes versicolor* 가 각기 다른 곳에서 비교적 높은 빈도로 분리되었다. 이들은 입목, 벌채된 나무뿐만 아니라 목재품을 모두 가해하며 부후능력이 매우 우수하다고 알려져 있다(Duncan and Lombard 1965; Esllyn and Highley 1976; Zabel and Morrell 1992; Wilcox and Dietz 1997; Suhara et al. 2003). 그리고 본 연구에서는 다공성 부후균과 더불어 많은 고약버섯류의 부후균(corticoid fungi)도 분리되었다. 이들 균의 많은 수가 목재 세포벽 구성성분 모두를 분해할 수 있는 백색부후균이며, Homobasidiomycetes의 모든 계통학적 그룹에 분포되어 있다(Hibbett and Thorn 2001; Lim 2001; Larsson et al. 2004). *Coniophora puteana*, *Phnerochaete chrysosporium*, *Serpula lacrymans*, *Stereum sanguinolentum* 등이 잘 알려진 고약버섯류인데(Duncan and Lombard 1965; Burdall 1985; Palfreyman et al. 1995; Schmidt et al. 2002; Hogberg and Land 2004) 이들은 산 나무와 죽은 나무를 상관하지 않고 심재, 뿌리의 심각한 부후를 야기하나 동정하기가 매우 어려워 그동안 간과하는 경우가 많다. 그러나 최근 Lim 등(2005)의 연구에 따르면 고약버섯류의 DNA 염기서열정보가 많이 밝혀져 목재품을 가해하는 다양한 고약버섯류 계통의 균들이 보고되고 있다. 그러므로 본 연구 또한 고약버섯류가 목재품 열화에 중요한 역할을 한다는 가설을 뒷받침하고 있다.

본 연구에서 부후균 분리에 사용된 목재품의 대부분이 침엽수임에도 불구하고 갈색부후균보다 백색부후균의 빈도가 약 3배에 가까웠는데 이는 기 수행된 연구결과에서도 침엽수 목재품에서 갈색부후균보다 백색부후균의 분리빈도가 더 높게 나타나(Zabel and Moore 1958; Duncan and Lombard 1965; Butcher 1968) 지접하는 침엽수 목재품에서 백색부후균이 갈색부후균보다 우선적으로 균체를 형성한다는 Butcher(1968)의 주장을 뒷받침한다.

**Table 1. Basidiomycetes isolated from wood products in services.**

KUC I.D.	Fungal species	Rot type <sup>*1</sup>	Location <sup>*2</sup>	No. of isolates	% Frequency of isolates
KUC8005	<i>Amphinema byssoides</i>	W	SU	1	0.6
KUC8002	<i>Antrodia serialis</i>	B	SU	1	0.6
KUC8011	<i>Antrodia</i> sp.	B	SU	1	0.6
KUC8202	<i>Antrodia</i> sp2.	B	NH(2)	2	1.2
KUC8072	<i>Bjerkandera adusta</i>	W	YP, SU(4), GC(3), SC(2), MP, NH, DN, DH	14	8.6
KUC8111	<i>Ceriporia lacerata</i>	W	SC, BS, GS(3), GC(2)	7	4.3
KUC8209	<i>Coprinellus domesticus</i>	B	NH	1	0.6
KUC8065	<i>Crustoderma corneum</i>	W	SU	1	0.6
KUC8001	<i>Crustoderma flavesescens</i>	W	SU	1	0.6
KUC8012	<i>Crustoderma</i> sp.	W	SU	1	0.6
KUC8020	<i>Cryptoporus volvatus</i>	W	YJ	1	0.6
KUC8048	<i>Cystidiophorus castaneus</i>	B	YP, GN	2	1.2
KUC8010	<i>Fomitopsis pinicola</i>	B	SU	1	0.6
KUC8053	<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	B	GN	1	0.6
KUC8056	<i>Gloeophyllum</i> sp.	B	GN(2)	2	1.2
KUC8013	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	B	SU(11), SC	12	7.4
KUC8136	<i>Homobasidiomycetes</i>	B	GS	1	0.6
KUC8031	<i>Hyphoderma raetermissum</i>	W	YP	1	0.6
KUC8046	<i>Hypochnicium eichleri</i>	W	YP	1	0.6
KUC8019	<i>Hypochnicium</i> sp.	W	SN	1	0.6
KUC8049	<i>Hypochnicium</i> sp.	W	GN	1	0.6
KUC8064	<i>Hypochnicium</i> sp.	W	SU	1	0.6
KUC8075	<i>Irpex lacteus</i>	W	SU	1	0.6

\*1B: brown-rot type, and W: white-rot type.

\*2AM: Anmyeondo, BH: Bonghwa, BS: Busan, CJ: Cheongju, DH: Donghae, DN: Donnae, GC: Gwacheon, GN: Gangneung, GR: Gurye, GS: Gunsan, JJ: Jinju, MP: Mokpo, NH: Namhae, PC: Pyeongchang, SC: Suncheon, SN: Seongnam, SU: Seoul, YJ: Yeosu, and YP: Yangpyeong.

**Table 1. Continued.**

KUC I.D.	Fungal species	Rot type <sup>*1</sup>	Location <sup>*2</sup>	No. of isolates	% Frequency of isolates
KUC8034	<i>Phlebia radiata</i>	W	YP(2)	2	1.2
KUC8041	<i>Phlebia subserialis</i>	W	YP(2), GC	3	1.8
KUC8093	<i>Phlebiella griseofulva</i>	W	GC(3), DN	4	2.5
KUC8220	<i>Polyporus arcularius</i>	W	YJ	1	0.6
KUC8047	<i>Pycnoporellus</i> sp.	W	YP	1	0.6
KUC8016	<i>Schizophyllum commune</i>	W	SU(5), CJ, YJ, SC, AM, GS, MP(2), NH(4), DH(3), DN(4)	31	19.0
KUC8006	<i>Schizopora flavipora</i>	W	SU(3), DH	4	2.5
KUC8140	<i>Schizopora paradoxa</i>	W	MP	1	0.6
KUC8014	<i>Sistotrema brinkmannii</i>	B	SU(2), GN(6), SC, BS	10	6.1
KUC8217	<i>Sistotrema oblongisporum</i>	B	YJ	1	0.6
KUC8208	<i>Sistotrema</i> sp.	B	GR	1	0.6
KUC8218	<i>Sistotrema</i> sp.	B	PC	1	0.6
KUC8044	<i>Stereum hirsutum</i>	W	YP, DN	2	1.2
KUC8018	<i>Tapinella panuoides</i>	B	SN	1	0.6
KUC8035	<i>Trametes versicolor</i>	W	YP(2), JJ(2), AM, BS(8), MP(6), DH(4)	24	14.7
KUC8210	<i>Trametes versicolor</i> -like	B	NH	1	0.6
KUC8135	<i>Trametes versicolor</i> -like	W	GS	1	0.6
KUC8214	<i>Trichaptum abietinum</i>	W	YJ	1	0.6
KUC8100	<i>Tulasnella pruinosa</i>	B	GC	1	0.6
KUC8098	Unidentified basidiomycete	B	GC	1	0.6
KUC8036	Unidentified basidiomycete	W	YP	1	0.6
Total				163	100

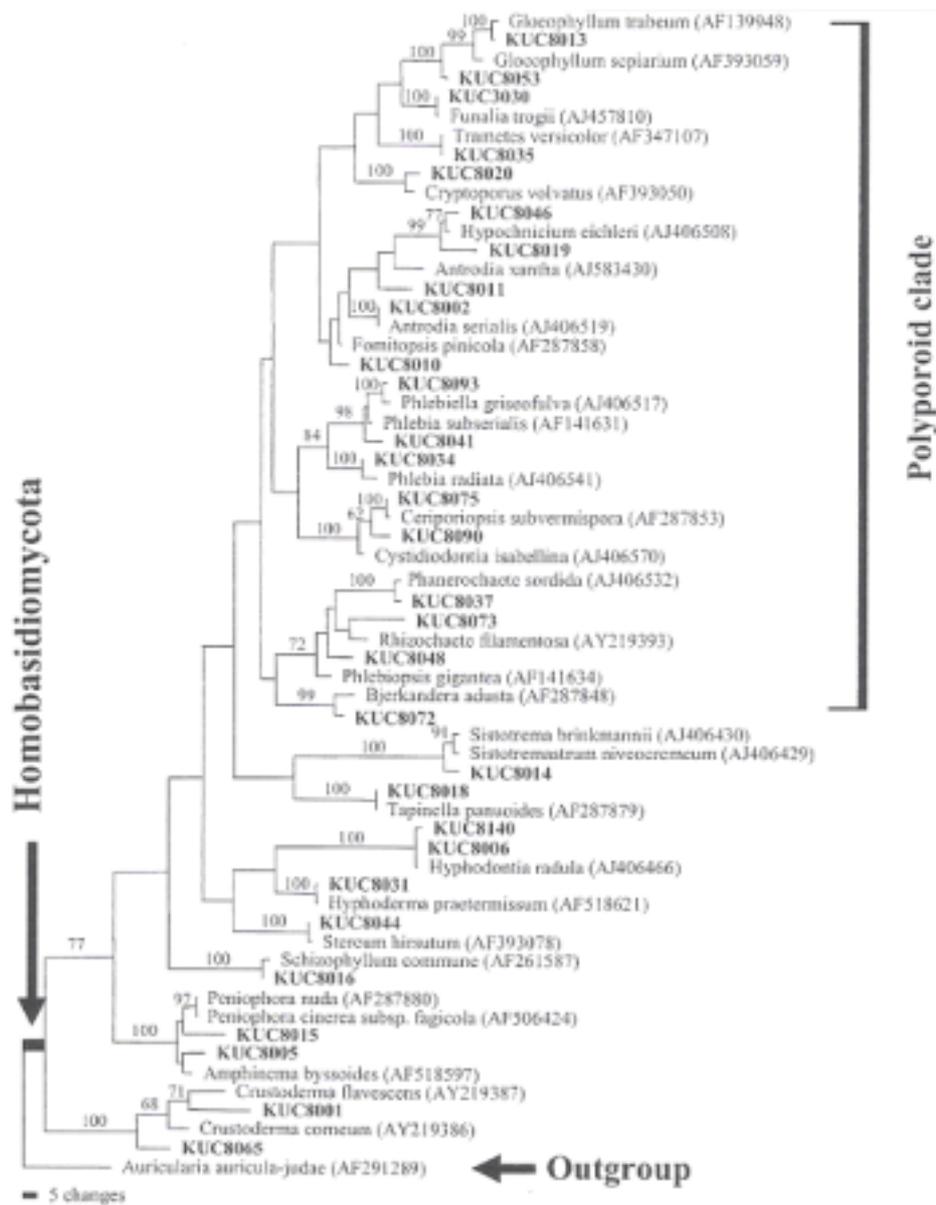


Fig.2. Phylogenetic tree based on partial 28S rDNA sequences of decay fungi isolated from the various wood products service and reference strains from GenBank.



*Amphinema byssoides*



*Antrodia serialis*



*Bjerkandera adusta*



*Ceriporia lacerata*



*Ceriporiopsis subvermispora*



*Crustoderma corneum*

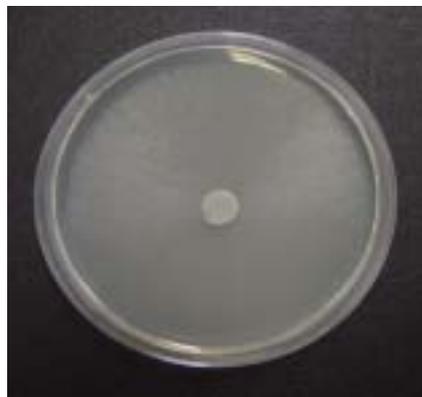
**Fig.3. Colony on MEA media major fungi identified in this study.**



*Crustoderma flavescescens*



*Cryptoporus volvatus*



*Cystidiophorus castaneus*



*Fomitopsis pinicola*



*Funalia trogii*



*Gloeophyllum sepiarium*

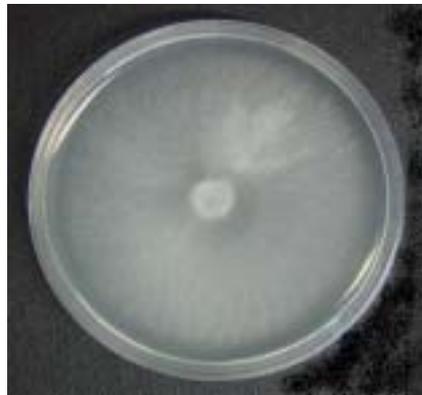
**Fig.3. Continued.**



*Gloeophyllum trabeum*



*Hyphoderma praetermissum*



*Hyphodontia radula*



*Hypochnicium eichleri*



*Peniophora cinerea*



*Phanerochaete sordida*

**Fig.3. Continued.**



*Phlebia radiata*



*Phlebia subserialis*



*Phlebiella griseofulva*



*Schizophyllum commune*



*Sistotrema brinkmannii*



*Stereum hirsutum*

**Fig.3. Continued.**



*Trametes versicolor*



*Tapinella panuoides*

**Fig.3. Continued.**

#### 나. 단계별 열화 시편의 제조

##### 1) 단계별 열화 시편의 제조

###### 가) 목재 시편의 준비

경상북도 봉화 산림조합 목재집하장과 인천지역 제재소에서 구입한 소나무와 라디에타소나무 생원목으로부터 제재되어 실내에서 함수율 15% 이하로 건조된 두께 3.5cm의 변재부 판재로부터 횡단면 치수가 100mm × 30mm이고 길이가 100mm인 무결점 시편을 필요량 준비하였다. 비파괴 검사 시 연륜 배향에 의한 변이를 제거하기 위하여 모든 시편은 정목(quarter-sawn)으로 준비하였다.

###### 나) 공시 부후균

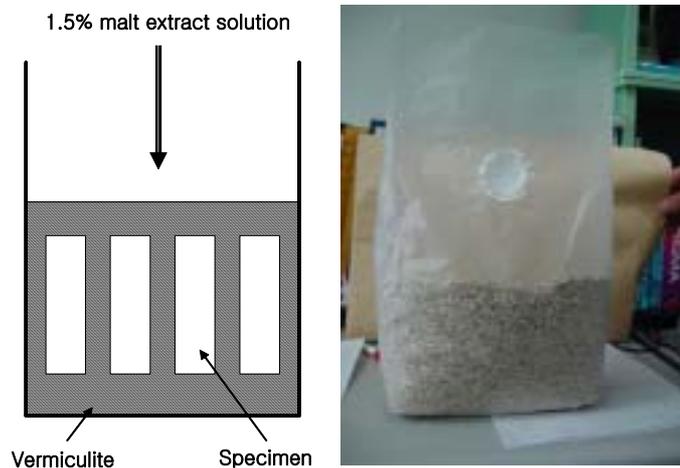
한국산업규격(KS)과 일본산업규격(JIS)의 목재 방부제 효력시험용 공시 갈색부후균인 *Fomitopsis palustris*와 미국 재료시험협회(ASTM)의 목재 자연내후성 시험용 공시 갈색부후균중 하나인 *Gloeophyllum trabeum*을 사용하였다.

###### 다) 시편의 강제부후

시편의 강제부후는 질석매립법(vermiculite burial method)에 의해 실시되었다. 표고 버섯 톱밥재배용 봉지에 일단 질석 300 gram을 넣고 시편을 봉지당 4개씩 세우고 다

시 질석 400 gram을 더 넣어 소시편이 질석 내에 완전하게 매립되도록 하였다. 시편의 함수율을 조절 및 공시균의 왕성한 생육을 도모하기 위하여 1.5% malt extract 수용액 2 liter를 봉지에 부은 다음 121℃ 온도의 고압멸균기에서 60분간 멸균하였다 (Fig.4).

Cork borer를 사용하여 2% malt extract agar(MEA) 평판배지에서 왕성하게 자라고 있는 공시균의 외곽에서 접종원(inoculum)을 채취하여 2.5% malt extract 액체 배지에 접종하여 일주일간 27℃에서 진탕 배양하였다. 배양된 균사 슬러지 20ml를 봉지 내의 질석 표면에 고루 뿌린 후 봉지의 입구를 밀봉하였다. 밀봉된 봉지는 27℃ 항온기에 보관하면서 중량감소를 경사를 유도하기 위해 일정시간 간격으로 균 배양을 중지하였다.



**Fig.4. Method used to expose small specimens to decay fungi.**

강제부후가 끝난 시편 표면에 부착된 균사체와 질석을 완벽하게 제거하고, 55℃ 건조기에서 항량까지 건조한 후, 부후 전후의 55℃ 항량 무게로부터 중량 감소율 (weight loss)을 산출하였다.

## 2) 방사방향 길이별 인위적 열화 시편 제조

### 가) 목재 시편의 준비

경상북도 봉화 산림조합 목재집하장에서 구입한 소나무 생원목으로부터 제재되어

실내에서 함수율 15% 이하로 건조된 두께 3cm의 변재부 판재로부터 필요한 치수 [25mm(수축방향) × 25mm(접선방향) × 20, 40, 60, 또는 80mm(방사방향)]의 시편을 준비하였다. 비파괴 검사시 연륜 배향에 따른 변이를 제거하기 위하여 모든 시편은 정목(quarter-sawn)으로 준비하였다.

#### 나) 공시 부후균

미국 재료시험협회(ASTM)의 목재 자연내후성 시험용 공시 갈색부후균중 하나인 *Gloeophyllum trabeum*을 사용하였다.

#### 다) 시편의 강제부후

방사방향 치수가 20mm와 40mm 시편은 배양병, 그리고 방사방향 치수가 60mm와 80mm 시편은 표고버섯 톱밥재배용 봉지 내에서 강제부후를 실시하였다. 배양병에는 질석 35 gram과 증류수 110ml, 봉지에는 질석 250 gram과 증류수 800ml를 첨가한 다음 질석의 표면을 평평하게 하였다. 질석 표면에 2% malt extract 수용액에 1분간 침지 처리한 feeder strip[(시편의 방사방향 길이+10)mm×30mm×3mm]을 올려놓고 배양병 뚜껑을 닫거나 봉지를 밀봉한 후 고압멸균기를 사용하여 121℃에서 30분간 멸균을 실시하였다.

멸균 배양병이나 봉지를 충분히 식힌 다음 후 무균상(clean bench) 내에서 뚜껑이나 봉지 입구를 열고 cork borer를 사용하여 2% malt extract agar(MEA) 평판배지에서 왕성하게 자라고 있는 공시균의 외곽에서 접종원(inoculum)을 채취하여 feeder strip에 접종하였다. 접종 후, 봉지를 밀봉하여 32℃로 온도가 조절된 항온기에서 균사가 feeder strip을 완전히 덮을 때까지 배양하였다.

공시균이 feeder strip을 완전히 덮은 후, Fig.5과 같이 시편이 feeder strip과 접촉되도록 feeder strip 위에 올려놓은 다음 시편 윗면에도 다른 feeder strip을 뒤집어 덮었다. 균 접종이 끝난 후, 32℃ 항온기에서 배양하면서 중량 감소율 경사를 유발하기 위해 일정시간 간격으로 균 배양을 중지하였다. 강제부후가 끝난 시편 표면에 부착된 균사체와 질석을 완벽하게 제거하고, 55℃ 건조기에서 항량까지 건조한 후, 부후 전후의 55℃ 항량 무게로부터 중량 감소율(weight loss)을 산출하였다.

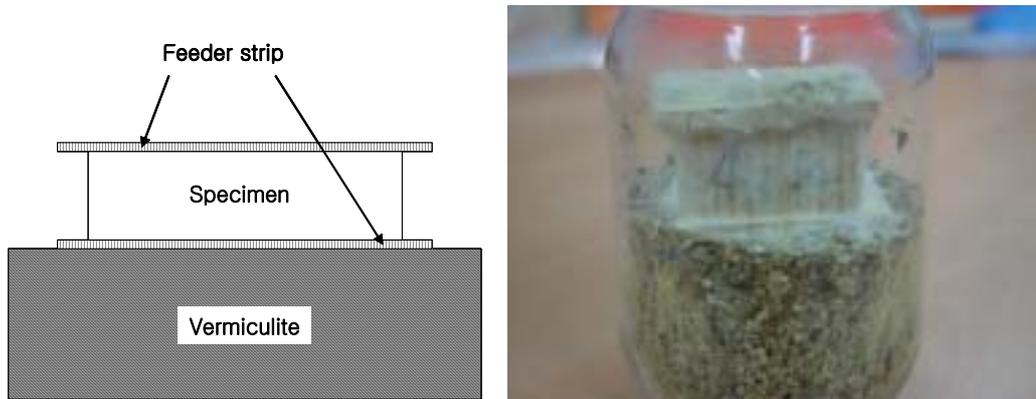


Fig.5. Method used to expose specimens to decay fungi.

## 2. 단계별 열화재의 비파괴 평가

### 가. 열화 단계에 따른 조직변화 조사

#### 1) 실험 방법

열화에 의한 목재의 해부학적 특성변화 조사를 광학현미경, 주사전자현미경 및 투과전자현미경 관찰용 목재 시료를 소정의 방법에 따라 제조하고 관찰하였다.

광학현미경 관찰용 시료는 확보된 시편으로부터  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 의 목편을 제조하고 autoclave에서 연화한 다음 sliding microtome으로  $15 \sim 25 \mu\text{m}$  두께로 횡단면, 방사단면, 접선단면의 박편을 절삭하고 safranin액으로 염색한 다음 ethanol 및 xylene 계열로 탈수, 투명화 처리하고 영구 slide를 제작하였다.

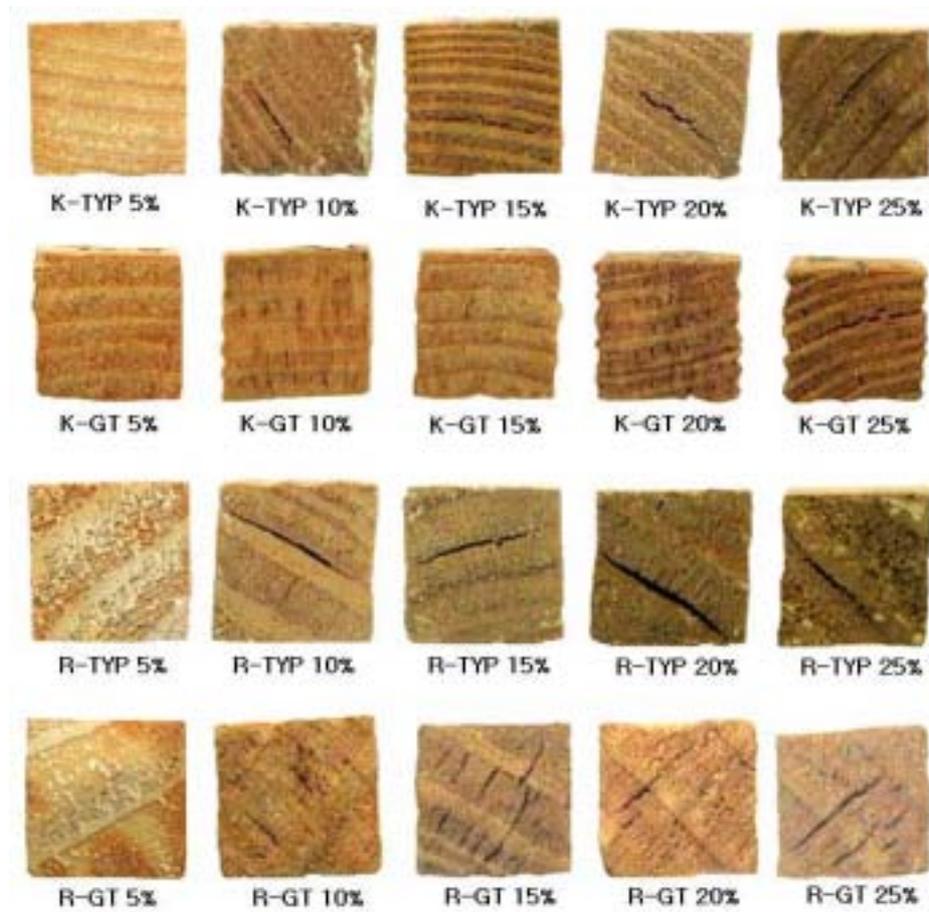
또 다른 방법으로  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$  크기의 작은 조각으로 절단하였다. 현미경적 관찰을 위한 작은 시료들은 건조 및 무게 측정 없이 formalin-glacial acetic acid-50% aqueous ethanol의 비율이 10 : 5 : 85인 혼합액 (FAA)에 즉시 담가 최소한 2일 동안 고정시켰다.  $45^\circ\text{C}$  증류수로 1시간에서 3시간동안 2번 세척하고 난 뒤 50% ethanol 15분, 70% ethanol 10분, 95% ethanol 5분 그리고 무수 ethanol 5분 탈수시켰다. 그리고 나서 xylene과 ethanol 50:50 혼합액으로 15분간 처리하고 순수 xylene으로 15분간 투명화 처리한 후  $60^\circ\text{C}$ 에서 paraffin wax에 12시간동안 담가두었다. microtome을 이용하여 횡단면( $45\mu\text{m}$ )과 종단면( $25\mu\text{m}$ )을 절삭하고 그 박편들을 2중 염색하였다. xylene으

로 5분 처리하고 다시 순수 xylene으로 5분 100%, 70%, 50% ethanol로 각각 2분 동안 처리하고 safranin으로 6분간 염색한 뒤 70%, 95% ethanol로 각 2분간 처리하고 picro aniline blue 2-15초 동안 2중 염색한 뒤 100% ethanol로 두 번 각각 2분 처리하고 xylene으로 10분간 두 번씩 처리하였다(Berlyn & Miksche, 1976). 그리고 나서 50%, 70%, 90% 그리고 무수 ethanol순으로 각 10동안 탈수시킨 뒤 투명화 처리하여 영구슬라이드시편을 만들었다.

주사전자현미경 관찰용 시료는 FAA로 고정된 시료를 polyethylene glycol (PEG-1500)과 55°C 증류수 50:50 혼합액에 하룻밤(55°C) 담가 둔 다음 50 : 50 혼합액을 옮겨 따르고 용해된 순수 PEG-1500 으로 교체한 다음 2시간동안 55°C에서 저장하였다. 그리고 난 뒤 다시 순수 PEG-1500으로 교체하여 4시간에서 6시간동안 55°C에서 저장하였다. 이는 PEG가 상온상태에서 굳어지기 때문에 굳어지는 것을 막기 위해 55°C에서 저장하였다. 매물 처리된 시료로부터 면도칼을 사용하여 횡단면, 방사단면과 접선단면을 준비하였다(Exley et al., 1974). 면도칼로 절단된 단면을 지나는 입방체 모양의 시료를 목편에서 떼어낸 다음 매물 매질을 제거하기 위해 따뜻한 증류수로 여러 번 세척하고 인공건조 시켰다. 건조된 시료는 주사전자현미경 시료대 위에 고정하고 sputter coater에서 gold로 대략 300Å가 되도록 코팅한 다음 25kv에서 JEOL-JSM5410 주사전자현미경으로 관찰하였다.

투과전자현미경 관찰용 시료는 관찰하고자 하는 부위로부터 1mm<sup>2</sup> 정도 크기의 작은 목편을 채취하였다. 먼저 1차고정으로 0.075M Sodium Cacodylate 완충액에 혼합하여 제조한 2.5-3.0% glutaraldehyde 용액(pH 7.2-7.4)으로 시편을 3시간 고정된 뒤 0.5M Sodium Cacodylate 완충액으로 3회 세척하되 세척은 완충액 1회당 10분간 침지하였다. 2차 고정으로 1.0M Sodium Cacodylate 완충액에 용해하여 제조한 2.0% osmium tetroxide 용액(pH 7.2-7.4)으로 시편을 2시간 고정한 다음 즉시 0.1M Sodium Cacodylate완충액에 침지한 상태에서 냉장실에 하룻밤 방치해 두었다. 그리고 나서 30, 50, 70, 90% propenoxide 로 각각 15분간 침지한 다음 100% propenoxide에 10분간씩 3회 침지시켜 탈수하였다. propenoxide에 용해하여 제조한 50% Spurr's resin 용액으로 2시간 처리한 다음 순수 Spurr's resin 용액에서 하룻밤 처리하였다. 이때 시편은 vial에 넣은 다음 rotator에서 계속 회전시키면서 수지를 시편에 침투시켰다. 100% Spurr's resin용액으로 3시간동안 처리한 후 시편을 capsule 에 넣은 다음 70°C oven 에 하룻밤 방치하여 수지를 경화시켰다.

절편을 제작하기위해 먼저 포매 된 시료 block의 불필요한 부분을 사다리꼴 모양으로 rough trimming한 후 해부현미경 하에서 면도칼을 사용하여 trimming한다. 그리고 나서 초박절편기를 사용하여 절편을 0.5-2 $\mu$ m 두께로 절삭하고 염색하여 편광현미경으로 관찰한 후 원하는 부분을 두께 100nm의 초박편을 절삭하고 grid에 올린 다음 50% ethanol의 포화 acetate 용액과 납 용액으로 2중 염색하여 관찰하였다.



**Fig 6. Macroscopic feature showing development of ring and radial checks.**  
 K: Korean red pine; R: radiata pine; TYP: Fomitopsis palustris; GT: Gloeophyllum trabeum; %: Target weight loss level.

## 2) 실험 결과

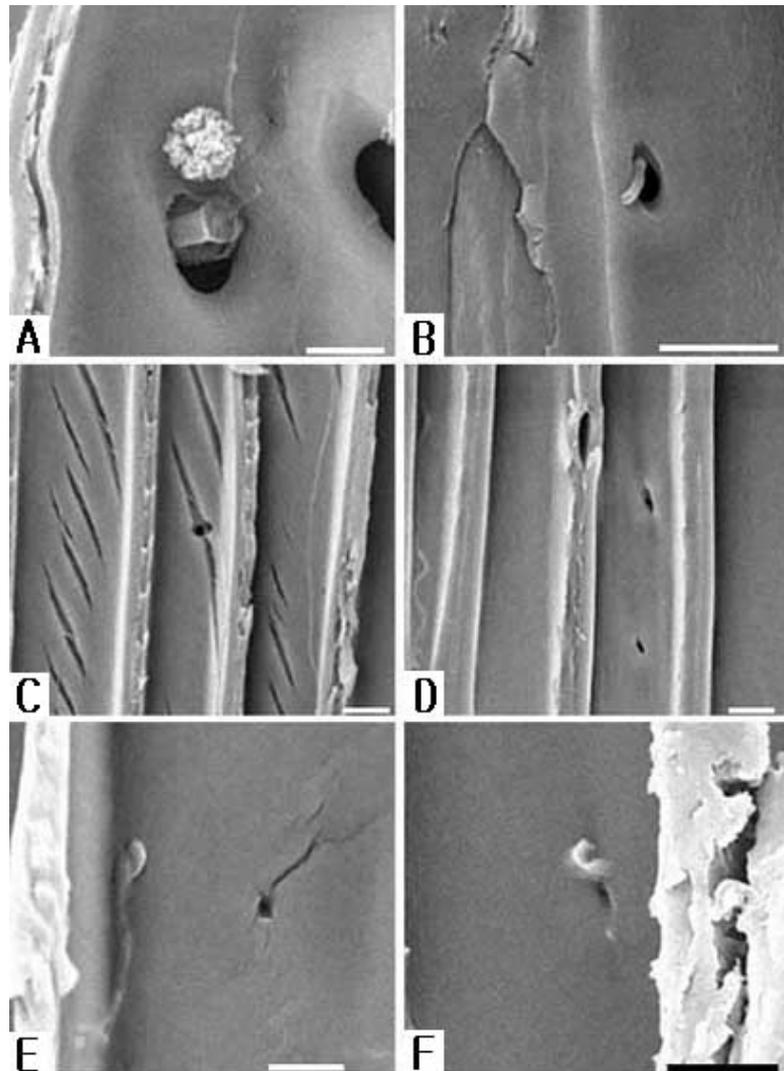
부후된 목재는 대개 연하거나 부서지기 쉬운 특성을 지니고 있기 때문에 현미경으로 관찰하기 위해 만족스럽게 시편을 제조하기 어려웠다. 특히 부후가 진행됨에 따라 목리를 가로질러 절단할 때 상당한 일그러짐으로 어려움이 발생했다 따라서, 현미경적 관찰을 위한 작은 시료들은 건조 및 무게 측정 없이 FAA에 담가 고정시켰다. 증류수로 여러 번 헹구어 고정액을 제거한 다음 편광현미경 관찰용 시험편은 Berlyn과 Miksche(1976)의 방법을 따라 파라핀으로 매몰시키고 절삭한 뒤 일부 박편들을 picro aniline blue 방법(Wilcox 1964)에 따라 2중 염색을 하여 영구시편을 만들어 관찰하였다. 파라핀은 진전된 부후단계에서 시편을 만들 때 꽤 적합하다고 입증되었다. 또한 FAA로 고정한 시편을 polyethylene glycol로 매몰한 다음 면도칼로 절삭하고 그 후 용매 치환법으로 건조해 주는 방법은 부후된 목재로부터 주사전자현미경 관찰용 시료를 제작하는데 있어 하나의 우수한 기술이 될 수 있는 것으로 밝혀졌다. 면도칼에 의한 절삭 과정 중에 있어 polyethylene glycol 매질에 의해 부여된 기계적 지지 그리고 용매 치환법에 따른 건조 중의 과도한 수축 억제는 시료 제작 동안 인위적인 결함을 최소화시켜 주게 된다. 이 방법을 사용함으로써 목재 시편 내부에 균사의 건조되지 않은 형태와 본래 위치가 잘 보존될 수 있었다. 또한 이 방법을 통해 부후된 목재 시편의 조직이 흐트러짐 없이 그대로 잘 보존되었고 따라서 부후의 진행 단계에 따른 세포벽 구조의 변화를 쉽게 관찰할 수 있었다.

또한 투과전자현미경을 사용하여 모든 세포벽의 열화에 따른 초미세구조적 변화를 정확하게 관찰할 수 있었다. 그러나, Crack과 cavity가 다당류의 과도한 손실로 인해 세포벽에서 관찰되었고 sectioning 과정 중 일부 연구자들이 lignin이 열화된 것으로 보여주었던 중간층의 chatter mark가 생성되었다(Fig.12B). 전자현미경에서 관찰된 일부 생리학적 특징이 부후 또는 시편제조과정 동안 세포의 팽창과 건조로 인해 일어날 수 있다는 가능성이 Liese(1970)에 의해 보고되었다. 또한 셀룰로오스 결정영역의 분해로 약해진 세포벽은 시료준비과정 중 영향을 받아 분리되거나 wavy 모양이 관찰되었다(Fig17B).

### 가) 균사의 이동과 분포

Proctor(1941)는 균사가 벽공막과 벽공구를 통하거나 또는 천공을 통해 인접세포로 직접 침투한다고 주장하였으며 또한 천공의 생성은 갈색부후균과 백색부후균을 다른

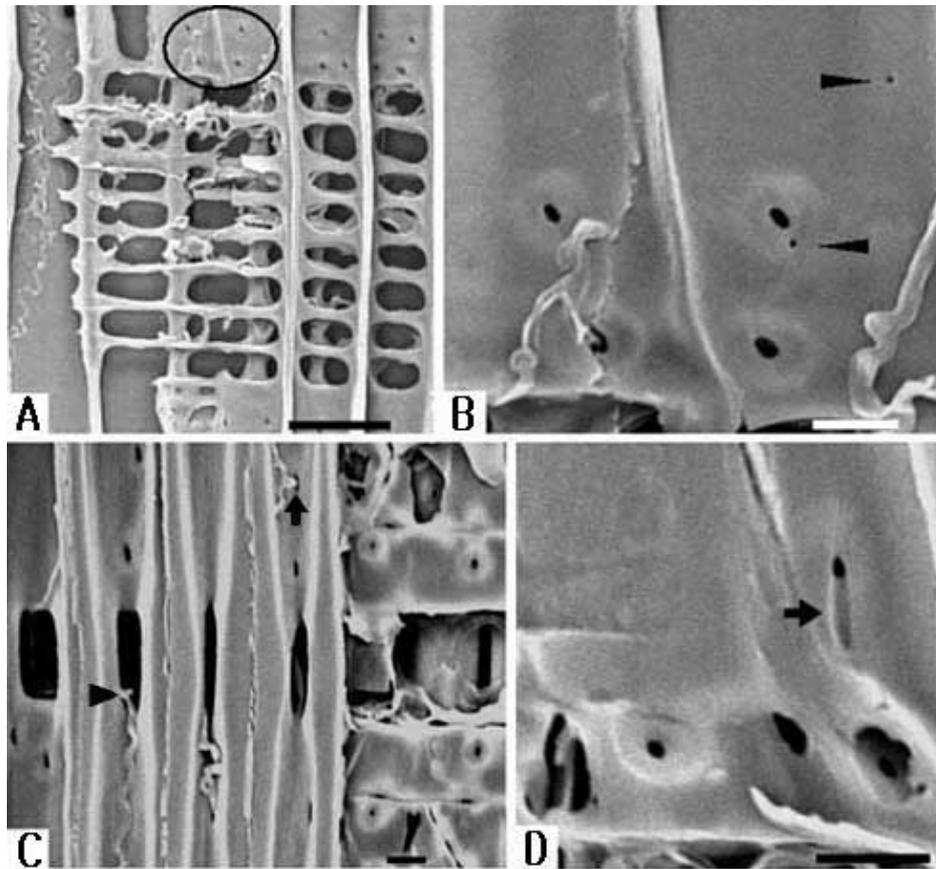
균과 구별시켜주는 가장 큰 특징이라고 보고하였다. 그러나 갈색부후균인 *Poria monticola*의 경우에는 부후 초기에 균사가 대부분 벽공을 통해 침투하는 것이 관찰된 것과 같이 대부분의 갈색부후균은 부후 초기에 천공을 통한 침투보다는 벽공을 통한 침투가 더 일반적인 것으로 알려져 있다(Liese and Schmid, 1964; Greaves and Levy, 1965; Wilcox, 1968). 또한 *L. lepideus*에 의해 부후된 소나무재의 경우 벽공막이나 천공 그리고 유연벽공구를 통한 균사의 침투는 관찰하지 못하여 균사는 방사조직을 통해 목부 깊숙이 침투한 후 주로 교분야벽공을 통해 가도관으로 이동한다고 알려져 있다(Mi Kwon, 1993). 그러나 본 실험에서 천공이 부후초기에서 발견되었고(Fig.7B, D & F) 부후후기에서조차 비교적 그 수가 변하지 않았기 때문에(Fig.7C & E) 부후 초기동안 가도관의 대부분의 천공이 생성되었다고 사료된다. 부후초기에서 균사 침입은 주로 유연벽공을 통해 일어났고(Fig.7A) 드물게 천공을 한 다음 그 곳을 통해 침투하였다(Fig.7B & F). 천공은 가도관의 벽에서 주로 관찰되었고 부후가 진행된 단계에 있어서조차도 천공이 나타났기 때문에 대부분의 천공은 부후 초기 단계에서 형성된 것으로 가도관으로의 균사침입을 도와준다는 것이 명백해졌다. 균사는 대개 세포축에 대해 직각으로 가도관 세포벽을 관통하여 구멍을 뚫지만 세포축에 대해 경사진 각도로 형성된 천공과 동그랗게 형성된 천공이 관찰되었다(Fig.7D, E & F). 또한 부후가 진행됨에 따라 방사가도관 유연벽공으로 균사가 침투되었다(Fig.8).



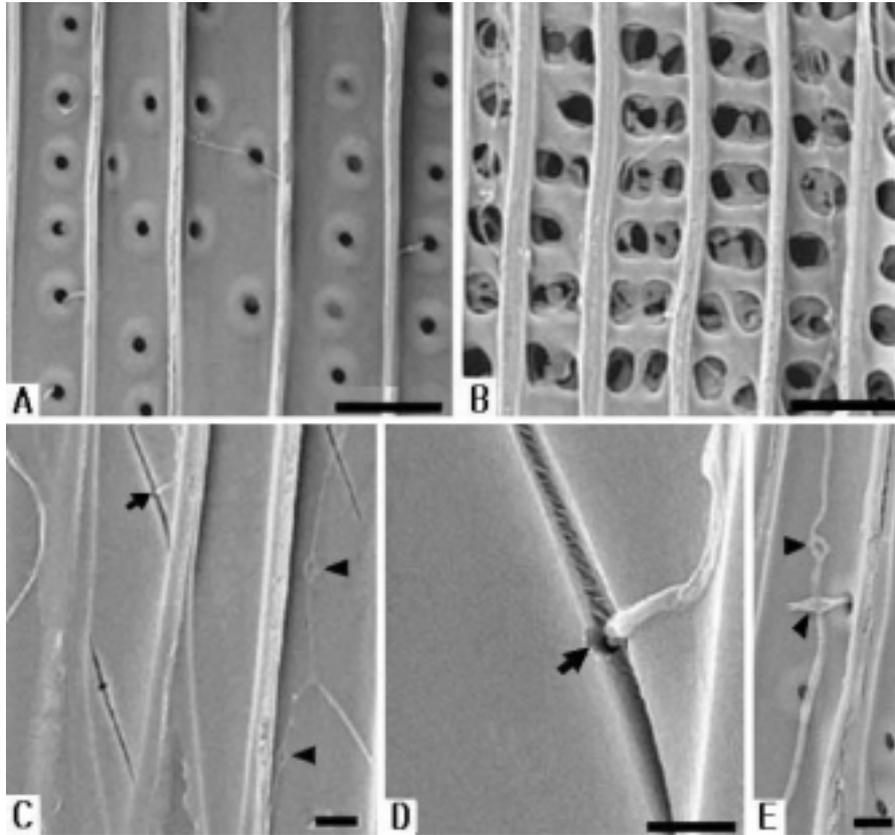
**Fig.7. Radial surfaces showing openings for passage of hyphae in tracheid walls.** A (R-GT 10% weight loss): Penetration of a hypha through a bordered pit. B (K-GT 10% weight loss): Penetration of a hypha through a bore hole. C (R-GT 25% weight loss): Formation of spiral checks and a bore hole located in a check in tracheid walls. D (K-GT 5% weight loss) and F (K-TYP 10% weight loss): Formation of slit-like bore holes lying at small angle to cell axis. E (K-TYP 25% weight loss): Formation of a circular bore hole. A-F: SEM; Scale bars: A & E=5  $\mu\text{m}$ , B-D & F=10 $\mu\text{m}$ .

또한 Fine hyphae는 셀룰로오스를 빨리, 깊숙이 침투할 수 있어 bore hole의 생성과 관련이 깊은 것으로 알려져 있지만(Liese and Schmid, 1966; Jutte and Sachs, 1976), Highley 등(1983b)은 11종의 갈색부후균을 이용한 실험에서 microhyphae에 의한 세포벽 침투를 관찰하지 못함에 따라 microhyphae는 갈색부후균의 셀룰로오스 열화와 관련이 없다고 결론지었다. 그러나 Chou와 Levi(1971)는 bore hole hyphae가 세포벽의 열화를 일으키는 효소의 근원이라 주장한 것처럼 부후초기에서 대부분의 미세균사가 유연벽공과 교분야 벽공에 침투되어 있는 것을 관찰할 수 있었으며(Fig.9A & B) 미세균사가 천공을 통해 침투되는 것을 관찰하였다(Fig.9C & D). 따라서 어느 정도 세포벽 열화에 영향을 미칠 수 있다고 생각된다.

부후 초기 춘재에서 균사의 분포가 더 많았음에도 불구하고 춘재와 추재간의 저항성에서도 춘재보다 추재에서 더 많은 할렬, cavities 및 열화가 발생한 것을 관찰할 수 있었기 때문에(Fig.10B & D) 균사의 분포와 열화정도는 아무런 상관이 없다는 Waterman and Hansbrough(1957)의 주장을 확인할 수 있었다. 하지만 부후 후기에는 춘추재 모두에 균사가 고르게 분포되어있었다.



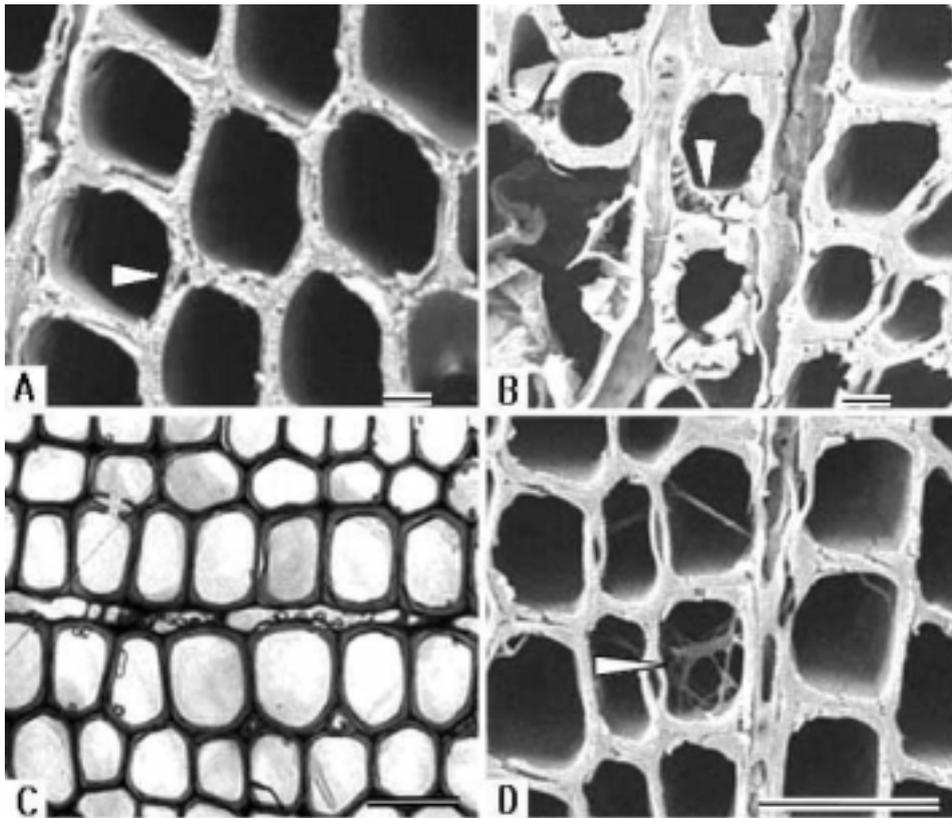
**Fig.8. Radial surfaces showing penetration of hyphae.** A (K-GT 20% weight loss): Penetration of hyphae through bordered pits of ray tracheids (circle). B: Enlargement of circle area in A showing formation of bore holes in pit border of ray tracheid and wall of tracheid (arrowhead). C (K-GT 25% weight loss): Penetration of hyphae through cross-field pits (arrowhead) and bordered pits of ray tracheids (arrow). D (K-GT 20% weight loss): Depressed hyphal trace (arrow). A-D: SEM; Scale bars: A=50 $\mu$ m, B-D=10 $\mu$ m.



**Fig.9. Radial surfaces showing penetration of hyphae.** A (K-GT 5% weight loss): Penetration of microhyphae through tracheid bordered pits. B (K-GT 5% weight loss): Hyphae passing through cross-field pits. C and D (R-GT 25% weight loss): Microhyphae penetrating through bore holes in spiral check (arrow) and having clamp connection (arrowheads). E (K-TYP 15% weight loss): Hyphae with clamp connection (arrowheads). A-E: SEM; Scale bars: A & B=50 $\mu$ m, C & E=10 $\mu$ m, D=5 $\mu$ m.

대부분의 균사가 비교적 방사조직과 그에 인접한 가도관 내강에서 쉽게 관찰되었고 (Fig.11A & B) 균사의 분포는 리그닌의 농도가 상대적으로 높은 cell corner 부위에 균사가 집중적으로 분포하는 것을 관찰 할 수 있었다(Fig.10C). 이러한 현상은 셀룰로오스 이외의 다른 목재 구성 성분이 셀룰로오스의 열화를 촉진시켜주기 때문이라는 Nilsson(1974)의 주장과 일치 하였다. 또한 부후가 진행됨에 따라 격쇠모양의 균사와

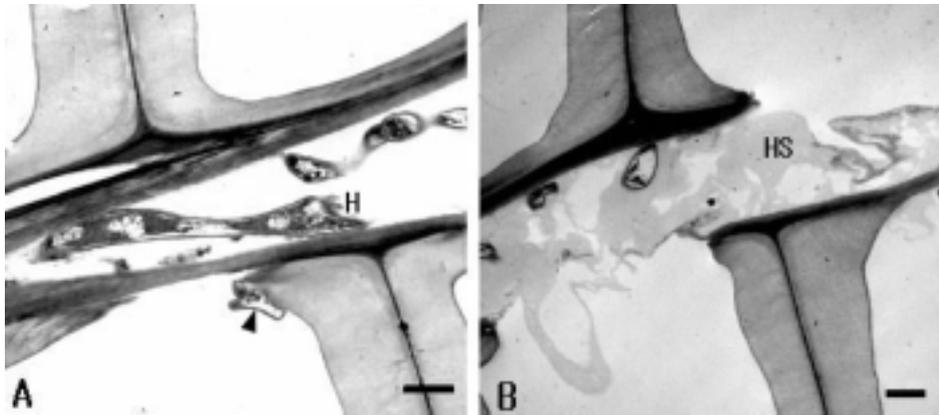
거대 균사가 가도관 세포벽에서 축방향으로 길게 뻗어있는 것을 쉽게 관찰할 수 있었으며(Fig.9C & E, 12A & B) 수많은 미세균사가 가도관 내강 전체에 걸쳐 분포하고 있었다(Fig.12C). 교분야 벽공내에 균사체의 형성을 쉽게 관찰할 수 있었다(Fig.12D & E). 부후후기에서 방사조직을 구성하는 세포벽이 거의 분해되어 양 끝의 방사가도관부분의 세포벽을 제외하고 제거되어 중앙에 균사체로 채워져 있었다(Fig.13).



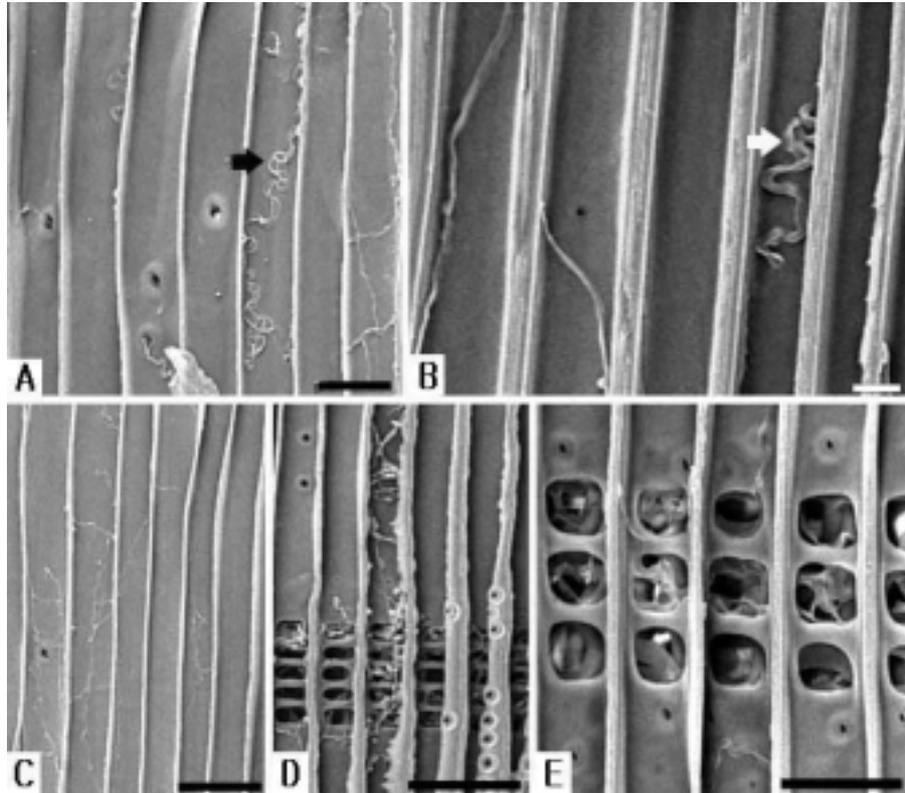
**Fig.10. Transverse surfaces showing structural changes of tracheid walls (A & B) and distribution of hyphae (C & D).** A (R-TYP 5% weight loss): S2 layer of the secondary wall having a porous appearance (arrowhead). B (R-GT 5% weight loss): Development of radial checks or voids (arrowhead) in S2 layer. C (R-TYP 10% weight loss): Hyphae located in ray and tracheids. D (K-GT 10% weight loss): Development of mycelia (arrowhead) in tracheid lumina adjacent to ray. A, B & D: SEM; C: LM; Scale bars: A & B=10 $\mu$ m, C & D=50 $\mu$ m.

나) 미세구조 변화

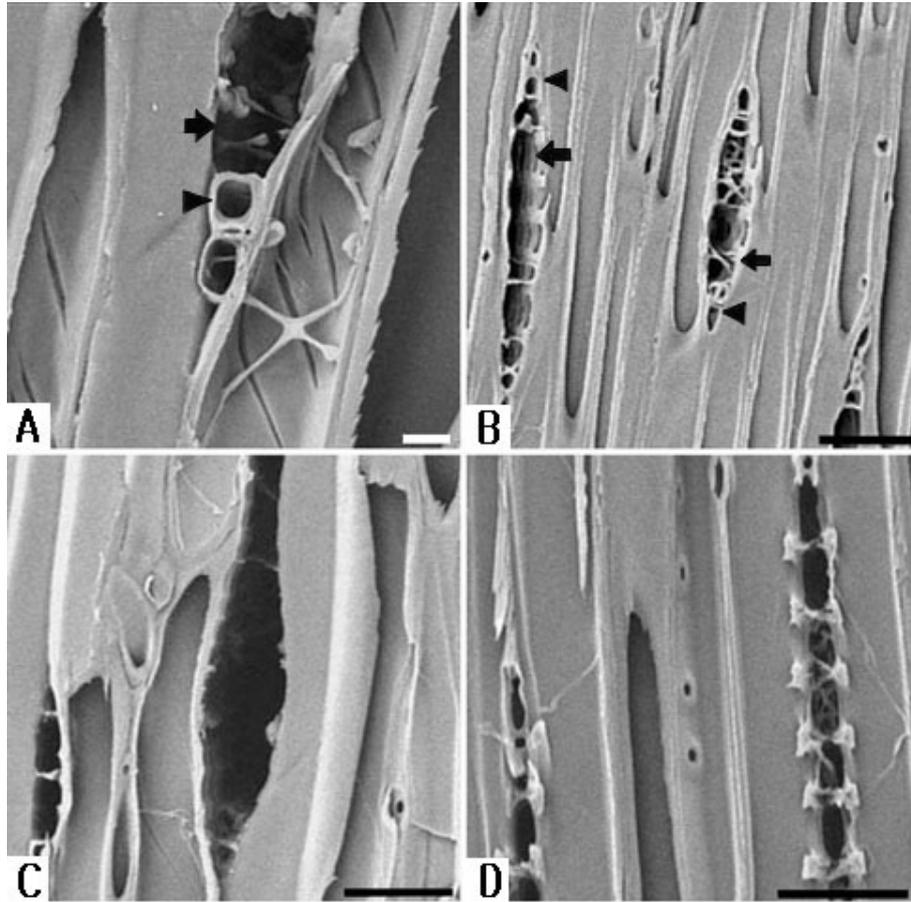
부후초기에서 TEM을 통해 셀룰로오스 물질의 분해 과정 중 여러 갈색 부후균의 균사를 종종 에워싸는 균사초가 본 연구에서 쉽게 관찰되었다(Fig.14). 균사초(Hyphal sheath)는 세포벽 분해산물을 용해시켜 흡수하고 목재 세포벽으로의 효소 이동을 용이하게 해주는 역할을 담당하는 것으로 알려져 있다(Jutte and Sachs, 1976; Leightley and Eaton, 1980).



**Fig. 11. Transverse surfaces showing distribution of hyphae.** A (K-GT 10% weight loss): Hyphae (H) with sheath in ray and a hypha attached to innermost S3 layer (arrowhead). B (K-GT 10% weight loss): Degradation of tracheid walls adjacent to ray and penetration of hyphal sheath (HS) into tracheid lumen. A & B: TEM; Scale bars=2 $\mu$ m.



**Fig. 12. Radial surfaces showing distribution of hyphae.** A (R-GT 15% weight loss) and B (K-GT 25% weight loss): Hyphae (black arrow) and a large hypha (white arrow) elongated along the cell axis in tracheids. C (R-TYP 20% weight loss): Microhyphae distributed throughout tracheids. D (K-TYP 20% weight loss): Hyphae-filled cross-field pits and a tracheid. E (K-GT 25% weight loss): Hyphal colonization in cross-field pits. A-E: SEM; Scale bars: A & E=50 $\mu$ m, B=10 $\mu$ m, C & D=100 $\mu$ m.



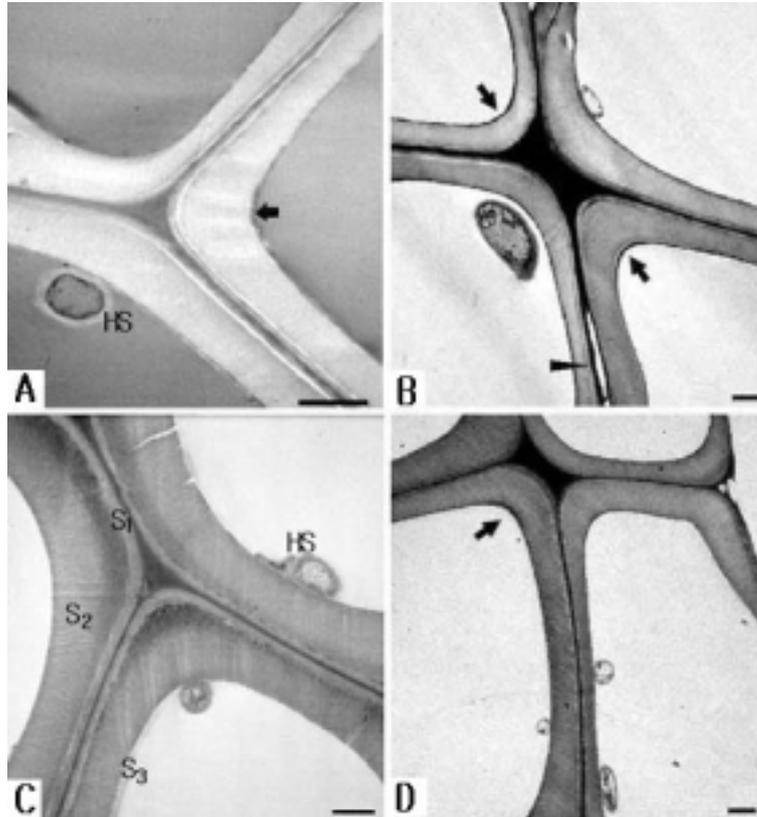
**Fig. 13. Tangential surfaces showing structural changes of ray cell walls.** A (R-GT 20% weight loss) and B (K-TYP 20% weight loss): Degradation of ray parenchyma cell walls (arrow) but intact ray tracheid walls (arrowhead). C (R-TYP 20% weight loss): Decomposition of all the cell walls in uniseriate and fusiform rays. D (K-GT 15% weight loss): Development of mycelia in decomposed ray cells. A-D: SEM; Scale bars: A=10 $\mu$ m, B-D=50 $\mu$ m.

부후가 진행됨에 따라 세포내강에 균사가 약간 존재할 뿐만 아니라 대부분의 세포 내강에 균사 존재하지 않음에도 불구하고 세포벽에서 열화가 발생한 것을 관찰할 수 있었다(Fig.14D). 이는 목재 세포벽의 미세공극을 통해 확산될 수 있는 저분자물질이 세포벽 열화에 관여한다는 Highley 등(1983a)의 결과를 뒷받침에 주는 것으로 여겨진

다.

부후가 진행됨에 따라 S<sub>1</sub>층이나 S<sub>2</sub>층에 비해 S<sub>3</sub>층의 전자밀도가 매우 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있었는데(Fig.14B & D) 이러한 현상은 Messner and Stachelberger(1984) and Messner et al.(1986)이 보고한 바와같이 phenolic units가 demethylation되어 생성된 dihydroxyphenolic substances와 OsO<sub>4</sub>가 반응하여 생긴 반응산물인 전자와의 친화력이 매우 큰 electron dense particles에 의해 발생한 것으로 여겨지므로 본 연구에서도 세포벽 리그닌의 부분적인 demethylation이 생성되었다는 것을 알 수 있었다.

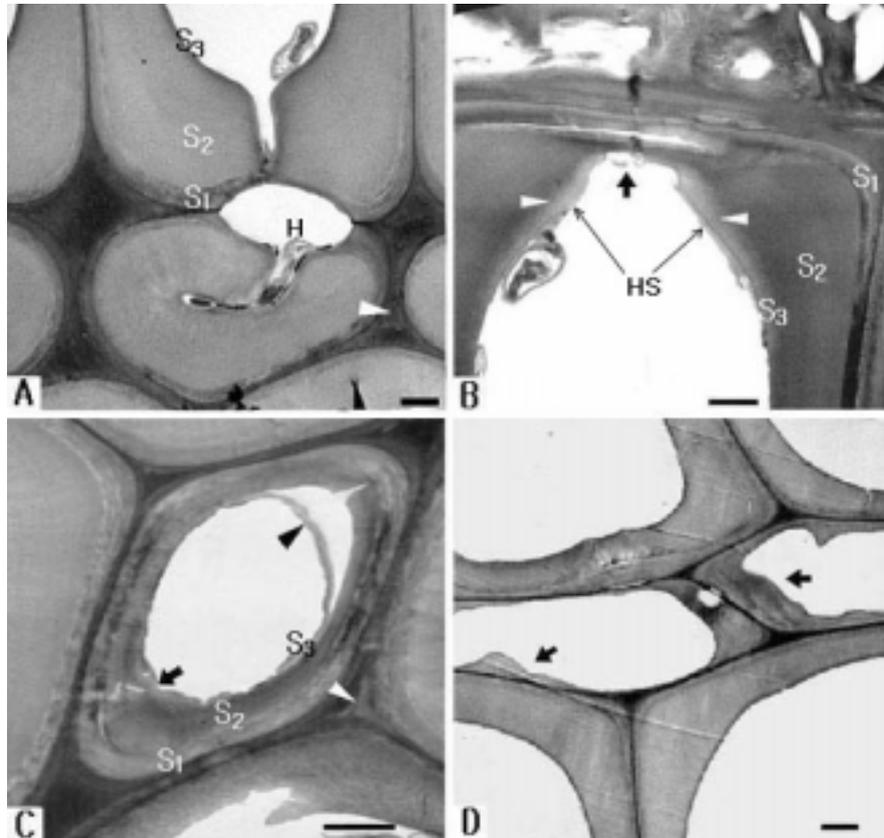
또한 Messner and Stachelberger(1984) and Highley and Murmanis(1985)는 갈색부후균이 단순히 리그닌의 demethylation만을 일으킨다면 OsO<sub>4</sub> 또는 KMnO<sub>4</sub>로 고정하였을 때 전자밀도가 높게 나타나야함에도 불구하고 세포의 중간층과 cell corner 부위에서 전자밀도가 오히려 낮게 나타나는 것으로부터 갈색부후균도 리그닌의 분해를 일으킬 수 있다고 보고한 바 있으며 Mi Kwon(1993) 또한 리그닌을 포함한 모든 세포벽 성분의 분해를 관찰하여 *L. lepideus* 도 리그닌을 분해할 수 있다고 보고하였다. 본 실험에서도 부후 마지막단계에서 중간층의 cell corner 부분의 전자밀도가 다소 낮게 관찰할 수 있었으며(Fig.15A & C) 대부분의 2차벽이 열화되어 있었다(Fig.15B). 이러한 결과는 본 실험에 사용된 갈색부후균도 S<sub>2</sub>층의 선택적인 공격뿐만 아니라 모든 세포벽 구성성분의 분해를 일으키는 균사를 생성한다고 여겨진다.



**Fig. 14. Transverse surfaces showing ultrastructure of tracheid walls fixed with OsO<sub>4</sub>.** A (R-TYP 10% weight loss): Formation of hyphal sheath (HS) and osmiophilic (electron-dense) particles (arrow) in the S<sub>3</sub> layer of cell corner. B (R-GT 15% weight loss): Hyphae in corners of tracheid lumina, osmiophilic particles (arrows), and delamination in true middle lamella (arrowhead). C (R-TYP 25% weight loss): Elongated hyphal sheath (HS) and exposure of cellulose microfibrils in S<sub>1</sub> layer by some decomposition of lignin. D (R-TYP 20% weight loss): Osmiophilic particles (arrow) in the S<sub>3</sub> layer in cell corner. A-D: TEM; Scale bars=2 $\mu$ m.

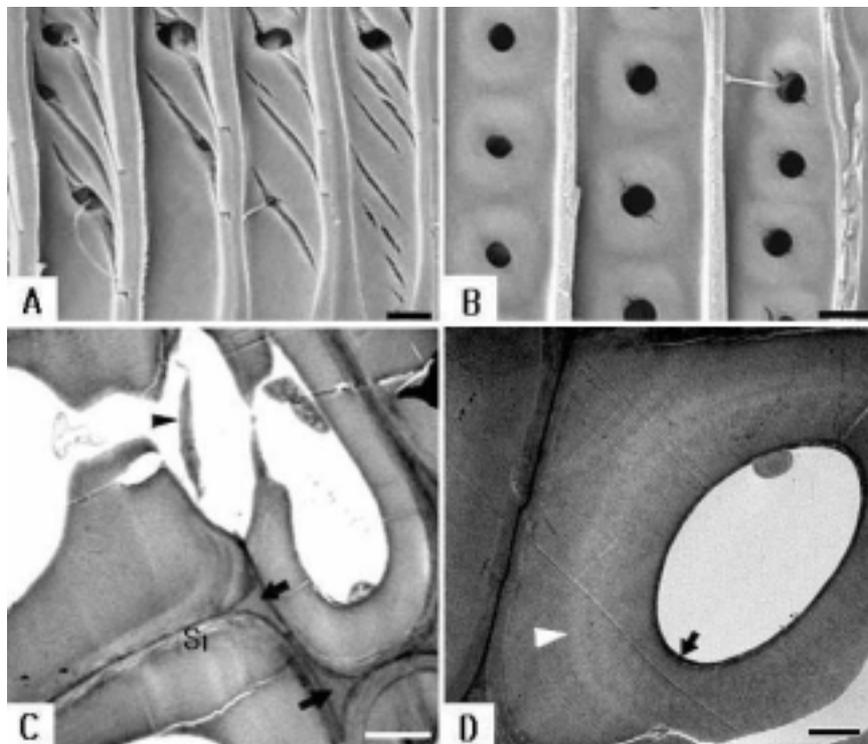
본 실험에서 부후 마지막 단계에서 가도관 2차벽 S<sub>3</sub>층에서 erosion을 관찰할 수 있었다(Fig.15C & D). Wilcos(1968)는 침엽수재의 갈색부후에서 발생한 방사세포의 부분적인 erosion을 관찰하였다. 또한 Liese(1970)는 부후가 상당히 심한 갈색부후재의

S<sub>3</sub>층과 S<sub>2</sub>층에서 부분적인 erosion을 관찰하였고 Mi Kwon(1993)는 일부 가도관 세포와 방사세포에서 국부적인 erosion을 관찰하였다.



**Fig. 15. Transverse surfaces showing ultrastructural changes of tracheid and ray cell walls.** A (K-GT 25% weight loss): Penetration of hyphae (H) into tracheid lumen via bordered pit and low electron-dense true middle lamella in cell corner (arrowhead). B (K-GT 20% weight loss): Heavily eroded secondary wall adjacent to ray (arrow) and S<sub>2</sub> and S<sub>3</sub> layers in the process of degradation (arrowheads) near hyphal sheath (HS). C (K-GT 25% weight loss): Extensively degraded S<sub>2</sub> layer, low electron-dense true middle lamella in cell corner (white arrowhead), localized erosion of S<sub>3</sub> layer (arrow), and separation of S<sub>3</sub> layer (black arrowhead) from S<sub>2</sub> layer in tracheid wall. D (R-GT 25% weight loss): Localized erosion (arrows) in ray cell wall. A-D: TEM; Scale bars=2 $\mu$ m.

특이한 점은 부후가 진행됨에 따라 소나무보다 라디에타 소나무의 가도관 세포벽에서 spiral checks이 더 현저하게 발달되어 있는 것을 관찰할 수 있었다(Fig.16A). 유연벽공연(pit border)의 열화에 대해 Mi Kwon(1993)은 일부 유연벽공연의 S<sub>2</sub>층과 벽공연의 BT(border thickening)층이 부후된 것을 관찰하였으나 대부분 유연벽공이 건전한 상태를 유지하고 있다고 보고하였다. 본 실험에도 역시 일부 유연벽공을 제외하고는 건전한 상태를 유지하고 있었다(Fig.16B). 또한 마이크로피브릴속이 주성분인 유연벽공의 토러스도 대부분 건전한 상태를 유지하였고 벽공 주위의 복합중간층도 cell corner부분에서 낮은 전자밀도를 나타낸 것 외에는 열화 되어 있지 않았다(Fig.16c).



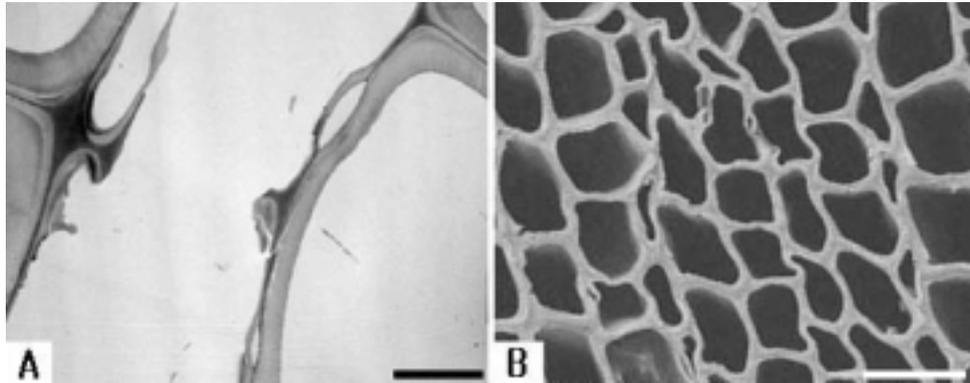
**Fig. 16. Radial surfaces showing wall checks in tracheids (A & B) and intact torus and margo (C & D).** A (R-GT 20% weight loss): Long spiral checks associated with cross-field pit openings. B (R-GT 25% weight loss): Bordered pits of tracheids having short spiral checks in borders. C (K-TYP 25% weight loss): Revealed microfibrils by some decomposition of lignin in S1 layer,

low electron-dense true middle lamella in cell corner (arrows) but intact torus and margo (arrowhead). D (K-GT 25% weight loss): Evidence of polysaccharide degradation in S2 layer (arrowhead) and osmiophilic (electron-dense) particles (arrow) in the S3 layer. A & B: SEM; C & D: TEM; Scale bars: A & B=10 $\mu$ m, C & D=2 $\mu$ m.

#### 다) 세포벽 각 층의 저항력

갈색 부후균에 대한 다양한 목재 구성세포와 세포벽층의 저항력은 세포벽 각 층의 세포벽 밀도, 화학성분(Meier 1955) 그리고 목화 정도에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(Meier 1955; Wilcox 1968). 특히 리그닌은 미생물에 의한 열화에 가장 저항성이 강한 성분으로 알려져 있다(Wilcox 1970; Kuo et al. 1988). 그러나 본 실험에서는 대부분의 가도관에서 리그닌 함량이 상대적으로 많은 cell corner 부위의 세포벽에서 광범위한 열화가 발생한 것을 관찰할 수 있었다(Fig.15A & C). 이러한 현상은 목화된 황마 섬유가 갈색부후균에 의해 쉽게 열화되는 반면 탈리그닌된 섬유에서는 부후가 잘 발생하지 않는다는 점과 여러 가지 방법을 통해 리그닌의 존재가 셀룰라아제 생성을 유도한다는 것을 밝혀낸 Nilsson(1974)에 의해 입증된다.

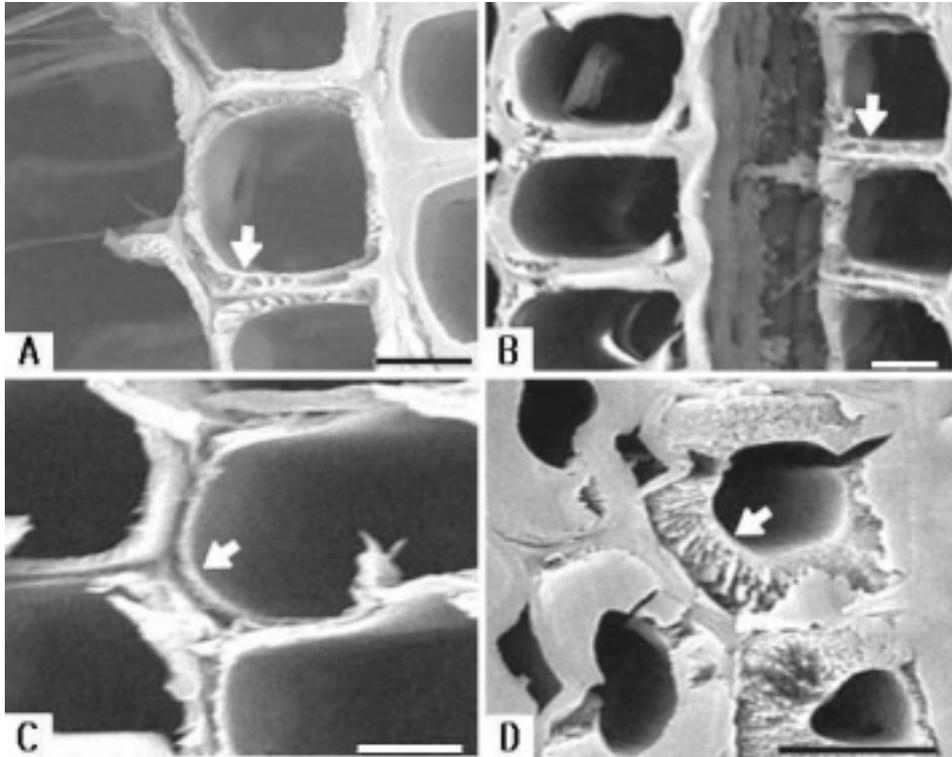
방사 가도관과는 달리 방사유세포의 세포벽에서 먼저 광범위한 열화가 발생되었다(Fig.15 & 17A). 이러한 현상으로 갈색부후에서 방사유세포가 열화저항성이 낮다는 것을 알 수 있었다. 부후초기에서 가도관 2차벽의 S<sub>3</sub>층은 거의 열화 되어 있지 않았지만 S2층이 열화 되어 radial checks or voids가 발달되어 있는 것을 관찰하였다(Fig.10A & B). 이러한 현상은 Eriksson and Blanchette(1990)의 보고처럼 부후가 진행됨에 따라 목재의 다공성(porosity)이 증가하고 셀룰로오스 피브릴간의 결합력이 약해지기 때문이라고 여겨진다. 따라서 이와 같은 2차벽의 할렬은 작은 중량감소를 수준에서도 심한 강도적 손실을 일으키는 원인으로 알려져 있다(Cowling, 1961; Highley, 1977).



**Fig. 17. Transverse surfaces showing ultrastructural changes of tracheid and ray cell walls.** A (R-TYP 15% weight loss): Extensively decomposed ray. B (R-GT 25% weight loss): Degraded tracheids showing a loss of cell wall rigidity and 'wavy' appearance. A: TEM; B: SEM; Scale bars: A=8 $\mu$ m, B=50 $\mu$ m.

부후가 진행됨에 따라 균사가 S<sub>3</sub>층과 접촉하고 있음에도 불구하고 미세구조의 변화가 2차벽 내부 깊숙한 곳에서 시작되는 것이 분명히 관찰되었으며 S<sub>2</sub>층의 열화가 심한 부분에서도 S<sub>3</sub>층은 부후의 영향을 거의 받지 않았다(Fig.18A, C & D). 갈색부후는 일반적으로 각기 다른 세포벽층이 동시에 공격받으며(Cowling, 1961; Wilcox, 1968), S<sub>3</sub>층이 부후의 영향을 거의 받지 않았음에도 불구하고 S<sub>2</sub>층에서 광범위한 열화가 발생하는 현상은 대부분의 갈색부후에서 나타나는 일반적인 특징으로 알려져 있다(Juras다, 1958, 1964; Highley et al. 1985). 또한 침엽수 가도관 2차벽의 S<sub>2</sub>층은 갈색부후균에 의해 가장 먼저 제거되는 층으로 알려져 있다(Meier 1955; Wilcox 1970). 이는 침엽수 2차벽에 존재하는 리그닌의 양은 S<sub>1</sub>과 S<sub>3</sub>층에 비해 S<sub>2</sub>층이 더 적기 때문에(Saka와 Thomas 1982), S<sub>1</sub>과 S<sub>3</sub>층이 나타내는 갈색부후에 대한 더 높은 저항성은 이들 층에 더 높은 lignification의 정도에 의한 것이라 사료된다(Wilcox 1968).

갈색부후균이 분비하는 효소는 리그닌에 대해 demethylation의 정도의 변화만 초래할 뿐 리그닌 matrix는 거의 변화시키지 않는다는 Wilcox(1968)의 보고와 같이 부후가 상당히 진행된 후에도 세포의 형태는 그대로 유지되는 것을 알 수 있었다. 또한 부후후기에도 리그닌이 많은 복합중간층은 거의 모든 세포에서 건전한 상태를 유지했다(Fig.18). 이로써 복합층이 갈색부후에 가장 저항이 강한 층이라는 것을 알 수 있었다.



**Fig. 18. Transverse surfaces showing ultrastructural changes of tracheid walls.** A (K-TYP 15% weight loss), B (R-TYP 15% weight loss), and C (R-TYP 20% weight loss): Extensively degraded S2 layer but intact compound middle lamella and S3 layer (arrow) in earlywood. D (K-TYP 15% weight loss): Extensively degraded S2 layer but intact S3 layer (arrow) and compound middle lamella in latewood. A-D: SEM; Scale bars=10 $\mu$ m.

### 3) 결론

균사의 분포와 이동 면에서 부후 초기 균사는 주로 유연벽공과 교분야 벽공을 통해 이동하였고 균사가 가도관 벽에 직접 천공한 다음 그 곳을 통해 침투하는 것이 가끔 관찰되었으므로 천공은 가도관으로의 균사 침입을 도와준다는 것이 명백해졌고 또한 세포벽 열화에도 어느 정도 영향을 미칠 수 있다고 사료되었다. 또한 대부분의 균사가 방사조직과 그에 인접한 가도관 내강에서 쉽게 관찰되었으며 리그닌의 농도가 높

은 세포내강 내의 모서리(cell corner) 부위에 균사가 주로 분포하는 것이 관찰되었다. 따라서 리그닌과 같은 셀룰로오스 이외의 다른 목재 구성 성분이 셀룰로오스의 열화 촉진과 관련이 있음을 시사하는 것으로 여겨졌다.

미세 구조 변화에 있어 부후가 진행됨에 따라 S<sub>1</sub>층이나 S<sub>2</sub>층에 비해 S<sub>3</sub>층의 전자밀도가 매우 높게 나타났다. 또한 부후 마지막 단계에 있어서는 *G. trabeum*에 의해 부후된 각 시편의 가도관과 방사조직에 세포벽의 침식(erosion)이 형성되었으며 리그닌이 풍부한 세포 모서리(cell corner) 부분의 진정중간층에서 전자밀도가 다소 낮게 관찰되어 본 연구에 사용된 갈색부후균은 리그닌의 디메틸화(demethylation)뿐만 아니라 리그닌을 포함한 모든 세포벽 성분을 열화 할 수 있는 균사를 함께 생성한다고 사료되었다. 또한 부후가 진행됨에 따라 소나무보다 라디아타소나무의 가도관 벽에서 나선 짜집이 더 현저하게 발달되었다.

세포벽의 각 층에 따른 부후 저항성 측면에서 보았을 때 방사가도관과의 벽과는 달리 방사유세포의 벽이 가장 먼저 광범위한 열화를 나타냈기 때문에 방사유세포가 갈색부후균에 대한 저항성이 가장 낮다는 것을 알 수 있었다. 또한 비교적 리그닌이 많은 S<sub>3</sub>층과 균사가 접촉하고 있음에도 불구하고 S<sub>2</sub>층에서 먼저 광범위한 열화가 발생하였다. 그리고 리그닌이 풍부한 복합중간층은 대부분 건전한 상태를 유지하였으므로 리그닌의 양이 갈색부후와 어떤 관련성이 있다고 사료되었으며 또한 복합중간층이 갈색부후에 대해 가장 강한 층이라는 것을 알 수 있었다.

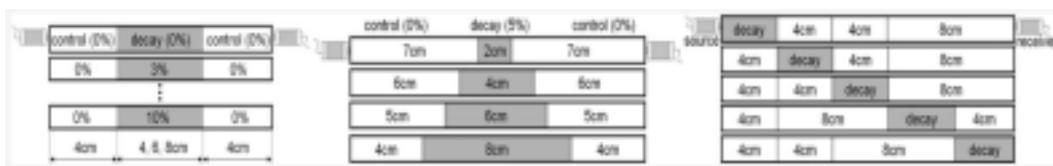
결론적으로, *Fomitopsis palustris*에 의해 부후된 목재 시편에서는 윤열이 그리고 *G. trabeum*에 의한 목재 시편에서는 방사할렬이 대개 발생하였다. 이들 윤열과 방사할렬은 소나무보다는 라디아타소나무에서 더 많이 확인되었다. 부후의 진전에 따른 교분 야벽공 및 천공에서의 나선할렬은 소나무보다 라디아타소나무에서 더 현저하였다. 라디아타소나무의 경우 *Fomitopsis palustris*보다는 *G. trabeum*에 의해 더 많은 나선할렬이 발생하는 것으로 드러났다. *G. trabeum*에 의한 부후 후기 단계에 이르러서는 방사조직 구성 세포벽의 침식이 소나무와 라디아타소나무 모두에서 확인되었으나 가도관의 S<sub>3</sub>층 침식은 소나무에서만 관찰되었다.

**나. 단계별 열화재의 비파괴 평가**

1) 실험 방법

2cm × 2cm × 2cm~8cm 크기의 시편을 제작하여 GT균으로 1~13%의 중량감소가 일어난 인공열화재를 이용했다. PUNDIT-plus 장비를 이용하여 개별시편의 초음파 전달속도를 측정하였다. 시편사이의 경계면에는 grease를 사용하였다.

부후의 정도, 크기, 위치에 따른 초음파 전달 속도의 영향을 평가하기 위하여 Fig.19와 같은 다양한 조합에 대한 초음파 실험을 하였다.



**Fig.19. Measurements of ultrasonic velocity on decayed wood (weight loss, length and location. from left)**

먼저 부후 정도에 따른 영향을 평가하기 위하여 부후 길이를 4cm로 고정된 상태에서 부후율을 나타내는 중량감소율을 3~10%로 변화 시키면서 초음파 전달속도를 측정하였다. 이 후 부후 길이가 6, 8cm 인 시편에 대해서도 동일한 실험을 진행하였다. 이 때 부후 시편 양편에 4cm의 건전한 시편을 덧대어 탐촉자와 접촉면에 대한 변이를 최소화 시켰다.

다음으로 부후 길이에 따른 영향을 평가하기 위하여, 조합된 전체 시편의 길이를 16cm 로 고정하고 중심에 인공 열화로 인한 중량 감소율이 5%로 일정한 부후시편을 2, 4, 6, 8 cm 로 변화 시켜가며 초음파 전달 속도를 측정하였다.

마지막으로 부후의 위치가 표면에서 내부로 변화됨에 따라 초음파 전달속도 미치는 영향을 평가하기 위해, 부후 시편의 위치를 source에서부터 receiver까지 5단계로 옮겨가면서 초음파 전달 속도를 측정하였다.

2) 실험 결과

목재의 부후 정도(중량감소)에 따른 초음파 전달 속도 측정 결과는 Fig20.과 같다. 각 시편에 대하여 초음파 전달 속도는 중량감소 0~5%에서의 차이가 크고, 5%이상

서는 상대적으로 그 차이가 작은 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인을 규명하기 위하여 현미경 관찰을 실시하였다. 현미경 관찰 결과, 중량감소를 5%까지는 존재와 추재 가도관의 S2층에 다공성 구조, 즉 할렬이나 공극이 형성되어 가는 과정이며, 5% 이후에는 공극이나 할렬의 크기가 증가하는 것이 확인되었다. 초음파는 공극이나 할렬이 존재하면 주위를 회절하여 전달되므로 5% 이후 진행되는 부후는 더 이상 큰 영향을 주지 않는다. 즉, 세포벽내의 공극 존재 여부가 초음파 전달 속도에 영향을 하는 것이지 그 크기가 영향하는 것은 아니기 때문이다.

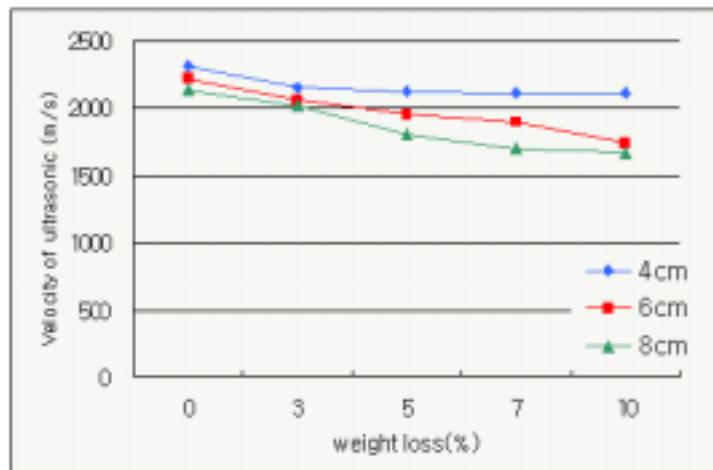


Fig.20. 부후의 정도에 따른 초음파 전달속도

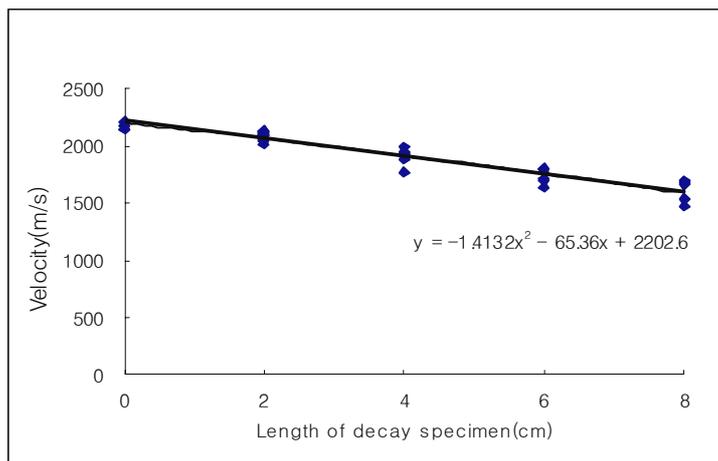
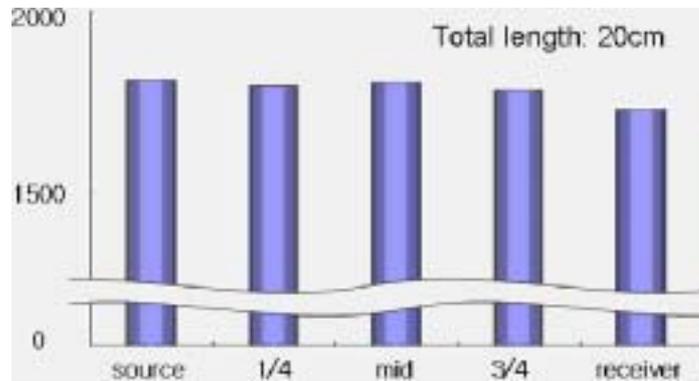


Fig.21. 부후의 크기에 따른 초음파 전달속도

부후길이 변화에 따른 초음파 전달 속도차이는 Fig.21에서와 같이 부후 길이가 길어질수록 초음파 전달 속도가 느리게 나타남을 알 수 있다( $R^2=0.91$ ). 이는 부후 길이가 길어질수록 전체 길이에 대해 밀도가 떨어진 부분의 비율이 커지고 이로 인해 속도가 느려진다.

마지막으로 부후된 시편을 source에서 receiver로 위치를 이동하여 가면서 부후 위치에 따른 초음파 전달속도의 영향을 평가하였다. Fig.22와 같이 부후의 위치는 초음파 전달속도에 영향을 주지 못했다. 따라서 부후 정도나 부후 길이는 초음파 전달 속도를 통해 어느 정도 예측할 수 있으나 그 위치는 초음파 전달 속도의 측정만으로는 불가능한 것을 알 수 있다.



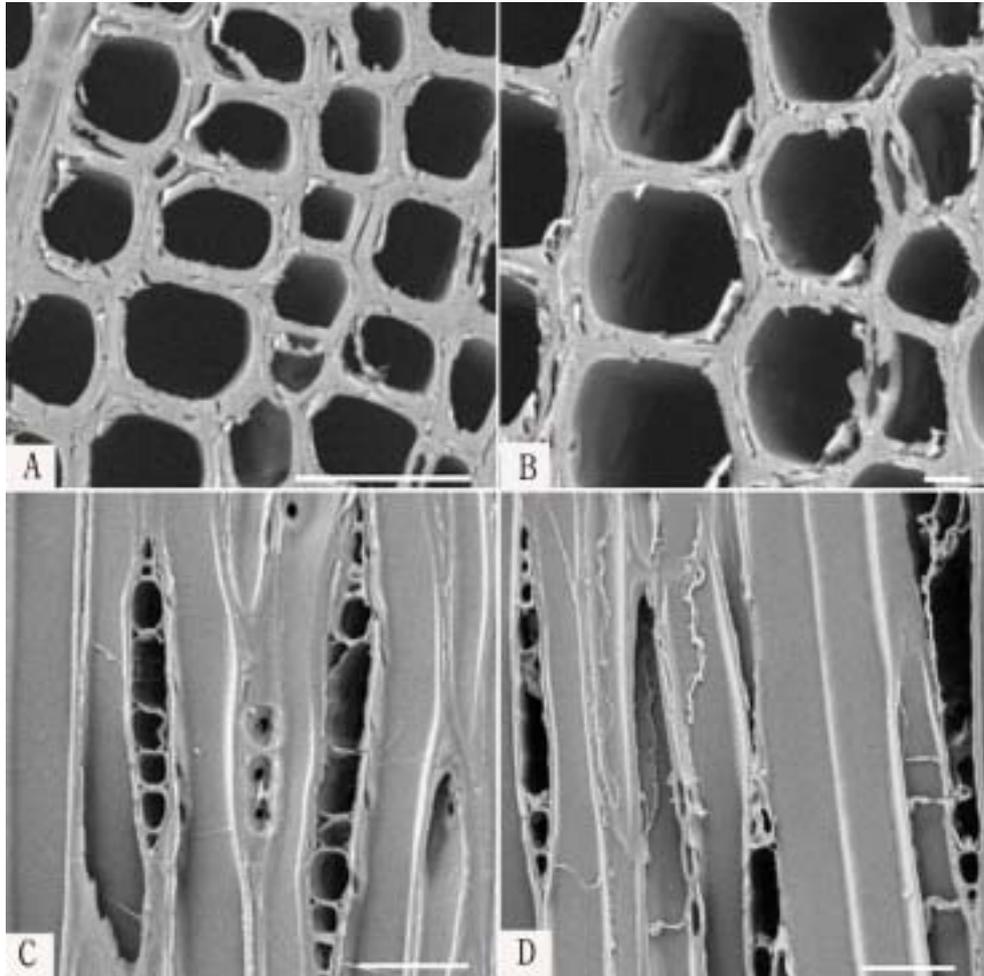
**Fig.22. Ultrasonic velocities according to the position of decay**

### 3) 초음파 측정결과의 변화원인 규명

갈색부후균(brown rot fungi)은 세포벽의 셀룰로오스(cellulose)나 헤미셀룰로오스(hemicellulose)를 선택적으로 공격하며 리그닌(lignin) 구조를 변화시킨다. 이러한 균에 의해 심하게 분해된 목재는 높은 농도의 저분자량 리그닌 때문에 비정상적으로 갈색 또는 붉은 색을 나타내게 된다. 갈색부후 목재는 목리에 직각인 방향으로 할렬이 나타나며 건조 시 입방체 모양의 조각으로 파괴된다. 갈색부후균(brown rot fungi)은 세포벽의 모든 층을 공격하나 셀룰로오스(cellulose)가 풍부한 S<sub>2</sub>층을 먼저 공격하게 된다. 갈색부후는 부후 초기 단계에 심한 강도 저하가 일어나게 되어 전체 목질량의

2/3가 결국 갈색부후균에 의해 분해될 수가 있다. 또한 균체의효소의 결핍으로 인해 셀룰로오스의 결정영역에 대해 상당히 낮은 활성을 나타냄에도 불구하고 낮은 중량감소율 수준에서도 결정영역의 셀룰로오스를 광범위하게 열화시켜 셀룰로오스의 중합도를 현저히 저하시키는 특징을 지니고 있기 때문에 10% 미만의 작은 중량감소율 수준에서도 갈색부후균의 인성(toughness)이 완전히 소실되며 압축과 인장강도의 감소가 발생하는 등, 다른 부후균에 비해 목재의 강도적 성질에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 보고되어 있다. 최근 연구를 통해 리그닌의 실질적인 분해가 어느 정도 발생한다는 것이 확인되고 있으며 갈색부후균도 리그닌을 분해시킬 수 있는 균사를 일부 생성할 수 있음이 보고되고 있다.

‘2항의 가항’에서의 실험결과와 유사하게 중량감소율 5% 춘재가도관 2차벽의 S<sub>2</sub>층에서 다공성 구조, 측 할렬이나 공극이 발달되어 있는 것을 관찰되어 부후가 진행되었음을 알 수 있었으며 중량감소율 10% 춘재가도관 2차벽에서 더 광범위한 열화가 발생되었음을 알 수 있었다(Fig23. A & B). 중량감소율 5%에서 방사조직을 구성하는 세포벽이 분해되어 있음을 관찰할 수 있었으며 중량감소율 10%에서 방사조직의 세포벽중 양 끝의 방사가도관부분의 세포벽을 제외하고 거의 제거되어 있음을 관찰할 수 있었다(Fig23. C & D).



**Fig.23.** A (5% weight loss) & B (10% weight loss) : Transverse surfaces showing structural changes of tracheid walls. C (5% weight loss) & D (10% weight loss) : Tangential surfaces showing structural changes of ray cell walls. A - D: SEM; Scale bars: A,C & D=50 $\mu$ m, B=10 $\mu$ m.

## 라. 열화 단계에 따른 목재의 제반 물성변화 평가

### 1) 물리적 성질

#### 가) 중량감소율

##### (1) 연구방법

###### (가) 공시균

사용 중인 목제품으로부터 분리·동정된 균주중 분리빈도가 높은 균들과 분리빈도는 낮지만 목재 부후능력 평가가 필요하다고 판단된 균들을 공시균(갈색부후균 6속 7종, 백색부후균 14속 18종)으로 선별하였다(Table 2).

###### (나) 중량감소율 평가

공시균의 중량감소율 평가는 토양(soil) 대신 질석(vermiculite)을 사용한 점을 제외하고는 미국목재보존협회 표준규격 AWPA E10-01(AWPA 2001)의 soil-block 시험법에 의거하여 실시하였다. 통상적으로 갈색부후균의 부후능력 평가는 갈색부후균이 선호하는 침엽수 시험편을 사용하며, 백색부후균의 부후능력 평가는 백색부후균이 선호하는 활엽수를 사용한다. 따라서 본 연구에서도 갈색부후균에 의한 중량감소율은 침엽수 대표수종인 소나무(*Pinus densiflora*) 시험편, 그리고 백색부후균의 중량감소율은 활엽수 대표수종인 참나무 속의 굴참나무(*Quercus variabilis*) 시험편을 사용하였다. 공시균의 최대 부후능력을 유도하기 위해 12주간의 강제부후시 공시균 별로 사전에 조사된 최적 생장온도가 배양온도로 적용되었다.

##### (2) 연구결과

갈색부후균 6속 7종과 백색부후균 14속 18종을 대상으로 실시한 12주간의 강제 부후시험 결과, 각 균별 중량감소율과 최적 생육온도를 Table 2에 보여준다.

갈색부후균 중에서는 *Gloeophyllum trabeum*과 *Gloeophyllum sepiarium*이 각각 53.12%, 18.61%의 높은 중량감소율을 나타냈으며, 백색부후균 중에서는 *Cryptoporus volvatus*(20.14%), *Trametes versicolor*(13.25%), *Ceriporia lacerata*(11.51%), *Crustoderma flavescens*(10.90%)가 중량감소 10% 이상을 기록하였다. 특히 채집된 갈색부후균 중 가장 높은 분리빈도를 보인 *G. trabeum*은 목재부후 능력도 가장 우수하였다. *G. trabeum*의 소나무류에 대한 뛰어난 가해능력은 기 수행된 여러 연구결과들과 일치함을 알 수 있다. Hof(1972)는 *G. trabeum*의 소나무류 가해속도가 매우

빠름을 보고한 바 있으며, Carey(1988)와 Kartal(1999)도 구주적송(*Pinus sylvestris*) 변재부를 이용하여 수행한 부후능력 평가에서도 각각 37.1% 및 61.8%의 높은 중량감소율을 나타낸 것으로 보고하였다. 또한 Nicholas (1996)는 *G. trabeum*을 이용한 연구에서 배양기간 4주 만에 southern yellow pine 변재부에서 44.2% 중량감소를 야기하였다고 보고하였다.

백색부후균 중에서는 *Cryptoporus volvatus*가 20.14%로 가장 높은 중량감소율을 보였으나 분리빈도가 0.6% 밖에 되지 않아 실제 자연환경에서는 균간 상호작용에 의해 생장이 억제되는 것으로 사료된다. *Trametes versicolor*는 채집된 부후균 중 분리빈도가 가장 높은 *Schizophyllum commune*(18.9%) 다음으로 높은 분리빈도(14.6%)를 나타내면서 높은 중량감소율을 보임으로써 백색부후균 중에서는 *T. versicolor*가 야외 목재의 주요 부후원인균으로 사료된다. 분리빈도가 가장 높은 *S. commune*의 중량감소율은 3%에도 못 미치는 것으로 나타났다. 이는 기 수행된 연구결과들과 일치하는데 Nillson 등(1983)은 구주적송 변재부를 이용한 4개월간 강제부후시험 결과 약 3~4% 중량감소를 나타내었으며, Schmidt와 Liese(1980) 역시 *S. commune*의 부후능력은 미미하다고 보고한 바 있다.

**Table 2. Weight loss of selected fungi isolated from wood products in services.**

Fungi	Rot type	Optimum growth temperature( °C)	Weight loss(%)		
			average		stdev
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	B	30	53.12	A	5.28
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	B	30	18.61	B	2.58
<i>Fomitopsis pinicola</i>	B	30	4.12	C	3.47
<i>Sistotrema brinkmannii</i>	B	25	1.34	D	0.24
<i>Antrodia serialis</i>	B	25	0.82	D	0.80
<i>Tapinella panuoides</i>	B	25	0.65	D	0.60
<i>Cystidophorus castaneus</i>	B	30	-		-
<i>Cryptoporus volvatus</i>	W	30	20.14	A	3.55
<i>Trametes versicolor</i>	W	30	13.25	B	3.83
<i>Ceriporia lacerata</i>	W	30	11.51	BC	1.72
<i>Crustoderma flavescens</i>	W	35	10.90	C	5.02
<i>Bjerkandera adusta</i>	W	30	7.84	D	2.66
<i>Phanerochate sordida</i>	W	30	7.56	D	1.18
<i>Phlebia subserialis</i>	W	25	5.68	E	1.02
<i>Irpex lacteus</i>	W	35	5.32	E	1.02
<i>Stereum hirsutum</i>	W	20	4.77	E	1.29
<i>Phlebia radiata</i>	W	25	4.67	E	1.06
<i>Schizophyllum commune</i>	W	30	2.58	F	1.07
<i>Hyphochnicium radula</i>	W	25	1.97	F	1.09
<i>Amphinema bissoides</i>	W	25	1.91	F	1.02
<i>Hyphochnicium eichleri</i>	W	25	1.44	F	0.35
<i>Phlebia griseofulva</i>	W	25	1.10	F	0.65
<i>Crustoderma corneum,</i>	W	25	0.91	F	1.07
<i>Hyphoderma praetermissum</i>	W	25	0.86	F	0.69
<i>Peniophora</i> sp.	W	25	0.75	F	1.14

\*1W and B represent white-rot type and brown-rot type respectively.

\*2Values are mean of 10 replicates. Numbers followed by the same letter in each column are not significantly different ( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan method.

나) 평행함수율

(1) 연구방법

*Goeophyllum sepiarium*, *Goeophyllum trabeum*, *Fomitopsis palustris*에 의해 단계적으로 부후된 소나무 톱 시편의 평행함수율을 조사하였다. 톱 시편의 강제부후 방법은 다음의 열화 단계에 따른 목재의 휨성질 평가 관련 연구방법에서 자세히 보여준다. 강제부후가 끝난 후, 시편 표면에 부착된 균사체와 질석을 완벽하게 제거하고 시편을 온도 25℃, 상대습도 65%로 조절된 항온항습기에서 조습하여 조습 무게( $W_e$ )를 측정하였다. 다음으로 시편을 온도 103±2℃로 조절된 건조기에서 전건하고 전건무게( $W_0$ )를 측정하였다. 온도 25℃, 상대습도 65% 조건에서의 평행함수율은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\% EMC = \frac{W_e - W_0}{W_0} \times 100 \quad (\text{식1})$$

(2) 연구결과

초기 갈색부후 목재의 평행함수율은 부후 극초기에는 대조구(중량감소율 0.0%)보다 처음에는 약간 감소하였다가 그 후로는 약간씩 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다 (Table 3). Cowling(1961)은 갈색 부후균 가해에 의한 셀룰로오스 비결절 영역의 파괴로 수분 흡착점인 수산기가 소실되면서 갈색부후재의 평행함수율이 부후 진행과 함께 급격하게 저하된다고 하였다. 이는 중량감소율이 10 퍼센트 이상인 부후목재를 대상으로 조사한 연구결과인데, 중량감소율 10% 미만의 초기 갈색부후재를 대상으로 조사한 본 연구의 결과는 상이하였다. 본 연구에서 평행함수율의 증가는 Winandy와 Morrell(1993)도 지적하였듯이 초기 부후단계에서 셀룰로오스의 분해에 앞서 발생하는 셀룰로오스 결정질 영역의 열화에 의한 내부 수분 흡착점의 노출 때문이라 사료된다.

**Table 3. Equilibrium moisture contents of decayed wood by three brown-rot fungi with various weight losses.**

Fungus	Weight loss(%)				
	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	11.35 (3.78)	11.02 (2.45)	11.36 (3.25)	11.81 (5.44)	12.09 (1.57)
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	11.35 (3.78)	11.13 (3.56)	11.43 (3.71)	11.65 (2.42)	11.64 (2.20)
<i>Fomitopsis palustris</i>	11.35 (3.78)	10.75 (2.75)	10.79 (3.30)	11.26 (4.56)	11.58 (5.57)

2) 역학적 성질

가) 휨성질

(1) 연구방법

(가) 공시 부후균의 선정

전국 19개 지역에서 분리·동정된 11속 18종의 갈색부후균중 분리빈도와 선행 연구 결과 목재부후 능력이 우수한 것으로 판정된 *Gloeophyllum trabeum*과 *Gloeophyllum sepiarium*과 사용중인 야외 목재나 목제품으로부터 분리되지는 않았지만 한국산업규격 KS M1701의 목재방부제 효력시험시 공시 갈색부후균인 *Fomitopsis palustris*, 총 3종을 본 실험의 공시 부후균으로 사용하였다.

(나) 휨 시험편의 준비

경상북도 봉화 산림조합 목재집하장에서 구입한 소나무 생원목으로부터 제재되어 실내에서 함수율 15% 이하로 건조된 두께 3cm의 변재부 판재로부터 횡단면 치수가 25mm × 9.5mm이고 길이가 200mm인 무결점 휨 시험편을 필요량 준비하였다. 준비된 시험편들은 온도 25℃, 상대습도 65% 조건의 항온항습기에서 조습되었다.

조습 후, Stress wave timer (Model 239A, 제조사: Metriguard, Inc)를 사용하여 모든 휨 시험편의 수축방향 응력과 전달시간을 측정하였다. 측정된 응력과 전달시간과 응력과 전달거리로부터 산출된 응력과 전달속도와 시험편의 밀도 (조습 후 중량/조습 후 체적)에 의해 각 시험편의 동적 탄성계수를 구하고, 각 그룹의 동적 탄성계수의 분

포가 비슷하도록 시험편들을 총 14개(3 균주 × 4 부후 단계 + 비멸균 대조구 + 멸균 대조구) 그룹에 배치하였다. 응력과 전달속도 및 동적 탄성계수는 다음의 식2와 식3에 의하여 계산하였다.

$$\text{Stress wave velocity (m/sec)} = \frac{d}{t} \quad (\text{식2})$$

d = distance of accelerometer (m)

t = stress wave propagation time (sec)

$$\text{Dynamic MOE (kg/cm}^2\text{)} = \frac{v^2 \times \rho}{g} \quad (\text{식3})$$

v = stress wave velocity (m/sec)

$\rho$  = density (g/cm<sup>3</sup>)

g = acceleration of gravity = 980 cm/sec<sup>2</sup>

감압주입법(vacuum impregnation method)에 의해 대조구 및 부후 그룹에 속하는 모든 시험편 내로 물을 강제 주입하여 시험편의 함수율을 부후균의 가해에 적당한 수준인 60~80% 선이 되도록 조절한 후, aluminum foil로 완전 밀봉하여 121℃ 온도의 고압멸균기에서 30분간 멸균하였다.

#### (다) 강제부후용 배양기 준비

시중에서 구입한 은박 파운드 몰드에 질석(vermiculite) 40gram과 증류수 120ml를 첨가한 다음 질석 표면을 평평하게 하였다. 질석 표면에 2% malt extract 수용액에 1분간 침지 처리한 feeder strip(60mm×3mm×60mm)을 올려놓고 은박 파운드 몰드를 표고버섯 톱밥 재배용 봉지에 넣어 밀봉하고 121℃ 온도의 고압멸균기에서 30분간 멸균하였다.

멸균 표고버섯 톱밥 재배용 봉지를 충분히 식힌 다음 후 무균상(clean bench) 내에서 봉지 입구를 열고 cork borer를 사용하여 2% malt extract agar(MEA) 평판배지에서 왕성하게 자라고 있는 공시균의 외곽에서 접종원(inoculum)을 채취하여 feeder strip에 접종하였다. 접종 후, 봉지를 밀봉하여 Gaeophyllum trabeum과 Gaeophyllum sepiarium을 접종한 봉지는 30℃, Fomitopsis palustris를 접종한 봉지는 25℃로 온도

가 조절된 항온기에서 균사가 feeder strip을 완전히 덮을 때까지 배양하였다.

(라) 휨시험용 시험편의 강제부후

Fig.24와 같이 휨 시험편의 중앙부 1/3 부분이 feeder strip과 접촉되도록 feeder strip 위에 올려놓은 다음 시험편 윗면에도 다른 feeder strip을 뒤집어 시험편의 중앙부 1/3 부분과 직접 접촉되도록 덮었다. 표고버섯 톱밥 재배용 봉지를 다시 밀봉하고, 균주별로 25℃ 또는 30℃ 항온기에서 배양하면서 중량 감소율의 경사를 유발하기 위해 일정시간 간격으로 균 배양을 중지하였다.

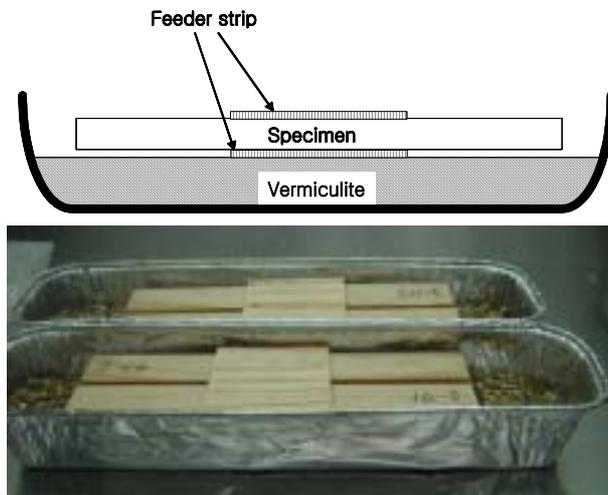


Fig.24. Method used to expose bending specimens to decay fungi.

(마) 중량 감소율 측정

강제부후가 끝난 시험편 표면에 부착된 균사체와 질석을 완벽하게 제거하고, 실내에서 시편의 함수율이 12% 내외가 될 때까지 기건시켰다. 기건 시험편들을 온도 25℃, 상대습도 65%로 조절된 항온항습기에서 재조습한 후 무게를 측정하였다. 측정된 부후 전후의 조습무게를 사용하여 다음의 식4에 의해 중량 감소율(weight loss)을 산출하였다.

$$Weight\ loss(\%) = \frac{(W_b - W_a)}{W_b} \times 100 \quad (식4)$$

Wb = conditioned weight before fungal attack

Wa = conditioned weight after fungal attack

(바) 강제부후 시험편의 응력과 측정

재조습 후, 강제부후 시험편의 수축방향 응력과 전달시간을 Stress wave timer를 사용하여 측정하였다. 측정된 응력과 전달시간과 응력과 전달거리로부터 응력과 전달 속도, 응력과 전달속도와 시험편의 밀도(재조습 후 중량/재조습 후 체적)으로부터 파동 임피던스(wave impedance), 동적 탄성계수를 각각 식 2, 3, 5에 의해 계산하였다.

$$\text{Wave impedance}(kg/m^2 \cdot sec) = v \times \rho \quad (\text{식5})$$

v = stress wave velocity (m/sec)

$\rho$  = density (g/cm<sup>3</sup>)

(사) 휨 시험

휨 시험은 Winandy와 Morrell(1993)이 제안한 180mm 스패의 중앙부 1/3 지점에 하중이 1.25mm/분 속도로 적용되는 4점 하중 방식(four-point loading)으로 만능 강도 시험기(Instron testing machine)를 사용하여 실시하였다(Fig.25). 휨 시험을 통하여 얻어진 하중-변형 곡선으로부터 휨강도(modulus of rupture; MOR), 휨 탄성계수(modulus of elasticity; MOE), 파괴시까지 최대일량(work to maximum load; WML)을 계산하였다.

소형 시험편의 휨 시험시 통상적으로 사용하는 3점 하중(three-point loading) 방식 대신에 4점 하중 방식으로 하중을 가한 이유는 다음과 같다. 3점 하중 방식에서는 Fig.25의 (a)에서 볼 수 있듯이 최대 휨 모멘트가 스패의 정 중앙부, 즉 하중이 적용되는 점에서 발생한다. 그러나 본 실험에서 사용된 강제부후 방식에 의하면 균 가해지는 최소한 feeder strip과 직접 접촉되었던 부분인 시험편의 중앙부 1/3 지점 또는 시험편 전체에 걸쳐 발생하게 된다. 따라서 3점 하중 방식을 이용한 휨시험은 최대 휨 모멘트 발생 위치와 균 가해에 의해 약해진 시험편 부위가 일치하지 않아서 휨성질 감소를 정확하게 평가할 수 없게 된다. 반면에 4점 하중 방식에서는 Fig.25의 (b)에서 볼 수 있듯이 최대 휨 모멘트가 시험편의 중앙부 1/3 지점에서 균일하게 발생하면서 균 가해에 의해 가장 심하게 약해진 부분과 정확하게 일치하므로 균 가해에 따른 휨

성질 감소를 정확하게 평가할 수 있게 된다.

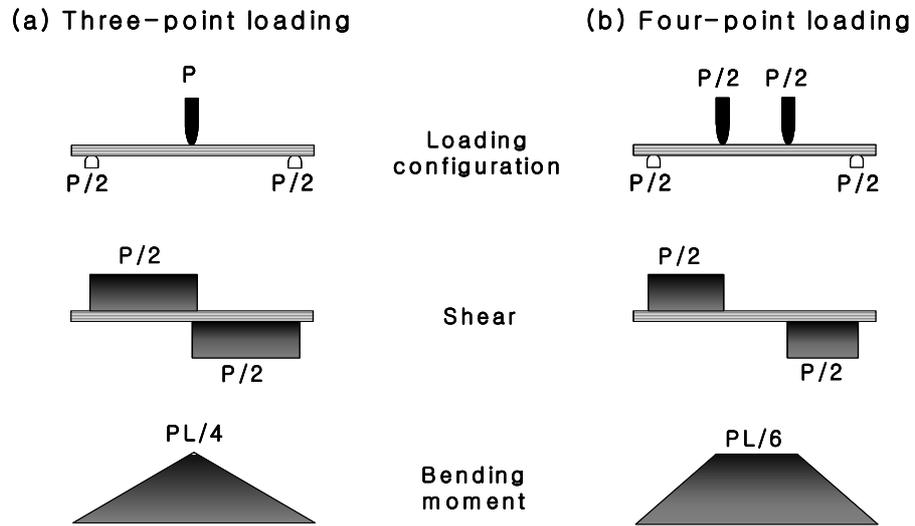


Fig.25. Shear and bending moment diagrams for three-point (a) and four-point at  $L/3$  (b) loading configurations where  $P$  is load and  $L$  is span.

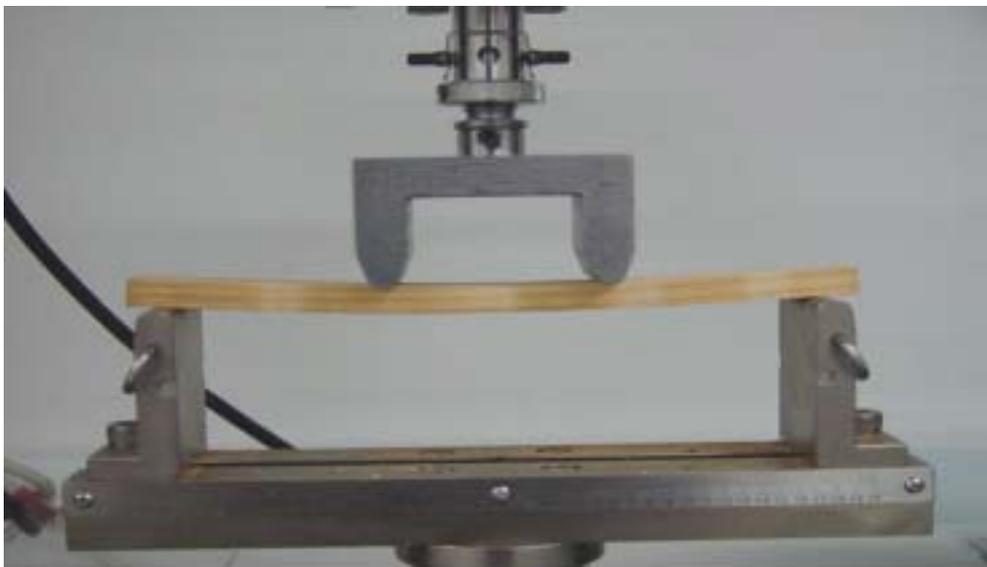


Fig.26. Test setup for four-point bending test.

(아) 자료분석

대조구와 중량감소율을 달리하는 강제부후 그룹 간 휨성질(MOE, MOR, WML) 차이를 general linear model(GLM)을 이용하여 검정하였다. 그리고 통계학적으로 유의성이 인정되는 평균값은 Duncan의 multiple range test를 이용하여 비교하였다. 중량감소율에 따른 휨성질 변화 정도를 예측할 수 있는 최적 model을 개발하기 위하여 단순 및 다중 회귀분석을 실시하였다. 모든 자료의 통계분석은 Statistical Analysis System ver 7.12(SAS Institute, 1988)를 이용하였다.

(2) 연구결과

강제부후 3주 정도가 경과되면서부터는 균종에 관계없이 균사가 시편의 전면에 고르게 퍼졌으나 재색 변화, 시편 표면의 물러짐, 목리움기에 의해 판정된 시편의 부후 형태는 Fig.27에서 볼 수 있듯이 균종에 따라 상이함을 알 수 있었다. *Gloeophyllum trabeum* 가해 시편은 시편의 전체 길이에 대하여 부후가 진행되었으나 *Fomitopsis palustris* 가해 시편은 feeder strip과 직접 접촉되었던 부위에서만 부후가 심하게 진행되었음을 알 수 있었다. *Gloeophyllum sepiarium* 가해 시편의 대부분은 *Fomitopsis palustris* 가해 시편과 마찬가지로 feeder strip과 직접 접촉되었던 부위에서만 부후가 심하게 진행되었으나 일부 가해 시편에서는 feeder strip과 직접 접촉하지 않았던 부위로도 부후가 진행된 것이 관찰되었다. 균종에 따른 부후 부위의 이러한 차이는 부후에 따른 휨성질 변화 측정의 정확도를 영향하리라 사료된다. 참고로 본 연구에서 사용할 4점 하중 방식(four-point loading)을 이용한 부후 시편의 휨시험시 최대 휨모멘트(maximum bending moment)가 발생하는 부위(feeder strip과 직접 접촉하였던 시편 길이로 스펠의 중앙부 1/3 위치)와 부후 부위가 일치하여야만 부후에 의한 휨성질 변화를 정확하게 측정할 수 있다.

또한 *Fomitopsis palustris* 가해 시편 상부와 하부의 부후 정도를 보여주는 Fig.28에서 볼 수 있듯이 시편 하부의 부후 정도가 상부보다 심하였다. *Fomitopsis palustris*과 *Gloeophyllum sepiarium* 가해 시편에서는 상부와 하부의 부후 정도 차이가 컸으나 *Gloeophyllum trabeum* 가해 시편에서는 차이가 비교적 적게 나타남을 알 수 있었다. 균종에 관계없이 시편 하부의 부후가 심한 이유는 질석과 직접 접촉하고 있던 feeder strip이 질석으로부터 물을 흡수하여 시편 하부의 함수율을 항상 부후균의 생육에 적

합한 함수율로 유지하였기 때문이라 사료된다. 휨성질이 압축면(compression side)보다 인장면(tension side) 상태의 영향을 받기 때문에 이러한 사실을 고려하여 추후 휨시험시 모든 시편은 균의 가해가 더 심한 시편 하부가 인장면이 되도록 위치시켰다.



*Gloeophyllum sepiarium*



*Gloeophyllum trabeum*



*Fomitopsis palustris*

Fig.27. Differences in fungal colonization and decay area among three brown-rot fungi.



**Fig.28. Differences in decay area between upper and lower side of specimen attacked by *Fomitopsis palustris*.**

갈색 부후균 가해에 의한 휨성질 감소 정도는 균종에 관계없이 파괴시 최대일량 (WML)>휨강도(MOR)>휨탄성계수(MOE) 순으로 나타났는데(Table 4), 부후에 따른 휨 성질 감소의 민감도는 지금까지 알려진 연구결과들과 대부분 일치한다. 김 등 (1996)은 *Fomitopsis palustris*와 *Gloeophyllum trabeum*의해 부후된 라디에타소나무 초기 부후재에서 에너지 관련 성질인 파괴시 최대일량이 가장 심각하게 감소함을 보고하였다. 또한 Wilcox(1978) 역시 에너지 관련 성질인 인성(toughness)과 충격 휨강도(impact bending strength) 감소가 가장 크다고 보고한 바 있다. 갈색 부후균에 의한 초기 부후가 침엽수재의 역학적 성질에 미치는 영향을 연구한 Mulholland(1954), Winandy와 Morrell(1993), Kim 등(1994), 김 등(1996)은 휨강도 감소가 휨탄성계수 감소보다 크다고 보고하였다. 그러나 Cartwright 등(1931)은 휨탄성계수 감소가 휨강도 감소보다 조금 높은 것으로 보고하였다. 이와 같이 부후에 따른 휨강도와 휨탄성계수 감소 정도가 연구자들 간에 상이한 이유는 이들이 연구에 사용한 공시균과 수종이 서로 달랐기 때문인 것으로 사료된다. 참고로 Wilcox(1978)는 부후에 의한 제반 역학적 성질의 감소 정도는 수종과 부후균의 조합에 따라 상이함을 지적한 바가 있다.

**Table 4. Change in bending properties of Japanese red pine sapwood microbeams decayed by three brown-rot fungi with various weight losses.\*<sup>1</sup>**

Fungus	Weight loss (%)	MOR(kg/cm <sup>2</sup> )		MOE(kg/cm <sup>2</sup> )		WML(kg · mm)	
		Mean	% CV	Mean	% CV	Mean	% CV
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	0.0 (steam sterilized)	768.38 <sup>a</sup> <sub>2</sub> (0.00)	6.51	97,445.00 <sup>a</sup> <sub>b</sub> (0.00)	8.34	737.41 <sup>a</sup> (0.00)	13.38
	2.5	608.25 <sup>b</sup> (20.84)	11.60	106,923.00 <sup>a</sup> (-9.73)	8.75	292.88 <sup>b</sup> (60.28)	36.05
	5.0	538.08 <sup>c</sup> (29.97)	12.04	91,537.78 <sup>b</sup> <sub>c</sub> (6.06)	10.65	257.57 <sup>b</sup> (65.07)	27.83
	7.5	475.26 <sup>d</sup> (38.15)	10.96	85,846.00 <sup>c</sup> (11.90)	14.49	233.74 <sup>b</sup> (68.30)	29.95
	10.0	422.16 <sup>d</sup> (45.06)	13.87	73,500.00 <sup>d</sup> (24.57)	13.59	208.20 <sup>b</sup> (71.77)	40.30
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0.0 (steam sterilized)	768.38 <sup>a</sup> (0.00)	6.29	97,445.00 <sup>a</sup> (0.00)	8.34	737.41 <sup>a</sup> (0.00)	13.38
	2.5	609.81 <sup>b</sup> (20.64)	11.49	99,391.11 <sup>a</sup> (-2.00)	11.83	290.47 <sup>b</sup> (60.61)	27.15
	5.0	536.20 <sup>b</sup> <sub>c</sub> (30.22)	17.97	89,381.00 <sup>a</sup> (8.28)	13.02	270.88 <sup>b</sup> (63.27)	31.06
	7.5	507.18 <sup>d</sup> (33.99)	16.70	78,296.67 <sup>b</sup> (19.65)	10.27	263.90 <sup>b</sup> (64.21)	29.63
	10.0	434.88 <sup>d</sup> (43.40)	27.20	76,444.00 <sup>b</sup> (21.55)	13.52	178.06 <sup>c</sup> (75.85)	46.16

\*<sup>1</sup>MOR is modulus of rupture, MOE modulus of elasticity, WML work to maximum load, and % CV coefficient of variation; Values in parenthesis are percent differences from steam sterilized controls.

\*<sup>2</sup>Values followed by the same letter in each column not significantly different ( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan's multiple range test.

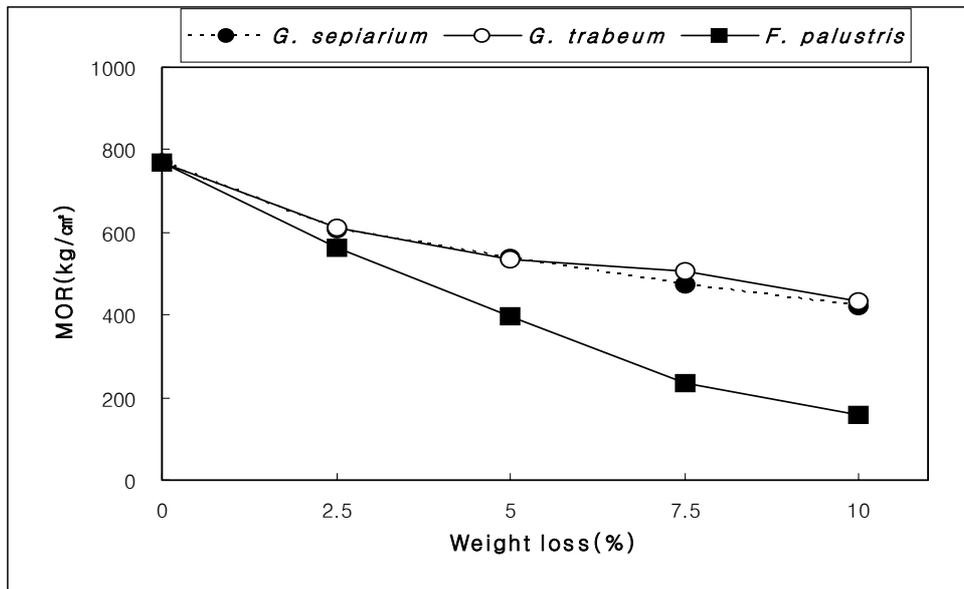
**Table 4. Continued.**

Fungus	Weight loss (%)	MOR(kg/cm <sup>2</sup> )		MOE(kg/cm <sup>2</sup> )		WML(kg · mm)	
		Mean	% CV	Mean	% CV	Mean	% CV
<i>Fomitopsis palustris</i>	0.0 (steam sterilized)	768.38 <b>a</b> (0.00)	6.51	97,445.00 <b>b</b> (0.00)	8.46	737.41 <b>a</b> (0.00)	13.38
	2.5	562.30 <b>b</b> (26.82)	21.84	103,847.39 <b>a</b> (-6.57)	9.69	254.56 <b>b</b> (65.48)	44.15
	5.0	397.76 <b>c</b> (48.23)	23.06	89,105.56 <b>b</b> (8.56)	17.56	134.99 <b>c</b> (81.69)	42.08
	7.5	233.10 <b>d</b> (69.66)	36.90	64,036.00 <b>c</b> (34.28)	24.67	79.52 <b>c</b> (89.22)	50.44
	10.0	156.10 <b>d</b> (79.68)	17.83	46,118.00 <b>d</b> (52.67)	13.04	51.33 <b>c</b> (93.04)	60.97
	0.0 (untreated)	709.80	6.29	99100.83	8.34	658.78	27.52

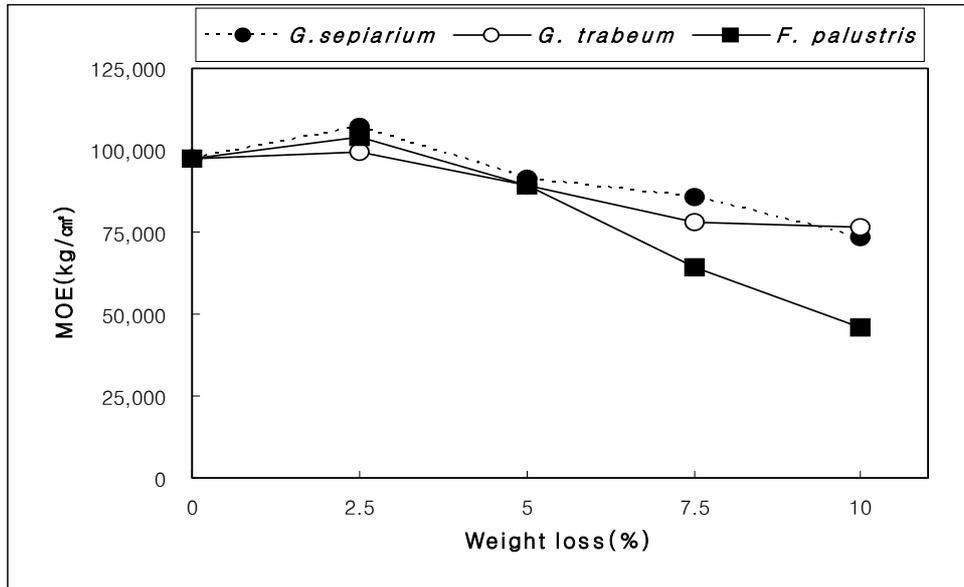
Table 4에서 볼 수 있듯이 휨성질 감소는 중량감소율 10퍼센트 미만으로 정의되는 초기 부후단계부터 심하게 발생하였다. 특히, 휨강도와 파괴시 최대일량 감소는 극초기 부후단계(very early stage of incipient decay)부터 관찰되었다. 휨강도와 파괴시 최대일량은 균종에 관계없이 중량 감소율 2.5 퍼센트에서 각각 20~25 퍼센트 및 60~65 퍼센트 감소하여 대조구와 비교시 감소 정도가 통계적( $\alpha < 0.05$ )으로 유의한 것으로 나타났다. 반면에 휨탄성계수 감소는 중량 감소율 7.5 퍼센트에서 20~35 퍼센트 감소하여 대조구와 비교시 감소 정도가 통계적( $\alpha < 0.05$ )으로 유의한 것으로 나타났다. 이상과 같이 초기 갈색부후는 목재의 역학적 성질을 크게 감소시키나 육안적 진단이 불가능한 관계로 갈색부후균에 의한 구조부재의 초기 부후를 다양한 비파괴시험법을 이용하여 정확히 진단하는 것은 구조물 안전성 측면에서 매우 중요하다. 특히, 갈색부후균이 기주(host)로 침엽수재를 선호하는 사실과 목재 구조물의 구조부재가 대부분 침엽수재라는 사실을 놓고 볼 때, 초기 갈색부후의 정확한 진단의 중요성은 매우

중요하다고 할 수 있다.

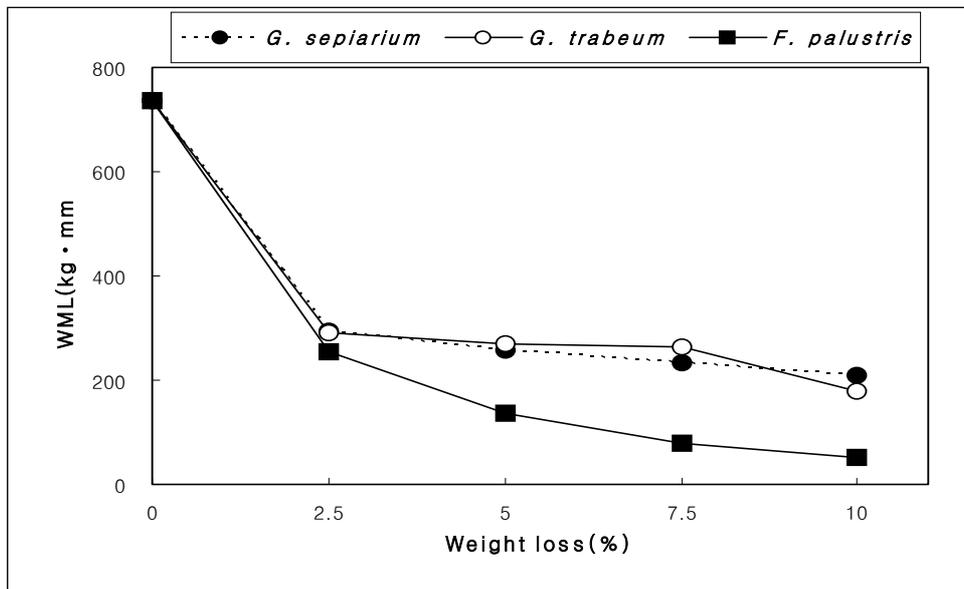
부후 진행에 따른 휨강도 감소율은 극초기 단계(중량감소율 2.5% 단계)에서는 20~25 퍼센트로 균종에 관계없이 급격하게 나타나나, 그 이후로는 균종에 따른 감소율 차이가 관찰되었다(Fig.29 a). *Fomitopsis palustris* 가해의 경우에는 극초기 단계에서의 감소율이 거의 유지되면서 휨강도가 지속적으로 심하게 감소하나 *Gloeophyllum*속 (*Gloeophyllum sepiarium*과 *Gloeophyllum trabeum*) 가해 시편에서는 휨강도 감소가 완만하게 진행되면서 부후가 진행됨에 따라 *Fomitopsis palustris* 가해 시편과 휨강도 감소율 차이가 벌어졌다. 휨탄성계수는 중량감소율 5 퍼센트까지는 균종 간에 감소율 차이가 관찰되지 않았으나 그 이후로는 휨강도 감소율에서와 마찬가지로 *Fomitopsis palustris* 가해 시편과 *Gloeophyllum*속 가해 시편간의 휨탄성계수 감소율 차이가 점차 벌어지기 시작하였다(Fig.29 b). 파괴시 최대일량은 균종에 관계없이 극초기 단계(중량감소율 2.5% 단계)에서 60~65% 정도 매우 심각하게 감소하고 이후로는 감소 정도는 완만하지만 앞서 언급한 다른 성질들과 마찬가지로 균종간에 파괴시 최대일량 감소율 차이가 점진적으로 벌어졌다(Fig.29의 c).



(a) Weight losses vs. MOR



(a) Weight losses vs. MOE



(a) Weight losses vs. WML

Fig.29. Changes in bending properties with various weight losses.

초기 갈색부후가 역학적 성질에 미치는 영향에 대한 총설에서 Wilcox(1978)는 5~10퍼센트 중량감소율에서 갈색부후재의 휨 파괴시 최대일량은 50~70퍼센트, 휨강도와 휨탄성계수는 60~70퍼센트 정도 감소한다고 하였는데, 본 연구의 결과도 휨탄성계수를 제외하고는 이와 비슷하였다. 그리고 Mizumoto(1996)는 *Gloeophyllum trabeum*에 의한 12 퍼센트 중량감소율에서 소나무(*Pinus densiflora*) 변재부 시험편의 휨강도가 70퍼센트 감소한다고 보고하였는데, 이러한 감소율은 본 연구의 *G. trabeum*에 의한 부후 결과와 비슷하였다. 또한 Winandy와 Morrell(1993)도 중량감소율이 11.5퍼센트로 *G. trabeum*에 의해 부후된 Douglas-fir 심재의 휨강도, 휨탄성계수, 파괴시 최대일량 감소율이 각각 43.5, 16.2, 70.5퍼센트라고 보고하였는데, 이 역시 본 연구의 *G. trabeum*에 의한 부후 결과와 비슷하였다.

동일한 부후도, 즉 중량감소율에서 공시균 간의 휨성질 감소율 차이가 발생하는 것은 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 하나는 공시균 간의 강제부후시 시편 가해 형태 차이에 기인한다고 볼 수 있다. *Gloeophyllum sepiarium*과 *Gloeophyllum trabeum*에 비해서 *Fomitopsis palustris*는 강제부후시 feeder strip과 직접 접촉된 시편 부위를 집중적으로 가해하였다. 따라서 *Fomitopsis palustris* 가해 시편에서는 4점 하중 방식(four-point loading)을 이용한 부후 시편의 휨시험시 최대 휨 모멘트(maximum bending moment)가 발생하는 부위(feeder strip과 직접 접촉하였던 시편 길이로 스패의 중앙부 1/3 위치)와 부후 부위가 일치하여 부후에 의한 휨성질 변화가 정확히 반영되었다고 판단된다. 다른 하나는 공시균 별로 3가 철 이온을 2가 철 이온으로 환원시키고 또한 직접 헤미셀룰로오스의 산 가수분해에 참여하는 수산(exogenous oxalic acid) 분비량이 차이 나면서 부후 능력의 차이가 초래되었기 때문이라 사료된다. 갈색부후균에 의한 셀룰로오스 비효소적 산화분해 체계는  $[H_2O_2-Fe^{+++}]$ 와  $[H_2O_2-Fe^{++}]$  체계에 의하는데 후자가 전자에 비해 다당류 가해속도가 빠르다.(Schmidt 1980). 따라서 수산 분비가 많은 경우는 3가 철 이온의 2가 철 이온으로 환원량이 많아지기 때문에 세포벽 구성성분의 비효소적 가해가 신속하게 발생되면서 셀룰로오스의 해중합(depolymerization)에 의한 중합도 저하가 심할 뿐 아니라 수산에 의한 헤미셀룰로오스의 산가수분해가 발생하면서 비슷한 부후도에서도 균종간에 강도 감소의 차이가 발생하리라 본다.

초기 갈색부후에 따른 휨성질 감소 정도를 중량감소율에 의해 예측할 수 있는지를 판정하기 위하여 실시된 강제부후 시편의 중량감소율과 휨성질 간에 실시된 회귀분석

결과를 Table 5에 보여준다.

**Table 5. Results of regression analyses for the prediction of bending properties using weight losses as independent variables.\*1**

Fungus	Bending property	Regression equation	R <sup>2</sup>
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	MOR	-25.198(%WL) + 664.50	0.61
	MOE	-3788.1(%WL) + 112,90	0.60
	WML	-13.709(%WL) + 333.29	0.23
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	MOR	-16.078(%WL) + 643.78	0.33
	MOE	-3,008.2(%WL) + 105,91	0.48
	WML	-7.6368(%WL) + 317.15	0.09
<i>Fomitopsis palustris</i>	MOR	976.948e <sup>-1.6373(%WL)</sup> + 757.036e <sup>-0.155516(%WL)</sup>	0.80
	MOE	63,308.e <sup>-0.101642(%WL)</sup> + 68,976e <sup>-0.101354(%WL)</sup>	0.80
	WML	227.144e <sup>-0.1422467(%WL)</sup> + 913.351e <sup>-1.08544(%WL)</sup>	0.63

\*1MOR is modulus of rupture, MOE modulus of elasticity, WML work to maximum load, and %WL percent weight loss.

중량 감소율과 휨성질 간의 상관관계는 *Gloeophyllum trabeum*을 제외하고는 휨강도 ≥ 휨탄성계수 > 파괴시 최대일량 순으로 나타났다(Table 5). *Gloeophyllum trabeum* 과 *Fomitopsis palustris*를 공시균으로 사용한 라디에타소나무 초기 부후재에 관한 김 등(1996)의 연구에서 중량 감소율과 휨성질 간의 상관관계가 휨강도 > 파괴시 최대일량 > 휨탄성계수의 순으로 우수하게 나타났는데, 이러한 차이는 앞서도 언급한 바와 마찬가지로 균은 동일하나 수종이 다른 이유도 있겠지만 김 등(1996)은 본 연구에서와 달리 3점 하중(three-point loading) 방식에 의해 휨성질을 산출하였는데, 이 역시

양 실험 결과의 차이를 설명할 수 있는 단서가 될 수 있다고 사료된다.

공시균에 따른 중량감소율과 휨성질 간의 상관관계는 *Fomitopsis palustris* > *Gloeophyllum sepiarium* > *Gloeophyllum trabeum* 순으로 나타났다(Fig.30, Fig.31). *Fomitopsis palustris* 초기 부후재에서는 중량감소율과 휨성질간 상관의 결정계수가 약 0.80정도로 매우 양호하였으며, 파괴시 최대일량의 경우는 결정계수가 0.68로 비교적 양호한 상관관계를 보였다. *Gloeophyllum sepiarium* 초기 부후재에서는 중량감소율과 휨성질간 상관의 결정계수가 약 0.60으로 비교적 양호하였으나 파괴시 최대일량의 경우는 매우 낮은 것으로 나타났다. 반면에 *Gloeophyllum trabeum* 초기 부후재에서는 중량감소율과 모든 휨성질의 상관관계가 다른 공시균에 비해서 매우 불량한 것으로 나타났다. 이러한 공시균에 따른 상관관계의 차이는 강제부후시 균종별 부후 위치가 상이한 것보다도 관련이 있을 수 있다고 본다.

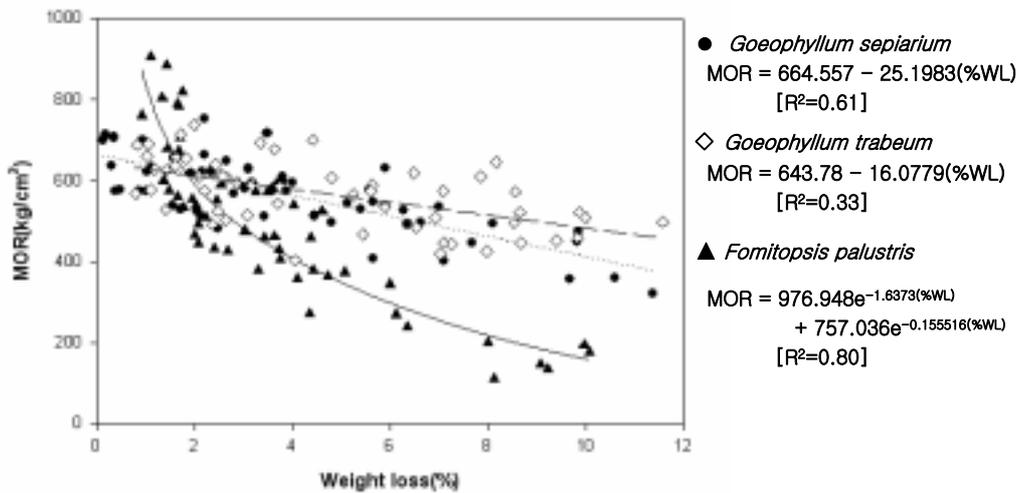


Fig.30. Regression of MOR on percent weight loss of Japanese red pine sapwood beams decayed by three brown-rot fungi.

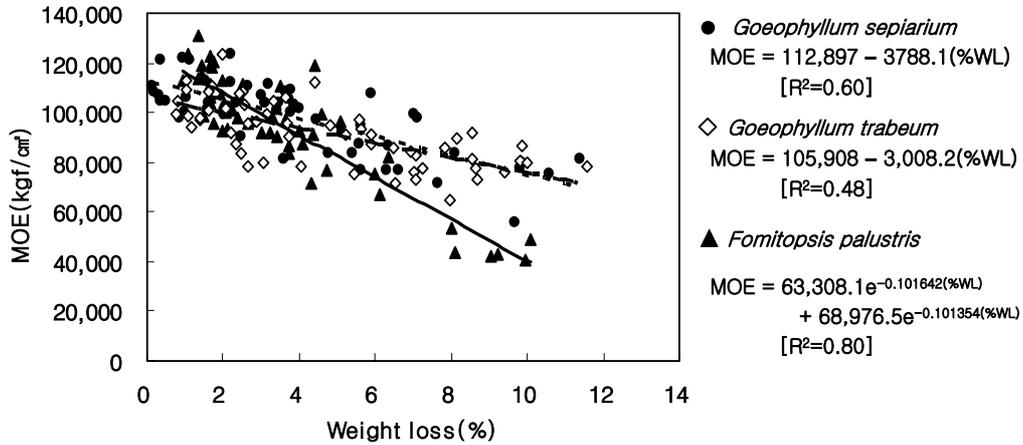
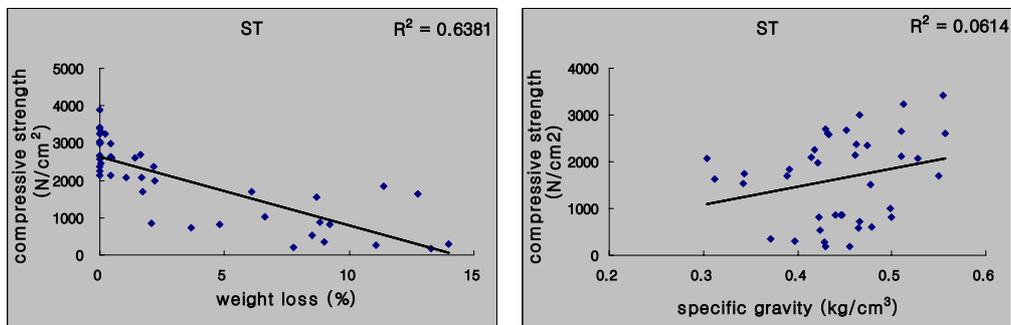


Fig.31. Regression of MOE on percent weight loss of Japanese red pine sapwood beams decayed by three brown-rot fungi.

나) 종압축강도



(a) 중량감소에 대한 강도

(b) 비중에 대한 강도

Fig.32. 중량감소 및 비중에 대한 강도의 상관관계

Fig.32는 중량감소와 비중 중 어떤 인자가 강도에 크게 영향하는지 알아보기 위한 결과이다. (a)를 통해 중량감소의 증가에 따라 강도가 감소하는 일반적인 견해에 맞는 결과를 얻었고 R<sup>2</sup>값은 0.6381로 비교적 높은 값을 얻었다. 이에 대해 (b)의 결과는 비

중이 증가함에 따라 강도도 증가하는 맞는 경향이 나타났지만  $R^2$ 값이 0.0614로 상관관계는 거의 없는 것으로 나타났다. 이를 통해 중량감소가 비중보다 강도에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 비중이 유사하더라도 열화를 통해 중량감소가 일어난 시편이 강도에 약하다는 것을 나타낸다 할 수 있다.

### 3) 비파괴검사 결과와 상관관계 규명

#### 가) 연구방법

횡단면 치수가 25mm × 9.5mm이고 길이가 200mm인 소나무 변재부 무결점 휨 시험편의 부후 전후 응력과 변수와 초기 부후의 각 단계별 중량감소율 및 휨성질은 2) 항(역학적 성질)의 가)항(휨성질) 자료를 그대로 사용하였다.

대조구와 중량감소율을 달리하는 강제부후 그룹간 응력과 변수(응력과 속도, 파동 임피던스, 동적 탄성계수) 차이를 general linear model(GLM)을 이용하여 검정하여 응력과 변수에 의한 초기부후 진단 가능성을 평가하였다. 그리고 응력과 변수들에 의한 부후도 및 부후시편의 잔존강도 예측 가능성을 조사하였다. 전자의 경우는 부후시편의 응력과 변수와 중량감소율 간의 관계, 후자의 경우는 응력과 변수와 휨강도(MOR)간의 관계를 단순 또는 다중회귀분석에 의해 조사하였다. 모든 자료의 통계분석은 Statistical Analysis System ver 7.12(SAS Institute, 1988)를 이용하였다.

#### 나) 연구결과

##### (1) 수축방향 응력과

##### (가) 수축방향 응력과 변수에 의한 초기 부후 평가

Table 6은 부후군 별로 부후의 진행에 따른 각 부후 그룹과 대조구의 응력과 변수인 응력과 속도, 파동 임피던스, 동적 탄성계수의 평균치와 Duncan의 다중검정법에 의한 이들 평균치간의 비교를 보여준다. *Gloeophyllum sepiarium* 가해 시편은 부후에 따른 응력과 변수 변화가 가장 둔감하여 응력과 속도는 중량감소율 10 퍼센트까지 대조구와 통계학적 유의성( $\alpha < 0.05$ )이 인정되는 차이가 나타나지 않았으나 파동 임피던스와 동적 탄성계수는 중량감소율 10 퍼센트에서 통계학적 유의성( $\alpha < 0.05$ )이 인정되는 차이가 관찰되었다. *Gloeophyllum trabeum*과 *Fomitopsis palustris* 가해시편에서 응력과 속도는 중량감소율 7.5 퍼센트에서 대조구와 통계학적 유의성( $\alpha < 0.05$ )이 인정되는 차이가 발생하였다. *Fomitopsis palustris* 가해 시편에서 파동 임피던스와 동적

탄성계수가 응력과 속도와 동일하게 중량감소율 7.5 퍼센트에서 통계학적 유의성이 있는 변화가 나타났다. *Gloeophyllum trabeum*은 파동 임피던스와 동적 탄성계수가 각각 5 퍼센트와 2.5 퍼센트에서 통계학적인 유의성이 있는 변화가 나타나 가장 부후에 따른 중량감소율에 민감한 변화를 나타내었다. *Fomitopsis palustris* 가해 시편의 경우를 제외하고 부후재 밀도와 관련이 있는 파동 임피던스와 동적 탄성계수 경우는 중량감소율에 의해 응력과 속도의 변화가 나타나는 시점보다 적어도 2.5% 이상 조기에 변화가 났는데, 이것은 응력과 속도 감소보다는 임피던스와 동적탄성계수의 감소에 의해 초기 부후를 보다 정확히 진단할 수 있음을 의미한다. 이상과 같이 *Gloeophyllum trabeum*을 제외하고는 중량감소율 5 퍼센트 미만의 극초기 부후는 응력과 변수의 감소에 의해서도 진단이 어려운 것으로 나타났는데, 앞에서 언급된 것처럼 중량감소율 2.5 퍼센트부터 부후 시편의 역학적 성질 감소가 심각한 관계로 구조물의 안전측면에서 육안적으로 부후를 탐지할 수 없는 구조부재의 극초기 부후를 정확히 진단하는 것은 매우 중요하다. 그래서 다른 시도으로써 부후 그룹에 속하는 시편들을 대상으로 측정된 부후 전 응력과 변수와 부후 후 재 측정된 응력과 변수에 의해서 산출된 응력과 변수 감소율에 의한 초기부후의 진단 가능성을 살펴보았다(Table 7). 응력과 속도 감소율은 *Gloeophyllum trabeum* 가해 시편의 경우 중량감소율 5 퍼센트부터 부후에 의한 변화가 통계학적인 유의성을 나타내었고, 파동 임피던스의 경우 모든 공시균에서 단순 측정치보다 감소율 변화가 더 빠르게 통계학적 유의성을 나타내어 *Gloeophyllum trabeum* 가해 시편의 경우는 부후에 의한 중량감소율 2.5 퍼센트부터 변화가 나타나는 것으로 나타났다. 동적 탄성계수 감소율의 통계적 유의성을 가지는 변화는 각 균에 따라 다르게 나타났다. 응력과 변수 자체를 사용하는 것보다 응력과 변수의 감소율을 사용할 경우 중량감소율 변화 시점을 약 2.5 퍼센트 먼저 파악할 수 있는 것으로 나타났다. *Gloeophyllum trabeum* 가해 시편경우에 초기 강도 감소가 심한 중량감소율 2.5 퍼센트부터 통계학적 유의성을 나타내어 극초기 부후를 진단할 수 있는 것으로 나타났다. 정확한 수치는 제시할 수 없지만, 극초기 부후 존재가 탐지되는 응력과 변수 감소율을 설정할 수 있으면 다음과 같은 방법에 의해 구조부재의 극초기 부후를 탐지할 수가 있을 것이다. 목구조물 내에서 부후균에 의한 가해가 예상되는 구조부재(예를 들어, 주기적으로 강우 등에 의해 재젖음이 발생하는 목부재)를 대상으로 현장 시설 직후에 부재의 응력과 변수를 측정하고 그후로 정기적으로 초기 측정위치와 동일한 위치에서 재측정하면서 응력과 변수의 감소율을 계산하여, 계산된 감소율

이 실험을 통해 기 설정된 부후의 존재에 의한 응력과 변수의 감소율 또는 그 이상이 될 경우에는 부후재가 부후균에 의해 가해를 받고 있는 것으로 판정할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 방법을 현장에 적용시키기 위해서는 Gerhards(1975)와 Kim(1989)이 제시한 것처럼 함수율에 대한 보정이 필요하고, 또한 응력과 전달경로상에 활렬 등의 건조결함이나 웅이 등의 자연결점이 존재할 경우에는 이들의 응력과 변수에 미치는 영향도 반드시 고려해 주어야 할 것이다.

**Table 6. Changes of stress wave parameters of weight loss.**

Fungus	Weight loss (%)	Stress wave velocity (m/sec)	Wave impedance (kg/cm <sup>2</sup> )	Dynamic MOE (kg/m <sup>2</sup> · sec)
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	0.0	3,706.06 a <sup>*1</sup>	1,758.35 ab	66,441.68 ab
	2.5	3,744.78 a	1,778.49 a	67,987.78 a
	5.0	3,646.89 a	1,671.48 b	62,241.42 bc
	7.5	3,780.86 a	1,672.75 b	64,528.70 ab
	10.0	3,595.46 a	1,557.81 c	57,297.64 c
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0.0	3,706.06 a	1,758.35 a	66,441.68 a
	2.5	3,606.32 ab	1,684.51 ab	61,993.69 b
	5.0	3,559.51 ab	1,585.22 bc	57,566.21 c
	7.5	3,488.59 b	1,535.41 c	54,590.09 cd
	10.0	3,495.42 b	1,429.79 d	51,050.15 c
<i>Fomitopsis palustris</i>	0.0	3,706.06 a	1,758.35 a	66,441.68 a
	2.5	3,774.63 a	1,707.12 a	65,791.66 a
	5.0	3,650.13 ab	1,679.60 a	62,571.03 a
	7.5	3,499.32 bc	1,536.22 b	54,815.65 b
	10.0	3,408.87 c	1,481.99 b	51,591.31 b

\*1 Same letters followed by numbers in each column are not significantly different ( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan's multiple range test.

**Table 7. Changes of percent reduction in stress wave parameters of weight loss.**

Fungus	Weight loss	Stress wave velocity	Wave impedance (%)	Dynamic MOE
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	0.0	1.47 a <sup>*1</sup>	2.99 bc	4.40 c
	2.5	-0.13 a	2.32 c	2.14 c
	5.0	0.57 a	5.70 b	6.20 bc
	7.5	2.07 a	9.22 a	11.03 ab
	10.0	2.25 a	11.87 a	13.45 a
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0.0	1.47 d	2.99 d	4.40 c
	2.5	3.05 cd	5.37 c	8.18 c
	5.0	5.17 bc	10.08 b	14.61 bc
	7.5	7.63 a	14.39 a	20.89 a
	10.0	6.80 ab	16.07 a	21.75 a
<i>Fomitopsis palustris</i>	0.0	1.47 bc	2.99 c	4.40 cd
	2.5	-0.04 c	2.17 c	2.00 d
	5.0	3.08 abc	7.50 b	10.33 bc
	7.5	4.06 ab	10.69 b	14.27 ab
	10.0	5.79 a	14.94 a	19.57 a

<sup>\*1</sup>Same letters followed by numbers in each column are not significantly different ( $\alpha=0.05$ ) according to the Duncan's multiple range test.

(나) 수축방향 응력과 변수에 의한 부후도 예측

부후에 따른 부후도, 즉 중량감소율을 응력과 변수에 의해 예측할 수 있는지 여부를 판정하기 위하여 단순회귀분석을 실시하였다. 추가적으로 단순회귀에 비하여 응력과 변수들과 중량감소율 간의 상관관계를 개선할 목적으로 응력과 변수의 변환(제곱, 역수 등), 응력과 변수의 2차식 회귀[중량감소율 =  $a + b(\text{변수}) + c(\text{변수})^2$ ], 2개 또는 3개의 변수를 이용한 다중회귀[중량감소율 =  $a + b(\text{속도}) + c(\text{임피던스}) + d(\text{동적 탄성계수})$ ]를 시도하였지만, 다중회귀를 제외하고는 상관관계가 크게 개선이 되지 않았다. 따라서 응력과 변수 감소율과 중량감소율 간의 상관관계가 급격히 높아진 다중회귀를 제외하고는 Table 8과 Table 9에 나타내지 않았다.

응력과 변수들인 응력과 속도, 파동 임피던스, 그리고 동적 탄성계수 자체와 중량감소율 간의 상관관계는 비교적 양호하지 못하였다(Table 8). 특히 응력과 속도의 경우, 상관계수가 0.59~0.68로 비교적 불량한 편이었다. 응력과 변수들 중 상관관계가 가장 양호한 동적 탄성계수의 상관계수도 0.74~0.79로 보통의 상관관계를 나타냈다. 상관관계를 개선할 목적으로 수행한 다중회귀에서 3개의 변수를 모두 사용한 *Fomitopsis palustris* 가해 시편에서 상관관계를 제외하고는 크게 개선되지 않는 것으로 나타났다. 다중회귀를 통해서 상관관계가 증가한 *Fomitopsis palustris* 가해 시편의 경우 상관계수가 0.86으로 비교적 양호한 상관관계를 나타내었다.

응력과 계수 감소율간 중량감소율 간의 상관관계는 파동 임피던스 > 동적 탄성계수 > 응력과 속도의 순으로 나타났는데, 이것은 김 등(1996)이 라디에타소나무를 이용한 연구 결과에서도 동일하였다. 응력과 속도 감소율의 상관관계는 0.72~0.75로 보통으로 나타났으며, 동적 탄성계수 감소율은 0.80~0.87로 양호한 상관관계를 나타냈다. 파동 임피던스는 *Fomitopsis palustris* 가해시편에서 상관계수가 0.87로 양호하고, *Gloeophyllum sepiarium*과 *Gloeophyllum trabeum*은 가해 시편에서는 각각 0.93과 0.91로 매우 양호한 상관관계를 나타내었다(Fig.33). 현장에서 파동 임피던스를 산출하기 위해서는 응력과 전달 속도 외에 부후재의 밀도를 측정하여야 하는 문제가 있으나, 충격저항에 의한 목재밀도 측정기인 Pilodyn을 이용한 비파괴 방법에 의한 밀도 예측에 대한 연구(Kim, 1989) 결과에 의하면 Pilodyn 핀의 침투깊이에 의해 목재의 밀도를 양호하게 예측할 수 있다고 보고했다. 따라서 Pilodyn을 별도로 준비하면 파동 임피던스의 감소율을 측정하는 것이 가능하므로 부후균에 의해 피해가 예상되는 구조

부재를 대상으로 동일 위치에서 정기적으로 stress wave timer와 Pilodyn을 사용하여 파동 임피던스의 감소율을 측정하면 부후도를 예측하는 것이 가능하다고 할 수 있다. 상관관계를 높이기 위해 실시된 다중회귀의 결과 2개 이상의 변수를 사용할 경우에 상관관계는 매우 높아지는 것으로 나타났는데, 모든 공시균에서 0.95~0.99로 거의 완벽하게 중량감소율을 예측할 수 있는 것으로 나타났다(Table 8).

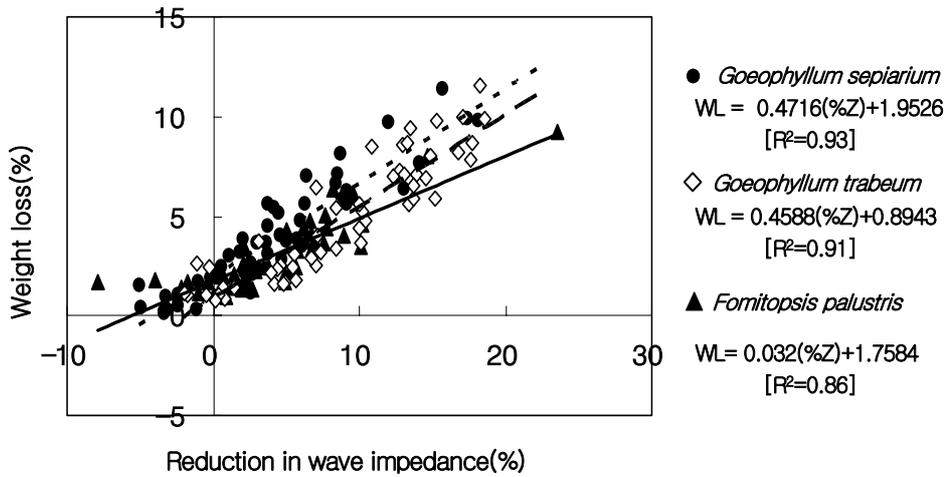


Fig.33. Regression of percent weight loss on reduction in wave impedance of red pine sapwood beams decayed by three brown-rot decay fungi.

**Table 8. Relationship between stress wave parameters and percent weight loss by brown-rot fungi.**

Fungus	Predictor <sup>*1</sup>	Regression equation	Correlation coefficient
<i>G. sepiarium</i>	V	WL= 39.312-0.0096(V)	0.59
	Z	WL= 28.917-0.0146(Z)	0.69
	Ed	WL= 23.005-0.0003(Ed)	0.74
	V, Z	WL= 43.02696-0.00545(V)-0.0111(Z)	0.75
	V, Ed	WL= 23.79482-0.00032482(V)-0.00028932(Ed)	0.74
	Z, Ed	WL= 23.32664-0.00054157(Z)-0.00028628(Ed)	0.74
	V, Z, Ed	WL= 159.18137-0.03708(V)-0.076942(Z)+0.00175(Ed)	0.76
<i>G. trabeum</i>	V	WL= 37.83-0.0094(V)	0.63
	Z	WL= 25.437-0.013(Z)	0.68
	Ed	WL= 22.253-0.0003(Ed)	0.77
	V, Z	WL= 42.86416-0.00632(V)-0.00977(Z)	0.78
	V, Ed	WL= 26.71018-0.00183(V)-0.00026599(Ed)	0.78
	Z, Ed	WL= 20.63757+0.00310(Z)-0.00035855(Ed)	0.78
	V, Z, Ed	WL= 121.23281-0.02846(V)-0.5666(Z)+0.00130(Ed)	0.79
<i>F. palustris</i>	V	WL= 33.93-0.0082(V)	0.68
	Z	WL= 23.235-0.0116(Z)	0.73
	Ed	WL= 18.91-0.0002(Ed)	0.79
	V, Z	WL= 36.03978-0.00502(V)-0.00824(Z)	0.81
	V, Ed	WL= 22.95396-0.00166(V)-0.00020739(Ed)	0.80
	Z, Ed	WL= 18.28035+0.00111(Z)-0.00025992(Ed)	0.79
	V, Z, Ed	WL= 166.95525-0.04071(V)-0.08679(Z)+0.002209(Ed)	0.86

<sup>\*1</sup>V is stress wave velocity, Z wave impedance, Ed dynamic MOE, and WL percent weight loss.

**Table 9. Relationship between reduction in stress wave parameters and percent weight loss by brown-rot fungi.**

Fungus	Predictor <sup>*1</sup>	Regression equation	Correlation coefficient
<i>G. sepiarium</i>	%V	WL= 3.6955+0.6392(%V)	0.75
	%Z	WL= 1.9526+0.4716(%Z)	0.93
	%Ed	WL= 2.6608+0.2906(%Ed)	0.87
	%V, %Z	WL= 0.03027-0.95905(%V)+1.00893(%Z)	0.99
	%V, %Ed	WL= 0.24858-1.84583(%V)+0.99154(%Ed)	0.99
	%Z, %Ed	WL=-0.3607+1.97782(%Z)-0.99369(%Ed)	0.99
	%V, %Z, %Ed	WL=-0.02355-0.56783(%V)+1.42442(%Z)-0.41872(%Ed)	0.99
<i>G. trabeum</i>	%V	WL= 2.4916+0.5827(%V)	0.72
	%Z	WL= 0.8943+0.4588(%Z)	0.91
	%Ed	WL= 1.4359+0.2818(%Ed)	0.85
	%V, %Z	WL=-0.12355-1.00485(%V)+1.04850(%Z)	0.99
	%V, %Ed	WL=-0.19958-2.00698(%V)+1.08704(%Ed)	0.99
	%Z, %Ed	WL= 0.01467+2.019362(%Z)-1.03783(%Ed)	0.99
	%V, %Z, %Ed	WL=-0.08102-0.64596(%V)+1.40739(%Z)-0.37874(%Ed)	0.99
<i>F. palustris</i>	%V	WL= 2.6557+0.3459(%V)	0.72
	%Z	WL= 1.7584+0.032(%Z)	0.86
	%Ed	WL= 2.1747+0.1731(%Ed)	0.80
	%V, %Z	WL=-0.08745-1.00059(%V)+1.04122(%Z)	0.99
	%V, %Ed	WL= 0.22039-1.79155(%V)+0.97176(%Ed)	0.95
	%Z, %Ed	WL= 0.25406+1.71814(%Z)-0.84984(%Ed)	0.99
	%V, %Z, %Ed	WL=-0.05219-0.73124(%V)+1.27607(%Z)-0.26057(%Ed)	0.99

<sup>\*1</sup>%V, %Z, %Ed and WL represents percent reduction in stress wave velocity, wave impedance, dynamic MOE, and weight.

(다) 수축방향 응력과 변수에 의한 부후시편의 잔존강도 예측

부후재의 잔존강도를 응력과 변수에 의해 예측할 수 있는가 여부를 판정하기 위하여 실시된 응력과 변수(변수 자체와 감소율)와 휨강도간의 단순회귀를 실시하였다. 추가적으로 응력과 변수들과 휨강도 간의 상관관계를 개선할 목적으로 응력과 변수의 변환(제곱, 역수 등), 응력과 변수의 2차식 회귀[중량감소율=  $a + b(\text{변수}) + c(\text{변수})^2$ ], 2개 또는 3개의 변수를 이용한 다중회귀[중량감소율=  $a + b(\text{속도}) + c(\text{임피던스}) + d(\text{동적 탄성계수})$ ]를 시도 하였지만, 다중회귀를 제외하고는 상관관계가 크게 개선이 되지 않았다.

비파괴 시험에 대한 44개의 연구 결과를 요약한 Hoyle(1968)에 따르면 휨강도의 경우 비파괴 계수와와의 상관계수가 0.70 이상이면 비파괴 계수에 의한 신뢰성 있는 휨강도의 예측이 가능하다고 보고하였다. 응력과 변수 자체의 상관관계는 동적 탄성계수 > 파동 임피던스 > 응력과 속도 순으로 나타났으며, 추가적으로 수행한 다중회귀의 결과 상관관계는 크게 개선되지 않는 것으로 나타났다(Table 10). 현장에서 용이하게 측정할 수 있는 응력과 속도는 상관계수가 0.39~0.58로 불량한 상관관계를 나타내어 휨강도의 예측이 불가능 할 것으로 판단된다. 그러나 파동 임피던스와 동적 탄성계수의 휨강도 간의 상관계수는 0.68~0.80으로 Hoyle(1968)가 지적한 것처럼 휨강도의 예측이 가능한 것으로 나타났다(Fig.34, Fig.35). 따라서 부후 현장 평가시 stress wave timer와 Pilodyn을 준비하면, 파동 임피던스나 동적 탄성계수에 의한 휨강도의 예측이 가능할 것으로 사료된다.

**Table 10. Result of regression analysis for prediction of bending strength of decayed wood by brown-rot fungus using stress wave parameters.\*1**

Fungus	Predictor	Regression equation	Correlation coefficient
<i>G. sepiarium</i>	V	MOR= -178.07+0.2033(V)	0.39
	Z	MOR= -307.31+0.5118(Z)	0.75
	Ed	MOR= -5.3229+0.0089(Ed)	0.69
	V, Z	MOR= -345.91811+0.01491(V)+0.50212(Z)	0.75
	V, Ed	MOR= 526.90809-0.21854(V)+0.01314(Ed)	0.74
	Z, Ed	MOR= -301.08245+0.49607(Z)+0.00031924(Ed)	0.75
	V, Z, Ed	MOR= -4,598.82458+1.17306(V)+2.91278(Z)-0.06425(Ed)	0.76
<i>G. trabeum</i>	V	MOR= -166.58+0.2064(V)	0.44
	Z	MOR= -84.292+0.4032(Z)	0.68
	Ed	MOR= 66.821+0.0085(Ed)	0.70
	V, Z	MOR= -349.20617+0.09611(V)+0.35448(Z)	0.70
	V, Ed	MOR= 247.03838-0.07384(V)+0.00989(Ed)	0.71
	Z, Ed	MOR= -5.23745+0.13834(Z)+0.00591(Ed)	0.71
	V, Z, Ed	MOR= 2,396.00798-0.67942(V)-1.28814(Z)+0.04541(Ed)	0.72
<i>F. palustris</i>	V	MOR= -1,667.9+0.5839(V)	0.58
	Z	MOR= -1,287.9+1.0524(Z)	0.78
	Ed	MOR= -807.6+0.0203(Ed)	0.80
	V, Z	MOR= -1,896.51988+0.23869(V)+0.89041(Z)	0.81
	V, Ed	MOR= -430.1908-0.15528(V)+0.0234(Ed)	0.81
	Z, Ed	MOR= -1,035.63595+0.40302(Z)+0.01323(Ed)	0.81
	V, Z, Ed	MOR= -4,356.24016+0.90919(V)+2.36629(Z)-0.03934(Ed)	0.81

\*1V is stress wave velocity, Z wave impedance, Ed dynamic MOE, and MOR modulus of rupture

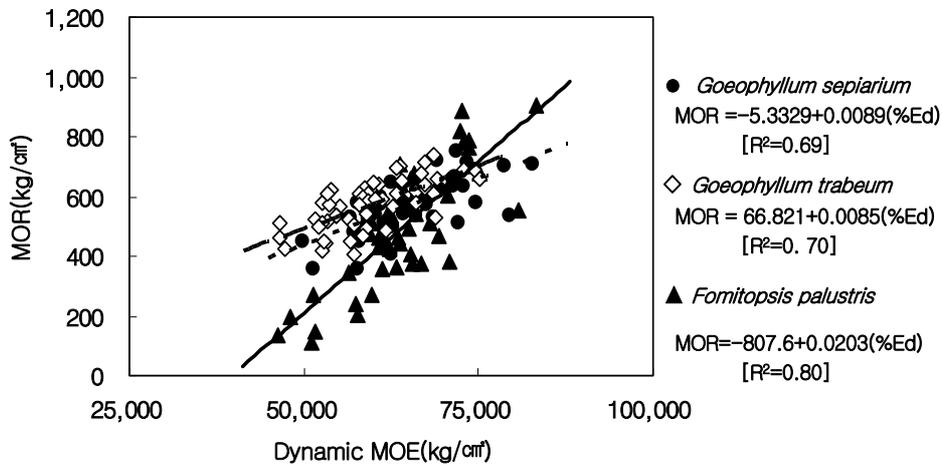


Fig.34. Regression of bending strength on dynamic MOE of red pine sapwood beams decayed by three brown-rot decay fungi.

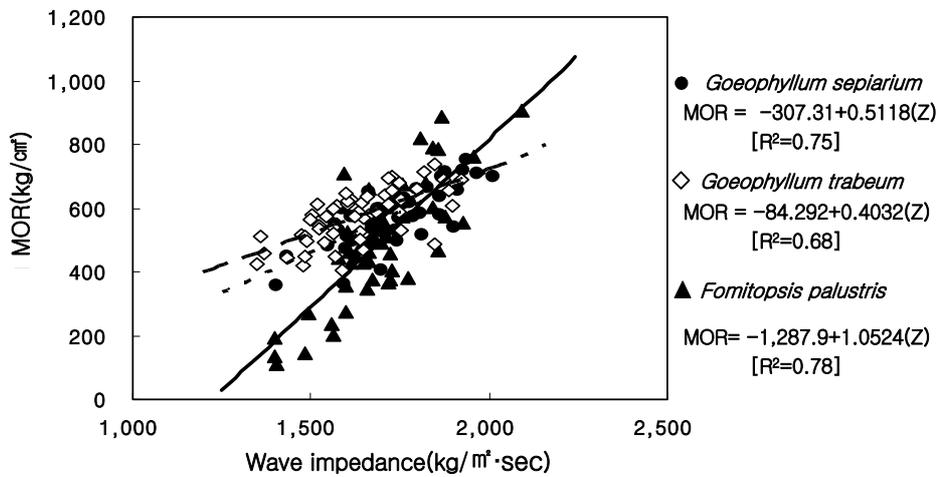


Fig.35. Regression of bending strength on wave impedance of red pine sapwood beams decayed by three brown-rot decay fungi.

응력과 변수 감소율과 휨강도간의 상관관계를 Table 11에 나타내었다. 응력과 변수 감소율의 상관관계는 파동 임피던스 > 동적 탄성계수 > 응력과 속도 순으로 나타났

는데, 이것은 김 등(1996)이 라디에타소나무로 연구한 결과와 같은 상관관계 순서이다. 그러나 응력과 변수의 감소율에 의한 휨강도의 예측은 상관관계가 매우 불량하여 휨강도의 예측이 불가능한 것으로 판단된다. 상관관계를 개선할 목적으로 수행한 다중회귀의 결과에서 상관관계는 급격히 증가하여 *Gloeophyllum trabeum*을 제외한 공시균에서 0.80 이상의 상관계수가 나타나 다중회귀에 의한 휨강도의 예측은 가능할 것으로 판단된다.

이와 같은 결과들로부터 제반 조건들이 조절·통제된 조건하에서는 수축방향 응력과 방법에 의한 초기갈색부후의 진단, 부후도의 예측, 그리고 부후재의 잔존강도 예측이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 본 결과가 목리 방향이 일정한 목리 방향을 가진 소형 무결점 시편을 사용하여 실시된 실험실 규모의 실험 결과이기 때문에, 수축방향 응력과 방법을 구조물 현장에서 사용하기 위해서는 앞으로 옥외에서 부후중인 실대재에 대한 실험을 반드시 실시하여 본 실험의 결과를 입증하여야 할 것이다.

**Table 11. Result of regression analysis for prediction of bending strength of decayed wood by brown-rot fungus using reduction in stress wave parameters.\*<sup>1</sup>**

Fungus	Predictor	Regression equation	Correlation coefficient
<i>G. sepiarium</i>	%V	MOR= 567.31-10.69(%V)	0.40
	%Z	MOR= 603.69-9.6673(%Z)	0.61
	%Ed	MOR= 587.57 -5.5716(%Ed)	0.54
	%V, %Z	MOR= 686.08255+41.10465(%V)-32.69603(%Z)	0.80
	%V, %Ed	MOR= 676.39696+67.96026(%V)-31.38151(%Ed)	0.78
	%Z, %Ed	MOR= 693.06996-77.36125(%Z)+44.6602(%Ed)	0.81
	%V, %Z, %Ed	MOR= 693.32430-11.53350(%V)-88.60157(%Z)+4,655.26110(%Ed)	0.81
<i>G. trabeum</i>	%V	MOR= 595.26-7.2148(%V)	0.33
	%Z	MOR= 622.52 -6.5499(%Z)	0.48
	%Ed	MOR= 613.13-3.886(%Ed)	0.43
	%V, %Z	MOR= 647.10236+24.26543(%V)-20.78995(%Z)	0.60
	%V, %Ed	MOR= 650.82282+46.26476(%V)-22.44775(%Ed)	0.62
	%Z, %Ed	MOR= 641.80421-40.75671(%Z)+22.74898(%Ed)	0.58
	%V, %Z, %Ed	MOR= 653.91218+81.72993(%V)+36.67327(%Z)-60.64270(%Ed)	0.62

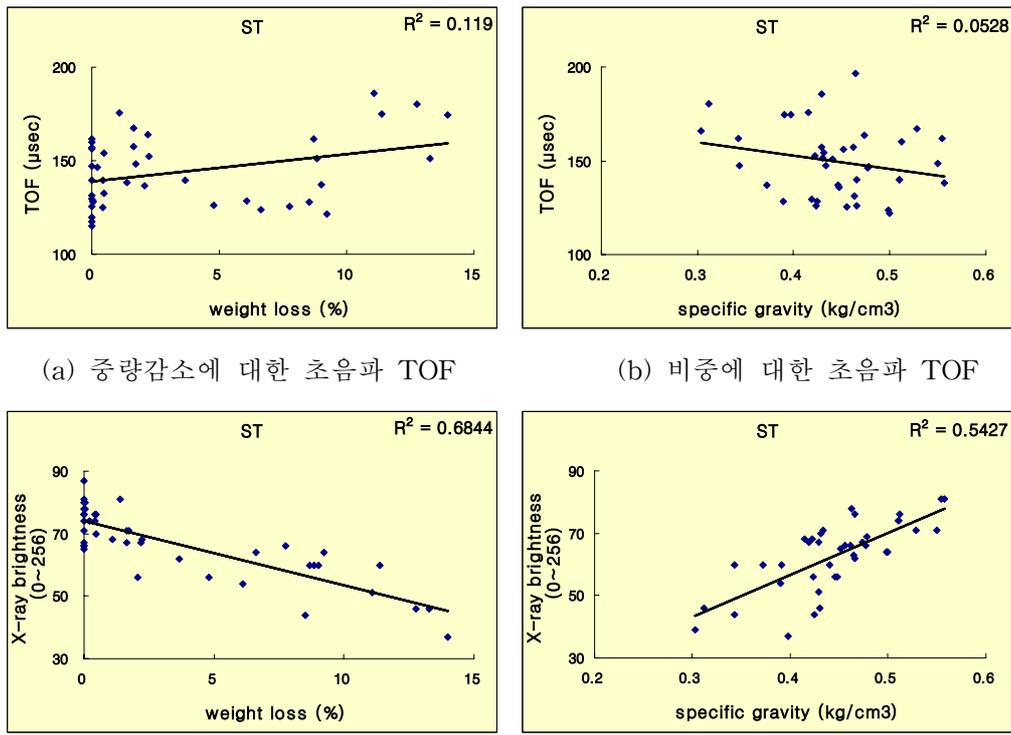
\*<sup>1</sup>%V, %Z, %Ed, and MOR represent percent reduction in stress wave velocity, wave impedance, dynamic MOE, and modulus of rupture.

Table 11. Continued

Fungus	Predictor	Regression equation	Correlation coefficient
<i>F. palustris</i>	%V	MOR= 556.19-26.058(%V)	0.56
	%Z	MOR= 626.29-24.079(%Z)	0.69
	%Ed	MOR= 594.17-13.369(%Ed)	0.64
	%V, %Z	MOR= 790.12633+89.19300(%V)-88.88287(%Z)	0.83
	%V, %Ed	MOR= 782.26542+172.71186(%V)-90.23413(%Ed)	0.82
	%Z, %Ed	MOR= 742.67357-133.4659(%Z)+66.21068(%Ed)	0.79
	%V, %Z, %Ed	MOR= 794.71860+124.26928(%V)-58.29986(%Z)-33.93252(%Ed)	0.84

(2) 방사방향 초음파 및 X선

Fig.36은 초음파, X선을 통한 TOF와 명도의 비파괴 인자와 중량감소, 비중 간의 상관관계를 나타낸 결과이다. (a), (b)를 통해 중량감소의 증가에 따른 초음파 TOF의 증가, 비중의 증가에 따른 초음파 TOF의 감소가 나타나 올바른 경향을 보였으나, 중량감소와 비중에 대한 초음파 TOF의  $R^2$ 값은 각각 0.119, 0.0528로 매우 낮게 나타났다. 이는 두 인자 모두에서 상관관계를 찾을 수 없음을 의미한다.



(a) 중량감소에 대한 초음파 TOF

(b) 비중에 대한 초음파 TOF

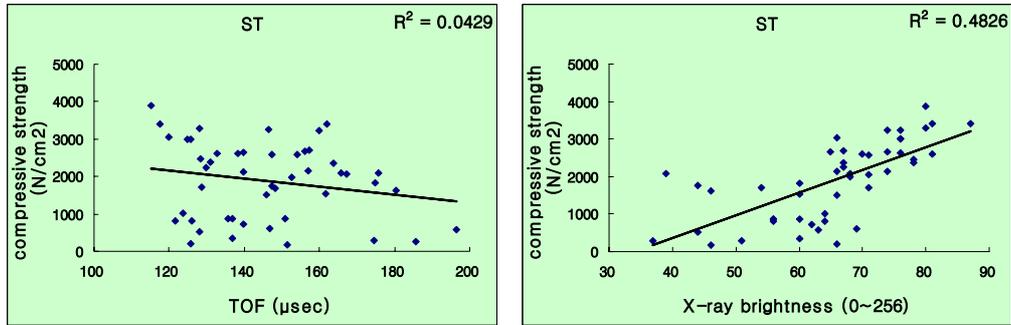
(c) 중량감소에 대한 X선 명도

(d) 비중에 대한 X선 명도

**Fig.36. 중량감소 및 비중에 대한 비파괴 인자의 상관관계**

(c), (d)의 결과는 비파괴 인자 중 X선 명도에 대한 결과이다. 중량감소의 증가에 따른 X선 명도의 감소, 비중의 증가에 따른 X선 명도의 증가를 보여 올바른 경향이 나타났고, 또한  $R^2$ 값이 각각 0.6844, 0.5427로 매우 높게 나타났다. 이는 초음파의 결과와는 대조적인 것인데, X선이 초음파에 비해 열화 초기 단계를 매우 정확하게 탐지함을 알 수 있었다. 또한 투과된 X선의 감쇠 정도는 재료의 비중과 직접적인 영향이

있는 것으로 알려져 있는데 중량감소의 결과도 X선의 결과를 매우 정확하게 반영하는 요소임을 알 수 있었다.



(a) 초음파 TOF에 대한 강도

(b) X선 명도에 대한 강도

**Fig.37. 비파괴 인자에 대한 강도의 상관관계**

마지막으로 Fig.37의 결과를 통해 비파괴 인자와 강도간의 직접적인 상관관계를 확인하였다. 예상했던 바와 같이 초음파 TOF는 거의 상관관계가 없었고 X선 명도는 어느 정도의 상관관계를 보였다.

## 제 5 절 열화의 정량적인 평가 기술 개발

### 1. 목재 열화 탐지용 초음파 CT 개발

#### 가. 초음파 측정 시스템 구축

##### 1) 장치 구성

초음파 전달시간 측정에 사용된 장치의 실제 사진(Fig.1)과 모식도를 Fig.2에 나타내었다. 송·수신용 탐촉자로는 KAIJO사에서 제작한 중심주파수 68kHz의 BLT (Bolt-clamped Langevin type) 초음파 탐촉자가 이용되었는데, 목재와 탐촉자 사이의 접촉을 위해 지름 10mm의 고무를 탐촉자 끝에 붙여 사용하였다. Generator (Agilent Technology : 33220A)에서 발생된 신호는 증폭기 (NF electronics : HSA4052)를 통해 100배로 증폭된 후에 송신용 탐촉자를 통해 시편에 전달된다. 시편을 통과해서 수신용 탐촉자에 도달된 신호는 탐촉자 내에 장치된 30 db의 pre-amplifier에 의해 증폭된 후에, 오실로스코프 (Iwatsu : DS-8812)를 통해 디지털 신호로 전화되고, 최종적으로 컴퓨터 (Samsung : SENSE V30)에 저장된다.



Fig.1. Ultrasonic test set up for measuring the transmission time of wave

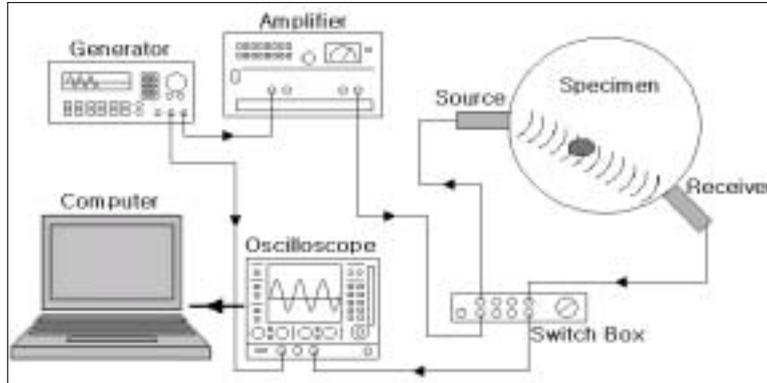


Fig.2. 초음파 전달속도 측정 장치.

초음파 실험이 재료의 표면 성질에 매우 크게 영향하는 것은 최소화하기 위하여 Fig.2에서와 같이 20mm의 실리콘패드와 10mm의 고무패드를 탐촉자 앞에 부착하였다. 이를 통해 접촉면을 작게 하여 좋은 상태의 신호를 얻을 수 있었고, 또한 각 패드의 신축성을 이용하여 표면의 거침이나 불규칙성을 줄일 수 있었다.



Fig.3. 탐촉자

## 2) TOF (Time of Flight) 측정

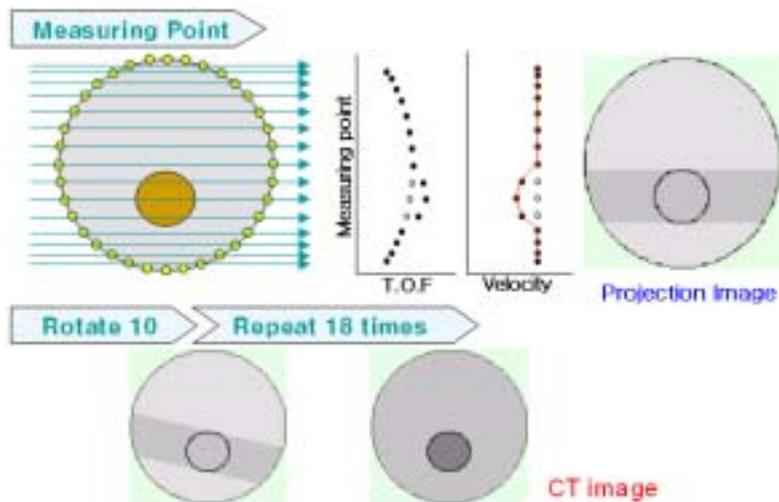


Fig.4. Measurement and image reconstruction procedure

Fig.4는 초음파 CT 이미지의 구성을 위한 측정 방법과 FBP (Filtered-Back Projection)법에 의한 이미지의 구성 원리를 간략하게 나타낸 모식도이다. 270회의 측정(Fig.5)을 통해 총 18개의 프로젝션 이미지를 얻게 되며, 이 프로젝션 이미지들을 근거로 CT 이미지가 구성된다.

실제의 초음파 TOF 측정에 대한 방법은 Fig.5와 같다. 하나의 시편 주위에 10° 간격으로 총 36개의 측정 위치를 표시하였다. 먼저 Fig.과 같이 평행한 방향으로 15회 측정하고, 시편을 10° 회전시켜 다시 동일한 방법으로 15회 측정하였다. 이상의 과정을 시편이 170° 회전할 때까지 반복하였으며, 따라서 하나의 단면에 대하여 총 270회의 측정이 이루어졌다. 각각의 측정을 통해 얻어진 파형으로부터 초음파 전달시간을 계산하였다.

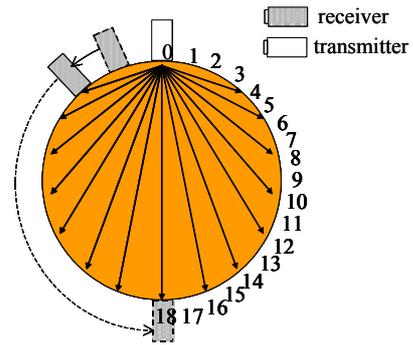


Fig.218. 실제 측정 방법

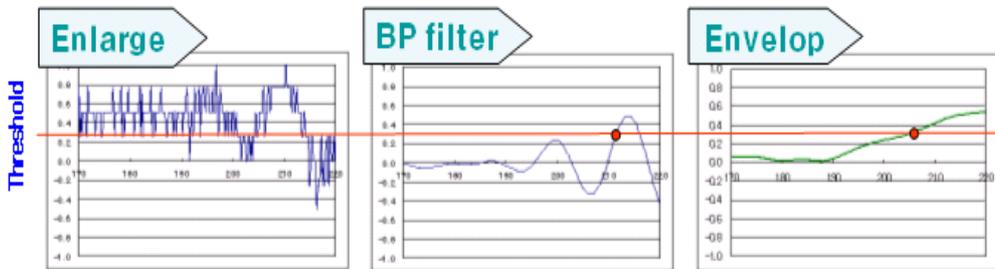


Fig.6.. Method for determine the TOF

Fig.6은 수신 신호의 처리 과정에 대한 순서이다. 잡음을 제거하기 위해 Band Pass filter를 사용했으며, 보다 정확한 TOF 산출을 위해 Envelop 과정을 거쳤다. 측정된 모든 270개의 데이터는 위와 같은 신호 처리 과정을 거쳐 TOF를 산출하게 된다.

## 나. 현장 사용에 적합한 알고리즘 개발

### 1) 알고리즘의 적용

#### 가) 역투영법

얻어진 초음파 전달시간으로부터 CT 영상을 구성하기 위하여 의학 분야에서 주로 적용되고 있는 Back-Projection법을 변형하여 이용하였다. 일반적인 Back-Projection법에서는 측정된 전달시간과 두 탐촉자 사이의 거리로부터 계산된 초음파 전달속도를 이용하여 CT 영상이 구성된다. 그러나 목재와 같은 이방성 재료의 경우에 연륜각에 따라 초음파 전달속도가 다르게 나타나므로, 전달속도를 그대로 CT 영상 구성에 이용할 경우에 얻어진 영상에 왜곡이 발생하게 되며 이러한 왜곡은 결국 내부 결함의 탐지를 어렵게 만든다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 영상구성 방법을 이용하였다. 먼저 동일한 연륜각에 대한 평균 전달속도를 구하고, 전달속도의 90%를 문턱값으로 정하였다. 각 경로에서의 전달속도가 문턱값보다 느리면 그 구간을 결함이 포함된 부분으로, 빠르면 건전한 부분으로 간주하여 각각에 100과 10의 값을 부여하였다. 이후의 영상구성 과정은 일반적인 Back-Projection법과 동일하며, 얻어진 영상의 해상도를 높이기 위하여 spline 보간법을 사용하였다. 최종적으로 얻어진 영상의 크기는 128×128 pixels이었다.

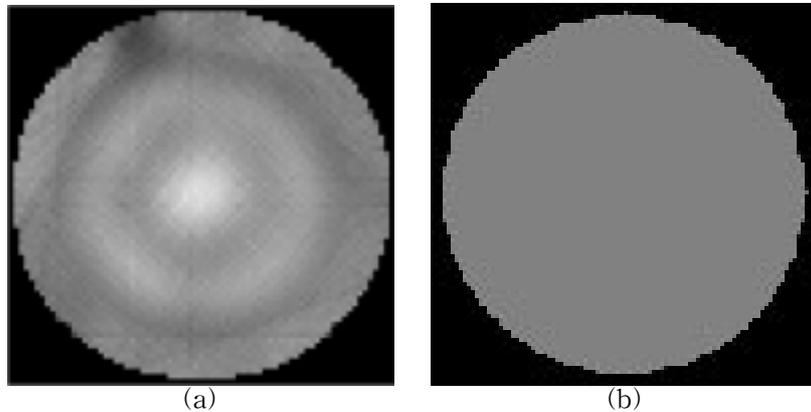


Fig.7. 무결점 시편에 대한 CT영상 구성 결과

Fig.7에는 결함이 없는 원형시편에 대하여 일반적인 Back-Projection법(a)과 본 연구에서 제안한 영상구성 방법(b)을 사용하여 얻은 CT영상을 각각 나타내었다. (a)의

경우 초음파 전달속도가 빠른 중앙으로 갈수록 점점 밝게 나타났으나, 새로운 영상구성 방법을 사용한 (b)의 경우에는 이러한 문제점이 해결된 것을 확인할 수 있다.

#### 다) SIRT법

역투영법과 함께 series expansion methods의 하나인 SIRT (Simultaneous Iterative Reconstructive Technique)법을 이용하여 CT 영상을 구성하고자 하였다. SIRT법에서는 초음파 전달 속도의 근사치를 행렬식의 반복계산을 통해 구하게 된다. 재료 물성의 분포함수인 모형함수를 가정하고 자료함수를 예측한다. 예측된 자료함수를 실제 측정을 통해 얻은 초음파 전달 시간과 비교하게 되고, 두 값의 차이가 사전에 정한 오차기준 이내가 될 때에 가정된 모형함수가 실제 재료의 물성 분포를 나타내는 것으로 결정하여, 이때의 값을 이용하여 CT 영상을 구성한다.

### 2) 기존 알고리즘의 검증

#### 가) 연구 방법

##### (1) 가상 모형 이용

구성된 CT 알고리즘의 검증을 위하여 가정된 모형 (Phantom)의 형태가 Fig.8에 제시되어 있다. 지름 200mm의 원형 모형을 가정하였으며, 결함으로 가정된 부위에서는 건전재로 가정된 부위보다 느린 음속을 갖는 것으로 하여 CT 이미지를 구성하였다.

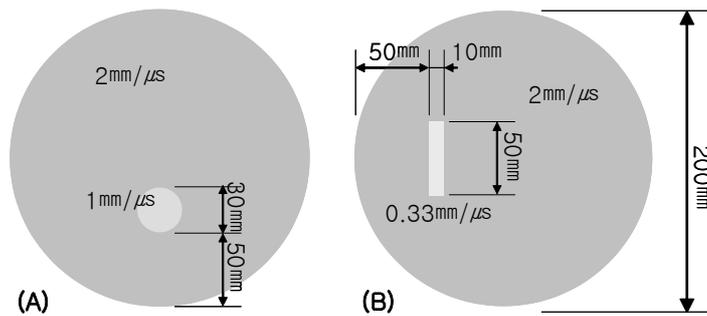


Fig.8. 가상 모형을 이용한 기존 알고리즘의 검증

## (2) 인공 결함 시편 이용

초음파 CT를 이용하여 탐지 가능한 결함의 크기 및 형태를 확인하기 위해 지름 200mm, 두께 30mm의 아까시나무(*Robinia pseudoacacia* L.)를 이용하여 실험을 진행하였다. 먼저 탐지 가능한 결함의 최소크기를 확인하기 위해 시편의 가장자리에 지름 6, 10, 13, 18, 23, 33, 40mm의 구멍을 뚫고 역투영법을 이용하여 초음파 CT 영상을 구성하였다. 다음으로 다양한 형태의 인공 결함을 갖도록 시편을 제작한 후 탐지 가능성을 확인하였다.

### 나) 연구 결과

#### (1) 가상 모형 이용

##### (가) 역투영법

Fig.9는 역투영법을 이용하여 구성한 가상 모형의 CT 이미지이다. (a)는 필터를 사용하기 전의 결과를 나타내며, (b)는 필터를 사용한 후의 결과를 나타낸다. (a)의 두 모형 모두에서 결함이 탐지되었지만 결함의 경계가 매우 불분명하게 나타났음을 확인할 수 있다. 반면 필터의 사용을 통해서 결함의 위치 및 크기가 더욱 정확하게 나타났음을 확인할 수 있다(Fig.9 (b)). 그러나 전체적으로 결함을 중심으로 나타난 방사형의 왜곡을 확인할 수 있다.

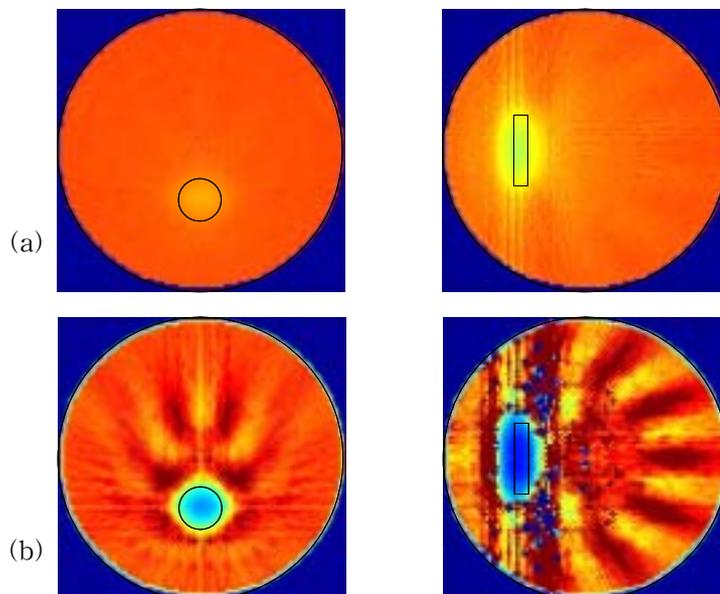


Fig.9. 가상 모형을 이용한 기존 알고리즘의 검증(역투영법)

(나) SIRT법

다음은 Fig.8(b)의 모형을 SIRT법을 이용하여 구성한 알고리즘에서 1회에서 10회까지의 반복계산을 거친 후의 CT 이미지를 나타낸 것이다. 약 5회의 반복계산까지는 결함의 크기 및 형태를 점점 정확히 탐지하고 있으나, 그 이후로는 반복수가 증가함에 따라 CT 영상의 왜곡이 점차 심해짐을 확인할 수 있었다. 이는 반복계산에 의한 오차에 의한 것으로 사료되며, 실제로 5회까지는 자료함수와 실제 측정값의 오차가 감소하였으나, 이후에는 오차가 증가하면서 진동하는 경향을 보였다.

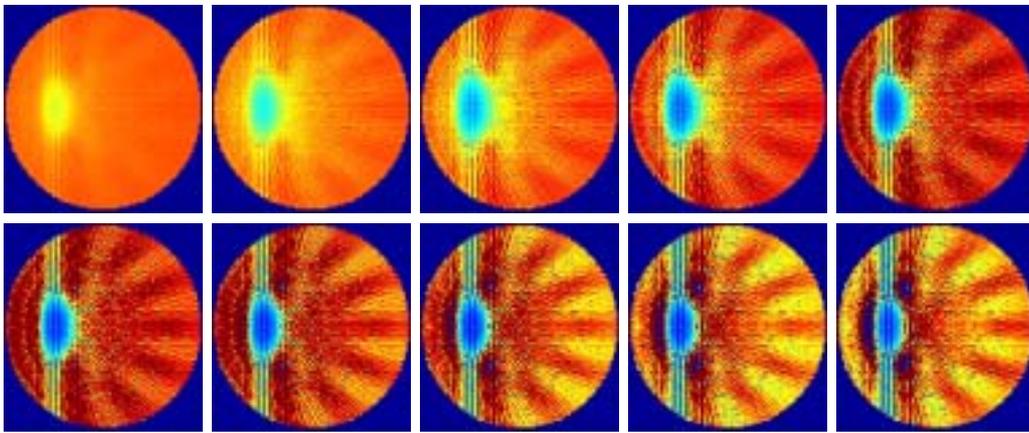


Fig.10. 가상 모형을 이용한 기존 알고리즘의 검증 (SIRT법)

(2) 인공 결함 시편 이용

Fig.11에 원형의 결함을 지속적으로 늘려가면서 구성한 CT 이미지의 결과가 제시되어 있다. 약 지름 23mm 이상의 크기를 가질 때에 결함이 탐지되었으나 정확한 결함의 크기와 형태를 확인하는 것은 불가능함을 확인할 수 있다.

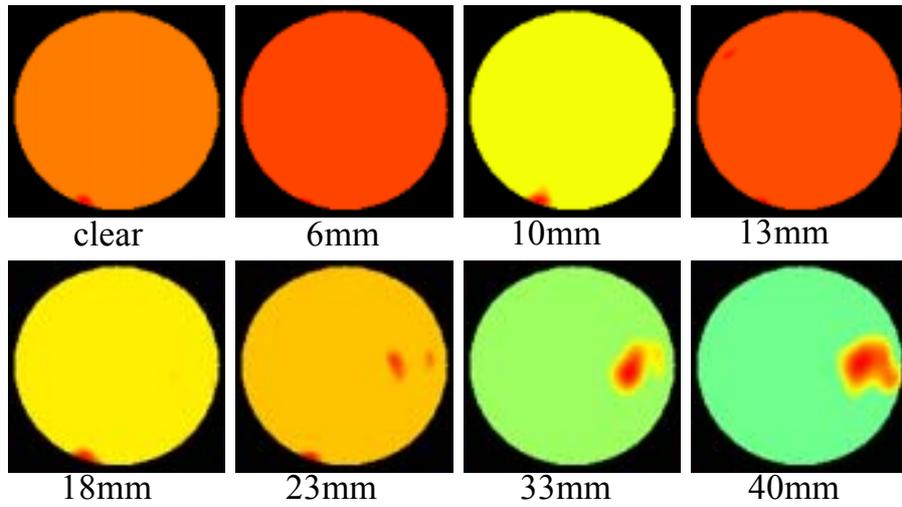


Fig.11. 하나의 원형 결함을 가지는 시편의 초음파 CT 영상.

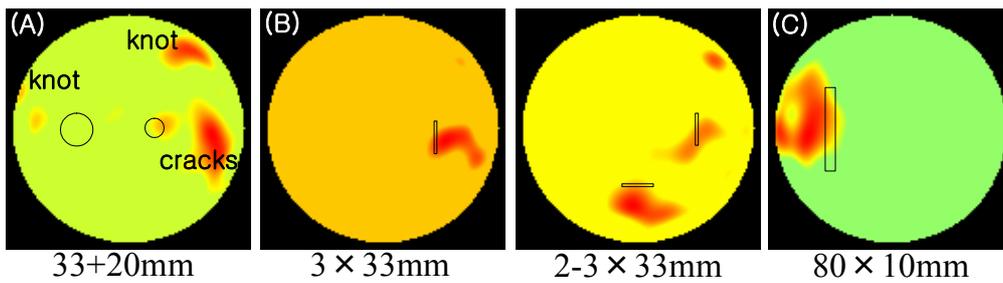


Fig.12. 다양한 형태의 결함을 가지는 시편의 초음파 CT영상.

Fig.12에는 다양한 형태의 인공결함을 가지는 시편에 대한 초음파 CT 영상을 제시하였다. (A)시편의 경우 크기가 다른 2개의 인공결함을 생성하였는데, 원래의 시편에 존재하던 용이와 인공결함의 생성과정에서 발생한 할렬로 인해 명확한 결함의 탐지가 어려웠다. CT 영상구성 과정에서 결함의 유무를 결정하는데 동일한 연료각에서의 평균값을 사용하므로 여러 결함이 동시에 존재할 경우에 개개의 결함이 상대적으로 작게 평가된 것으로 생각된다. (B)시편은  $3 \times 33\text{mm}$ 의 직사각형 결함을 생성한 경우인데 CT 영상만으로는 결함의 형태를 구분하는 것이 어려웠다. 또한 (A)시편과 마찬가지로 결함이 하나일 때는 비교적 명확하게 탐지되었으나 결함이 추가됨에 따라 약간 흐려지면서 그 위치가 새로운 결함 방향으로 조금 이동한 것을 확인할 수 있다. (C)시편은 하나의 큰 직사각형 결함( $10 \times 80\text{mm}$ )을 생성한 경우이다.

#### 다. 목재 적용성 고려한 초음파 CT 알고리즘의 수정

##### 1) 알고리즘 개발

상술한 몇 가지의 연구 결과를 통해 기존의 알고리즘을 적용한 초음파 CT 이미지로 어느 정도의 결함 탐지의 가능성을 확인하였지만, 결함의 크기 및 형태를 확인하는 데에는 한계가 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 목재에 적용 가능한 새로운 초음파 CT 알고리즘 (DET, Deterministic method)을 개발하고자 하였다.

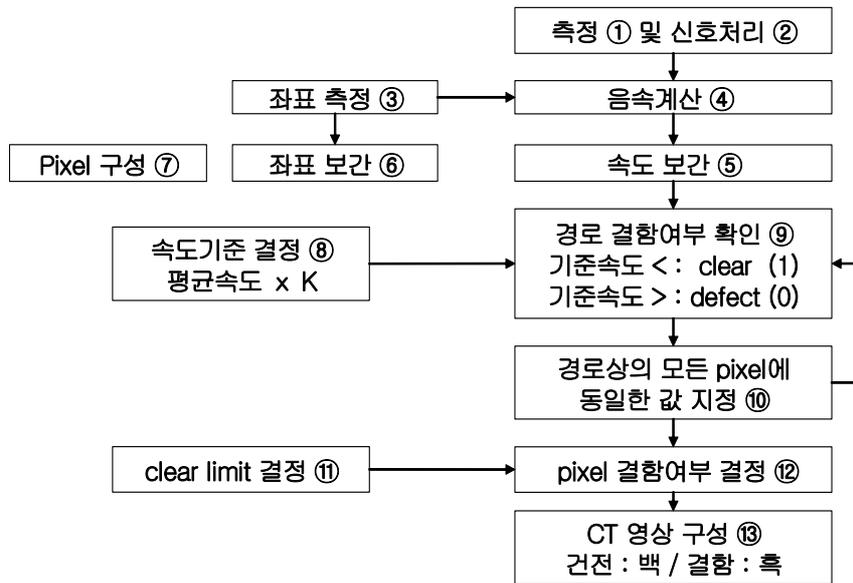


Fig.13. DET법에 의한 CT 영상 구성의 순서도

각 측정에서 얻어진 초음파 전달속도를 CT 영상 구성에 그대로 적용하지 않고 기준속도와 비교하여 해당 경로에 결함이 포함되어 있는지는 결정한다. 이후 그 결과에 따라 새로운 값을 지정하여 영상 구성에 이용하게 된다. 측정속도와 기준속도의 비교를 통해 값이 주어지게 되는데, 측정속도가 기준속도보다 느린 경우에는 0의 값을, 반대의 경우에는 1의 값을 측정결과로 지정하였다. 이후 목재의 이방성 및 미성숙재의 존재에 의한 초음파의 회절을 해결하고자 수를 중심으로 가정하여 초음파의 전달 경로를 수정하였으며, 반사파의 영향을 고려하여 기준속도를 조정하였다.

## 2) 알고리즘의 적용 및 검증

### 가) 무결점재

인공결함을 생성하기에 앞서 지름 200mm, 두께 30mm의 아까시나무 (*Robinia pseudoacacia* L.) 5개의 시편에 대해 개발한 알고리즘을 이용하여 CT 영상을 구성하였다. 부재의 외관에서는 용이를 제외하고는 특별한 결함이 관찰되지 않았지만, 역투영법과 SIRT법에 의해 얻어진 CT 영상에서는 전체적인 왜곡이 심하게 나타남을 확인할 수 있다. 역투영법에 의한 CT 영상에서 1, 3, 4, 5번째 시편의 결과에서 탐지된 용이의 크기는 실제의 것보다 과장되게 나타났다. 또한 전체적으로 CT 영상에 동심원 형태의 왜곡이 발생한 것을 확인할 수 있는데, 이는 목재의 이방성에 의한 영향으로 사료된다.

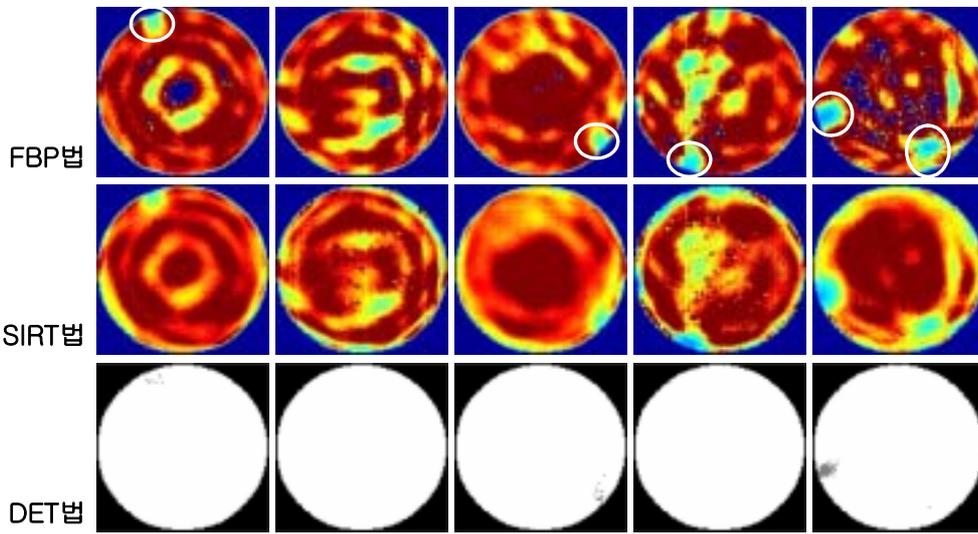


Fig.14 건전재에 대한 역투영법, SIRT법 및 DET법을 이용한 CT 구성

### 나) 원형 결함 (결함 크기)

결함의 크기에 따른 CT 영상의 변화와 탐지 가능한 결함의 최소 크기를 확인하기 위하여 Fig.11에서 이용된 시편의 결과를 이용하여 CT 영상을 구성하였다. 역투영법과 SIRT법을 이용한 경우, 결함의 크기가 18mm 이상인 경우에는 어느 정도의 탐지가 가능하였으나 그 형태는 실제의 것과 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다. 또한 지름 33mm 이상에서 비교적 원형에 가깝게 결함이 탐지되었지만, 실제 결함의 위치보다는 다소 시편의 가장자리 방향으로 이동되어 나타난다. 이에 반해 DET법을 이용하

여 구성된 CT 영상에서는 13mm 이상의 결함이 탐지되었으며 결함의 유무를 더욱 확실하게 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

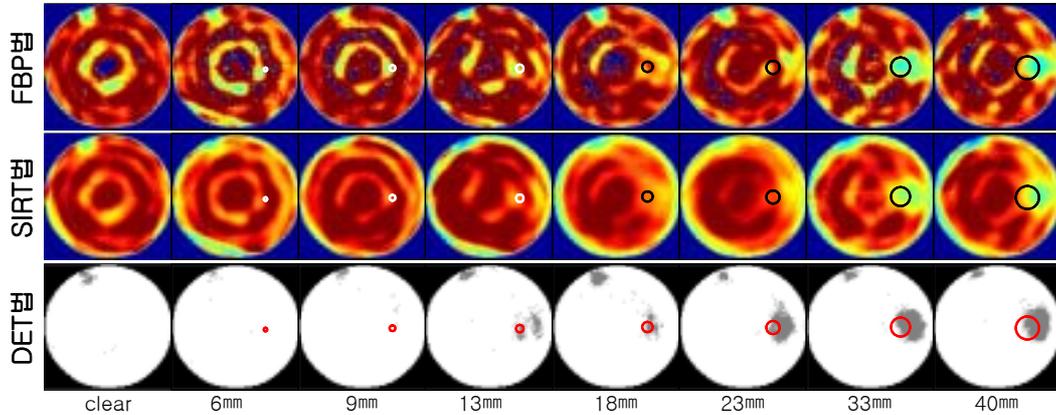


Fig.15 역투영법, SIRT법 및 DET법을 이용한 CT 구성 결과 (원형결함)

다) 직사각형 결함 결함 형태

목재 부재에 흔히 나타날 수 있는 열화 피해의 하나인 충해를 모형화하기 위하여 목재에 수직한 직사각형 형태의 인위적 결함을 생성한 후 CT 영상을 구성하였다. 세가지의 알고리즘을 이용한 결과 모두에서 결함이 시편의 가장자리 쪽으로 확대되어 나타남을 확인할 수 있다. 이는 상술한 바와 같이 목재의 이방성으로 인해 나타나는 결과라 사료된다.

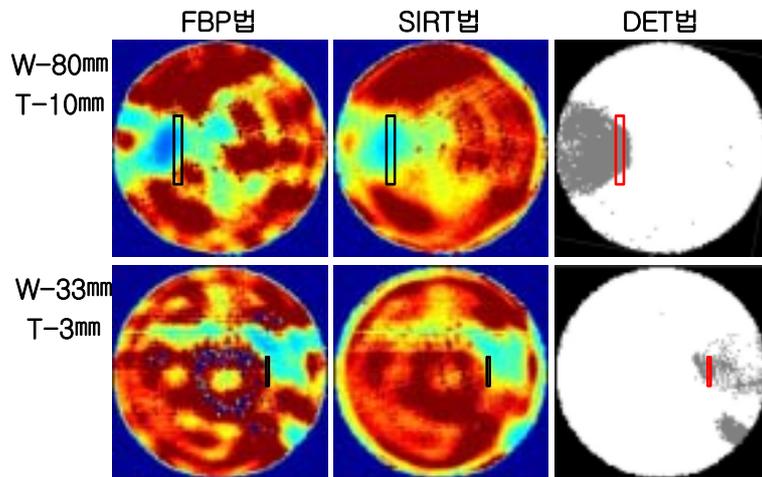


Fig.16 역투영법, SIRT법 및 DET법을 이용한 CT 구성 (직사각형 결함)

라) 다중 결함

마지막으로 하나의 시편에 여러 결함이 동시에 존재하는 경우에 발생할 수 있는 문제점을 확인하기 위해 두개의 원형, 혹은 직사각형의 결함을 생성하여 실험하고 CT 영상을 구성하였다. 이와 더불어 시편을 눕혀 놓고 촬영한 X선 필름을 같이 제시하였다. 두 개의 결함이 같이 존재하는 경우 초음파와 CT 영상의 왜곡은 더욱 심한 것을 확인할 수 있다. 이는 결함이 동시에 존재함으로 인하여 대부분의 파가 결함을 통과하게 되기 때문인 것으로 사료된다.

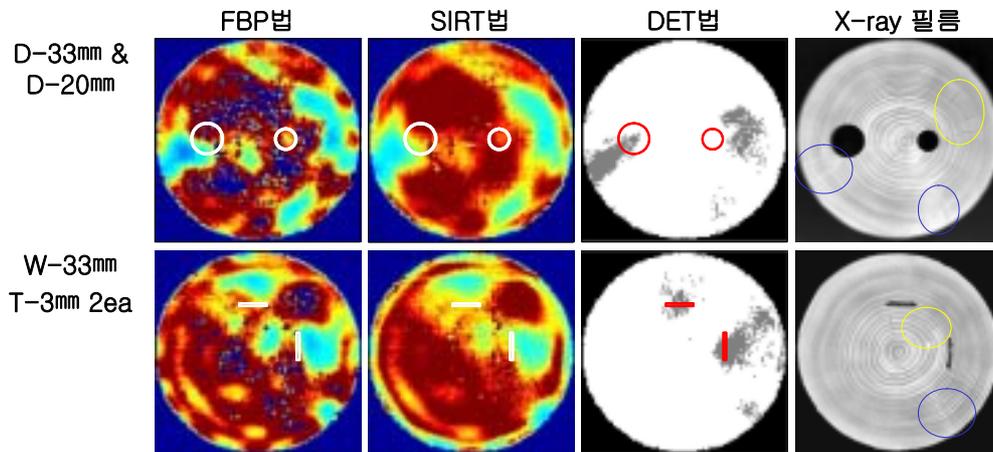


Fig.17 역투영법, SIRT법 및 DET법을 이용한 CT 구성 및 X선 사진  
(다중결함)

## 2. 목재 열화 탐지용 X선 CT 개발

### 가. X선 실험 시스템 구축

Fig.18은 X선 실험 장비의 간략한 모식도이다. X선 실험은 실제 현장에서 사용할 수 있도록 이동 가능한 SOFTEX-K4 장비를 이용하였다. 이 장비는 X선이 발생하는 부분인 X-ray source와 전류와 전압 그리고 방사 시간을 변화시켜 발생 X선의 강도를 조절하는 control box로 이루어져 있으며, 사용된 X선 필름은 25.4×30.5(cm) 크기의 FUJI IX50, FR이다. 시편의 지름, 밀도에 맞추어 전류, 전압, 방사시간 그리고 필름을 달리

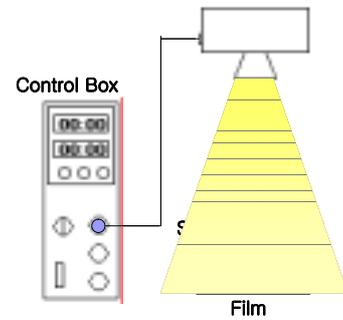


Fig.18. X선 실험 장치

하여 실험하였으며, 이를 통해 최상의 이미지를 얻고자 하였다. X-ray 필름의 정확한 감광정도를 확인하기 위하여, 필름 스캐너(Umax : Power Look 2100XL)를 이용하여 각 pixel의 명도를 측정하였으며, 측정된 명도와 X-ray 강도 사이의 상관관계로부터 X-ray 강도를 결정하였다.

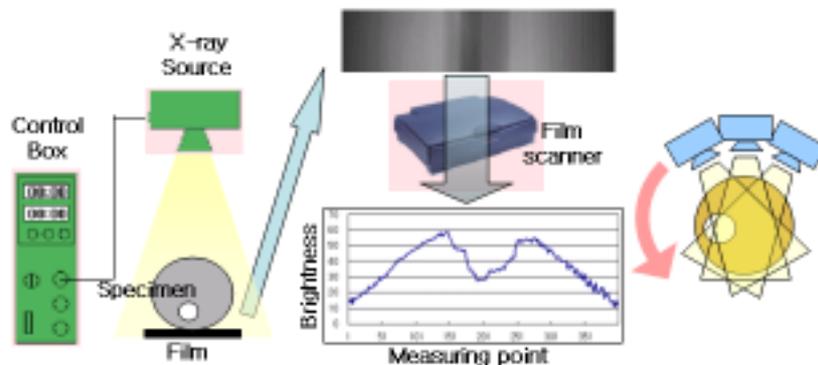


Fig.19. Testing device setup for X-ray CT

### 나. 개발 알고리즘의 적용

#### 1) 역투영법에 의한 CT 영상 구성

Fig.20에서와 같이 0-160°까지 20°간격으로 원형시편을 회전시키면서 총 9회의 실험을 실시하였다. 감광된 X-ray 필름을 400개의 구간으로 나누어 명도를 측정하고, 측정된 명도를 X-ray 강도로 전환한 후에 식(1)을 이용하여 각 측정위치에서의 비중을

계산하였다. 얻어진 비중은 각 위치에서의 좌표와 함께 CT 영상 구성에 이용되었다. CT 영상 구성에는 Back-Projection법에 필터를 적용한 Filterd Back-Projection법을 이용하였다. 최종적으로 얻어진 CT 영상의 크기는 110×100pixel이며, pixel 하나의 크기는 2×2mm가 되게 하였다.

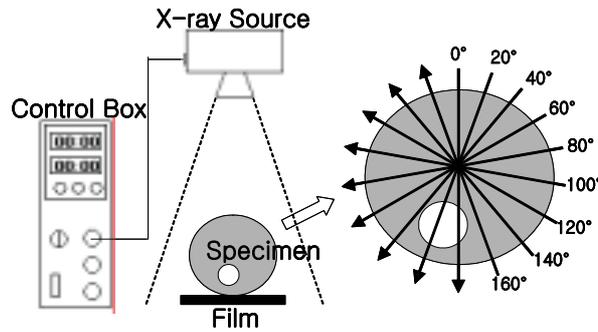


Fig.20. X-ray 실험

CT 영상 구성이 완료된 원형시편에 대하여 시편을 눕힌 상태에서 X-ray 촬영을 실시하였다. 이 경우 X-ray가 투과하는 시편의 두께가 3cm로 비교적 얇고 균일하기 때문에 시편을 육안으로 직접 확인하는 것보다 더 정확한 시편 상태의 확인이 가능하였다.

## 2) 최적 촬영횟수 확인

### 가) 실험 방법

비교적 연륜이 큰 라디에타 파인(*Radiata Pine*)을 대상으로 32회 (5° 간격)으로 X선 촬영을 실시하였다. 9회 촬영에 대한 적절성을 검증하고, 현장 적용성 및 정확성을 동시에 고려하기 위한 최적 촬영 횟수를 확인하기 위해 4, 6, 9, 18, 36개의 각각의 촬영 데이터를 이용하여 CT 영상을 구성하였다(Fig.21). 대략적인 시편의 연륜 탐지가 가능한 최소의 촬영 횟수를 확인하여 이를 실험에 이용하고자 하였다.

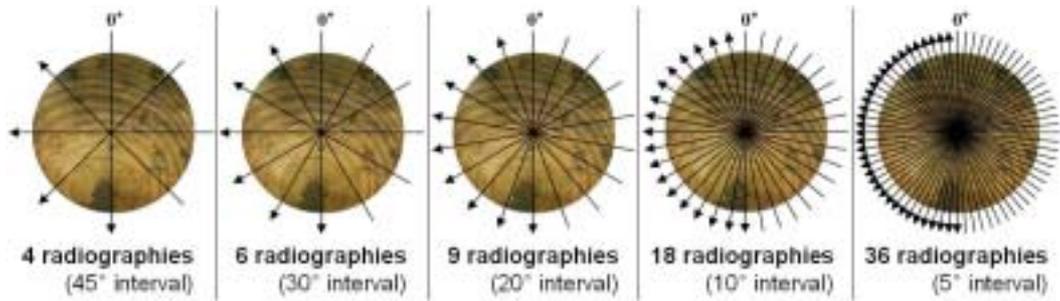


Fig.21. Methods of radiographies due to the number of projections

나) 실험 결과

많은 X선 필름을 이용할수록 더욱 정확하고 자세한 CT 영상이 구성되었음을 알 수 있다. 18회, 36회의 radiography를 이용한 경우, 수의 위치, 심변재의 함수율 차이에 의한 대략적인 경계 및 연륜 까지도 매우 정확하게 탐지되었음을 확인할 수 있다. 반면 4회, 6회의 radiography를 이용한 경우에는 영상의 왜곡이 매우 심하며, 대략적인 밀도의 분포를 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해 현장 적용성 및 정확성을 동시에 고려하기 위하여 9회의 촬영 횟수가 적당함을 확인하였다.

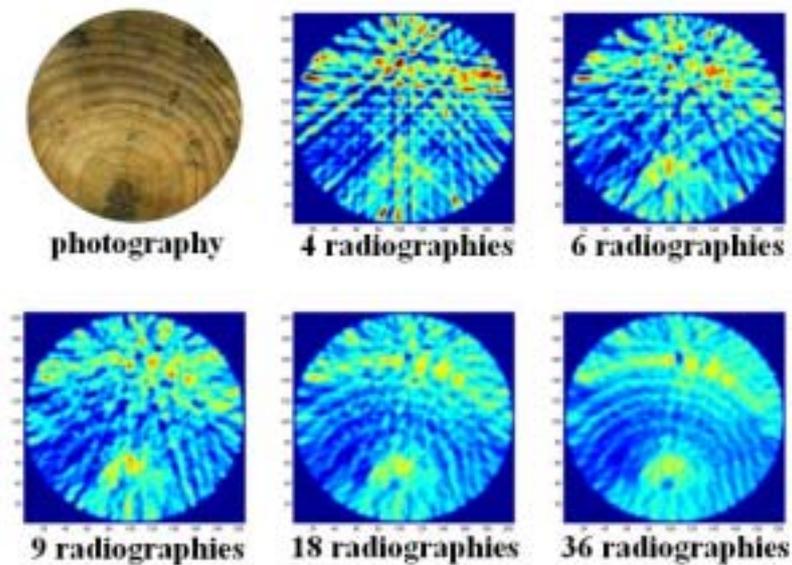
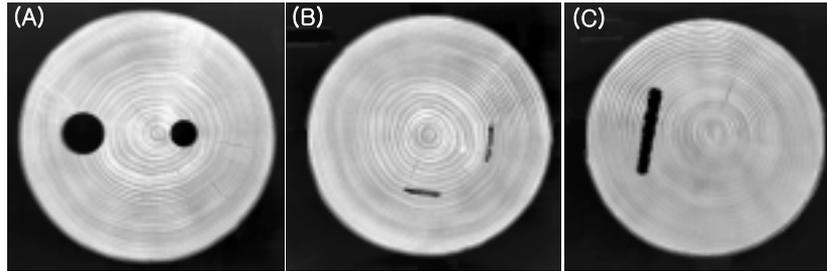


Fig.22. Photography and CT images (FBP)

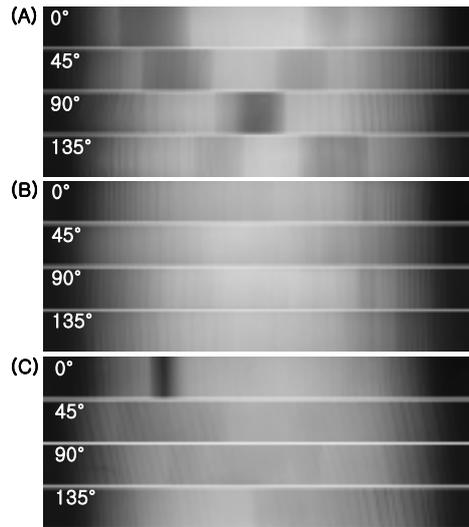
**다. 실험적 검증**

얻어진 CT 영상과 비교하기 위하여 각각의 시편들을 눕혀서 촬영한 X-ray 사진을 나타내었는데, 시편 내에 인공적으로 생성한 결함들 이외에도 용이와 할렬의 존재를 확인할 수 있다.



**Fig.23. 다양한 결함을 가지는 시편의 횡단면 X-ray 사진.**

Fig. 24은 Fig. 23의 시편을 각각 네 방향에서 촬영한 결과이다. 시편의 형태가 원판 형태이기 때문에 두께의 영향으로 인해 전체적으로 중심이 밝고 가장자리로 갈수록 어두워지는 경향을 나타내었다. (A)시편의 경우 결함의 위치와 크기가 명확하게 나타났으나, (B)시편의 경우에는 결함의 폭이 좁기 때문에 결함이 명확하게 나타나지 못하고 사진의 오른쪽에서 매우 흐르게 나타났다. (C)는 직사각형 결함의 크기를 80×10mm로 키운 경우인데 비교적 정확하게 결함의 위치와 크기를 확인할 수 있었다.



**Fig. 24. 4-direction X-ray photographs**

Fig.23과 동일한 3개의 원형시편에 대하여 필터를 사용하지 않고 얻은 X-ray CT 영상을 Fig.25에 나타내었다. 초음파 CT와 비교하여 전체적으로 결함의 크기, 형태, 위치가 정확하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었으나, 결함의 폭이 3mm로 작은 (B) 시편의 경우에는 결함이 나타나지 않았다. 또한 결함의 길이가 매우 긴 (C)시편의 경

우에는 결함의 장축방향을 따라 전체적으로 영상의 왜곡이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

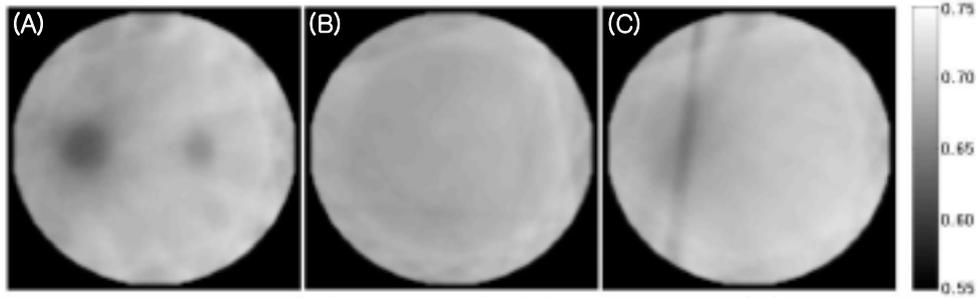


Fig.25. 필터를 사용하지 않은 X-ray CT 영상.

인공결함 위치에서는 실제 목질이 존재하지 않으므로 비중이 0임에도 불구하고, 건전한 부위(0.7-0.75)와 큰 차이가 없는 0.6-0.65의 범위에서 나타났으며, 결함의 경계 또한 명확하지 않았다. 이러한 문제를 해결하기 위해 RAM-LAK, Shepp-Lagan, Lowpass cosine의 세가지 필터를 사용하여 CT 영상을 구성하였는데, 필터의 종류에 따른 차이는 나타나지 않았으므로 Fig.26에는 RAM-LAK필터를 사용한 결과만을 나타내었다. (A)와 (C)시편의 경우 결함 위치에서의 비중이 약 0.2 정도로 실제와 많이 근접하였음을 확인할 수 있으며, 결함의 경계도 명확해졌음을 확인할 수 있다. 특히, 결함 탐지가 불가능하였던 (B)시편의 경우에도 다른 시편보다는 다소 흐리지만 결함의 존재가 영상에 반영되었음을 확인할 수 있다. 필터를 사용할 경우 여러 측면에서 영상 품질의 향상이 확인되었으나, 건전한 부위에서의 비중 편차가 증가하였으며, (C)시편의 장축방향에서 나타나던 영상의 왜곡 또한 더 선명하게 나타난 것을 확인할 수 있다.

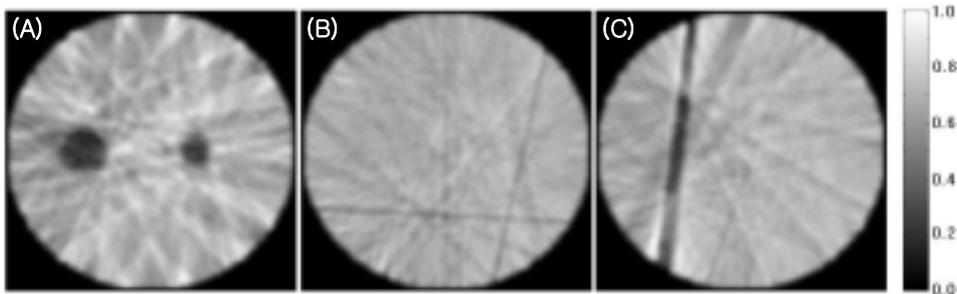


Fig.26. RAM-LAK필터를 사용한 X-ray CT 영상.

초음파 CT를 통해 확인되었던, 웅이나 할렐 등의 결함은 전혀 영상에 반영되지 않았는데, 웅이는 건전한 목재 부위와의 비중 차이보다는 주변 목리의 어긋남으로 인해 초음파 전달속도에는 크게 영향을 미치지 않지만 목리방향에 영향을 받지 않는 X-ray에서는 그 차이가 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다. 할렐의 경우에는 결함의 폭이 매우 작기 때문에 X-ray CT를 통해서도 탐지가 어려울 것으로 예상된다.

### 3. 인공열화재의 비파괴 평가

#### 가. 단계별 열화 대시편의 제조

##### 가) 목재 시편의 준비

경상북도 봉화 산림조합 목재집하장과 인천지역 제재소에서 구입한 소나무와 라디에타소나무 생원목을 원주가공하여 직경이 20cm의 원주가공재를 준비하였다. 준비된 원주가공재로부터 길이 30cm의 시편을 대형 웅이를 피하면서 필요량 채취하였다. 소나무 시편은 그대로 사용하였으나 라디에타소나무 시편은 가압처리에 의해 물을 시편 내로 강제 주입하여 함수율이 80~100%가 되도록 조절하였다.

##### 나) 공시 부후균

소나무 시편의 강제 부후에는 한국산업규격(KS)과 일본산업규격(JIS)의 목재 방부제 효력시험용 공시 갈색부후균인 *Tyromyces palustris*와 미국 재료시험협회(ASTM)의 목재 자연내후성 시험용 공시 갈색부후균중 하나인 *Gloeophyllum trabeum*을 사용하였으나 라디에타소나무 시편의 경우에는 *Gloeophyllum trabeum*만 사용하였다.

##### 다) 시편의 강제부후

소나무 시편에 대한 균 접종은 직경 6mm 드릴을 사용하여 시편 중앙부에 뚫은 구멍(깊이 10.5cm)에 접종원을 삽입함에 의해 실시하였다. 소나무 시편용 접종원은 3mm × 3mm × 10mm 크기의 소나무 변재부 소형 시편을 2% malt extract agar(MEA) 평판배지에서 왕성하게 자라고 있는 공시균의 균사체 위에 올려놓은 다음 공시균 균사가 시편 표면을 완전히 덮을 때까지 배양하여 준비하였다. 시편에 구멍을 뚫은 후, 2시간 간격으로 총 여섯 번 동안 매번 증류수 0.5ml를 구멍에 넣어 접종 위치의 함수율을 균의 생육에 적합한 수준으로 상승시켰다. 그리고 시편을 무균상(clean bench) 내로

옹겨 구멍 내부를 70% 에탄올로 멸균한 후 무균상 내에 일정시간 방치하여 에탄올이 구멍 내부로부터 완전히 증발되도록 하였다. 최종적으로 멸균수를 이용한 세척을 통해 구멍 내부의 잔류 가능한 에탄올 성분을 완전히 제거하였다. 준비한 소나무 시편용 접종원을 구멍 내로 집어넣은 다음 직경 6mm의 멸균 목재 dowel로 구멍을 막아 접종용 구멍을 통한 오염을 방지하고자 하였다.

라디에타소나무 시편에 대한 균 접종 역시 시편 중앙부에 직경 8mm 드릴을 사용하여 뚫은 구멍(방사방향으로 시편의 중앙부인 10.5cm 깊이와 시편의 표면과 중앙부 사이의 중간 부위인 5.5cm 깊이)에 접종원을 삽입함에 의해 실시하였다. 라디에타소나무 시편의 경우에는 MEA 평판배지에서 자라고 있는 공시균 최외곽 부분의 균사를 2.5% malt extract 액체배지에 접종하여 일주일간 27°C 온도에서 진탕 배양하여 만들어낸 균사 슬러지를 접종원으로 사용하였다. 시편에 구멍을 뚫은 후 입구를 솜으로 막고 121°C 온도의 고압멸균기에서 180분간 멸균하였다. 시편이 충분히 식은 후, 무균상(clean bench) 내에서 솜을 제거하고 균 접종 위치에 균의 초기 활착을 돕기 위해 소량의 소나무 변재부 톱밥을 채운 다음 준비된 접종원을 주입하였다. 그리고 직경 8mm의 멸균 목재 dowel을 사용하여 구멍을 막아 접종용 구멍을 통한 오염을 방지하였다.

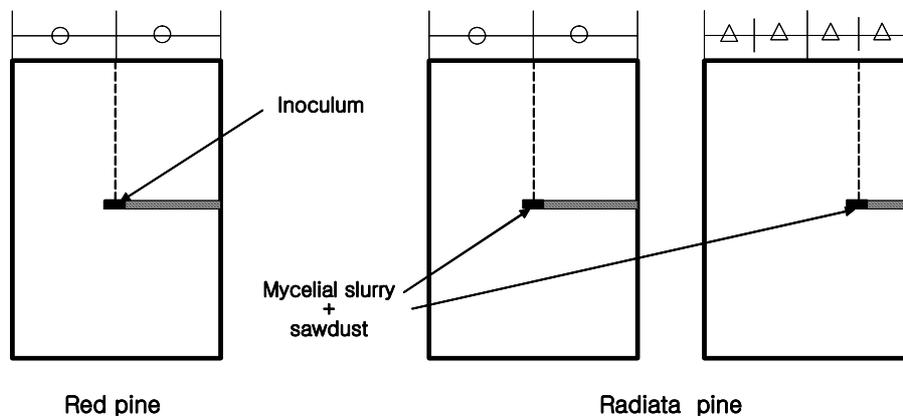


Fig.27. Method used to expose round specimens to decay fungi.

균 접종 후, 소나무와 라디에타소나무 시편 표면의 변재변색과 표면오염을 방지하기 위해서 각각 방미제인 Hylite excell 1% 수용액과 Britewood Q 5% 수용액에 3분간 침지처리 하였다. 플라스틱 용기 바닥에 10cm 두께로 젖은 상태의 질석을 깔고 시

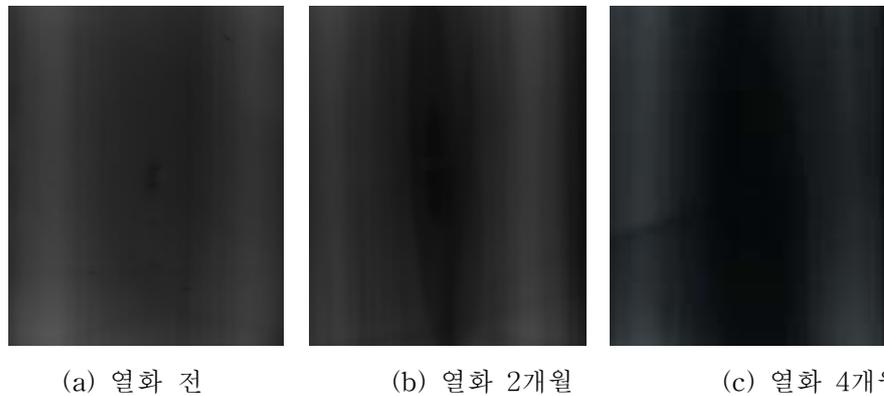
편들을 질석 위에 올려놓은 다음 뚜껑을 닫아 시편으로부터 수분 손실을 최소화하였다. 시편들을 담은 플라스틱 용기는 공시균이 *Gloeophyllum trabeum*인 경우에는 32℃, *Tyromyces palustris*는 경우에는 25℃로 온도가 조절된 항온실에 보관하면서 부후를 유도하였다. 중량감소를 경사를 유도하기 위해 일정시간 간격으로 균 배양을 중지하면서 단계별 열화시편을 제조하였다.

목재에 나타나는 부후에 의한 열화를 정량적으로 평가하고, 이미 개발된 초음파 및 X선 CT 기술의 타당성을 확인하고 개선하고자, 상술한 인공 열화시편을 이용하여 비파괴 평가를 실시하였다. 우선 시간 경과에 따른 열화의 진행 양상을 확인하고 목재에 나타나는 부후에 의한 초기 열화를 탐지하고자 한 지속적 열화 시편에 대한 실험을 진행하였다. 또한 일정 열화 시점에서 절단하여 실제 단면과 CT 결과를 대조, 분석하기 위한 절단 시편에 대한 실험을 진행하였다.

#### 나. 열화의 진행 양상

##### 1) X선 직접촬영법

지속적 열화 시편을 통해 두 개의 갈색 부후균에 의한 소나무에서의 열화 진행 양상 및 정도를 확인했다. 부후의 진행 양상은 큰 차이가 없었으나 진행 속도에 있어서는 *Gloeophyllum trabeum*가 다소 빠르게 진행됨을 확인할 수 있었다.



**Fig.28. 열화 단계에 따른 대시편 X선 radiograph**

Fig.28은 열화 전과 열화 2개월, 4개월 진행에 따른 X선 직접촬영법에 의한 결과의 한 예이다. 열화 전 X선 사진에서 중앙 부근의 주입구를 확인할 수 있으며, 심·변재

의 차이를 X선 명도의 차이로 확인할 수 있다. 열화 2개월 후에는 주입구 부분을 중심으로 시편의 길이 방향으로 검게 나타나서 열화가 진행되었음을 확인할 수 있다. 이런 양상은 열화 4개월 후에 더욱 크게 나타나서 열화가 시편의 두께 방향으로도 상당히 진행되었음을 알 수 있다.

## 2) 초음파 CT

제4절에 언급했던 바와 같이 본 연구 과제를 진행하는 중에 초기에는 단순한 FBP (Filtered Back Projection)의 알고리즘을 이용하여 CT 이미지를 구성하였다. 그러나 목재에 적용 가능한 현장용 CT 기술을 개발하는 중에 DET (Deterministic Technique)를 개발하였고, 결과 도출에 이용하였으며, 본 인공열화시편을 이용하여 알고리즘의 개선에 주력하였다.

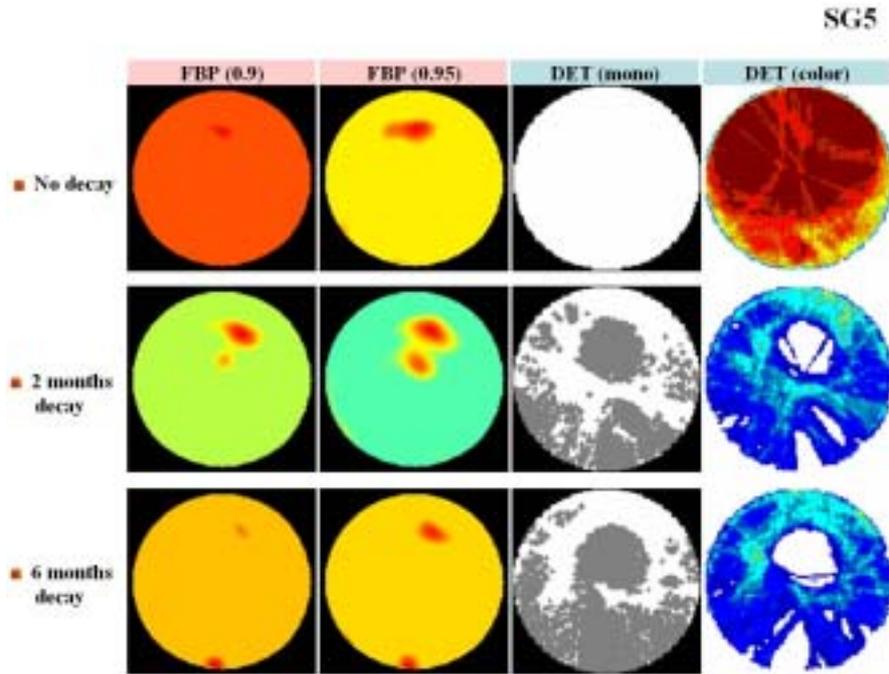


Fig.29 역투영법 및 DET법을 이용한 초음파 CT 영상 (SG5)

Fig.29에서 32는 열화 전과 열화 2개월, 6개월 후의 FBP와 DET의 알고리즘을 이용한 초음파 CT 결과를 나타낸다. 먼저 SG5의 경우 FBP법을 통한 초음파 CT 화상에 열화 전부터 수로 생각되는 부분이 탐지되었다. 이후 열화 6개월 후에는 주입구 부분

이 같이 탐지되어, 열화의 진행에 따라 상대적으로 수 부근의 열화가 작게 탐지되었음을 확인할 수 있었다. DET법에서는 목재의 이방성과 비균질성을 알고리즘에 반영하였기 때문에, 열화 전에는 어떠한 열화도 탐지되지 않았는데, 이는 Fig.26에서 29의 4개의 모든 결과에서 그렇다. 그러나 단 2개월의 열화 만으로 DET법은 매우 민감하게 열화를 탐지하여 시편의 전반이 열화로 판정되었다. 특히 수 부근과 주입구 부근이 크게 탐지되었음을 확인할 수 있다. 열화 6개월 후에는 시편 하부의 열화가 더욱 크게 탐지되었음을 알 수 있다.

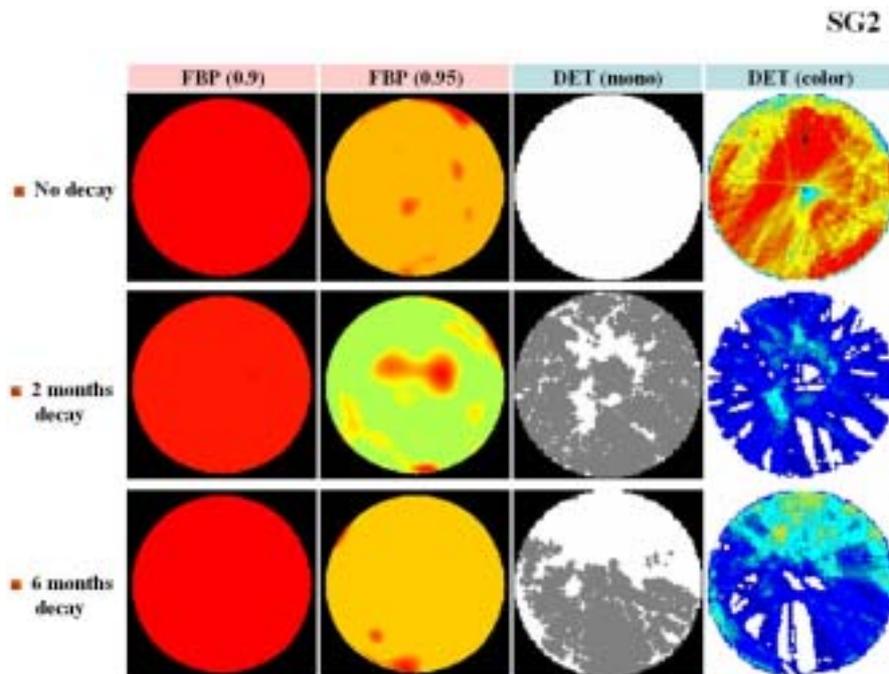


Fig.30 역투영법 및 DET법을 이용한 초음파 CT 영상 (SG2)

SG2의 경우, 민감도를 낮게 한 FBP법의 경우 열화 6개월이 지난 후에도 열화를 탐지하지 못했다. 민감도를 높인 FBP(0.95)의 경우에 열화 전부터 단순한 잡음으로 생각되는 열화가 탐지되었고, 열화 2개월이 지난 후에 상중양부에 열화가 탐지되었다. 절단면을 확인하지 않아 정확한 판정이 어려우나 이 부위가 수로 판단되며, 열화 6개월에 나타난 하부(0도부근)의 열화가 주입구로 판단되는 부분이다. 이에 반해 DET법에 의해서는 열화2개월이 지난 후에 시편의 전반에 걸쳐 열화로 판단됐다. 특히 열화

6개월에서 DET(color)의 결과에서 하부쪽이 열화로 판단되었는데, 이 부근이 정확하게 주입구와 일치하는 부분이다. 주입구를 타고 나타나는 부후가 판정된 것이라 판단된다.

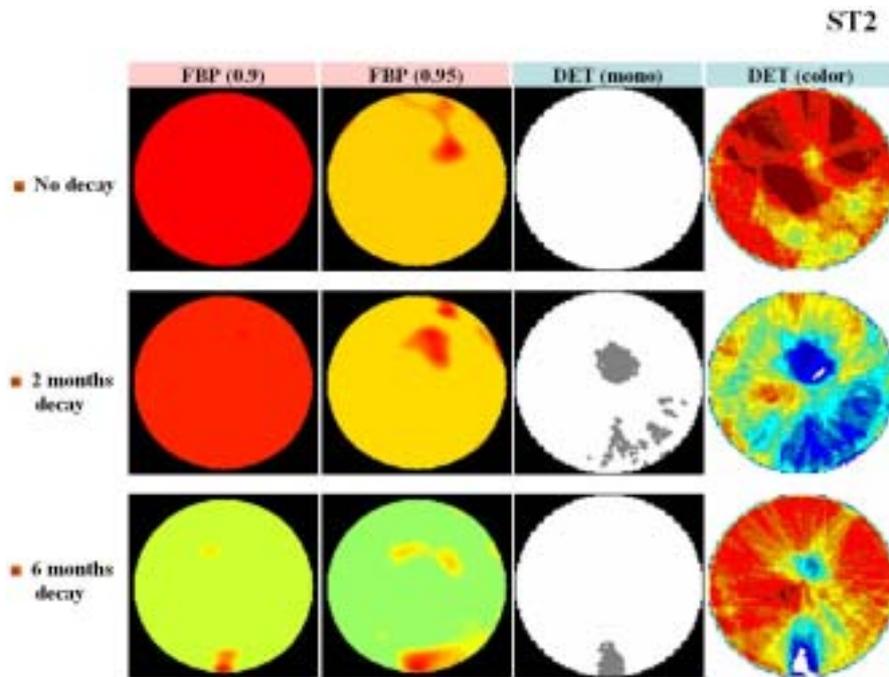


Fig.31 역투영법 및 DET법을 이용한 초음파 CT 영상 (ST2)

ST2의 경우에는 FBP법을 통해 열화6개월 후에 시편 하부의 열화가 탐지되었다. 민감도를 높힌 결과는 상대적으로 신뢰도가 떨어지는 결과를 얻은 것으로 판단된다. DET법을 통해 열화 2개월 후에 수 부근이 탐지되었다. 열화 6개월 후에는 시편 하부의 주입구 부근에서 열화를 탐지하였다.

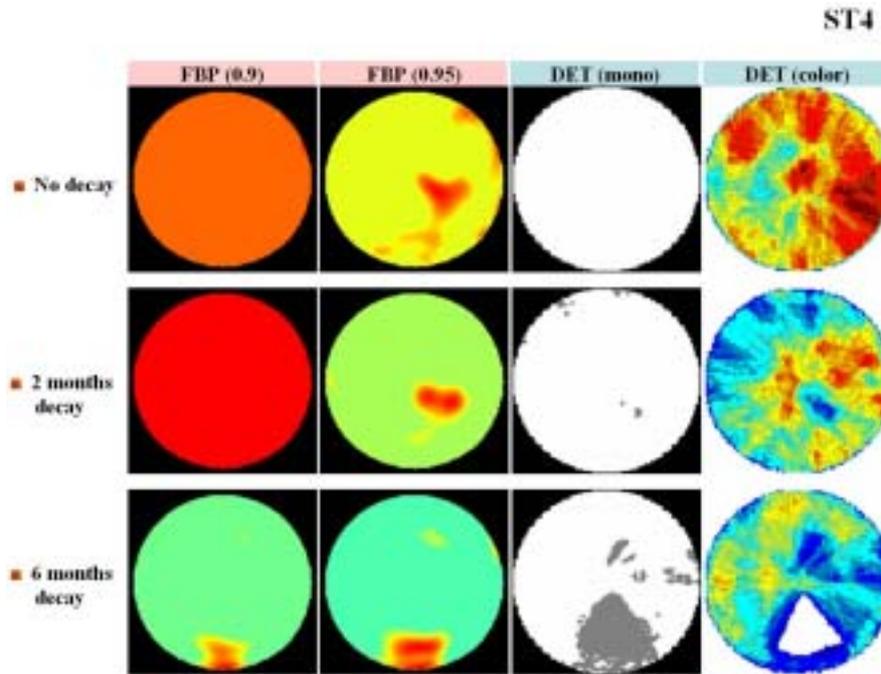


Fig.32 역투영법 및 DET법을 이용한 초음파 CT 영상 (ST4)

마지막으로 ST4의 경우에 있어서 두 방법 모두 열화 6개월 후에 시편 하부에 나타난 열화를 탐지하였음을 알 수 있다.

#### 다. CT 이미지의 검증

열화 후 일정 기간이 지난 시편들에 대해 절단하여 실제 단면과 도출 결과와의 비교, 분석을 진행하였다. 이를 통해 구성된 초음파 및 X선 CT 영상을 지속적인 개선하였다.

##### 1) 건전제

Fig. 33은 열화 2개월 후에 실제 단면 사진과 역투영법 및 DET법에 의한 초음파 CT 영상을 나타낸다. 두 결과 모두 시편 내부가 건전한 것으로 판단하였음을 확인할 수 있다.

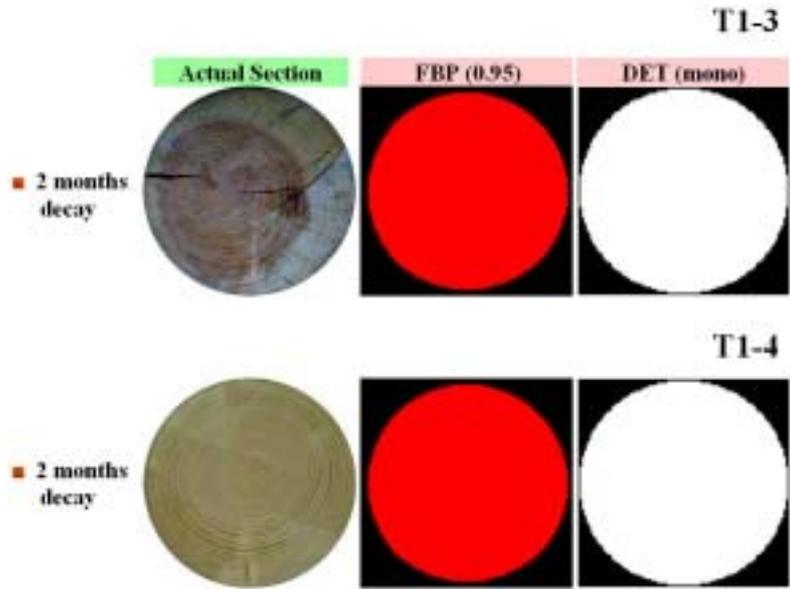


Fig.33. 실제 단면 및 초음파 CT 영상 (건전재)

2) 수 및 비균질부

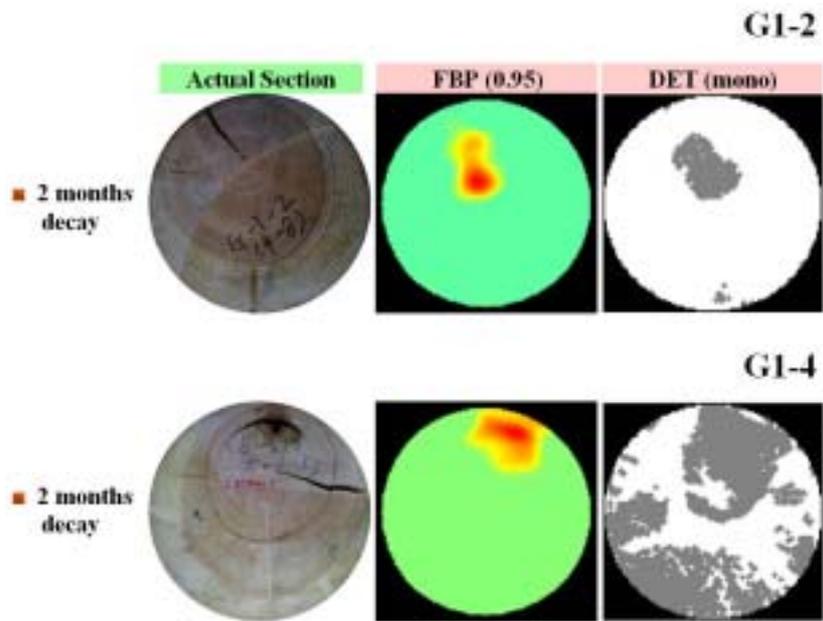


Fig.34. 실제 단면 및 초음파 CT 영상 (수 및 비균질부)

열화 초기에는 주로 미성숙재로 인한 수 부근이 CT 영상에 많이 반영되어 나타났다. Fig.34의 G1-2 시편의 결과에서 이러한 결과를 잘 반영하고 있다. 이와 더불어 DET법을 통한 CT 영상에서는 주입구의 가장 가장자리 부근이 다소의 열화로 탐지되었다.

### 3) 갈색부후균에 의한 열화

주로 주입구의 가장 가장자리 부근에서 열화의 시작이 탐지되었다. Fig.35부터 38까지 4개의 결과에서는 실제 단면 사진 및 초음파 CT, X선 CT 영상이 제시되어 있다.

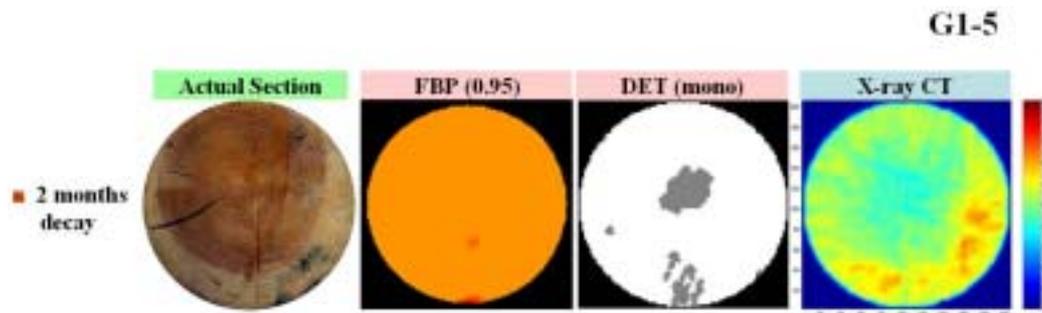


Fig.35 실제 단면 및 초음파 및 X선 CT 영상 (G1-5)

초음파 CT 결과에서는 주로 수(pith)나 주입구 부근에서의 열화가 탐지되었다. 이와는 대조적으로 X선 CT의 결과에서는 심, 변재의 함수율 차이에 의한 경계가 매우 명확하게 탐지됨을 확인할 수 있다. 즉 변재가 심재보다 상대적으로 함수율이 매우 높기 때문에 이러한 밀도 차가 직접적으로 반영된 것이라 할 수 있다.

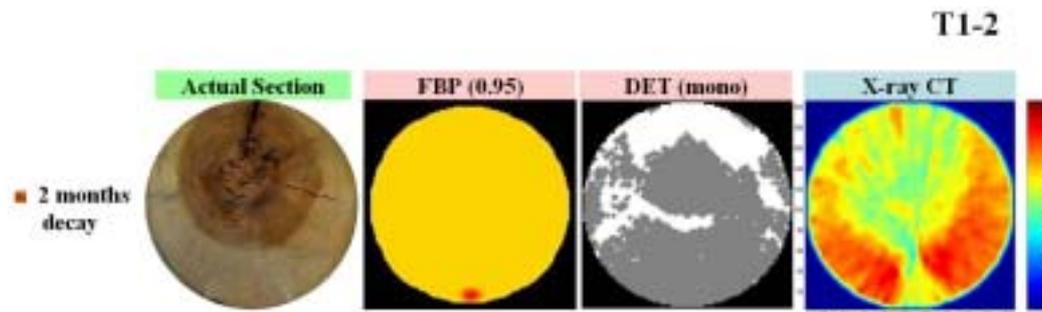


Fig.36 실제 단면 및 초음파 및 X선 CT 영상 (T1-2)

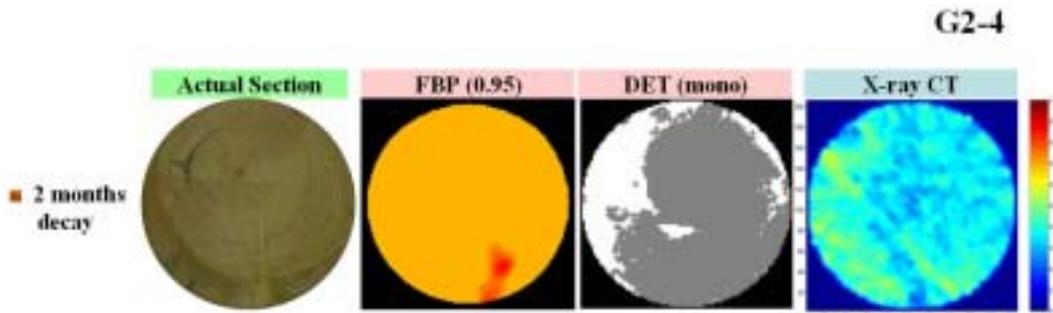


Fig.37. 실제 단면 및 초음파 및 X선 CT 영상 (G2-4)

Fig.38에는 열화 전과 후에 역투영법 및 DET법에 의한 초음파 CT 영상, X선 CT 영상이 종합적으로 제시되어 있다. 역투영법에 의한 초음파 CT 결과에서는 열화 후에 나타난 열화부위가 탐지되지 않았다. 그러나 DET법에 의한 초음파 CT 결과에서는 용이 탐지 되었을 뿐 아니라 주입구의 가장자리 쪽으로 나타난 열화가 선명하게 탐지되었음을 확인할 수 있다. X선 CT 영상의 결과에서는 용이 및 열화부위가 미약하게 탐지되었으나, 심재와 변재의 밀도 차이가 가장 크게 탐지되었음을 알 수 있다.

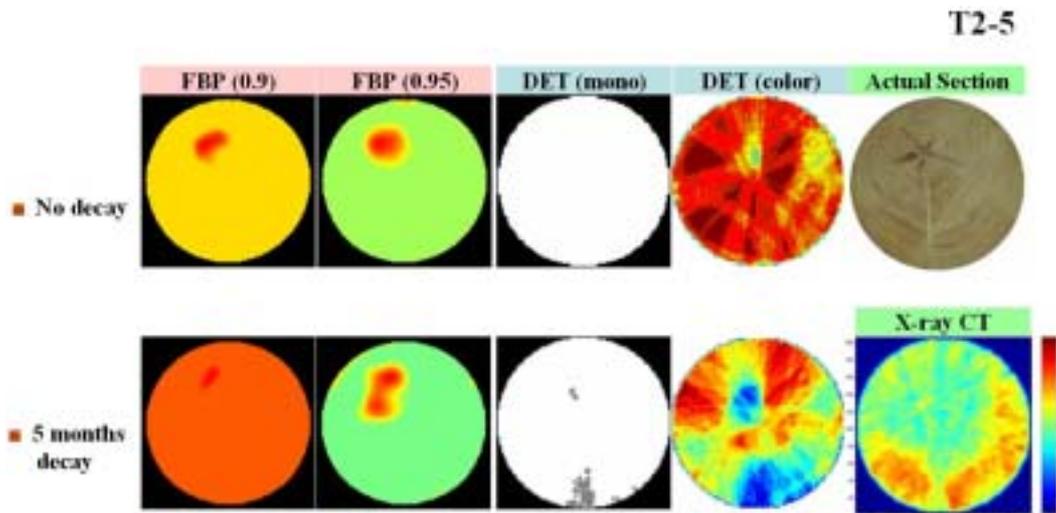


Fig.38. 실제 단면 및 초음파 및 X선 CT 영상 (T2-5)

라. 비파괴 평가의 검증

1) 실험 방법

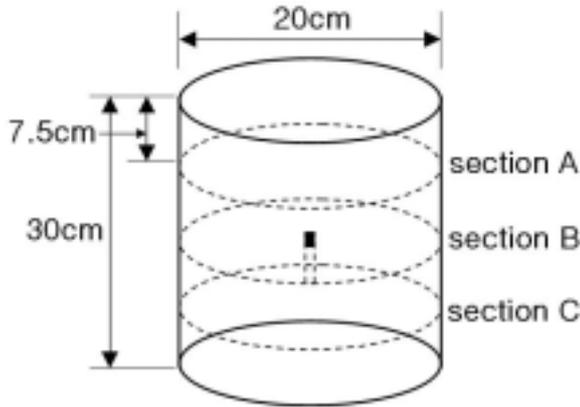


Fig.39. 시편의 시험 위치

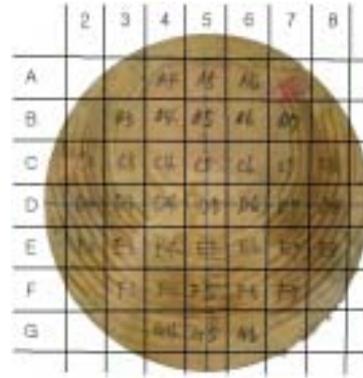


Fig.40. 횡단면 내 소시편

시편 내부의 재료물성 분포를 보다 정확하게 측정하기 위하여 단면 A와 B사이를 Fig.40와 같이 절단하여 소시편으로 제작하였으며, 시편의 크기는 2×2×6cm로 하였다. 먼저 각 시편에 대한 함수율과 전건비중을 측정한 후에 상온에서 조습하여 기건상태에서 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정에는 만능강도시험기(Zwick Z100)를 사용하였으며, 하중속도는 3mm/min으로 하였다.

2) 실험 결과

가) CT 영상 구성

역투영법과 DET법을 이용하여 구성한 초음파 CT 영상과 X선 CT 영상 및 실제 단면의 사진을 각 위치에 대하여 Fig.41에 나타내었다. 사진을 통해 수가 시편의 윗부분에 치우쳐 있으며, 변재부분의 함수율이 높기 때문에 심재보다 진하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 중앙의 위치에서 촬영한 단면사진에는 부후된 목편을 삽입하기 위하여 천공한 드릴구멍이 나타났으며, 드릴 구멍 주위로 부후가 진행된 것을 확인할 수 있다. 부후는 변재부분에서 주로 나타났으며, 심재로는 거의 진행되지 못한 것을 확인할 수 있다. 단면의 위치에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았는데, 이는 횡단방향에 비해서 길이방향으로 균이 쉽게 이동하기 때문인 것으로 생각된다.

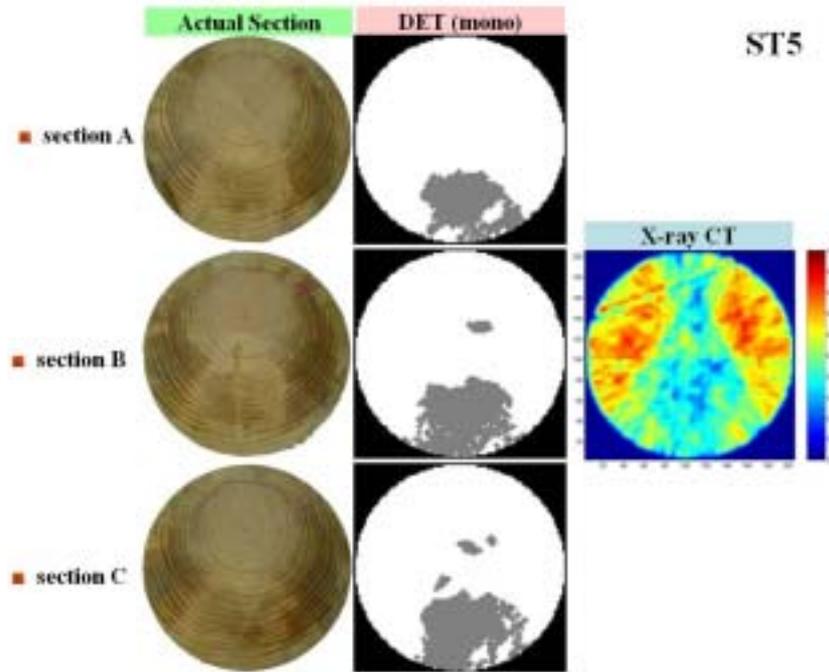


Fig.41. 단면 사진 및 초음파, X선 CT (ST5)

나) 함수율 및 전건비중, 압축강도

소시편에 대한 함수율 측정결과를 Table 1에 나타내었으며, 전건비중 측정결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 1. 위치에 따른 소시편의 함수율(%) 측정 결과.

	2	3	4	5	6	7	8
A	-	87.8	36.0	31.9	38.8	73.6	-
B	92.9	80.6	34.3	34.3	33.2	88.2	86.5
C	98.1	53.7	31.4	32.5	33.3	92.0	128.1
D	133.8	118.0	36.0	32.4	38.4	123.1	130.7
E	128.2	95.7	50.0	47.5	49.6	115.4	119.4
F	127.3	49.1	53.4	53.0	51.8	109.5	74.3
G	-	27.2	33.2	38.0	51.2	44.7	-

모든 시편에서 함수율은 섬유포화점 이상으로 나타났지만, 위치에 따라 다른 경향

을 보였다. 심재부분의 함수율은 30~40%, 부후된 것으로 예상되는 시편의 아랫부분은 약 50% 내외, 부후가 진행되지 않은 변재부분의 함수율은 100% 내외에서 나타나는 것을 확인할 수 있다.

전건비중의 경우에도 위치에 따라 다소 차이가 나타났다. 심재의 경우에는 약 0.34, 변재의 경우에는 약 0.39 정도로 나타났으며, 부후가 예상되는 부분에서는 약 0.26으로 결함이 없는 건전한 위치에서의 변재 비중과 비교할 때 30% 이상의 중량이 감소하였음을 확인할 수 있다.

부후와 인접한 위치인 G4~6 위치에서는 전건비중이 평균 0.34로 건전한 위치에 비해 약 10% 정도의 중량감소가 발생하였다. 시편을 육안으로 확인하였을 경우에는 이 부분에서 부후의 징후를 관찰하기 어려웠지만 함수율과 전건비중 측정결과로부터 유추해볼 때, 이부분에서 초기부후가 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

**Table 2. 위치에 따른 소시편의 전건비중 측정 결과.**

	2	3	4	5	6	7	8
A	-	0.380	0.325	0.327	0.313	0.371	-
B	0.396	0.331	0.325	0.323	0.339	0.338	0.415
C	0.358	0.334	0.343	0.346	0.346	0.327	0.372
D	0.389	0.344	0.345	0.337	0.339	0.347	0.400
E	0.360	0.380	0.257	0.234	0.280	0.384	0.392
F	0.405	0.378	0.265	0.241	0.268	0.381	0.409
G	-	0.408	0.355	0.316	0.350	0.382	-

Table 3에는 압축강도 측정결과를 나타내었다. 압축강도는 전건비중에 비해 더 큰 차이가 나타났다. 부후가 진행되지 않은 건전한 부분을 보면, 심재부분에서는 약 480 kg/cm<sup>2</sup>, 변재부분에서는 약 550kg/cm<sup>2</sup> 정도의 압축강도가 나타났다. 그러나 부후된 위치에서는 50kg/cm<sup>2</sup> 내외로 압축강도가 10% 이하로 감소되었음을 확인할 수 있다. 초기부후로 예상되는 G4~6에서의 압축강도는 평균 363kg/cm<sup>2</sup>로 건전한 부분에 비해 30%이상 감소한 것으로 나타났다.

Table 3. 위치에 따른 소시편의 압축강도(kg/cm<sup>2</sup>) 측정 결과.

	2	3	4	5	6	7	8
A	-	587	498	472	369	455	-
B	611	479	480	427	500	517	615
C	500	494	488	501	492	479	565
D	527	481	467	344	461	482	599
E	481	404	35	54	144	530	574
F	532	428	20	16	65	580	620
G	-	516	372	262	457	554	-

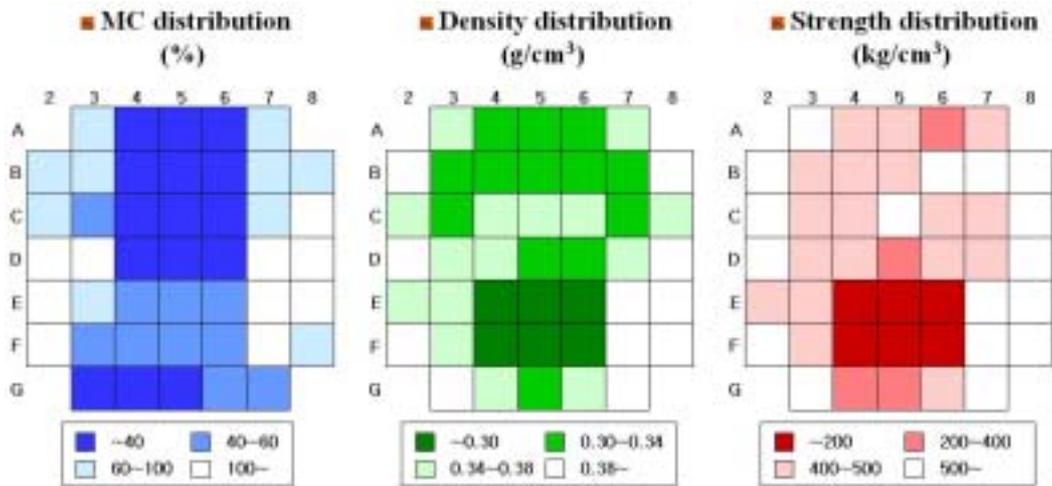


Fig.42. 함수율, 밀도 및 강도 분포

Fig.41에서 DET법을 이용해 구성한 CT영상을 살펴보면 G4~6위치가 결함으로 탐지된 것을 확인할 수 있다. 따라서 중량감소율 10% 정도의 초기부후에 있어서도 초음파의 전달에 영향을 미치며, 초음파 CT 시스템을 이용하여 탐지가 가능한 것으로 판단된다. 초기부후는 시편을 절단하여 육안으로 확인할 경우에도 식별이 어려우며, 측정결과에서도 나타난 바와 같이 압축강도는 매우 크게 감소시키기 때문에 비파괴 검사법을 이용한 탐지방법이 개발이 매우 중요하게 고려되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. Drilling Resistography 개발

##### 가. 밀도와 드릴저항시험 결과와의 상관관계

###### 1) 연구 방법

드릴 저항 시험법은 기본적으로 드릴 날이 목재 내로 뚫고 들어가는데 목재가 여기에 저항하는 상대적인 힘을 거리에 따라 연속적인 디지털 신호로 전환하여 측정하는 방법이다. 측정된 결과를 통해 부재의 압축 강도를 예측하기 위해서는 밀도와 상관관계를 통해 디지털 신호를 밀도로 환산하여야 한다. 본 연구에서는 하나의 시편에 대하여 목리에 수직한 두 방향으로 실험을 실시하였다. 실험 종료 후에는 육안으로 관찰하고 시편과 대조 확인하여 오차가 있거나 실험상의 문제점이 있는 데이터는 결과에서 제외하였다. 실험 장치 및 시편은 다음 Fig.43과 같다.

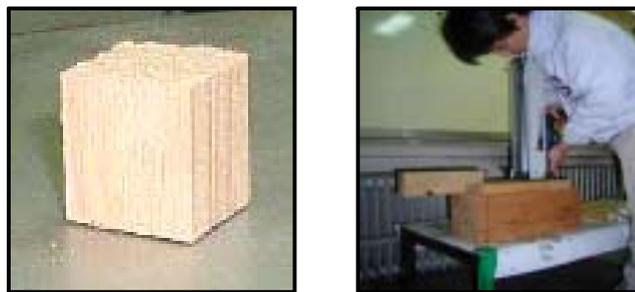


Fig.43. Drilling test specimen and equipment

각 시편에 대하여 연륜과 수직을 이루는 경우를 기준으로 하여 데이터를 취하여 높이의 평균값을 얻었다. 그러나 연륜에 접선방향으로 드릴 바늘이 통과하는 경우는 춘재의 경우 매우 낮게 춘재의 경우 매우 높게 나오므로 제외하였고, 일정한 각을 가지는 연륜을 통과하는 경우 각 시편에서 얻어지는 두개의 결과의 높이 평균값을 대표값으로 산정하였다. 드릴 저항 시험을 하기 전 모든 시편은 ASTM D2395와 ASTM D4442에 따라서 비중과 함수율을 측정하였다.

###### 2) 연구 결과

각 시편들에 대한 드릴 저항 시험 결과 아래 Fig.44와 같은 드릴 저항과 높이의 평균값을 구하였다. 육안 검사 결과 드릴 저항은 춘추재의 위치를 정확히 반영하고 있

었다.

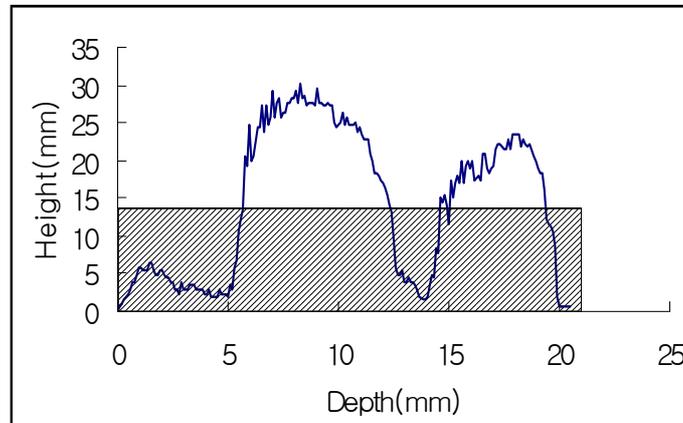


Fig.44. Data of drilling test and evaluation of average height

결과적으로 드릴링 저항 높이와 밀도 사이의 관계는 그래프 분석을 통하여 확인하였으며 그 결과는 다음 그래프와 같다.

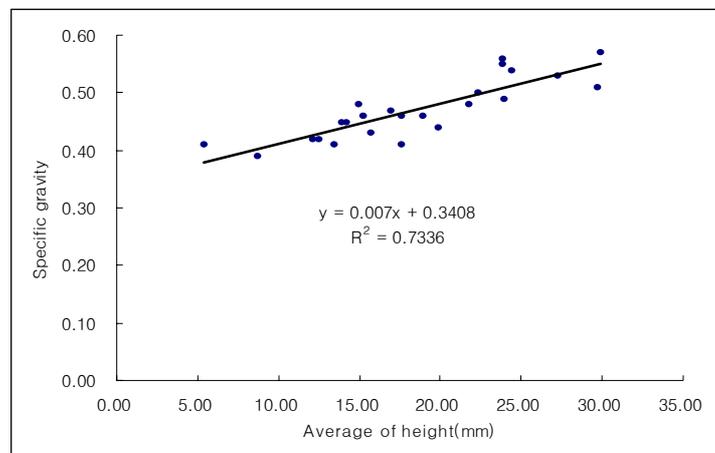


Fig.45. Correlation of specific gravity and average height

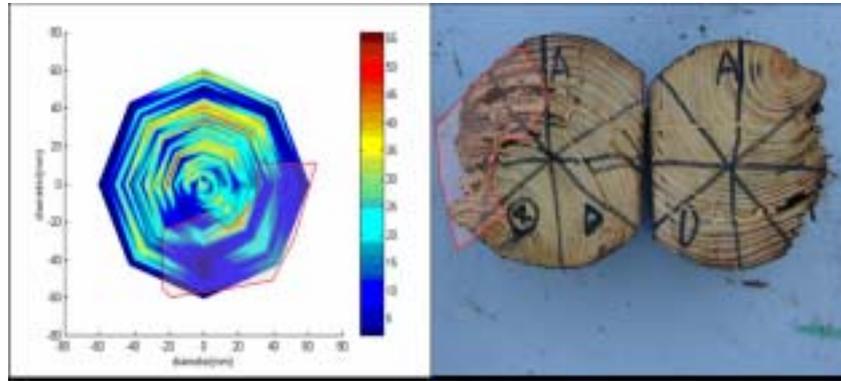
위의 그래프에서 보듯 드릴 저항 시험을 통한 평균 높이와 시편의 밀도 사이에는 매우 높은 상관관계가 나타났다. 이러한 관계를 바탕으로 아래 식과 같은 관계식을 유도하였다. 그러나 비중이 0.3이하인 경우에는 드릴 저항이 0에 가까운 값을 나타내

므로 평균 높이가 0인 경우는 비중을 0.3으로 정하였다. 그리하여 식1을 산출하였다.  
여기서 G는 비중이며, h는 드릴 저항 시험값의 평균 높이를 나타낸다.

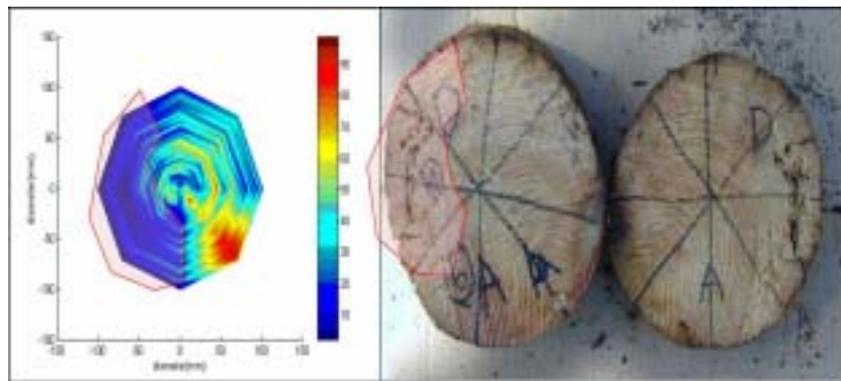
$$G = 0.007h + 0.3408 \quad (\text{식1})$$

#### 나. 실험적 검증

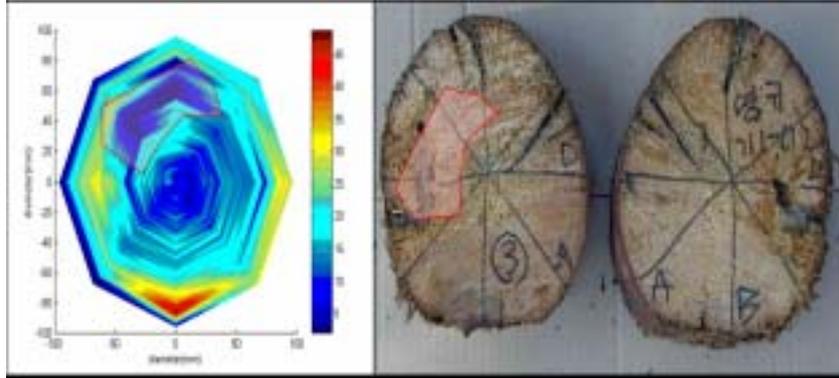
육안 확인 결과 드릴링 결과를 통해 얻어진 단면은 실제 절단면과 매우 유사함을 알 수 있었으며 그 결과는 Fig.46.에 나타내었다.



[member A-4section]



[member B-6section]



[member C-14section]

Fig.46. Comparison with drilling test result and actual section

## 제 6 절 열화 탐지 기술의 현장 적용

### 1. 범어사 불이문

#### 가. 실험 방법

##### 1) 열화 위치 탐지

열화 위치를 탐지하기 위하여 음파전달 시간을 이용하였다. 사용된 비파괴 기기는 PUNDIT-PLUS 와 Metriguard 239A이며 각 기둥마다 길이방향으로 20cm 간격 그리고 동일 높이에서 3번씩 실험하여 열화가 존재하는 위치를 결정한 후, 음파전달시간 측정을 통해 파악된 열화가 의심되는 단면을 중심으로 X선 실험을 하였다. 본 연구에서 사용된 초음파 실험 장치(PUNDIT-plus)는 음파의 전달 시간을 측정하는 것으로서 한 탐촉자에서 음파를 발생시키고 다른 탐촉자에서 신호를 수신하는 방식으로 출력전압 1.2kV를 사용하였고, 공진 주파수 54kHz, 직경 50mm의 종파 압전 탐촉자를 송신과 수신에 사용하였으며 그리스를 couplant로 사용하였다. 응력과 실험 장치 (Metriguard 239A) 역시 초음파 실험 장치와 그 원리는 유사하나 음파를 발생시키는 탐촉자 대신 시편에 직접 충격을 주는 해머를 사용하여 발생하는 음파의 전달 시간을 측정한다.

##### 2) X선 투과 시험

음파 전달 시간을 측정하여 기둥 내부 열화를 탐지하고 열화가 존재할 것이라고 의심되는 부분에 대하여 X-ray를 이용하여 내부 열화를 확인하고자 하였다. 즉, 음파로 실험한 위치에서 열화가 탐지된 위치에 필름의 폭과 너비를 고려하여 열화의 위치가 필름에 충분히 나타날 수 있도록 기둥의 동일 높이에서 X-ray 실험을 하였다.

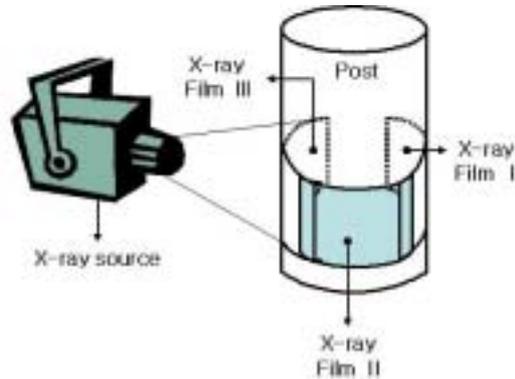


Fig. 1. X-ray methods for confirming the deterioration in-place.

Fig.1에서와 같이 방사선원(X-ray source)을 실험 하고자 하는 기둥과 일정 거리를 두어 설치하고 필름을 선원의 반대편 기둥에 밀착시켜 실험을 실시하였다. 기둥의 평균 둘레는 130cm이었고 필름의 크기는 25×30(cm)이었다. 한 단면에 대해 3장의 필름을 붙여서 실험하였고 열화의 위치를 올바르게 파악하기 위해 각 필름을 약 7.5cm 가량 겹쳐서 사용하였다. 즉, 필름의 위치(Film I, II, III) 에 따라 방사선원의 위치를 이동하여 동일 높이의 모든 부분에 대하여 X선이 전부 투과할 수 있도록 하여 기둥 내부의 열화의 위치와 크기를 확인하고자 하였다.

### 3) 시뮬레이션을 통한 열화 검증

비파괴 평가를 수행함에 있어서 육안으로 탐지가 가능한 외관적인 열화 뿐 만 아니라 보이지 않는 내부의 열화를 탐지하고 평가하는 것이 매우 중요하다. 그러나 목재 고 건축물과 같은 문화재의 경우 그 특성상 내부의 열화를 직접 확인할 수는 없다. 이런 면에서 본 연구에서는 드릴 저항 실험(Drilling resistance test)을 이용하여 기둥 내부의 단면밀도를 시뮬레이션 함으로써 내부 상태를 시각화하여 X선 사진과의 대조를 통하여 X선 결과의 타당성을 검증하고자 하였다.

드릴 저항기(IMLRESI F-400)는 드릴이 목재 내부로 침투해 나갈 때 생기는 저항 값을 침투 깊이에 따라 상대적인 값으로 변환하여 그래프 (Resistograph)로 보여준다. 드릴의 침투에 따라 목재에 작은 구멍(1.5-3mm)이 생기나 구조적인 어떠한 영향도 미치지 않기 때문에 충분히 무시할 수 있다.

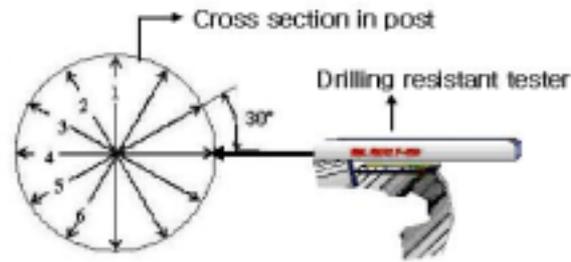


Fig.2. Drilling resistance testing for simulation of cross section.

또한 드릴 저항 실험도 음파를 이용하여 탐지된 열화 위치와 동일 높이(단면)에 대하여 실시하였으며 이는 X선 실험의 위치와도 일치한다. 동일 단면에 대해 6번씩 실험하였으며 이 때 얻어진 드릴 저항 값(Resistograph)을 Matlab (ver.5.2)을 이용하여 시뮬레이션하여 기둥 내부의 밀도 분포를 알 수 있었다.

#### 나. 실험 결과

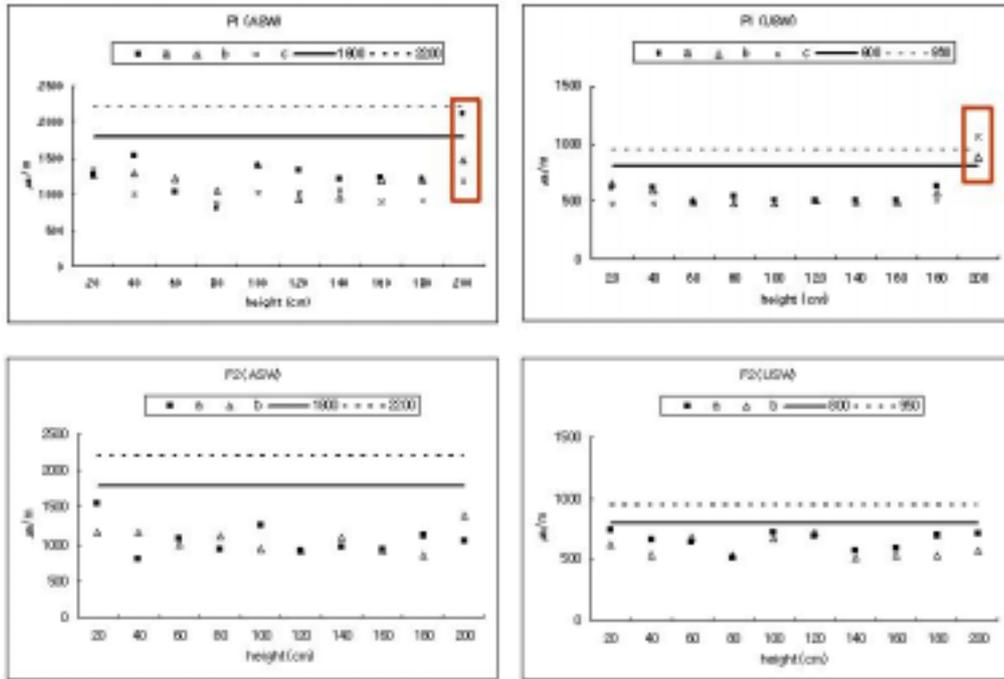
##### 1) 열화 위치 탐지

목재 내에서 음파의 전달은 목재의 물리적 및 기계적인 성질과 많은 관련이 있으며 또한 충격이나 음파 발생 장치 등을 이용한 공명 진동 기술로 측정될 수 있다. 음파의 전달 시간은 목재 내의 상태에 상당한 영향을 받게 되는데 음파와 목리가 이루는 각, 함수율, 밀도 경사 등이 주요한 요인이며 특히 동일 조건에서 목재 내의 열화 상태에 따라 큰 편차의 전달 시간을 보인다. 즉, 음파 전달 시간이 길어질수록 목재 내부에 상당한 열화가 존재한다고 할 수 있으며 본 연구에서도 음파의 이러한 특성을 이용하여 기둥의 내부에 존재하는 열화의 대략적인 위치를 탐지 하였다.

위의 그래프의 범례에서 보여주는 1800, 2200, 800, 그리고 950은 각 음파 전달 속도의 기준이 되는 값이다. 1800과 2200은 응력파의 경우, 각각 열화율(%)이 12%와 17% 일 때 그리고 800과 950은 초음파의 경우 열화율(%)이 각각 8%와 15%일 때를 나타낸다. 열화율(%)이란 드릴 저항 시험기를 이용하여 구한 값으로 건전길이와 열화길이의 비를 의미한다.<sup>3)</sup> 그러므로 각 음파 전달 속도 기준에 비하여 측정된 전달 속도가 큰 경우 열화가 존재할 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

각 그래프의 ASW와 USW는 각각 응력파 시험기와 초음파 시험기를 이용한 음파

전달 속도를 나타내는 것으로 불이문 기둥에 대하여 각 기둥의 높이를 따라 20cm의 간격으로 동일 높이에서 3방향(60°)으로 실험한 비파괴 검사 결과를 보여주고 있다.



\*ASW : Accelerometer Stress Wave, USW : Ultrasonic Stress Wave

**Fig.3. The velocity of accelerometer and ultrasonic stress wave for detecting the deterioration in the front of the building.**

동일 위치에서 음파 전달 시간을 측정하고 실험 위치의 거리를 구하여 속도값으로 변환한 후 기둥 내부의 열화를 탐지하고자 하였다. 앞에서 언급한 음파 전달 속도의 기준값과 실제 실험값을 비교해 보았을 때 기준값 이상의 수치를 나타내는 경우 열화가 존재한다고 할 수 있다. F1의 경우 200cm 높이에서 ASW와 USW가 모두 기준값 이상을 나타내고 있어 열화가 존재하고 있음을 알 수 있으며 F2의 경우에는 모든 값들이 기준값이하를 보이고 있기 때문에 열화가 존재하지 않는 건전한 기둥으로 판단할 수 있다.

하지만, 동일 위치에서 실험을 했음에도 불구하고 응력과 시험기와 초음파 시험기를 사용하여 얻은 결과가 다소 다르다는 것을 확인할 수 있다. 두 종류의 시험기에서

발생하는 음파의 종류가 모두 종파임에도 불구하고 음파 전달 시간의 차이가 존재하고 있는데 초음파의 경우가 응력파보다 전반적으로 낮게 나타나는데 이것은 초음파 시험기에서 발생하는 음파가 응력파보다 보다 쉽게 산란, 감쇠되어 목재 내부로 지남에 따라 갈수록 낮은 음압을 갖게 되어 수신 탐촉자가 저음압의 음파를 인식하지 못하기 때문이라고 생각된다. 또한 비파괴 검사를 실시하기 전 일차적으로 육안적 검사를 했을 때 기둥의 외관상 건전하다고 판단되었으나 초음파의 경우 탐촉자와 기둥의 접촉면의 영향을 줄이고자 고밀도 그리스를 사용한 위치에서 다른 결과를 보여주었는데 이것은 초음파 시험기를 이용한 비파괴 검사의 가장 일차적으로 거론 되는 오차 발생 요인으로 기둥 표면의 평활도에 따른 기둥과 탐촉자의 경계면에서 발생하는 오차라고 생각할 수 있다. 두 시험기기의 기본 원리는 같지만 가장 다른 부분은 음파를 발생하는 장치이다. 우선 응력파 시험기의 경우 시편에 충격을 가해 발생하는 음파를 이용하는 것이고 초음파 시험기의 경우는 탐촉자 내의 압전자를 이용하여 음파를 발생시키게 된다. 이러한 이유로 응력파의 경우 충격에 의해 시편 자체에 발생하는 진동이 수신 탐촉자에 영향을 주어 초음파 시험기로는 측정하지 못한 부분에서도 측정값이 나타날 수 있다.

## 2) 내부 열화 평가 및 검증

음파를 이용하여 기둥 내부의 열화를 탐지하였다. 하지만, 음파만을 이용하여 열화의 위치와 크기를 정확히 판단하기는 매우 어렵다. 탐지된 열화를 직접 확인하기 위해서는 기둥의 단면을 육안으로 관찰하는 것이 가장 정확하나 목조 고 건축물의 경우 단면을 직접 확인 할 수 없기 때문에 본 연구에서는 X-ray를 이용하여 열화가 탐지된 부분에 대하여 실험을 하였고 측정 부분에서 열화가 존재하고 있음을 알 수 있었다.

X-ray를 이용한 목조 고 건축물 기둥 내부의 열화는 앞서 제시한 옹이, 부후, 충해 등의 데이터를 기초로 하여 분석하였으며 이를 바탕으로 기둥 내부 열화의 위치와 크기를 확인할 수 있었다. X-ray 투과사진과 음파 전달 시간을 조합 하여 기둥 내부의 열화를 육안으로 확인 하고 내부에 존재하는 열화의 위치와 크기를 대략적으로 알 수 있었다. 열화의 위치와 크기는 기둥 내부에 열화가 존재하고 있을 때 X-ray 이미지를 구성하기 위한 X-ray 방사 각도 및 측정 위치에 따라 각 이미지에서 확인 할 수 있다. 하지만, X-ray 이미지를 이용한 검사는 아직까지 정성적인 평가 단계에 있으며

정량화를 통한 CT 이미지를 구현하기 위한 연구가 진행 중이다.

기둥 내부의 탐지된 열화에 대하여 드릴 저항 실험을 실시하여 실험 위치의 단면을 시뮬레이션 하였다. 드릴 저항 실험은 드릴이 목재 내로 침투 될 때 발생하는 저항값을 드릴의 침투 깊이에 따라 상대적인 값(%)으로 나타내는 것으로 이 실험을 통해 기둥 내부의 밀도 분포를 확인 할 수 있었다.

Fig.4는 X선 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 드릴 저항 실험을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 Matlab(ver 5.2)를 이용하여 기둥내부 열화 분포를 시뮬레이션 한 것이다. 붉은 색으로 갈수록 목재 내부의 상태가 건전하다고 할 수 있으며 파란 색을 나타낼수록 심각한 열화가 존재하고 있음을 나타낸다. 따라서, 드릴 저항 실험을 통한 시뮬레이션 결과는 기둥 수 부근에 건전한 부분이 존재하고는 있지만 전체적으로 심각한 열화가 진행되고 있음을 알 수 있다.

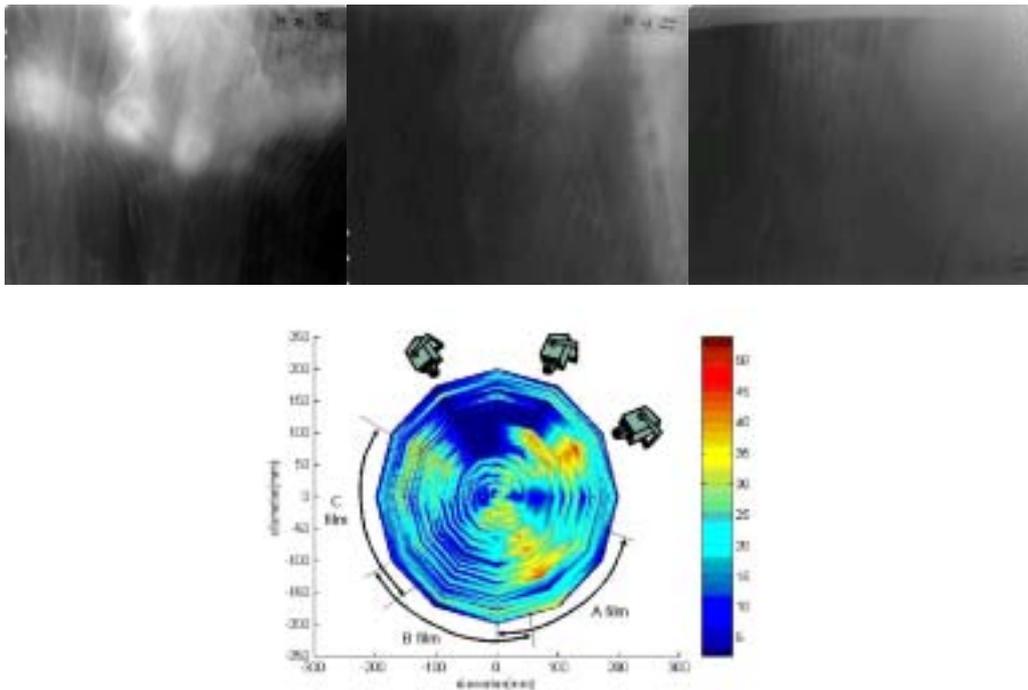


Fig.4. X-ray images(up) and the simulated image(down) by drilling resistance test for detecting the size and position of deterioration in post.

X-ray 이미지와 드릴 저항 실험을 통해 기둥 내부의 열화 위치와 크기를 시뮬레이션 하였다. X-ray 실험 시, 각 필름(A,B,C)과 X-ray source (방사선원)의 기둥에서의 측정 위치는 위와 같다. A 필름을 살펴보면, 건전한 부분과 열화된 부분이 동시에 존재하고 있으며 드릴 저항 실험을 통해 시뮬레이션된 단면도에서 확인 할 수 있다. 필름의 윗부분에서 보이는 밝은 부분은 옹이가 있음을 알 수 있으나 B 필름과 비교해 볼 때 옹이 부분의 밝기가 서로 다르다. 이것은 X-ray가 지나가는 부분에 열화된 부분이 존재하고 있어 일종의 상쇄효과를 일으켜 필름에서 보이는 것처럼 밝기의 차이가 생긴 것이라고 볼 수 있다. 반면 열화가 적은 B 부분에서의 필름에서는 옹이 부분이 상당히 명료하게 나타나고 있으며 필름의 왼쪽 부분은 심각한 열화가 진행된 상태로 해석할 수 있다. C 필름은 B 필름과 겹쳐진 부분에서 열화가 존재하고 있음을 나타내고 있다.

X-ray 이미지와 드릴 저항 실험을 통해 시뮬레이션한 단면도를 서로 비교해 보았을 때, 서로 동일한 부분에서 열화가 확인 되었으며 이를 통하여 X선 투과 실험의 타당성을 입증할 수 있었다.

#### 다. 결론

기둥의 정확한 열화 평가는 단지 열화의 위치와 크기만을 확인하고자 하는 것이 아니라 기둥의 잔여 강도 및 안전성을 평가하는 것을 최종적인 목적으로 하고 있다. 기둥의 잔여 강도 및 안전성을 평가하고자 할 때 가장 기초적인 부분은 열화의 위치를 정확히 탐지하는 것이며 이를 위해 기둥의 모든 위치에서 하나의 방법으로 비파괴 검사를 하는 것은 시간적, 경제적인 측면에서 매우 비효율적인 일이다.

따라서, 본 연구는 다각적인 비파괴 평가의 메카니즘을 구축하여 목조 고 건축물 기둥 안전성 평가를 최종 목적으로 하는 연구에 있어 X선 투과촬영 기법을 도입하여 실험함으로써 일차적으로 기둥 내부의 열화의 위치와 크기를 확인하고자 하였다. 하지만, X선 이미지를 분석하기 위해 X선 이미지 해석이 우선적으로 이루어져야 하므로 건전한 시편에 대하여 예비실험이 이루어졌으며, 또한 옹이, 할렬, 충해 등의 패턴 분석을 통하여 목재에 나타나는 밀도 변이의 특성이 X선 이미지에 어떻게 나타나는지를 확인하였다.

기둥 전체에 대한 X선 이미지를 구현하는 것은 매우 비경제적이므로 음파 전달 시간을 이용하여 기본적으로 열화가 존재하는 부분과 건전한 부분을 나누어 X선 실험

을 실시할 측정 위치를 탐지하였다. 그런 이후에 열화가 존재한다고 판단된 부분에 X선 실험을 실시하고 기둥 내부에 존재하는 열화를 확인 할 수 있었다. X선 이미지를 이용해 기둥 내부의 열화를 확인 하는 것은 기둥의 안전성을 평가하기 위해 실시할 드릴 저항 실험의 위치를 결정하는 단계인데 이것은 X선 이미지를 통해 내부 열화의 위치와 크기를 확인함으로써 열화가 가장 심각한 부분을 결정할 수 있게 하였다. 마지막으로 드릴 저항 실험을 통해 기둥 내부 단면을 시뮬레이션 함으로써 X선 이미지를 이용하여 확인된 열화의 크기와 위치를 정량화 하여 기둥의 안전성 평가를 위한 기초를 마련할 수 있었다. 그러나 여기서 주목해야 할 점은 보다 정확한 열화 탐지를 위해서는 여러 방향에서 X선 이미지를 많이 촬영할수록 보다 정확한 분석을 할 수 있다는 점이다.

X선 이미지를 이용한 영상 처리는 최종적으로 CT(computed tomography)를 위한 기초적인 단계이다. X선을 이용한 CT 처리는 실험위치의 단순한 단면도를 구성하는 것이 아니라 기둥의 잔여강도를 계산하고 최종적으로 기둥 뿐 아니라 건물의 안전성을 비파괴 검사 방법으로 평가하고자 하는 데 있다. 그러므로 X선을 이용한 비파괴 검사는 CT를 위한 가장 기초적인 단계로서 앞으로 많은 연구 과제를 안고 있으며 그 활용방안은 단순히 기둥 뿐 아니라 건물을 구성하고 있는 각 구조부재에도 적용 가능할 것이다.

## 2. 조계사 대웅전

### 가. 개관

#### 1) 배경

조계사는 대한 불교 조계종 직할 교구의 총 본사(本寺)로 서울특별시 종로구 수송동 44번지에 위치하고 있으며, 중앙 총무원, 중앙 종회 등을 갖춘 한국 불교의 중심지이다. 본 사찰은 1395년(태조4) 창건되어 1910년 승려 한용운, 이회광 등이 각황사로 불렸던 유래가 있으며 일제 강점기에는 태고사로 불리다가 54년 불교정화 이후 조계사로 개칭하였다.

본 사찰내의 대웅전은 국내 최대 규모의 단층 사찰 건물로 2000년 9월 10일 서울시 유형 문화재 제127호로 지정되었다. 1928년 전북 정읍에 준공된 보천교 십일전을 1937년 11월 현재의 위치로 이축한 건물로 1970년대 썩은 서까래를 교체하였고, 1999년 기와를 전면 교체한 바 있다. 그러나, 수년 전부터 대웅전 천정과 기둥 등의 안전 문제가 꾸준히 제기되어 2002년부터 대웅전 보수공사에 들어간 상태이며, 열화가 심각한 부재에 대해서는 새로운 부재로 교체하는 등 현재에도 공사가 진행 중에 있다.

본 조사 연구는 기존에 해체된 부재(기둥, 대들보, 중보) 중에서 건진하다고 판단된 부재를 대상으로 비파괴 검사를 실시하여 부재의 열화 상태를 파악하고, 재사용 가능 여부를 평가하기 위하여 진행되었다.

#### 2) 대웅전 구조

조계사 대웅전은 정면 7칸, 측면 4칸의 단층 팔작지붕 건물이며 지붕 처마를 받치기 위해 장식하여 만든 공포는 기둥 위뿐만 아니라 기둥 사이에도 있는 다포양식을 취하고 있다. 외부 5출목, 내부 7출목으로 짠 다포식 7량의 구조로서, 내부 전·후면에 내진주(內陳柱)를 각각 6개씩 모두 12개를 세웠다. 해체하기 이전 조계사 대웅전의 구조에 대한 단면도는 Fig.5에서 나타난 바와 같다.



## 나. 실험 방법

### 1) 조사 대상 부재

대응전에서 해체된 기둥과 대들보, 중보는 각각 6개씩이나 본 조사 연구의 목적은 앞서 언급하였듯 해체된 부재 중에서 가장 건전하다고 판단되는 것을 우선적으로 선별하여 선별된 부재의 재활용 여부의 판단에 있으므로 본 조사연구 에서는 대응전 기둥 4개, 대들보 2개, 중보 2개를 조사 대상 부재로 결정하였다.

기둥의 경우, 근래에 교체가 이루어졌으며 수종은 잎갈나무류 (*Larix spp.*)이며 대들보와 중보의 수종은 전나무류 (*Avies spp.*)로 확인되었다. 아래의 Table 1은 본 조사 연구에서 대상으로 하는 부재의 개수와 치수를 나타내고 있다.

**Table 1. 비파괴 검사 대상 부재**

부 재 명		수 량		치수 (mm)
		전체부재	대상부재	
기둥		6	4	D <sup>a</sup> : 554 ~ 770 L <sup>b</sup> : 8,155 ~ 8,290
보	대들보	6	2	D : 570 ~ 798 L : 13,765 ~ 13,882
	중보	6	2	D : 474 ~ 608 L : 9,625 ~ 9,686
전체		18	8	-

a : Diameter, b : Length

## 2) 비파괴 검사 방법

비파괴 검사는 재료의 최종 사용 성능은 물론 재료에 어떠한 손상을 가하지 않고 재료의 물리적, 역학적, 화학적 성능을 평가하는 검사법이다. 이러한 비파괴 검사는 보존, 계승 시켜야 할 무수히 많은 문화재가 존재하는 우리나라의 실정에 가장 적합한 조사 방법이다. 비파괴 검사는 다양한 방법으로 이루어 질 수 있으며, 어느 하나의 검사 방법 보다는 보다 많은 방법을 동원하여 검사를 실시함으로써, 비파괴 검사 결과의 신뢰도를 더욱 확보할 수 있다.

본 조사 연구에서는 이러한 비파괴 검사를 이용하여 조계사 대웅전 해체 부재의 열화를 조사하였으며 총 3가지의 비파괴 방법을 실시하였다. 우선, 육안검사를 실시하여 대상 부재의 외관을 조사하고 대상 부재의 표면 할렬의 깊이와 폭 그리고 위치 등을 기록하고 외관상 나타날 수 있는 부후와 충해의 가능성을 확인하였다. 하지만, 육안 검사는 목재 표면의 상태만을 파악할 뿐 표면에 나타나지 않는 목재 내부의 열화는 판별할 수 없는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 보완하고 목재 내부에 존재하는 열화 상태를 평가하기 위하여 X-ray 검사와 드릴 저항 검사법을 병행하여 조계사 대웅전 구조 부재의 열화 상태를 검사하였다.

육안 검사를 실시한 후, 개별 부재에서 가장 열화가 심각할 것이라고 판단되는 부분을 3~4곳 선정하여 X-ray 검사와 드릴 저항 검사를 연속적으로 실시하였다. X-ray 검사는 각 조사 단면에 대하여 2회에 걸쳐 대상 부재의 내부 상태에서 존재할 수 있는 내부의 부후와 충해를 확인하고자 하였으며 동일 단면에 대하여 드릴 저항 검사를 실시하여, 내부 열화의 정확한 위치와 크기 등을 조사하였다.

### 가) 육안 검사

육안 검사는 비파괴 검사에 있어 가장 기본이 되는 방법으로서 본 조사 연구에서는 조사 대상 부재의 상하 단부 및 표면을 육안 관찰하여 이상여부를 확인하였다. 표면에서 가장 기본적으로 나타날 수 있는 할렬의 깊이와 폭을 야장에 기록하고 대상 부재의 길이와 치수 등을 측정하였다.

육안 검사를 통하여 부후 및 충해 발생여부 확인하고자 하였으며 또한 내부의 열화 예상위치를 표시하였다. 육안 검사는 직접 눈으로 관찰하는 것과 목재에 충격을 가해 발생하는 소리로서 이상 유무를 확인하였으며 육안 검사 결과를 바탕으로 X-ray 검사의 조사 위치를 개별 대상 부재 당 3~4개 정도로 결정하였다.

나) X선 검사

본 조사 연구에서 사용된 X-ray 검사 장치는 X-ray를 발생시키는 X-ray source와 전압, 전류, 방사시간을 조절하는 control box로 이루어져 있으며 X-ray source에서 발생하는 X-ray를 검사 대상 부재에 직접 방사하여 반대편에 위치한 필름을 감광시켜 부재 내부의 상태를 확인할 수 있다. 본 조사 연구에서는 soft X-ray 장치를 사용하여 검사 대상 부재에 90° 간격으로 총 2회에 걸쳐 X-ray 촬영을 실시하여 부재 내부에 존재할 수 있는 부후, 충해와 같은 결함의 위치 및 크기 등을 확인하였다. 아래 그림은 본 조사연구에서 실시한 soft X-ray 투과 검사 장치와 검사 방법의 모식도이다.

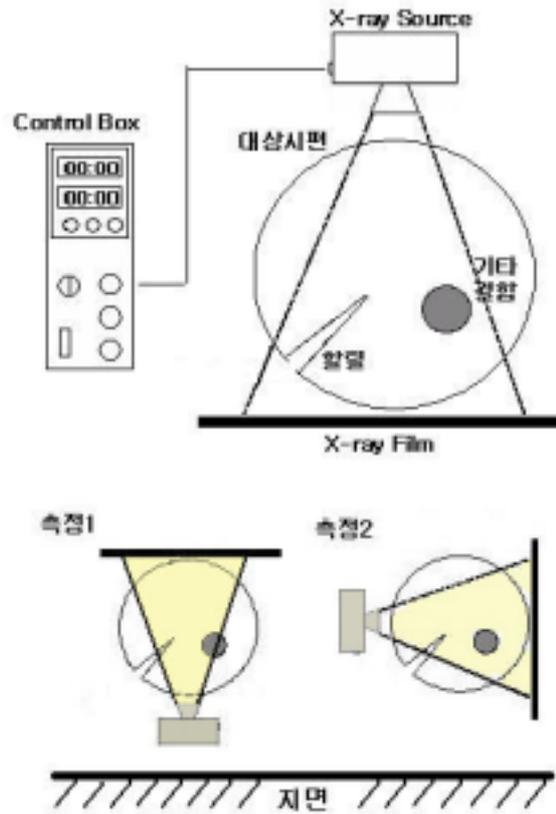


Fig.6. Soft X-ray 장치와 대상부재의 X-ray 검사 방법

X-ray source를 대상 검사 부재 단면의 아래에 설치하고 필름을 부재의 위에 위치하게 하여 측정된 결과(측정1, Top)와 X-ray source를 90° 회전하여 측면에서 측정된 결과(측정2, Side)를 제시하였다.

다) 드릴저항시험

드릴 저항 시험은 드릴을 목재 내부로 침투 시켜 목재 내부의 밀도 값을 드릴의 상대적인 저항값으로 나타내어 대상 부재 내부의 상태를 확인 할 수 있는 검사 방법이다.

본 조사 연구에서는 X-ray 검사를 실시한 조사 단면과 동일한 단면에 대하여 드릴 저항 시험을 실시하였다. 드릴 저항 시험은 개별 검사 대상 부재의 각 조사 단면에서 45° 간격으로 총 7회에 걸쳐 실시하였으며 180° 방향은 작업 공간 부족으로 측정에서 제외하였으며 열화가 존재할 거라고 의심되는 부분에 대해서는 추가적인 검사를 하였다.

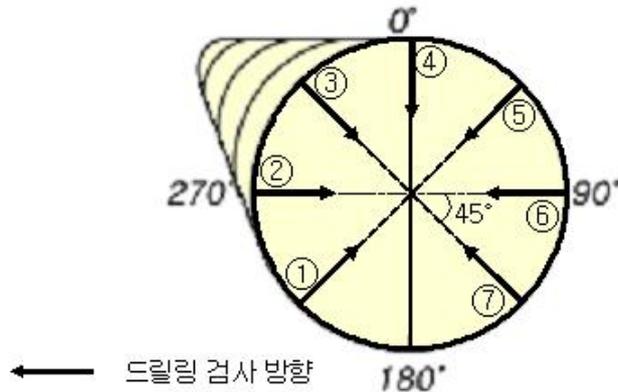


Fig.7. 조사 대상 단면에서의 드릴 저항 검사 방향

라) 종합

(1) 육안 검사

- 부후 및 충해 발생 여부 및 위치 확인
- 표면 할렬 정도 확인 : 할렬의 위치와 크기, 폭 길이, 깊이 기록
- 개별 부재에 대한 X-ray 검사 실시 위치 결정

(2) X-ray 검사

- 부재 내부의 전반적인 열화 상태 파악
- 부후, 충해와 같은 결함의 존재 여부 및 위치, 크기 확인

(3) 드릴 저항 검사

- X-ray 검사를 통한 부재 내부의 열화 부분 집중적 조사
- 부재 내부 결함에 대한 위치 및 크기 확인
- 부재 내부의 상태 결정

**다. 실험 결과**

조계사 대응전 주요 목재 부재에 대하여 비파괴 검사법(육안 검사, X-ray 검사, 드릴 저항 검사)를 이용하여 기둥 4개, 대들보 2개, 중보 2개 등 각 부재의 열화상태에 대한 조사를 수행하였다. 대상 부재에 대한 비파괴 검사는 육안 검사를 실시한 후 열화가 가장 심할 것으로 예측되는 단면을 3-4곳을 지정하고 조사 대상으로 결정된 동일 단면에 대하여 X-ray 검사 그리고 드릴 저항 검사를 순차적으로 실시하여 각 검사 결과에 대한 결과를 조사 대상 부재에 대하여 정리하였다. 또한 중보 1과 5의 경우, 휨 강도 실험을 추가적으로 실시하여 부재의 강도적 성능을 측정하였으며 조사 대상 부재의 목재 조직을 해부학적으로 분석하여 조사 연구에 대한 이해를 돕고자 하였다.

1) 기둥 23

가) 육안 검사

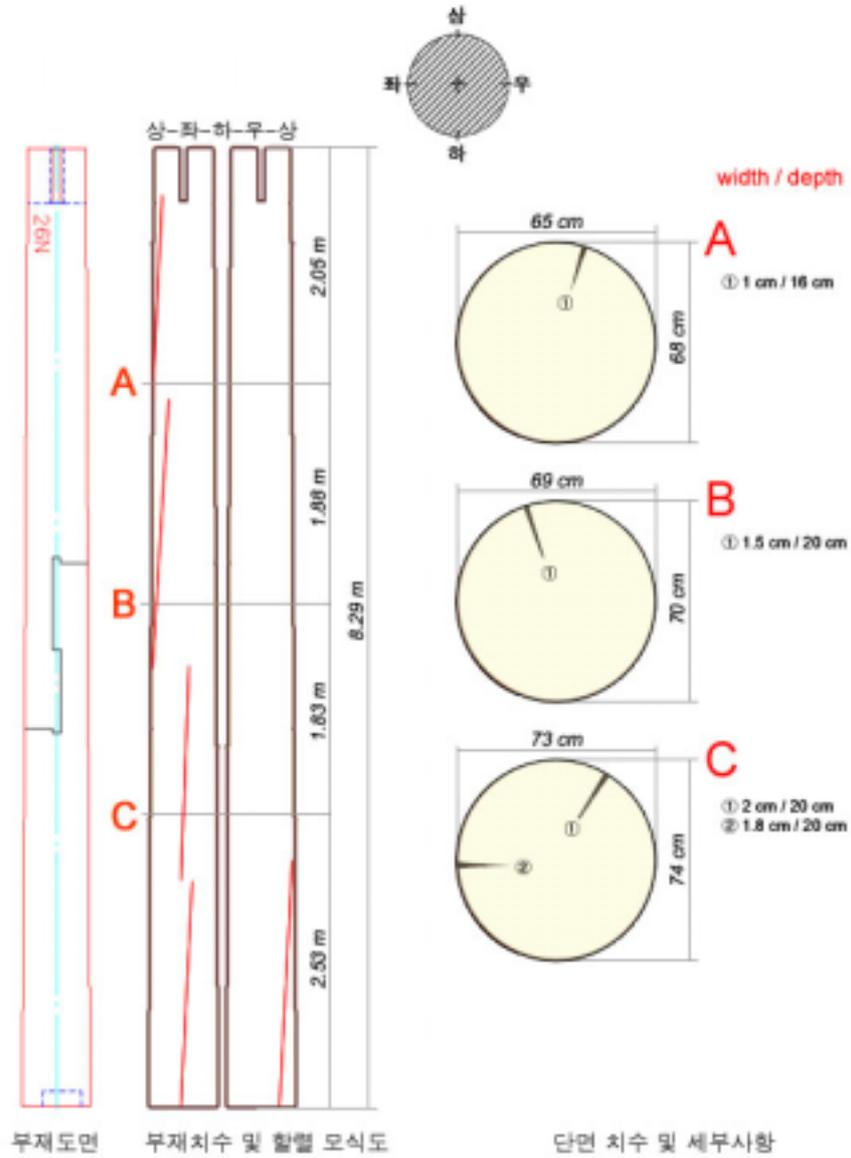


Fig.8. 기둥 23의 부재와 단면 치수 및 할렬의 크기와 위치

나) X-ray 검사 및 드릴 저항 검사

(1) 단면 A

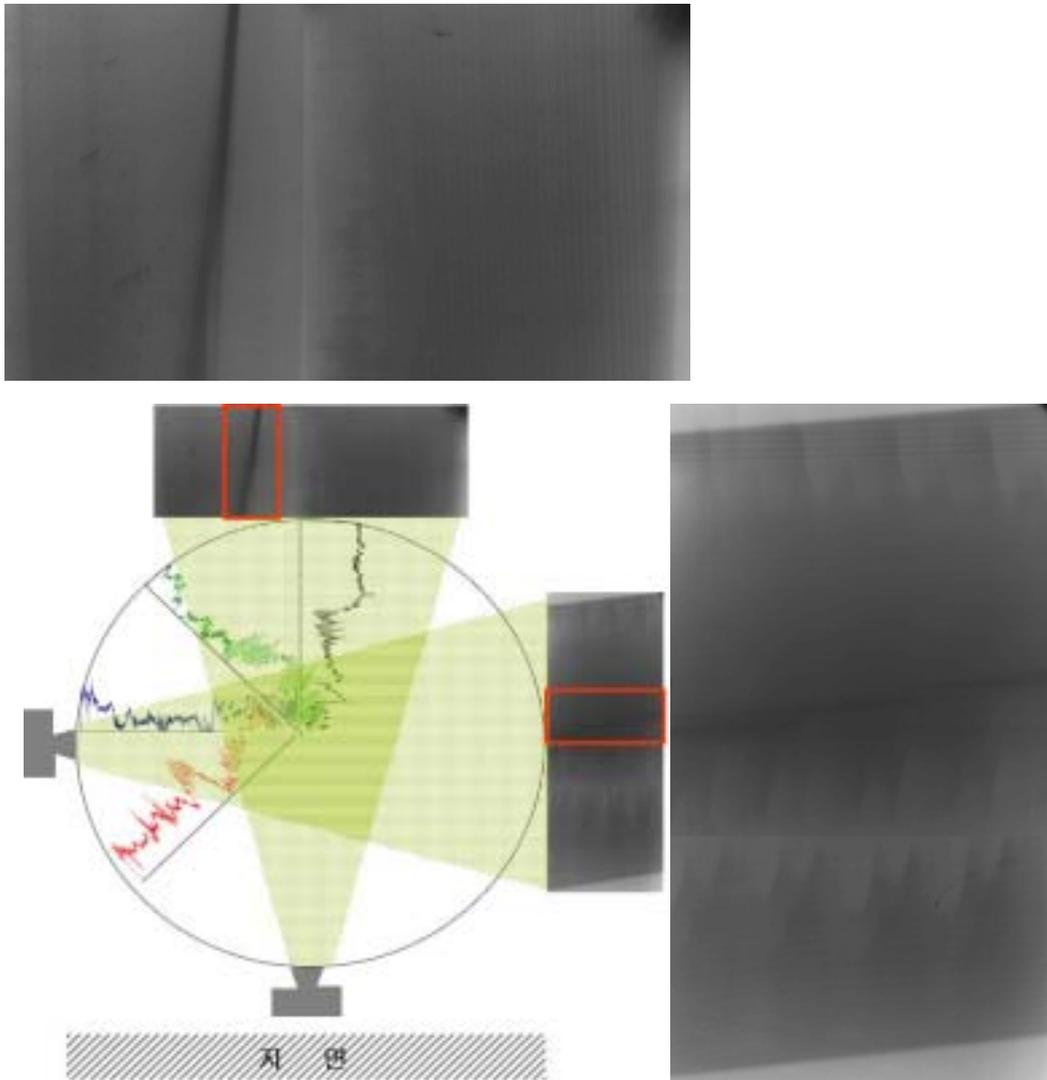


Fig.9. X-ray 검사 결과와 드릴 저항 검사 결과

위의 그림은 기둥 23 단면 A에서 실시한 드릴 저항 검사 결과와 X-ray 검사 결과이다. X-ray 검사 결과 측정 1과 측정 2 모두 할렬이 존재하고 있음을 확인 할 수 있

있으며 또한 사진에서 보이는 부재 내부의 상태는 목리가 확실하게 구분이 되고 전체적인 명도값이 낮지 않아 부재 내부는 할렬이외의 다른 열화는 존재하지 않는다고 생각된다. 드릴의 침투 깊이는 모두 38cm 이며 각 결과에서 알 수 있듯 부재 내부의 밀도는 건전한 상태와 거의 유사하다. 할렬에 의한 약 2cm의 빈 공간만이 존재 할 뿐 이외의 부분에서 어떠한 열화의 징후도 확인되지 않았다. 이러한 할렬은 외부에서 육안으로 관찰 되는 것으로서 내부에서 발생한 것이 아니라, 표면에서 발생하여 목재 내부로 발달한 것으로 기둥 23 단면 A의 치수 및 세부사항을 살펴보면 확인 할 수 있다. 따라서 기둥 23 단면 A의 경우, 표면에서 관찰되는 할렬 이외에 내부에서는 어떠한 열화 징후를 발견할 없었으며 상당히 건전한 상태라고 판단된다.

#### 다) 결론

위 기둥은 내부의 열화가 없는 것으로 판단되므로 재사용해도 무방한 것으로 여겨진다. 다만, 외부로부터의 할렬이 내부 깊숙이 침투하였을 뿐 만 아니라 길이 방향으로 대부분 표면 할렬이 존재하므로 이 상태로 방치할 경우에는 할렬의 진행에 의해 길이 방향으로 갈라질 위험이 있으므로 이를 방지하기 위하여 기둥의 상하 부분에 벌어짐 방지용 철륵을 설치하는 것이 바람직하다.

1) 중보 1

가) 육안검사

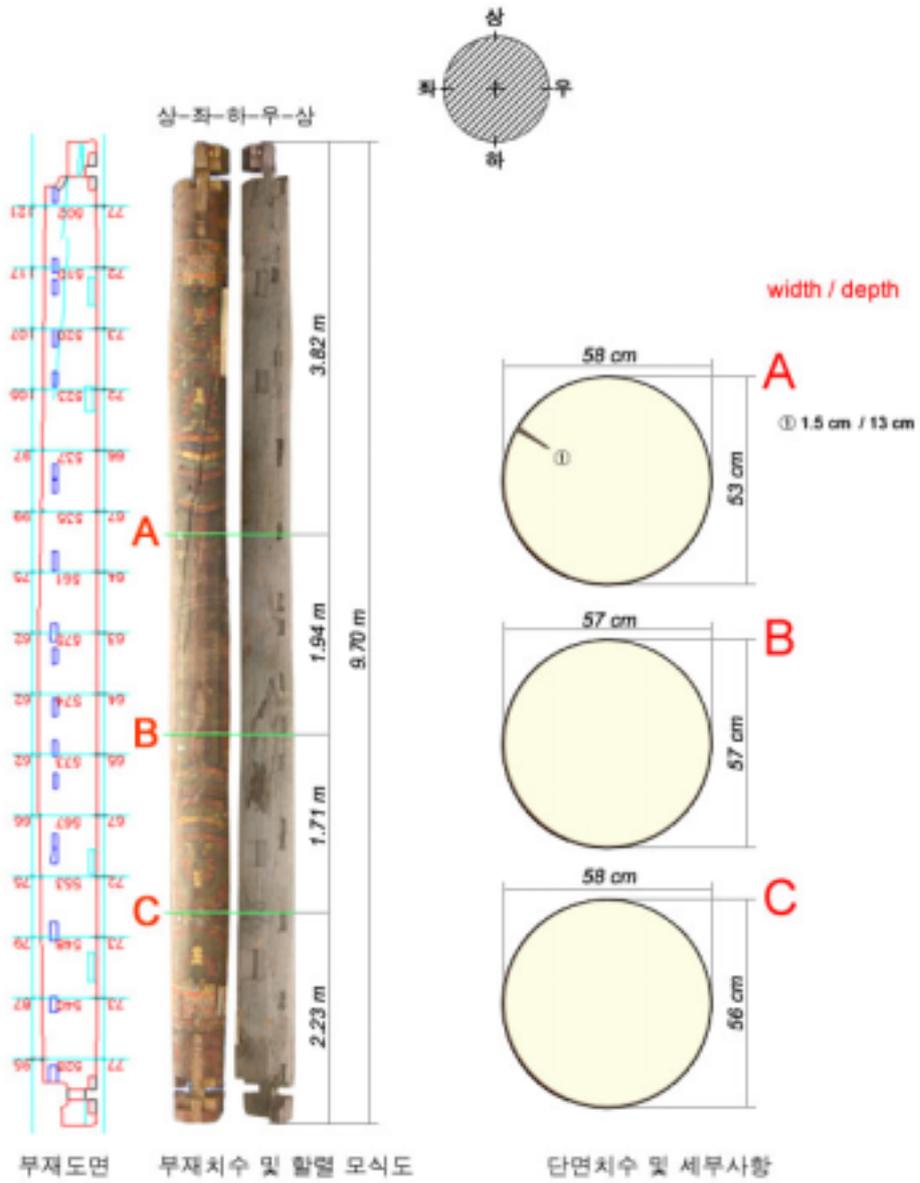


Fig.10. 중보 1의 부재와 단면 치수 및 할렬의 크기와 위치

나) X-ray 검사 및 드릴 저항 검사

(1) 단면 A

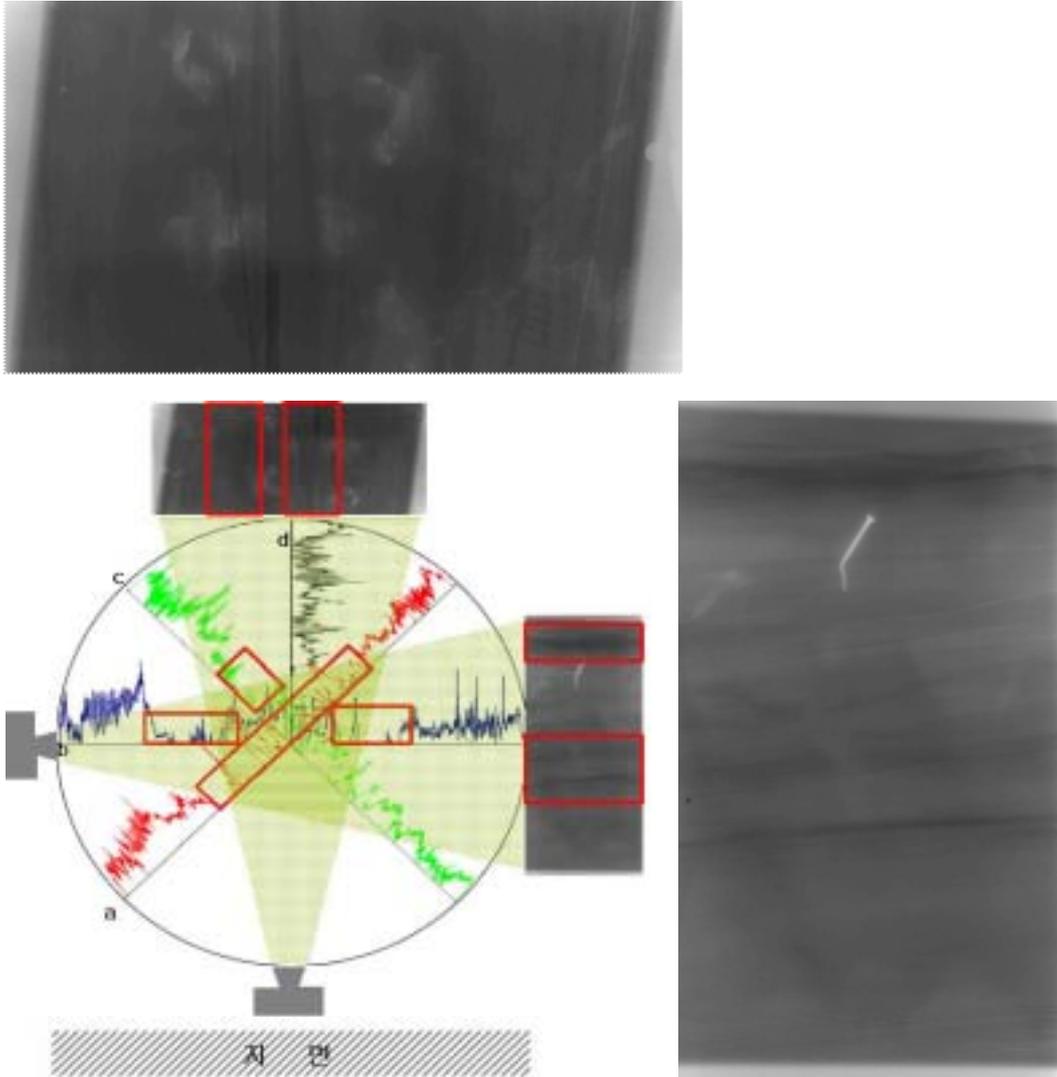
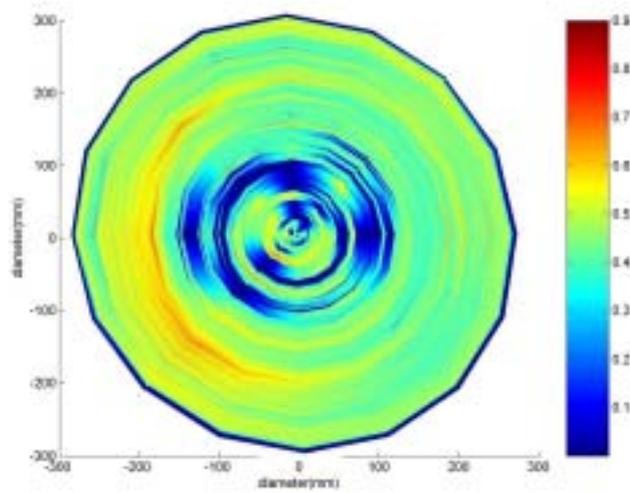


Fig.11. X-ray 검사와 드릴 저항 검사 결과 비교

위 그림은 중보 1 단면 A에 대한 비파괴 검사 결과이다. 위 그림의 X-ray 검사 결과를 우선 살펴보면, 박스 안에 표시된 부분은 밀도가 상당히 저하된 부분이며 특히 부분적인 부재 내부에 상당한 열화가 진행되어 있음을 알 수 있다. 드릴 저항 검사

결과 역시 같은 결과를 나타내고 있는데, 드릴 저항 검사 결과 a, b, c를 살펴보면, 상대 저항 드릴 값이 거의 0으로 저하되어 이 부분에 상당한 열화가 존재하고 있다는 것을 의미하며 이러한 특징은 X-ray 검사 결과에서 확인할 수 있다. 특히, X-ray 검사 결과 전체적으로 필름의 명도가 낮음에도 불구하고 열화로 판단되는 부분이 뚜렷하게 나타나는 것은 열화가 X-ray source 방사 방향으로 크게 진행되어 있음을 나타내는 것이다. 또한 드릴 저항 검사 결과 a를 살펴보면, 드릴 저항 값이 순간적인 춘추재의 밀도 변화를 보이는 것이 아니라 부분적인 밀도 저하를 지속적으로 나타내고 있다. 연속적인 춘추재의 밀도 변화는 결과 b의 초기단계에서 확인할 수 있으며 결과 a에서 나타난 결과는 이것과는 전혀 다른 열화의 전형적인 특징이라고 할 수 있다. 그러므로, 이러한 현상은 활렬에 의한 것이 아니라, 내부 열화로 판단되거나 정확한 원인을 규명하기 위해서는 해부학적, 조직학적인 추가 실험이 필요하다고 판단된다.

X-ray 검사 결과 측정 1의 사진에 산재해 있는 상대적으로 밝은 높은 명도값을 보여주는 부분은 자칫 옹이나 이물질 등 밀도가 높은 상태로 잘못 해석될 수 있으니 각별히 주의해야 한다. 사진에서 나타난 형태나 그 분포로 볼 때 옹으로 판단하기는 어려우며, 본 조사 연구에서 위와 같은 사항은 부재내부에 밀도가 높은 부분 옹이나 추출물 그리고 이물질 등이 존재하는 것이 아니라 부재의 표면에 있는 단청에 의한 영향으로 확인 되었다. 이러한 부분을 제외하고는 부재 내부의 밀도가 상당히 저하되어 전체적으로 낮은 명도값으로 나타나고 있으며, 부분적으로 검은 띠 형태로 특히 검게 나타나는 부분이 존재하고 있다. 이러한 부분은 드릴 저항 검사 결과에 도시된 붉은 박스를 보면 더욱 자세하게 확인할 수 있다. X-ray 사진과 드릴 저항 검사 결과를 분석해 보면 열화의 대부분이 부재의 중심쪽에 몰려 있어 부재의 표면 보다는 내부가 오히려 상당히 열화 되었음을 알 수 있다.



**Fig.12.** 드릴 저항 검사 결과를 이용한 부재 내부의 밀도 분포도

위 그림에서 심재 부분의 밀도가 변재에 비하여 상당히 저하되어있음을 확인할 수 있다. 이것은 표면 활렬이 부재의 내부까지 침투한 것으로 보기 힘들며 부후나 충격 등에 의한 심각한 열화로 판단된다. 즉, 중보 1 단면 A는 표면 보다는 부재의 내부가 상당히 열화 되어 있다고 할 수 있다.

(2) 단면 B

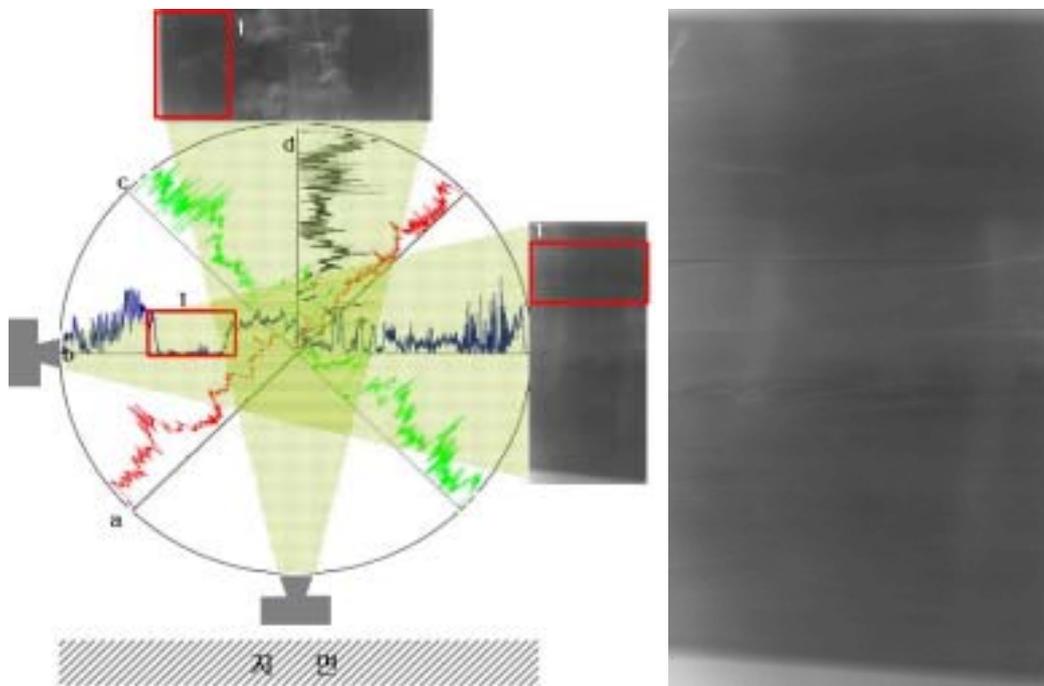
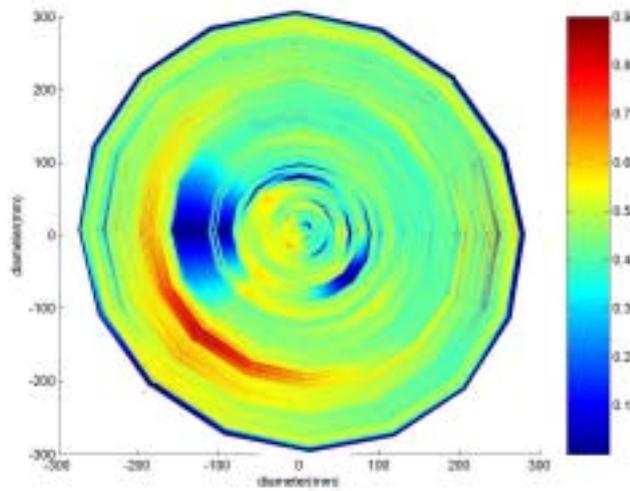


Fig.13. X-ray 검사와 드릴 저항 검사 결과 비교

위 그림은 중보 1 단면 B이다. X-ray 검사 결과 측정 2의 사진 결과를 살펴보면, 1번에 밀도가 낮아져 낮은 명도 값을 보이므로 열화가 존재한다고 할 수 있다. 이러한 부분은 드릴 저항 검사 결과 b의 1번 위치에서 확인 하였으며 X-ray 필름에서 열화의 범위가 넓게 나타난 이유는 X-ray 방사 시 부재를 통과하는 면이 X-ray가 진행될

수록 투영되는 면적이 넓어지기 때문이다. 즉, X-ray source 쪽에 가까운 열화일수록 X-ray 필름에 크고 낮은 해상도를 가지며, 반대로 X-ray 필름에 가까울수록 실제 열화의 크기를 가지며 해상도도 높아진다. 따라서, 드릴 저항 검사 결과 b의 1번 열화는 X-ray 필름에서 실제보다 확대되어 나타날 수 있으나 해상도는 상대적으로 떨어지게 된다. X-ray 필름 2번에서 나타난 열화는 드릴 저항 검사 결과 c의 2번과 대응되며 필름에서 보여지는 상대적인 명도값이 낮지 않은 것으로 보아서 열화의 크기가 상대적으로 더욱 작다는 것을 알 수 있다. 또한 이외의 부분 역시 전체적으로 열화되어 밀도가 저하되었기 때문에 건전한 상태는 아니라고 판단된다. 특히, 드릴 검사 결과 a의 오른쪽 상단 부분은 반대편에 비해 상대 저항값이 저하되어 있으며 이러한 결과는 X-ray 사진의 윗부분에서 확인 할 수 있었다.

X-ray 검사 결과 측정 1의 사진에서 1번과 드릴 저항 검사 결과 1번을 살펴보면, 목재 내부 발생한 열화로 인하여 밀도가 감소되었음을 확인 할 수 있다. 이 부분의 열화는 그 길이와 크기로 보았을 때 할렬이라고 판단하기는 어려우며, 열화 구간이 완전히 0으로 되지 않고 부분적인 상대 드릴 저항값이 나타나는 것으로 볼 때, 충해나 부후로 판단된다. 더욱 자세한 사항은 추가 실험을 통해 확인 할 수 있을 것으로 사료된다. 드릴 저항 검사 결과 c 역시 측정 2에서 언급하였듯, 부재 내부의 열화로 판단되어 지는데, X-ray 필름에서 측정 2에서 보다 멀어졌기 때문에 실제 크기 보다 확대되어 나타났으며 상대적으로 해상도는 저하되었다고 할 수 있다. X-ray 검사 사진의 중앙 부분은 높은 명도 값을 보이며 밝게 나타났는데, 이것은 앞서 설명한 바와 같이 부재에 남아있는 단청에 의한 영향으로 확인 되었다.



**Fig.14. 드릴 저항 검사 결과를 이용한 부재 내부의 밀도 분포도**

위의 드릴 저항 검사 결과와 X-ray 검사 결과를 상호 분석하여 보았을 때, 높은 상관관계를 확인 할 수 있어 X-ray에 노출 되지 않는 부분에 대해서는 드릴 저항 검사의 결과를 토대로 하여 평가 할 수 있다.

중보 1 단면 B에 대한 비파괴 검사 결과는 위의 그림에서 확인 할 수 있듯 중보 1 단면 A와 마찬가지로 부재 내부의 열화가 심각함을 알 수 있다. 하지만, 중보 1 단면 A와 비교해 볼 때, 열화의 범위가 상당히 감소되었음을 알 수 있는데, 이것은 중보 1 단면 A에서 확인된 열화가 부재 전체에 걸쳐 발생한 것이 아니라 중보 1 단면 B와 단면 C 위치로 갈수록 점차 감소할 것이라는 예측을 할 수 있다. 이러한 결론을 확인하기 위하여 중보 1 단면 A와 중보 1 단면 B 사이에 드릴 저항 검사를 추가적으로 실시하였다.

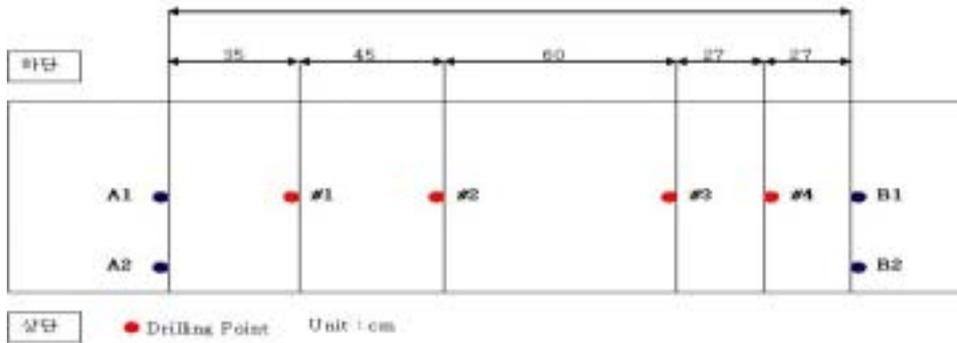
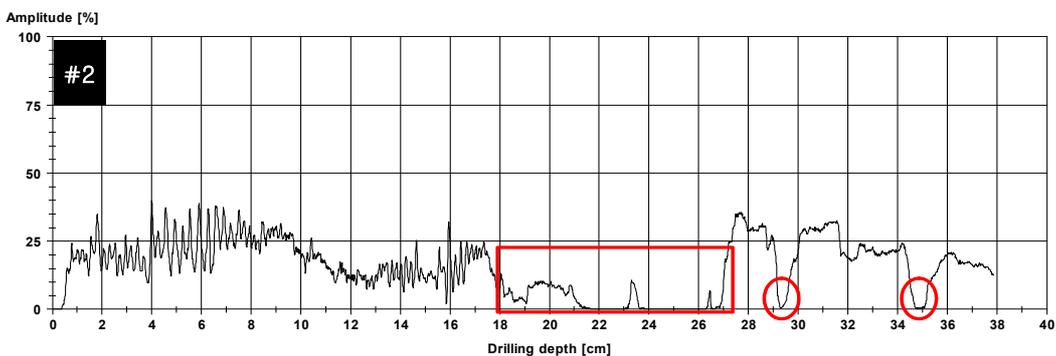
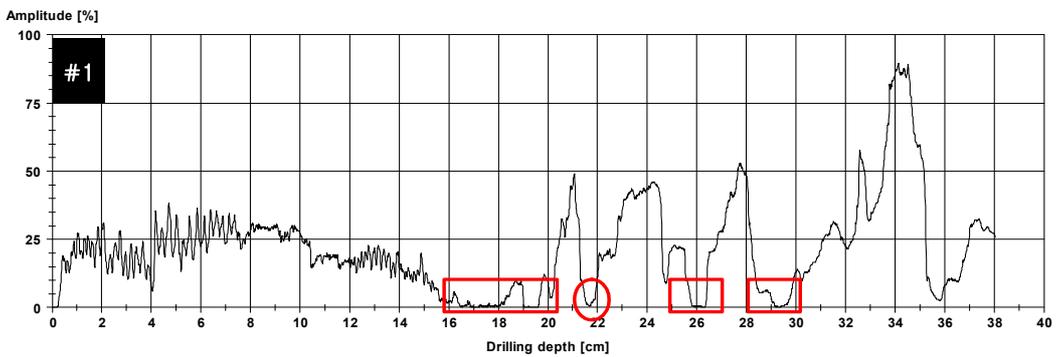


Fig.15. 단면 A와 B 사이의 드릴 저항 검사 위치 모식도

위의 그림은 중보 1 단면 A와 중보 1 단면 B 사이에 추가적으로 실시한 드릴 저항 검사 위치이다. 총 4회에 걸쳐 추가실험을 실시하였으며 아래에 제시된 그림은 총 4회에 걸쳐 실시된 드릴 저항 검사 결과이다.



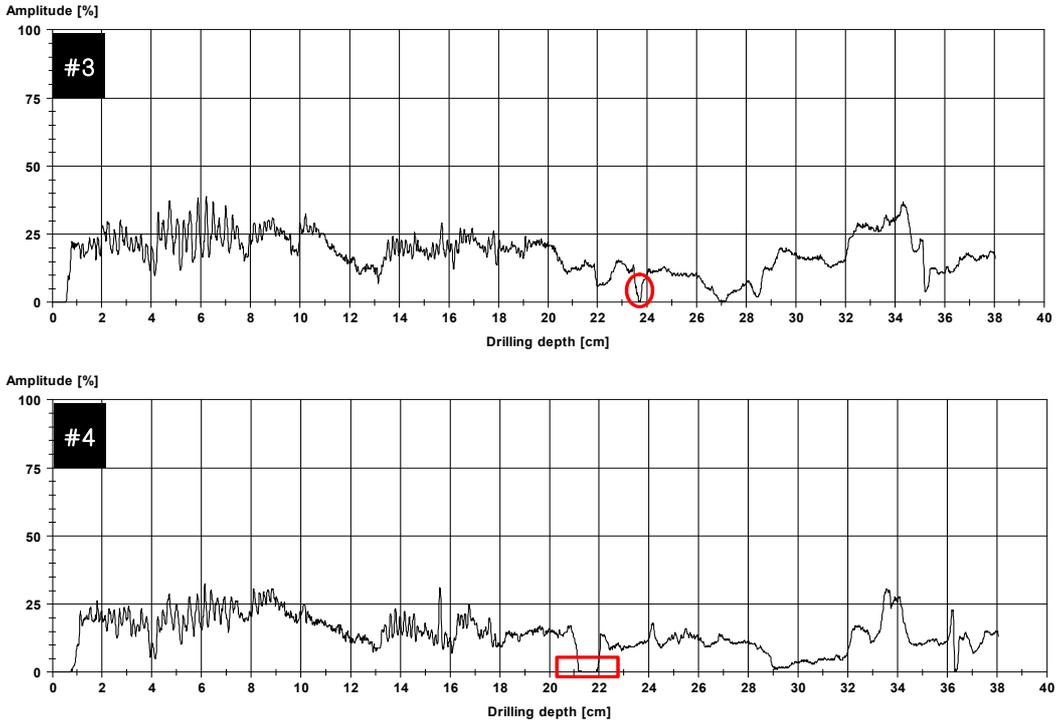


Fig.16. 단면 A와 B 사이의 드릴 저항 검사 결과 (#1 - #4)

위의 4개의 드릴 저항 검사 결과(#1, #2, #3, #4)에서 붉은 박스로 표시된 곳은 열화가 존재하고 있는 위치와 그 크기이다. #1과 #2에는 부재 안으로 약 18-19 cm부터 열화가 존재하고 있는데 그 길이와 크기를 예측할 수 있다. 하지만, #3과 #4의 결과를 보면 약 1cm 미만의 열화만이 부재 내부에 존재하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 중보 1 단면 A와 단면 B 사이의 #3위치에서 #1과 #2에서 보이던 열화의 정도가 급격히 감소하였음을 알 수 있었다. 즉, 위 부재의 열화의 크기는 단면 A부분에서 가장 크게 나타나며 단면 C로 갈수록 점차 그 크기가 감소된다는 것을 예측할 수 있다.

(3) 단면 C

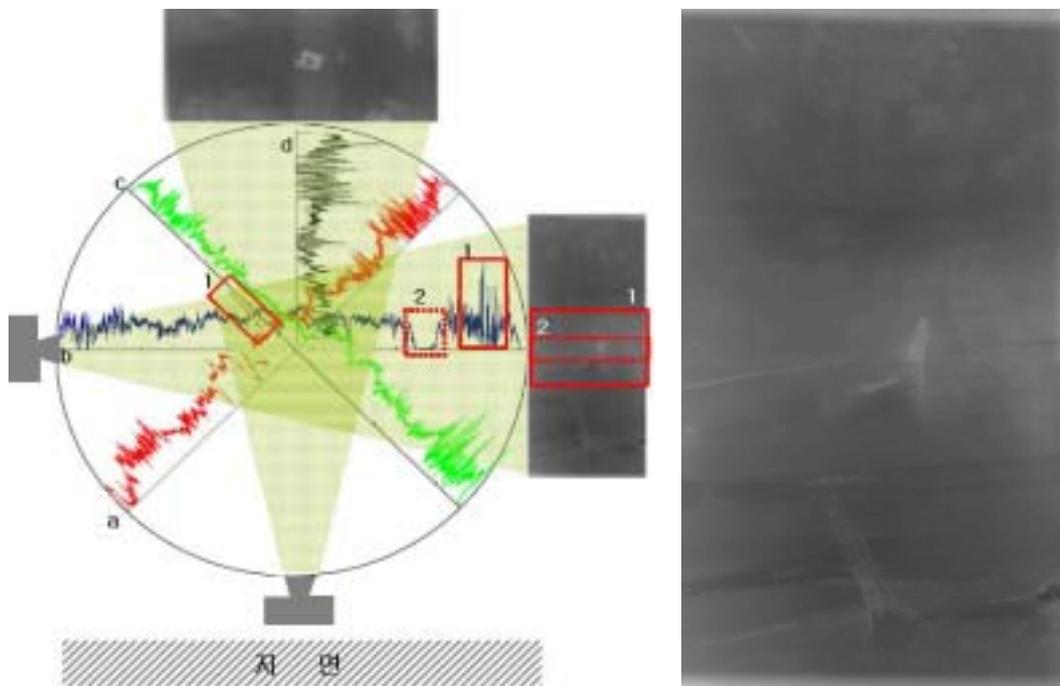


Fig.17. X-ray 검사와 드릴 저항 검사 결과 비교

X-ray 검사 측정 1의 결과 사진을 보면 부분적으로 높은 명도 값을 보여준다. 이러한 부분은 앞서 언급하였듯, 부재에 있는 단청에 의한 영향이라고 할 수 있으며 이러한 사항은 이미 확인하였으며 부재의 상태에 대한 어떤 정보를 제공하는 것은 아니지만 X-ray 검사 결과에 있어 X-ray 강도 감소가 일어나 순수한 목질 부분에 의한 검

사 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 실험 시 상당한 주의가 필요하다.

X-ray에 의한 결과는 부재 내부에 특별한 열화의 흔적은 보이지 않으나 사진이 전체적으로 어둡고 목리의 구분이 쉽지 않다는 것은 내부의 밀도가 건전한 경우보다는 저하되었다는 것을 의미한다. 드릴 저항 검사 b에서 상대 드릴 저항값이 0으로 저하된 부분이 있는데 이 부분은 X-ray에 노출되지 않았으므로 X-ray 검사 결과에 반영되지 않았다.

위 그림의 X-ray검사 결과 측정 2를 살펴보면, 가운데 부분이 주변에 비해 높은 명도 값을 갖는데, 이러한 점은 X-ray 검사 특징 중 하나인데 그것은 X-ray가 부재의 중심쪽으로 갈수록 투과하는 거리가 길어지게 되어 X-ray의 강도가 감소하기 때문이다. 즉, 필름에 도달하는 X-ray의 강도가 다른 부분에 비해 약해지게 되므로 상대적으로 높은 명도 값을 갖게 된다. 하지만, 드릴 저항 검사 b의 1번 결과를 보면, 일반적인 목재의 밀도로 나타날 수 없는 매우 높은 상대 드릴 저항 값을 나타내고 있다. 이러한 부분은 목재 내부에 웅이와 같은 밀도가 상대적으로 매우 높은 부분이 존재하거나 춘재보다는 추재의 비율이 상대적으로 높아 전체적으로 밀도가 높아졌다는 것을 의미한다. 또한, 드릴 저항 검사 b의 2번 결과에서는 상대 드릴 저항 값이 0으로 떨어지고 있어 이 부분에 빈 공간이 존재한다고 할 수 있다. 이러한 결과는 X-ray 검사 결과에서 살펴볼 수 있는데 중간에 크랙이 존재하는 것을 알 수 있다. 하지만 자세하게 살펴보지 않으면 나타나지 않을 수도 있지만, 그것은 b의 1번에 의해 전체적으로 밀도가 높아 보이기 때문에 크랙에 의한 영향이 X-ray 필름에서 상쇄되었기 때문이다.

중보 1 단면 C의 측정 2에서는 내부에 작은 범위의 열화가 존재하기는 하지만, X-ray 검사 사진을 살펴보면 전체적으로 목리를 쉽게 구분할 수 없으며 낮은 명도 값을 나타내고 있다. 이러한 이유는 부재 내부에 특징적인 열화가 존재하지 않더라도, 전체적인 밀도가 감소되었기 때문이다. 내부에 작은 범위의 열화가 존재하고 전체적으로 밀도가 저하된 상태라고 판단되며 이러한 경우 밀도 저하에 의한 정확한 부재의 성능을 평가하기 위해서는 추가적인 실험이 필요하다고 생각된다.

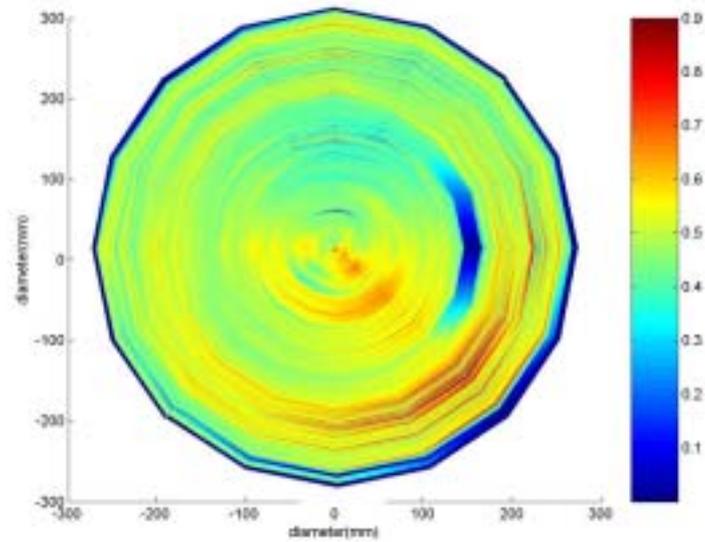


Fig.18. 드릴 저항 검사 결과를 이용한 부재 내부의 밀도 분포도

드릴 저항 검사 결과를 바탕으로 하여 구성된 중보 1 단면 C 이다. 위 그림에서 3시 방향에 열화가 존재하고 있으며 전체적으로 밀도가 저하된 상태임을 알 수 있다. 이것은 앞서 설명한 X-ray 검사 결과에 상응하는 것으로서 부재 내부의 상태가 건전하다고 할 수 없는 초기 열화가 진행되고 있다고 판단된다. 5시 방향에 밀도가 매우 높은 부분이 존재하고 있는데, 이 부분은 앞서 언급하였듯이 연륜내 추재의 비율이 상대적으로 높아 다른 부분에 비해 높은 밀도를 나타내는 것으로 확인되었다.

#### 다) 휨 강도 실험

중보 1의 비파괴 검사 결과를 살펴보면, 부재 내부의 상태는 내부 열화로 인하여 수를 중심으로 밀도가 상당히 저하되었음을 확인할 수 있다. 본 조사 연구에서는 이러한 비파괴 검사 이후에 중보 부재에 대해 추가적으로 휨 강도 실험을 실시하여 부재가 지지할 수 있는 휨 하중을 정확하게 평가함으로써 최종적으로 재사용 여부를 결정할 수 있는 판단 자료를 제공하고자 하였다.

비파괴 실험을 완료한 중보 1의 부재에서 휨 강도 실험을 위한 시편을 절단 후 확보하였다. 아래의 그림은 휨 강도 실험을 위해 절단한 시편의 부재 내 위치를 나타내고 있다. 아래 그림에서 확인할 수 있듯이 비파괴 검사를 실시한 부분(A, B, C)에서 휨

강도 시편을 확보하지 못하였는데 이러한 이유는 중보 1을 치목하여 종보로 재사용한다는 보수 계획에 의해 최대한 부재의 길이를 보존하고자 비파괴 검사를 실시한 부분이 아닌 부재의 끝 부분에서 시편을 절단하였다.

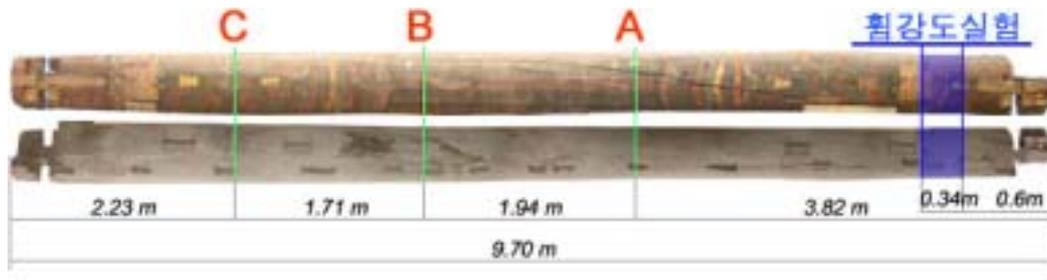


Fig.19. 휨 강도 실험 시편의 절단 위치 (중보 1)

휨 강도 실험을 위한 시편은 비파괴 검사를 실시한 단면 A쪽에서 0.6m 떨어진 부분에서 약 34cm 두께로 하여 확보하였다. 절단한 시편은 휨 강도 실험을 하기 위하여 2 \* 2 \* 30(cm)의 소시편으로 제작하였으며 소시편을 채취한 부분은 아래 Fig. 40과 같다. 각 소시편은 상, 하, 좌, 우, 4 방향에서 확보하였으며 수를 중심으로 각 소시편에 번호를 부여하였다.

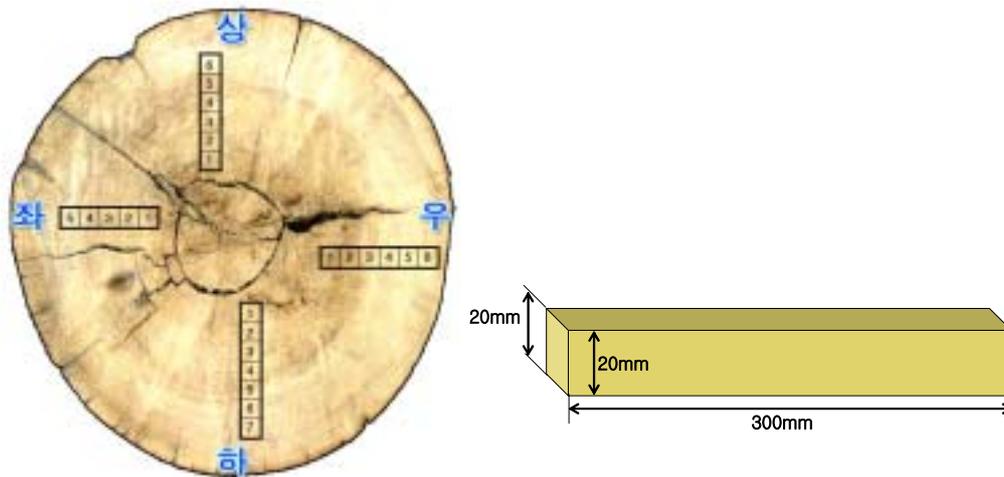


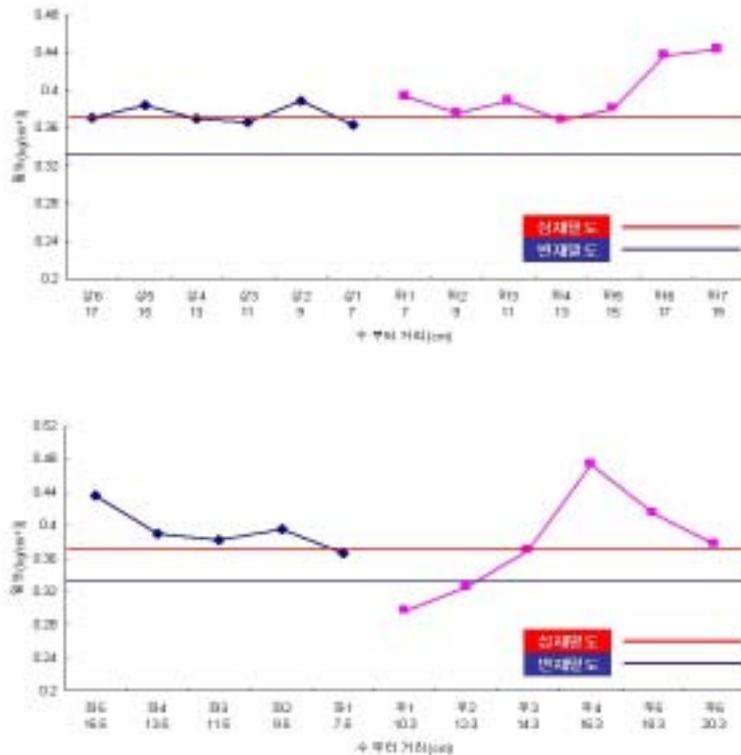
Fig.20. 휨 강도 실험을 위한 소시편의 채취 위치 및 크기

위 그림의 증보 1 단면 사진에서 알 수 있듯이, 수를 중심으로 심재 부분이 심각하게 열화되어 있어 심재 부분에서는 휨 강도 실험 시편을 확보하지 못하고 변재부분에서만 휨 강도 실험 시편을 제작하였다. 증보 1로 사용된 부재의 수종은 전나무(*Abies holophylla*)로서 소나무과의 상록교목(침엽수)이며 건전재의 심재와 변재에 따른 기건 밀도는 아래 표와 같다.

**Table 2. 전나무의 기건밀도**

심재 기건밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	0.37
변재 기건밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	0.33

각 휨 강도 실험 소시편마다 밀도 시편을 20 \* 20 \* 20 (mm)로 채취하여 밀도를 측정하였다.



**Fig.21. 휨 강도 실험 소시편의 각 위치별 밀도 분포**

위 그림은 중보 1의 휨 강도 실험 소시편의 밀도를 나타낸 것이다. 위의 그림에서 알 수 있듯이 대부분의 밀도값이 건전한 경우의 심재, 변재의 평균 밀도 보다 상위의 값을 가지고 있어 밀도 저하와 같은 현상은 발생하지 않은 것으로 확인 된다. 이것은 휨 강도 실험 소시편을 제작할 때 열화의 흔적이나 영향이 가장 적은 부분을 선택해서 시편을 절단하였기 때문이다. 하지만, (하) 6과 7, (우) 4, 5, 6 그리고 (좌) 1 에서 밀도가 상당히 높게 나타났는데 이러한 부분은 목재 밀도는 일반적으로 수 부근에서 작고 외주부로 향하면서 증가하다가 일정한 연륜 부위에서 최대치를 나타내는데 위에서 언급한 부분은 이와 같은 이유로 생각된다. (좌)와 (우)의 그래프에서 보면 중심(수)부분에 가장 가까운 부분인 (우1)과 (우2)부분의 밀도가 저하되었음을 알 수 있는데 이러한 이유는 최대한 건전한 부분으로 시편을 선택적으로 제작하였지만 육안으로는 식별할 수 없는 열화의 영향 때문으로 생각된다.

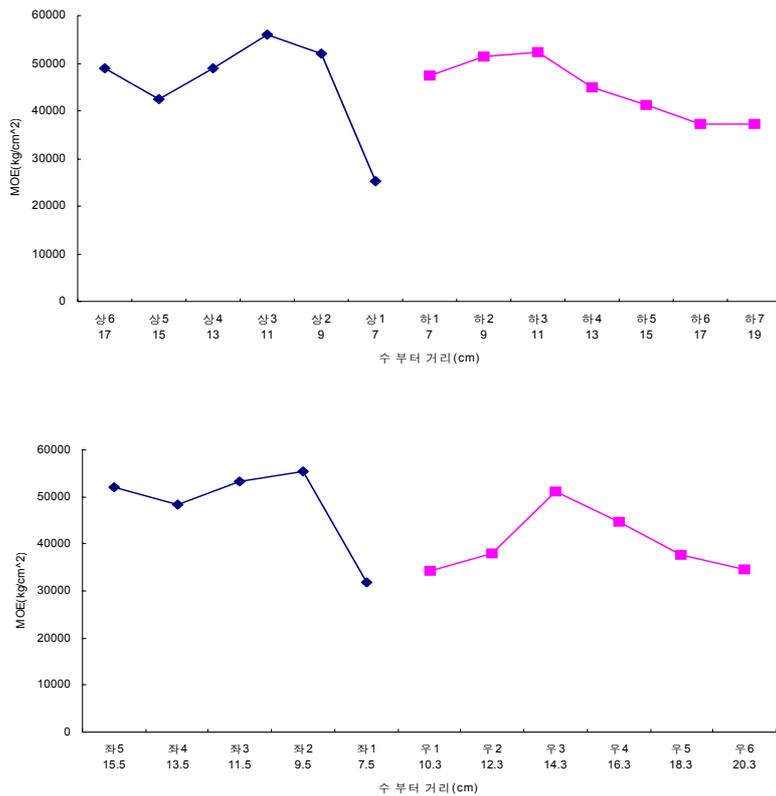
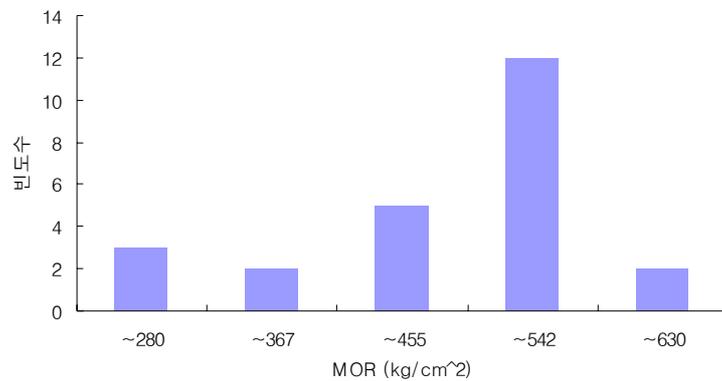


Fig.22. 휨 강도 소시편의 위치별 MOE 분포

위 그래프는 휨 강도 실험을 통해 측정된 각 소시편의 MOE 값을 나타내고 있다. 건전한 경우 전나무의 MOE가 약 85,000 kg/cm<sup>2</sup> 인 것에 비하여 전체적으로 55,000 kg/cm<sup>2</sup> 이하의 낮은 MOE 값을 보이고 있다. 네 방향 모두 MOE 값이 저하되었으나 특히, 수 부분(각 방향에서 1번)으로 갈수록 MOE 값이 더욱 낮아지는 것으로 보아 상당한 열화가 수를 중심으로 하여 진행되었음을 알 수 있으며 비파괴 검사 결과와 높은 상관관계를 나타낸다.



**Fig.23. 중보 1의 휨 강도와 빈도수**

위 그림에서 보면 하한치의 5개 정도가 전체 평균의 50% 미만의 휨 강도 값을 가지고 있다. 즉, 휨 강도가 50% 이상 저하되었다는 것은 상당히 심각한 열화의 영향으로 판단된다. 중보 1의 휨 강도 실험을 위하여 건전한 부분을 선택적으로 제작하였음에도 이러한 결과가 나타난 것은 수 부근의 열화가 매우 넓게 퍼져 있다는 것을 의미한다. 열화의 범위는 실제 휨 강도값을 각 방향별로 산출하여 나타낸 아래 그래프에서 확인 할 수 있다.

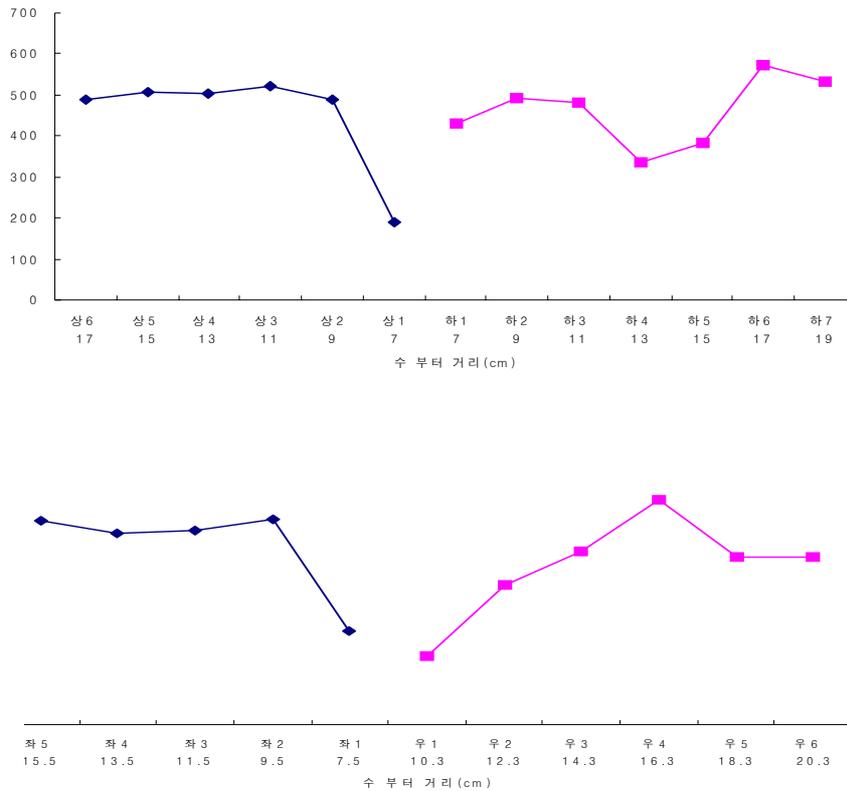


Fig.24. 휨 강도 소시편의 위치별 MOR 분포

전나무의 휨 강도는 일반적으로 약  $520 \text{ kg/cm}^2$  인데 위 그래프에서 알 수 있듯 수에 가까운 부분 (각 방향에서 1번 부분)의 강도 값이 상당히 저하되어 있음을 확인할 수 있다. 특히 (좌) 1, (우) 1, 2 그리고 (상) 1의 경우 강도 저하가 매우 심각하게 나타났다. 하지만, 다른 부분은 강도가 크게 저하되지 않은 것으로 확인되었다. 즉, 수를 중심으로 하여 부재의 내부만이 열화 되었을 뿐 평균  $445 \text{ kg/cm}^2$  로 약 15%의 강도가 저하되었을 뿐 변재 부분은 상당히 건전한 상태라고 할 수 있다.

라) 해부학적 고찰

중보 1에 대한 본 조사 연구의 판단은 아래 목재 조직 사진에서도 나타난다. 아래의 사진은 중보 1의 휨 강도 소시편에서 각각 채취한 것으로 휨 단면, 방사 단면, 접선 단면 순으로 육안으로는 볼 수 없었던 중보 1의 내부 상태를 대변해 주고 있다.

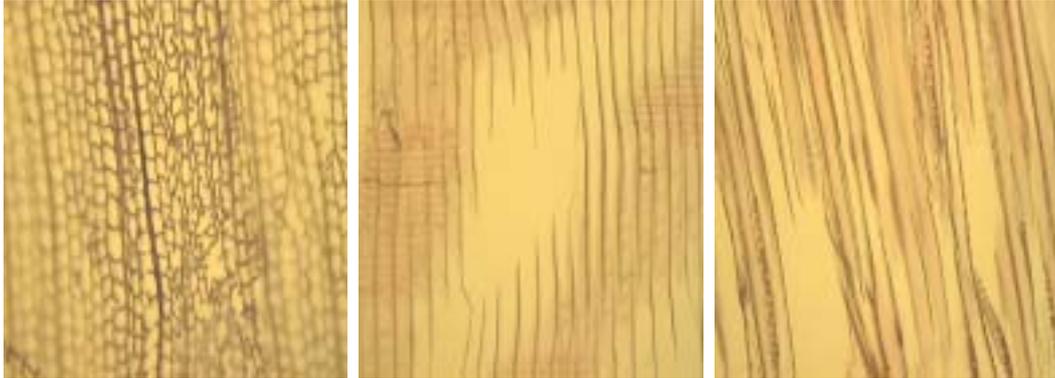


Fig.25. 중보 1의 열화로 목재 조직의 파괴 (횡단면, 방사단면, 접선단면)

위에서 제시된 중보 1의 3 단면 사진을 보면 알 수 있듯, 횡단면의 경우 세포벽의 파괴가 매우 심각하게 발생하였으며 이러한 부분은 횡단면의 곳곳에서 살펴볼 수 있다. 또한 방사단면과 접선단면에서도 이와 같은 현상을 관찰할 수 있다. 중보 1은 목재 조직 사진에서도 심각한 열화 현상이 관찰되며 이는 비파괴 검사와 휨 강도 실험에 직접적인 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

#### 마) 결론

중보 1에 대한 비파괴 검사 결과와 휨 강도 실험을 통한 결과를 상호 비교해 보면, 우선 비파괴 검사의 경우, 중보 1의 내부를 중심으로 심각한 열화가 존재하여 밀도가 상당히 저하되었음을 나타내었다. 휨 강도 실험을 통해서도 단면 사진에서 나타나듯, 심재 부분의 열화가 심각하여 휨 강도 실험 시편을 제작할 수 없었던 것으로 미루어 밀도가 매우 저하되었음을 알 수 있었고 열화가 적은 부분을 중심으로 소시편을 선택적으로 제작하였음에도 강도 감소를 확인하였다.

그러나 중보 1의 해부학적 고찰을 위한 목재 조직사진에서 부후의 원인이 되는 균사체가 발견되지 않았으므로 정확한 열화의 원인의 분석은 불가능하다. 그렇지만 조직에서도 열화가 존재하고 있음을 확인하였다.

따라서, 중보 1을 치목할 경우 상대적으로 건전한 부분인 변재가 상당량 절삭되고 열화가 매우 심각한 부분인 심재 부분이 상대적으로 더욱 많아져 전체적인 부재의 강도값은 지금보다 현저히 저하될 것으로 판단된다. 그러므로 본 조사 연구에서 실시한 비파괴 검사 결과와 휨 강도 실험 결과를 비교 분석해 보았을 때, 중보 1의 재사용은

불가능하다고 판단된다.

### 3) 종합 결론

조계사 대웅전 주요 목재 부재의 열화 상태 조사에 대한 조사 연구에 대한 결론은 아래와 같다고 할 수 있다.

**Table 3. 평가 내용 및 재사용 여부**

조사 부재	평가 내용	재사용 여부
기둥 23	부재 내부의 열화는 발견되지 않았으나 외부에서 관찰되는 표면 할렬이 부재 내부 깊숙이 발전되어 있어 재사용시 철륵을 이용한 부재의 보강이 필요하다.	○
기둥 24	부재 내부는 열화되지 않은 건전한 상태로 재사용이 가능하지만 표면 할렬이 부재 내부로 약 20cm 까지 진행되어 있어 재사용시 철륵에 의한 보강이 필요하다.	○
기둥 27	외부에서 관찰되는 할렬에 의한 열화만이 존재할 뿐 부재 내부는 건전한 상태이지만 재사용시 할렬에 의한 부재의 성능저하가 우려되므로 철륵에 의한 보강이 필요하다.	○
기둥 28	재사용시 철륵에 의한 보강으로 할렬에 의한 영향을 최소화 시킬 필요가 있으며 부재 내부의 상태는 건전한 것으로 평가된다.	○
중보 1	외부에서 관찰되는 나선목리 뿐 아니라 할렬에 의한 영향 역시 심각한 상태이며 부재 내부의 상태는 표면 보다는 심재 부분의 열화가 매우 심각하므로 재사용이 불가능하다.	×
중보 5	부재 내부의 상태는 특정 부분이 열화된 것이 아니라 전체적인 밀도 저하가 발생하여 부재의 성능이 상당히 감소되었으므로 재사용이 불가능하다고 판단된다.	×
대들보 1	부재의 내부의 상태는 건전하지만 할렬으로 인한 부재의 전단응력 감소를 고려할 때 전단응력에 대한 충분한 검토 후 재사용이 가능할 것으로 판단된다.	○
대들보 5	부재 내부의 상태는 건전한 상태이지만 표면 할렬이 부재의 내부까지 깊이 진행되어 있어 전단응력이 감소되었을 것으로 추정되어 재사용시 전단응력에 대한 충분한 검토가 필요하다.	○

1) 기둥의 경우 23, 24, 27, 28번의 기둥에 대하여 비파괴 검사를 실시하였다. 조사된 기둥의 경우, 표면 활렬로 인한 열화 발생 가능성이 존재하지만 현재 부재 내부는 건전한 상태라고 할 수 있다.

부재의 현 상태를 유지 하기 위해서는 활렬로 인한 부재 내부 열화 방지를 위한 대책과 정기적인 검사가 요구된다.

2) 중보의 경우 1번과 5번에 대하여 비파괴 검사를 실시하였으나 부재 내부 상태가 상당히 열화되어 추가적인 강도 실험을 실시하였다. 비파괴 검사 결과 중보 1의 경우 외부 보다는 수를 중심으로 부재의 내부가 상당히 열화되었으며 중보 5의 경우는 부재 내부의 밀도가 전체적으로 저하되어 특정 부분이 아닌 전체적으로 열화가 진행되었음을 알 수 있었다. 이러한 부분은 추가적으로 실시한 강도 실험에서도 확인할 수 있었는데, 중보 1의 경우 압축강도와 휨 강도 모두 건전재의 경우 보다 상당히 저하되었음을 실험 결과로 확인 할 수 있었으며 중보 5 역시 마찬가지로 휨 강도와 MOE가 상당히 저하되었음을 알 수 있었다.

따라서, 중보를 치목하여 중보로 사용한다면 구조적 안전성에 있어 상당한 위험이 예상되므로 중보의 경우 구조재로서의 성능에 있어 부적합하다고 판단된다.

3) 대들보의 경우, 중보와 기둥의 중간적인 단계라고 할 수 있다. 표면에서 진행된 활렬이 부재 내부 깊숙이 진행되어 곤충이나 부후균 등이 쉽게 내부 까지 접근할 수 있는 가능성을 내포하고 있으나 현재 상태는 초기 열화의 흔적만이 발견 될 뿐 심각한 열화 상태로 발전하지 않은 것으로 판단된다.

### 3. 여산향교 대성전

#### 가. 개관

여산향교 대성전의 모든 기둥들에 대해 비파괴 평가를 수행하였다. 대성전은 정면 3칸, 측면 2칸 반의 맞배지붕 건물로서, Fig.1에서와 같이 전체 14개의 기둥으로 이루어져 있다. 편의상 건물 외부의 4개 기둥을 노출기둥으로, 나머지 10개의 기둥에 대해 문헌기둥으로 명명하였다. 실험 단면의 높이는 일괄적으로 부재의 밑등에서 75cm가 되도록 하였으며, 부재의 지름은 35cm에서 50cm까지 다양했다.

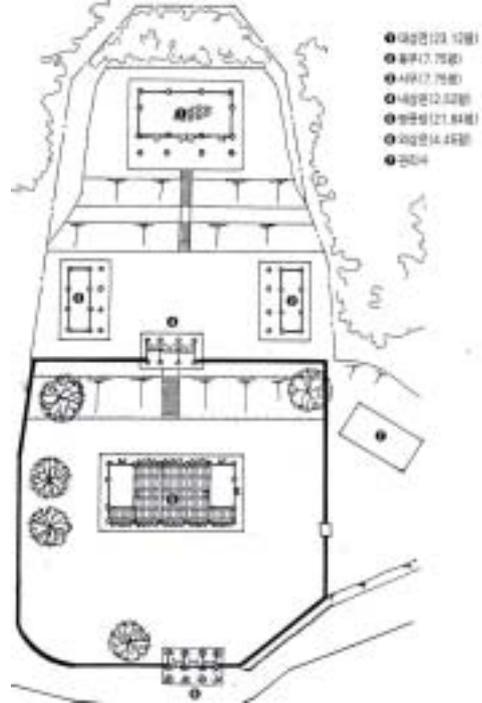


Fig.26. 여산향교 배치도

#### 나. 실험 방법

##### 1) 육안조사 및 단면 좌표 측정

비파괴 평가에 앞서 육안 조사를 실시하고, 3D 좌표측정기(3SPACE ISOTRAK II)를 이용하여 단면의 정확한 형상에 대한 정보를 확인하였다. 부재 단면의 정남쪽을 0°로 기준하여 반시계방향의 10° 간격으로 36개의 점에 대한 좌표를 측정하였다. 문헌기둥의 경우 측정이 불가능한 좌표가 존재한다. 특히 기둥8의 경우, 건물 내부에서 실험 단면으로의 접근이 제한되어 있었기 때문에 이런 경우에는 벽 두께 등을 고려하여 측정 불가능 좌표의 영역을 직선으로 가정하여 단면 형상을 구성하였다.

##### 2) 초음파 실험

측정에 이용된 초음파 장비와 시험 방법은 선행연구자에 의해 연구된 바를 참고하여 진행하였다. 그러나 본 실험의 대성전 기둥들은 할렐이나 표면열화가 매우 극심했고, 또한 지름이 매우 큰 부재(50cm 내외)가 있어 초음파 신호를 원활히 얻을 수 없었기 때문에 그리스(grease)를 커플런트로 이용하였다.

노출기둥에 대해서는 원하는 270회 전체의 초음파 TOF 측정이 가능했으나, 10개의 문힌 기둥들에 대해서는 측정이 불가능한 영역이 존재했다. 실험 시에 이러한 영역의 데이터를 제외한 최대한의 데이터를 확보하였다. 그리고 CT 화상 구성 시에는 매우 큰 값(해당 각도 측정값의 최대값)을 가지는 것으로 가정하였다. 이를 통해 측정 불가능 영역이 열화로 판단되어 결과적으로 빈 공간으로 나타나게 함으로써 측정 영역과의 구별이 가능할 수 있도록 의도하였다.

#### 4) 드릴저항시험

드릴저항시험은 일종의 준(準)비파괴시험으로서 매우 빠르고 정확하게 부재 내부의 상태를 파악할 수 있는 방법이다. 부재 내부를 드릴이 투과할 때 나타나는 저항값을 목재의 밀도값으로 환산한다. 부재의 지름이 40cm~50cm 가량으로 상대적으로 크기 때문에 한 부재에 대하여 8회 측정하였으며, 측정 방법이 Fig.2에 제시되어 있다. 측정에 이용된 장비는 IML RESI F-400이다.

드릴저항시험에 있어서도 문힌기둥에서 특정 각도에 대해 측정이 제한되는 영역이 존재한다. 초음파 CT 화상 구성에서와 마찬가지로 이미지 (Drilling Resistography) 구성 시에, 측정 불가능 영역이 열화로 판단될 수 있도록 매우 낮은 값의 저항 값을 주어 화상을 구성하였다.

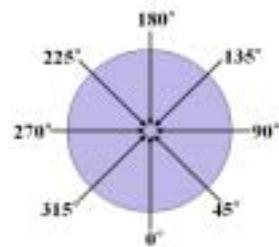


Fig.27. 드릴저항시험

### 다. 실험 결과

#### 1) 육안 조사

본 실험에 앞선 육안 조사 결과에서 여산향교 대성전의 심각한 열화 피해를 확인할 수 있었다. 전체적으로 모든 기둥에 활렬의 피해가 심한 것으로 나타났으며, 기둥4, 6 번은 보수가 제대로 이루어지지 않아 덧된 부재와 본 부재 사이의 빈 공간을 확인할 수 있었다. 육안 검사를 통해서도 대체로 노출기둥보다는 문힌기둥에서, 건물의 외부보다는 내부에서 피해가 더 큰 것으로 판단됐다.

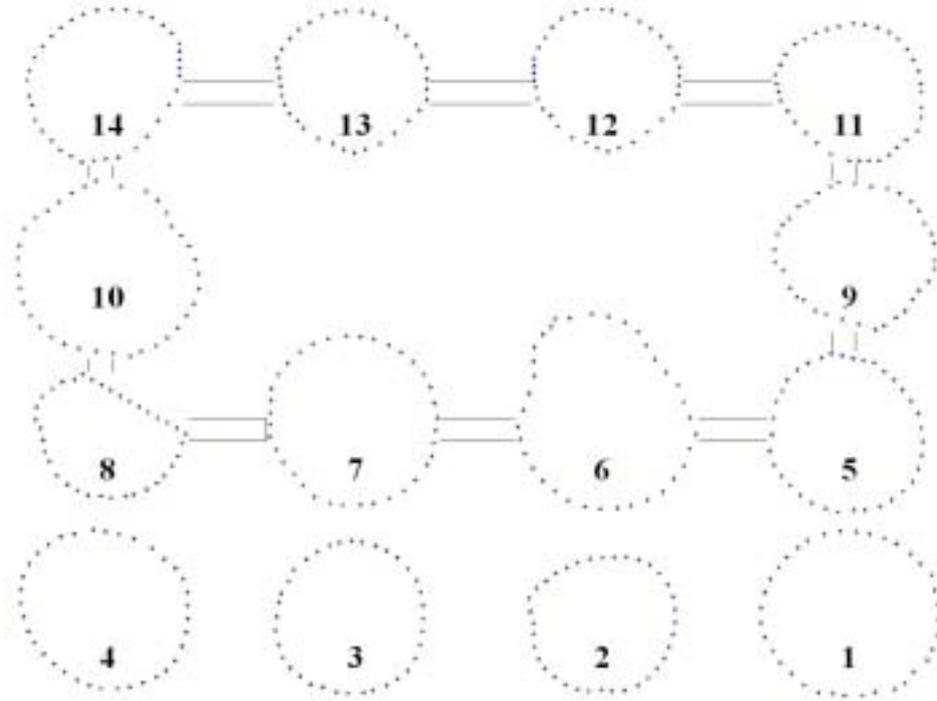


Fig.28. 14개 기둥의 단면형상 (밑둥에서 75cm)

Fig.28은 3D 좌표측정기로 측정된 단면의 형상을 실제 크기보다 다소 과장시켜 나타낸 것이다. 기둥8을 제외한 모든 기둥들에 대해서, 벽으로 묻혀있는 부분을 제외한 모든 영역에서 좌표 측정이 가능했다. 그림에서와 같이 부재의 평균적인 지름의 크기가 다양했으며, 특히 기둥6번은 건물의 내부 쪽에 지나치게 큰 부재를 덧 되었음을 확인할 수 있었다.

## 2) 초음파 CT

잘 알려져 있는 바와 같이, 초음파는 투과 시에 회절 및 굴절 현상이 심해서 투과 거리가 길어지거나 내부에 빈 공간이 존재하는 경우 그 투과 된 신호를 수신하는데 어려움이 따른다. 본 실험에서 몇 개의 기둥들에 대해 이러한 현상이 잘 나타났으며 결과가 Table 4에 제시되어 있다.

**Table 4. 각 기둥 평균 지름 및 초음파 TOF 획득 가능 데이터분율**

	노출기둥						물힌기둥							
기둥 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
평균 지름 (mm)	478	395	423	459	432	508	475	357	416	487	393	395	399	424
획득 데이터 (%)	51	25	78	13	38	13	60	55	22	20	21	38	20	64

기본적으로 획득 불가능 데이터는 물힌 영역에서의 데이터 처리와 같이 해당 각도 데이터의 최대값으로 가정하기 때문에, 데이터가 불충분한 경우 CT 화상의 신뢰도가 떨어지게 된다. 특히 기둥4, 6, 9, 10번 네 개의 기둥은 획득 가능 데이터분율이 22% 이하로 매우 낮아 신뢰성이 떨어지는 CT 화상을 얻었다. 그러나 기둥13의 경우에는 20%의 데이터를 통해 비교적 신뢰성 높은 CT 화상을 얻었음이 드릴저항시험 결과와의 대조를 통하여 확인되었다. 결론적으로 정확한 획득 가능 데이터분율에 대한 기준 값을 알기는 어렵지만 약 30% 이상의 데이터가 확보되면 신뢰성 높은 초음파 CT 화상 구성이 가능한 것으로 판단된다.

Fig.29에 여산향교 대성전의 모든 기둥들에 대한 초음파 CT 결과를 기둥의 크기를 다소 과장하여 나타냈다. 노출기둥의 경우 특히 기둥2에서 0° ~ 90° 내외의 구간에서 일부의 데이터를 얻을 수 있을 뿐 나머지 구간에서는 데이터 획득이 불가능했다. 데이터 획득이 불가능한 영역이 열화로 판단되는 부분이며 비어있는 것으로 표현된다. 물힌기둥의 경우 기둥6, 11번에서 열화가 매우 심한 것으로 나타났다. 상술하였듯이 특히 기둥6의 경우에는 덧된 부재와 본 부재 사이에 공동이 있어 초음파 측정의 획득 가능 데이터분율이 매우 낮았다(13%). 전체적으로 건물의 외부보다는 내부에 열화가 더욱 진행된 것으로 나타났다.

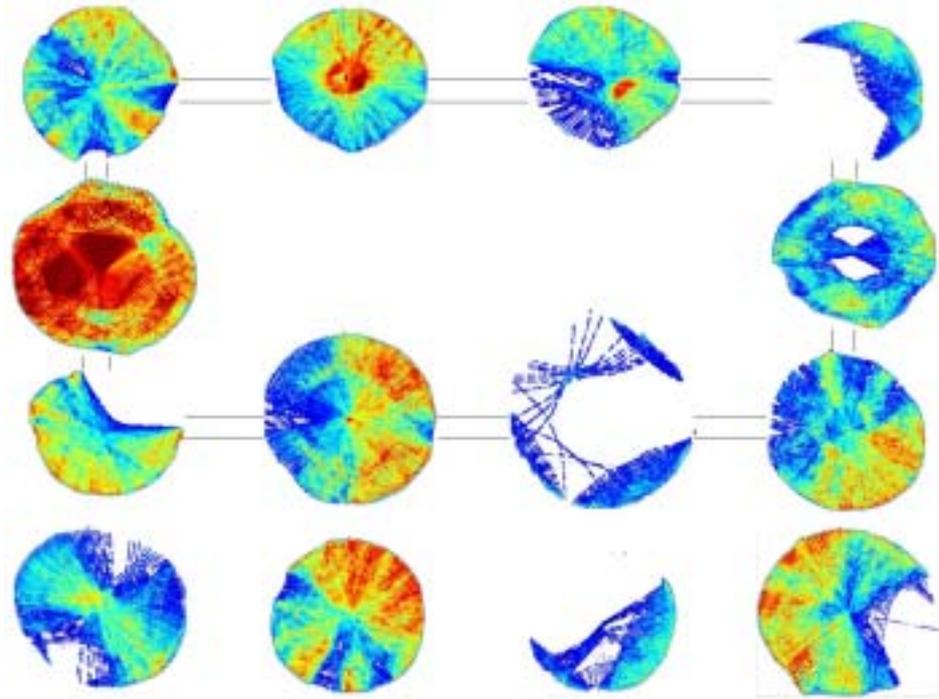


Fig.29. 대성전 기둥에 대한 초음파 CT 구성 결과

### 3) 드릴링 Resistography

Fig.30에 대성전의 모든 기둥들에 대해 구성된 드릴저항시험 결과를 나타냈다. 노출 기둥의 경우 4개의 모든 기둥들에서 표면 근처에서 연륜을 따라 진행된 열화를 확인할 수 있었다. 이전의 연구에 의하면 이렇게 연륜을 따라 드릴저항값이 0으로 떨어져 나타나는 열화를 층해로 결론지은 바 있다. 또한 육안 검사를 통해 내부에 비어있는 부분이 존재한다는 것을 확인하였으며, 이러한 사실을 종합하여, 이 열화가 층해일 것으로 판단했다. 이러한 층해에 의한 부재 내부의 빈 공간은 물론 기둥에서 더욱 극심한 것으로 나타났다. 건물 외부보다는 내부에서 더욱 심한 것으로 확인되었으며, 특히 기둥6에서는 덧된 부재와 본 부재 사이의 공동으로 생각되는 시편의 중앙에서의 열화 부가 탐지되었다.

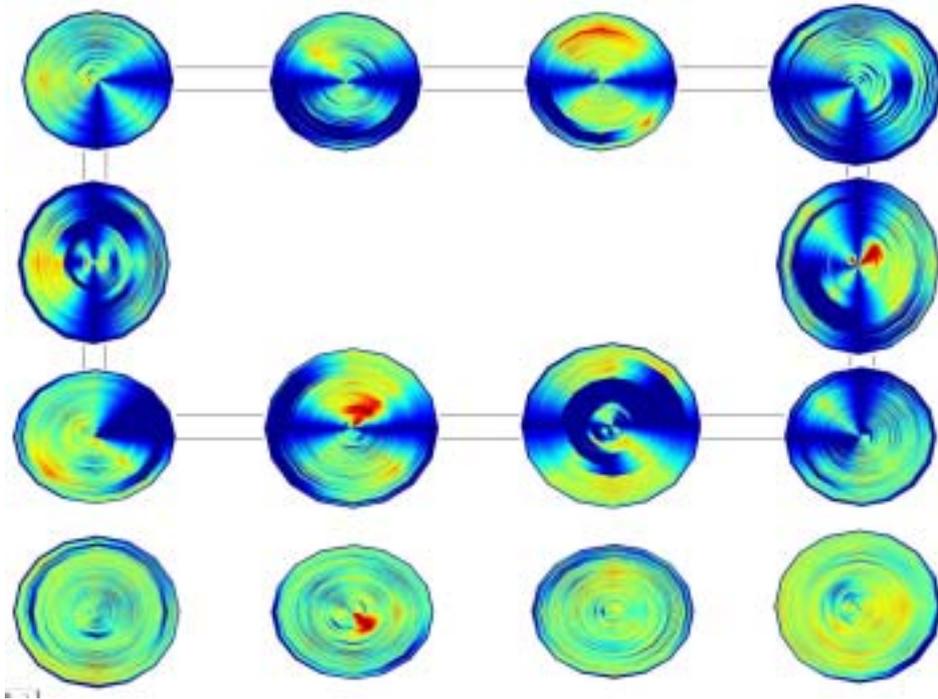


Fig.30. 대성전 기둥에 대한 Drilling Resistography

#### 라. 고찰

##### 1) 노출 기둥

모든 노출기둥은 270회의 초음파 TOF 측정, 8회의 드릴저항시험에 아무런 실험적인 제약이 없었으며, 부재의 내부 상태는 물헨기둥과 비교해서 상대적으로 건전한 것으로 판단된다. Fig.31에 기둥1번의 초음파 CT와 Drilling Resistography 결과가 제시되어 있다.

드릴저항시험의 결과 약 20° 에서 100° 에 이르는 영역에 표면 근처의 충해 피해가 감지되었다. 그 외의 영역은 시편 중앙부의 약 225° 부근에 밀도가 다소 떨어져 있는 것을 제외하고는 대체로 건전한 것으로 판단되었다. 이러한 열화는 초음파 CT 결과에서도 잘 나타났는데, 충해에 의한 열화부가 Drilling Resistography에서보다 기둥의 내부쪽으로 더욱 넓게 나타났다. 상술한 바와 같이 초음파가 공기 중을 투과하기 어렵기 때문에 충해 열화부분이 다소 과대평가 된 것으로 판단된다.

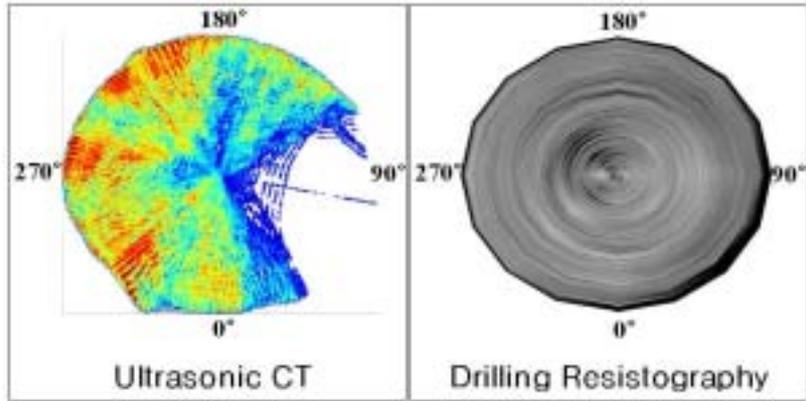


Fig.31. 기둥1번의 초음파, 드릴저항시험 결과 비교

2) 문힌 기둥

문힌기둥은 상술한 바와 같이 실험적 접근성의 제약으로 인해 모든 실험에 대해 데이터 확보가 불가능한 영역이 존재한다. 그러나 측정 가능 데이터를 이용하여 비교적 정확한 결과를 도출할 수 있었다. Fig.32는 약 90° 부근에서 200° 영역까지 가장 많은 영역에서 데이터를 확보할 수 없었던 기둥8번에 대한 결과이다.

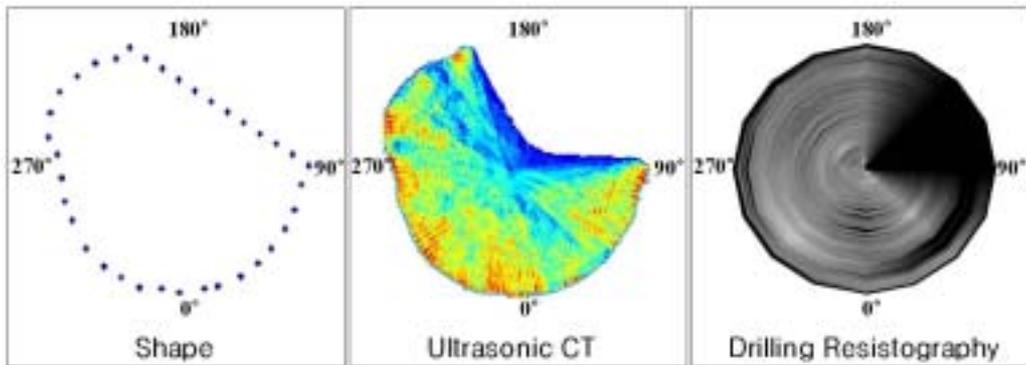


Fig.32. 기둥8번의 단면형상 및 초음파, 드릴시험 결과 비교

측정 불가능 영역의 좌표를 직선으로 가정하였고, 이 형상 데이터를 그대로 CT 구성에 이용하였다. 초음파 CT 화상에서 이러한 측정 불가능 영역이 매우 정확하게 반영됨을 확인할 수 있다. 이는 시편의 형상에 대한 좌표 데이터를 고려하지 않고 화상

을 구성한 Drilling Resistography와 비교할 때 더욱 확실해진다. 본 실험을 통하여 획득 가능 데이터를 이용하여 CT 화상을 구성하는데 대한 개발된 알고리즘의 적합성을 확인할 수 있었다.

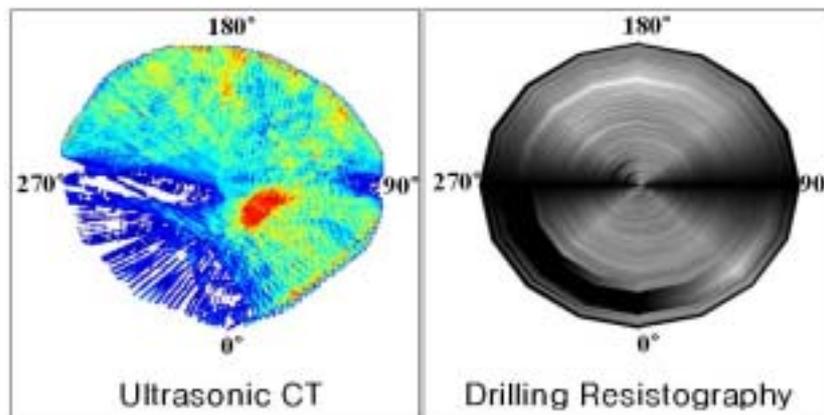


Fig.33. 기둥12번의 초음파, 드릴저항시험 결과 비교

Fig.33의 기둥12번은 여산향교 대성전의 문헌기둥에서 건물 외부에서보다 내부에서 흰개미의 피해가 극심하다는 것을 대표적으로 나타낸다. Drilling Resistography의 결과 약 270° ~0° 의 표면 근처에서 비교적 매우 넓은 영역에서 연륜을 따라 층해의 피해가 극심하게 나타났음을 확인할 수 있다. 그러나 건물 외부의 반대쪽 영역은 대체로 밀도가 높게 건전하게 나타났음을 확인할 수 있다. 이러한 열화의 양상이 초음파 CT 화상에서도 정확하게 반영하고 있다.

#### 마. 결론

본 연구는 보다 과학적이고 체계적인 목조 고건축물의 비파괴 평가를 위한 목적으로 여산향교 대성전을 대상으로 이루어졌다. 부재 내부 열화의 보다 정량적인 평가를 위하여 초음파 CT 및 Drilling Resistography의 개념을 도입하여 결과를 산출하였으며, CT 화상 구성 시 단면의 형상을 고려하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있도록 하였다.

측정에 이용된 초음파 장비와 실험 방법은 이미 구축되어 있어, 노출되어 있는 기둥의 경우에 직접적으로 적용하여 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 벽으로 문혀

있는 영역이 있거나 실험적으로 접근이 제한되어 있는 기둥에 대해서도 측정 데이터를 이용하여 정확한 결과를 도출할 수 있었다. 개발된 CT 화상 구성 알고리즘은 약 30% 이상의 획득 데이터를 이용하여 단면 내부 상태의 정확한 판단이 가능했다. 또한 매우 간단하고 빠른 속도로 부재 내부 상태를 확인할 수 있는 보조 수단으로서 드릴 저항시험을 수행하였으며 초음파 CT 결과의 정확성을 확인할 수 있는 근거로 이용되었다.

여산향교는 전체적으로 보존 상태가 매우 열악했으며, 본 연구를 통해 도출된 비파괴 평가의 결과에서도 이러한 상황이 그대로 반영되어 나타났다. 특히 충해의 피해가 매우 극심했으며, 보수가 제대로 되지 않아 추가적인 피해 가능성이 매우 크다고 판단된다. 향후 적절한 보수가 이루어져야 할 것으로 사료되며, 본 연구가 이에 대한 과학적이고 체계적 근거가 될 것으로 기대된다.

## 제 7 절 DATABASE 프로그램 개발

### 1. DATABASE 프로그램 개관

#### 가. 개발 목적 및 개관

본 데이터 베이스 개발의 주 목적은 데이터의 효율적인 보관 관리와 이를 통해 고건축물에 대한 비파괴 시험을 보다 효율적으로 하고자 하는 것에 있다. 고건축물에 대한 비파괴 시험 방법은 다양하게 개발되어지고 있다. 개발되어진 비파괴 시험 방법들은 시험된 부재의 결합상태, 용도 등 환경적 요인과 시험에 소요되는 시간과 같은 경제적인 요인에 따라 적합한 시험 방법이 적용되어야 한다. 적합한 시험 방법의 선정을 위해서는 방대한 량의 비파괴 시험 데이터들 간의 비교 분석이 필수적이며, 오랜시간과 많은 노력이 필요할 것으로 생각된다. 또한 목재가 아닌 이질재료와 결합되어 있는 부분과 같이, 비파괴 시험을 통한 수치로 그 열화 유무를 판단하기 어려운 경우, 동일 조건상태에서 주기적으로 시험하여 시간의 흐름에 따른 데이터의 변화를 통해, 내부의 결합 여부 또는 결합의 진행여부를 확인할 필요가 있다. 이를 위해서는 다수의 데이터를 효과적으로 입력 보관할 필요가 있으며, 다수의 데이터를 효과적으로 유지 관리 할 수 있는 프로그램 틀이 요구되어 진다.

본 연구에서는 현재 개발되어진 비파괴 시험 방법을 포함하여 추후 개발될 비파괴 방법도 활용되어질 수 있도록 범용적인 틀을 개발하였으며, 시험 방법들 또는 시험 일자들간의 상호 비교가 가능하도록 함으로써 추후 데이터를 확보하게 되면, 최적 시험 방법을 도출할 수 있고 주기적인 시험을 통해 열화 진행 여부를 확인 할 수 있도록 개발되었다.

#### 나. 알고리즘

##### 1) 데이터 입력

다수의 데이터를 보관하기 위해서는 입력 방법에서부터 다수의 유저가 입력이 가능하고 입력된 데이터를 효과적으로 디스플레이 하며, 다수의 유저가 열람이 가능하도록 구성되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 다수의 유저가 사용하기에 어려움이 없도록 설계하였다. 또한, 다수의 데이터를 입력하는 과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 할 수 있도록 입력즉시 입력중인 시편에 대한 데이터들을 즉각적으로 디스플

레이하여 입력한 데이터가 정확한 위치에 정확한 값을 실수 없이 입력하였는지 확인할 수 있도록 구성하였다. 뿐만아니라, 향후 활용되어질 가능성이 있는 정보들을 미리 선별하여 입력함으로써 데이터 보관시 누락될 수 있는 정보들을 빠뜨리지 않고 함께 보관할 수 있도록 하였다. 예를들어, 이전 시험 데이터를 활용하여 추가적인 정보를 얻고자 할 경우, 비파괴 시험 데이터는 잘 보관 되어 있으나, 어느 위치에 있는 건축물의 어느 부재에 대한 시험인지에 대한 데이터인지 확인이 되지 않아 활용되지 못하는 경우가 있다. 오랜 시간과 많은 노력이 기울어져 얻은 시험 데이터들을 추후에도 계속 활용할 수 있도록, 언제 어떤 건축물에서 어떤 부재를 시험하였으며, 또한 해당 시편이 어떤 환경에 노출되어 있는지 등 가능한 모든 정보를 입력 받도록 구성하였다.

새로운 비파괴 시험 기술들이 지속적으로 개발되어지고 있으며, 앞으로도 개발되어질 기술들에 대한 데이터도 본 데이터 베이스에 입력할 수 있도록 범용성을 갖출 수 있도록 설계하였다. 현재 개발되어진 비파괴 기술들인, 파의 전달 속도를 통한 분석방법, 부재 단면의 열화정도를 이미지화 하여 분석하는 방법, 현미경 분석, 육안검사 등 시각적 이미지를 통한 분석 방법 등을 고려하여 적용가능하도록 구성하였으며, 앞으로 개발될 비파괴 시험 방법들의 대부분도 현재 개발되어진 데이터베이스에 적용하는데 큰 어려움이 없을것으로 사료된다. 데이터 입력에 대한 알고리즘은 다음 Fig. 1에 도시되어 있으며, Fig. 1에서 볼 수 있듯이 건축물정보, 부재 정보, 시험일자 등 비파괴 시험에 관련된 주변정보들을 입력하지 않고는 시험결과를 입력할 수 없도록 구성되어 있다.

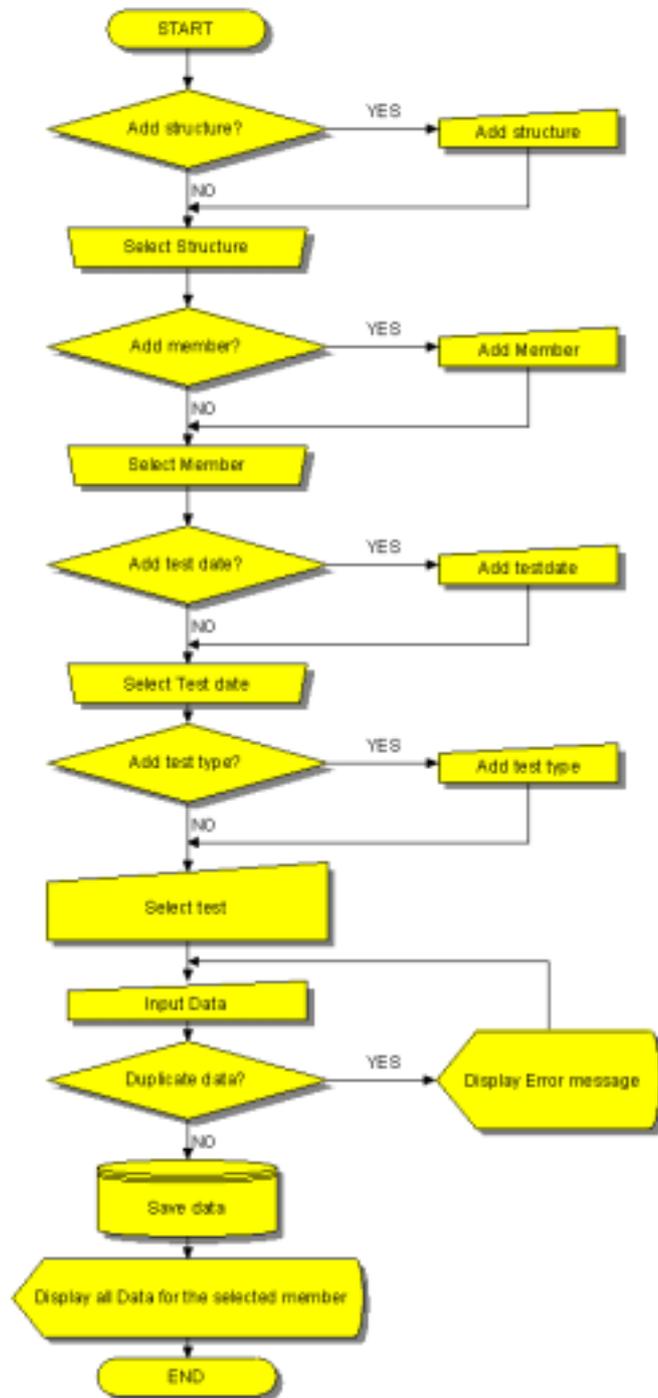


Fig.1. 데이터 입력 알고리즘

## 2) Display

실험 데이터에 대한 입력이 완료되면, 각 실험데이터를 선택하여 상호 비교 할 수 있도록 구성되어 있으며, 실험 방법들간의 상호 비교를 통해 특정 부재에 대한 각 비파괴 시험 방법들의 분석결과를 일목요연하게 확인할 수 있다. 또한 실험 일자들간의 비교를 통해 열화 유무를 판단하기 어려운 경우에도 주기적인 시험을 통해 열화의 진행 여부를 확인 할 수 있다. 프로그램의 흐름도는 Fig.2에서 제시된 바와 같다.

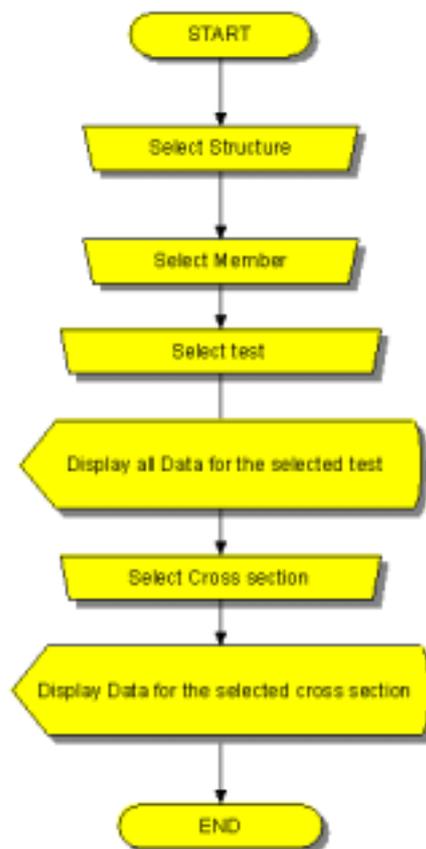


Fig.2. 디스플레이 알고리즘

### 3) 데이터베이스 디자인

추후 데이터 베이스의 유지 관리가 용이하고 확장이 가능할 수 있도록 설계하는 것에 주안점을 두었으며, ERD와 각 테이블의 설계는 Fig.3, Table1-12와 같다.

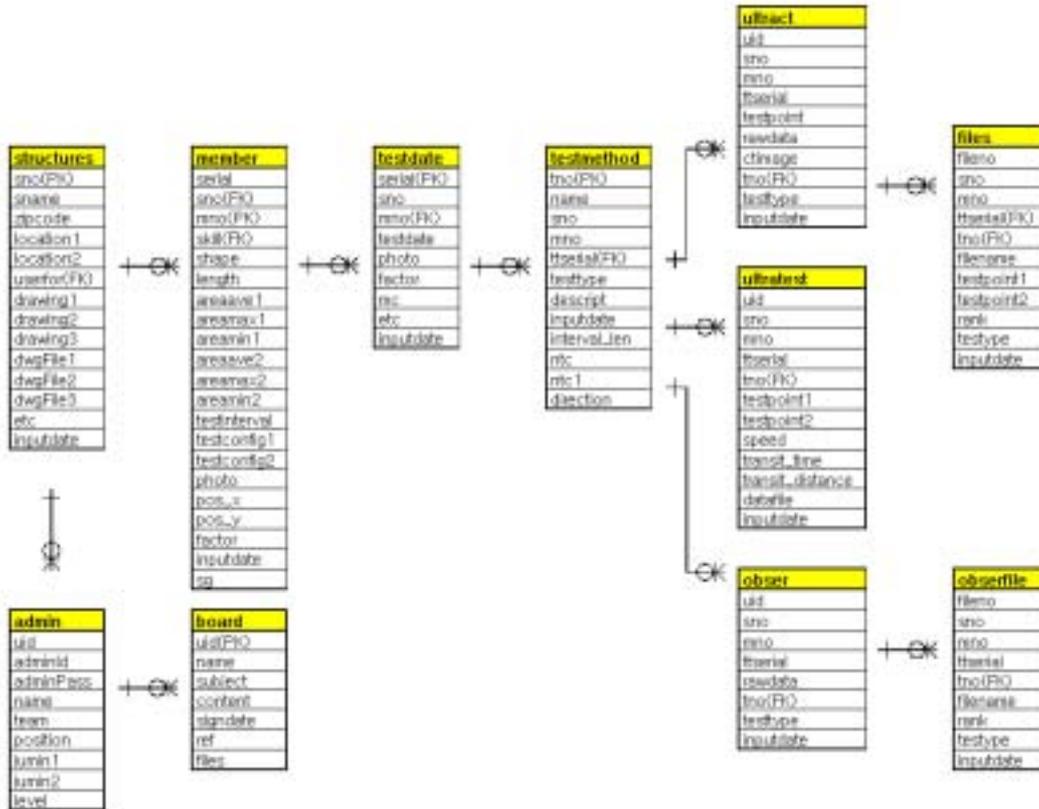


Fig.3. 데이터 베이스 ERD

Table 1. admin 테이블 디자인

테이블 'admin'		사용자 정보 테이블			
Field Name	Description	Primary Key	Null 허용	Default Value	Field type
uid	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(11)
adminid	아이디		Not		varchar(10)
adminPass	비밀번호		Not		varchar(10)
name	이름		Not		varchar(10)
team	소속		Not		varchar(10)
position	직책		Not		varchar(10)
login1	주민등록번호 앞자리		Not		varchar(10)
login2	주민등록번호 뒷자리		Not		varchar(10)
level	등급 '0' 등록대기 '1' 비교분석가능 '2' 아이디 입력 가능 '3' 사용자 관리 가능		Not	0	int(1)

Table 2. usage 테이블 디자인

테이블 'usage'		기본설정 테이블			
Field Name	Description	Primary Key	Null 허용	Default Value	Field type
uid	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(11)
name	건축물 용도명, 부대 기능명			Null	varchar(50)
usetype	'1' 건축물 용도 '2' 부대 기능			Null	smallint(6)
descrip	설명				text
inputdate	등록일			Null	bigint(11)

Table 3. structures 테이블 디자인

테이블 'structures'		건축물 정보			
Field Name	Description	Primary Key	Null 허용	Default Value	Field type
ano	건축물번호	yes	Not	auto_increment	
name	건축물명			Null	varchar(50)
apcode	우편번호			Null	varchar(10)
location1	주소			Null	varchar(50)
location2	상세주소			Null	varchar(50)
usetype	건축물 용도			Null	smallint(6)
drawing1	도면 이미지 파일명			Null	varchar(50)
drawing2	도면 이미지 파일명			Null	varchar(50)
drawing3	도면 이미지 파일명			Null	varchar(50)
flagFile1	첨부자료 파일명			Null	varchar(50)
flagFile2	첨부자료 파일명			Null	varchar(50)
flagFile3	첨부자료 파일명			Null	varchar(50)
etc	비고				text
inputdate	등록일			Null	bigint(11)

Table 4. member 테이블 디자인

테이블 'member'		부채널모				
Field Name	Description	Primary Key	Null 여부	Default Value	Field type	
serial	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(11)	
snr	건축물 번호		Not	0	int(11)	
anno	부채번호		Not		varchar(50)	
shape	가능 '1' 유휴 '2' 사진촬영		Not		bigint(5)	
length	길이		Not		float	
areaave1	단면(평균)		Not		float	
areamax1	단면(최대)		Not		float	
areamin1	단면(최소)		Not		float	
areaave2	단면(평균)		Not		float	
areamax2	단면(최대)		Not		float	
areamin2	단면(최소)		Not		float	
testinterval	실험간격		Not		int(11)	
testconfig1	testbox C 의 경우 Path1 경우		Not		int(11)	
testconfig2	testbox C 의 경우 Path2 경우		Not		int(11)	
photo	촬영일 사진		Not		varchar(50)	
pos_x	건축물도면 위치 좌표 X		Not		int(4)	
pos_y	건축물도면 위치 좌표 Y		Not		int(4)	
factor	결과값인				text	
inputdate	등록일		Not		bigint(11)	
sg	비율		Not		float	

Table 5. testdate 테이블 디자인

테이블 'testdate'		실험일자				
Field Name	Description	Primary Key	Null 여부	Default Value	Field type	
serial	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(11)	
snr	건축물번호		Not		int(11)	
anno	부채번호		Not		varchar(50)	
testdate	실험일		Not		bigint(11)	
photo	사진				varchar(50)	
factor	결과값인				text	
nc	참수물				float	
etc	비고				text	
inputdate	등록일				bigint(11)	

Table 6. testmethod 테이블 디자인

데이터명 'testmethod'		설명변형				
Field Name	Description	Primary Key	Null 허용	Default Value	Field type	
ino	고유번호	Yes	Not	auto_increment		
name	Test name			Null	varchar(50)	
ono	건축물번호			Null	smallint(5)	
ono	부채번호			Null	varchar(50)	
tszseq	실험일자 고유번호			Null	smallint(5)	
testtype	실험유형 '1' -> A (ex: Ultrasonic C.T.I.) '2' -> B (ex: Visual Inspection) '3' -> C(ex: Ultrasonic Test)			Null	smallint(5)	
descript	Description of Test					
inputdate	등록일			Null		
interval_len	Test interval(30pudinal)			Null	smallint(5)	
ntc	Number of Path			Null	smallint(5)	
ntc1	Number of Path (세로)			Null	smallint(5)	
direction	방향성 실험 '0' -> 0 '1' -> 1			Null	smallint(5)	

Table 7. ultract 테이블 디자인

데이터명 'ultract'		설명데이터 (test type of 'A')				
Field Name	Description	Primary Key	Null 허용	Default Value	Field type	
uid	고유번호	Yes	Not		int(11)	
ono	건축물번호		Not	0	int(11)	
ono	부채번호			Null	varchar(50)	
tszseq	실험일자 고유번호			Null	int(11)	
testpoint	실험위치			Null	int(11)	
rowdata	Row Data			Null	varchar(50)	
ctimage	CT Image			Null	varchar(50)	
ino	실험방법 고유번호			Null	int(11)	
testtype	실험유형			Null	smallint(5)	
inputdate	등록일			Null	bigint(11)	

Table 8. ultratest 테이블 디자인

테이블 'ultratest'		실용데이터 (Best type of 'C')				
Field Name	Description	Primary Key	Null 여부	Default Value	Field type	
uid	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(4)	
sno	건축물번호		Not	0	int(11)	
rno	부대번호		Not	''	varchar(50)	
floral	실험일자 고유번호			Null	int(11)	
trn	실험방법 고유번호			Null	int(11)	
testpoint1	실험위치 (가로방향)			Null	int(11)	
testpoint2	실험위치 (세로방향)			Null	int(11)	
speed	관입속도			Null	float	
transf_time	전달시간			Null	float	
transf_distance	이동거리			Null	float	
debtfile	데이터파일			Null	varchar(50)	
inputdate	등록일			Null	bigint(11)	

Table 9. files 테이블 디자인

테이블 'files'		실용데이터 전부필수(Best type of 'A')				
Field Name	Description	Primary Key	Null 여부	Default Value	Field type	
fileid	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(11)	
uid	고유번호			Null	int(11)	
sno	건축물번호			Null	varchar(50)	
rno	부대번호			Null	int(11)	
floral	실험일자 고유번호			Null	int(11)	
trn	실험방법 고유번호			Null	int(11)	
filename	필수 파일명			Null	varchar(50)	
testpoint1	실험위치 (가로방향)			Null	int(11)	
testpoint2	실험위치 (세로방향)			Null	int(11)	
year	연번			Null	int(11)	
testtype	실험유형			Null	smallint(6)	
inputdate	등록일			Null		

Table 10. obser 테이블 디자인

테이블 'obser'		실용데이터 (Best type of 'B')				
Field Name	Description	Primary Key	Null 여부	Default Value	Field type	
uid	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(11)	
sno	건축물번호			Null	int(11)	
rno	부대번호			Null	varchar(50)	
floral	실험일자 고유번호			Null	int(11)	
rowdate	Row Date			Null	varchar(50)	
trn	실험방법 고유번호			0	int(11)	
testtype	실험유형			Null	smallint(6)	
inputdate	등록일			Null	bigint(11)	

Table 11. obserfile 테이블 디자인

테이블 'obserfile'		실용데이터 필수필드(test type of 'B')			
Field Name	Description	Primary Key	Null 허용	Default Value	Field type
fileno	고유번호	Yes	Not	auto_increment	int(11)
stno	고유번호			Null	int(11)
year	건축물번호			Null	varchar(50)
flarea	부대번호			Null	int(11)
stno	실용입법 고유번호			Null	int(11)
filearea	실부 파일명			Null	varchar(50)
rank	순번			Null	int(11)
testtype	실용구형			Null	smallint(6)
inputdate	등록일			Null	bigint(11)

Table 12. board 테이블 디자인

테이블 'board'		자료형			
Field Name	Description	Primary Key	Null 허용	Default Value	Field type
uid	게시물 번호	Yes	Not	0	int(11)
name	게시자 이름		Not	''	varchar(20)
subject	게시물 제목		Not	''	varchar(255)
content	게시물 내용		Not	Null	Text
signdate	게시 날짜		Not	0	bigint(11)
ref	참조		Not	0	int(11)
file	첨부파일			Null	varchar(100)

#### 다. 프로그램 메뉴얼

##### 1) 사용자 권한 설정

사용자 권한에는 Table 13과 같이 3가지 종류가 있으며, 신규사용자는 Super admin 관리자로부터 인증을 받아야 사용이 가능하다.

Table 13. 사용자 권한

유형	권한			비고
	데이터 분석	데이터 입력	사용자 관리	
Super admin	O	O	O	
Admin	O	O	X	
User	O	X	X	

신규 사용자를 등록 하기 위해서는 신규사용자 등록후 Super admin 계정을 가지고 있는 관리자가 사용자 정보 변경메뉴에서 권한 유형을 선택하여 인증해 주어야 한다.

## 2) 기본 설정

데이터의 입력 분석하기 앞서 가장 기본적으로 설정되어야 할 부분이다. 건축물의 용도 부분은 건축물이 어떤 용도로 사용되었는지 구분하기 위한 것이다. 예를 들어 학교, 주거용, 사찰 등 건축물의 용도를 입력해 놓으면 실험 데이터 입력시 이를 통해 건축물을 구분할 수 있다. 데이터의 관리가 용이하도록, 명칭을 수정하는 것은 금지하고 있으며, 삭제만 가능하다. 부재 기능 부분은 부재가 어떤 용도로 사용되었는지 구분하기 위한 것이다. 예를 들어 도리, 창방, 보, 기둥 등으로 입력해 놓으면 부재 생성시 어떤 용도로 사용된 부재인지 분류 할 수 있다. 이 역시 데이터의 관리가 용이하도록 명칭을 수정하는 것은 금지하고 있으며, 삭제만 가능하다.

## 3) 데이터 입력

건축물 정보, 부재 정보, 실험 일자에 대한 정보는 필수 입력 사항이며, 순차적으로 각 정보를 입력하여야만 실험 데이터를 입력 할 수 있다. 모든 실험데이터는 어느 건축물에 대한 실험인지, 어느 곳에 위치한 부재인지, 그리고 언제 실험 되었는지 확인할 수 있도록 구성되어 있다.

### 가) 건축물 생성

건축물의 위치, 사용용도, 평면도를 입력한다.

평면도 입력시 CAD(\*.dwg) 파일을 입력할 시에는 다음과 같이 설정한 후 이미지 변환을 클릭한다.

### ◎ CAD(DWG)파일 Image 변환 방법

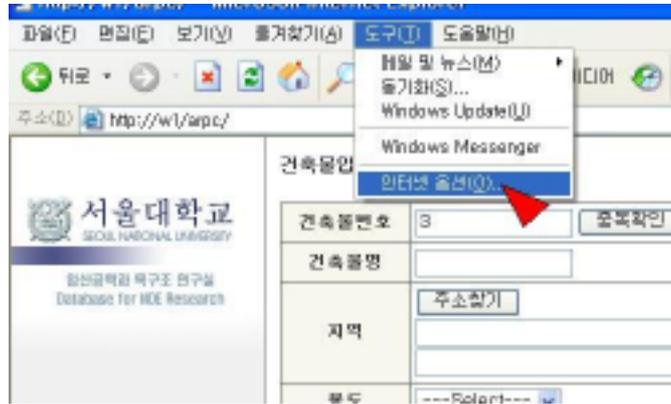
1. 업로드할 CAD(\*.DWG)파일을 Image file로 변환시킨다.
2. C:\outputDwg2Image\폴더에 변환된 gif파일을 선택하여 업로드시킨다.

### ◎ Active X 수동설치 방법

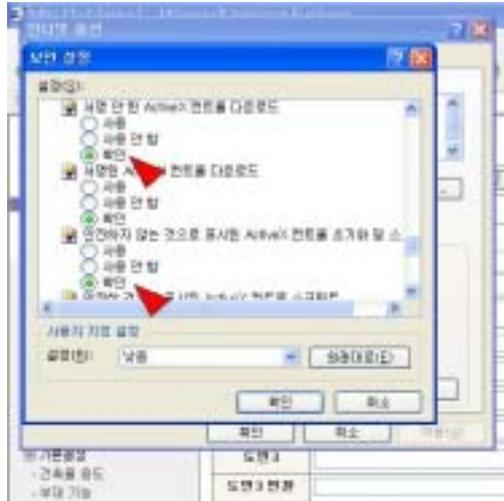
1. 다음 파일을 다운로드 받아 실행시킨다.

## DOWNLOAD ACTIVE X

2. 인터넷 옵션에서 보안탭을 선택한후 사용자 지정수준을 클릭한다.



3. 안전하지 않는 것으로 표시된 ActiveX 컨트롤 초기화 및 스크립트 항목을 확인으로 되어 있는지 확인한다. 서명 안 된 ActiveX 컨트롤 다운로드 항목을 확인으로 되어 있는지 확인한다.



나) 부재 생성

부재를 생성하기 위해서는 Table 14와 같은 항목을 모두 입력하여야 한다. 입력시 부재의 기능, 부재의 치수, 건축물내의 위치는 필수 사항으로 하여 추후 데이터의 재 활용에 활용할 수 있도록 하였다.

Table 14. 부재생성 입력항목

입력 항목	내용	필수사항	예시	비고
부재번호	식별가능한 번호 부여	O	보1,기둥1	
기능	부재의 용도 및 기능 선택	O	기둥,도리	기본 설정사항 자동구성
단면모양	부재의 단면 모양 선택	O		원형, 사각형 선택
부재길이		O		단위:mm
단면	단면 사이즈 입력	O		단위:mm
현미경사진		X		
비중		X		
열화원인		X		
위치지정	도면에서 부재위치 지정	O		



다) 실험일자 생성

실험일자를 생성하기 위해서는 Table 15와 같은 내용을 입력하여야 한다. 입력할 수 있는 정보로서 함수율, 열화 원인등, 시간이 흐름에 따라 변화될 수 있는 환경적 요소가 포함되어 있다.

Table 15. 실험일자 생성 입력항목

입력 항목	내용	필수사항 여부	예시	비고
실험일자	실험한 날짜를 입력한다.	O	2005-10-15	
사진	관련 사진을 입력한다	X		
함수율	관련	X		
열화원인	변동된 열화 원인 등이 있을시 입력한다.	X		
비고		X		

라) 실험방법 추가

실험방법으로는 고려할 수 있는 비파괴 실험방법이 모두 적용 되어 있다. 각 실험 유형별 입력 데이터 종류 및 적용가능한 실험은 Table 16과 같다.

**Table 16. 실험유형별 입력 데이터 및 적용 실험**

실험 유형	입력 데이터	입력가능데이터 개수 (부재당)	적용
A	각 단면에 대하여 Image files 10개 Raw Data file 1개	단면개수 × 11개	CT, 단면사진 등
B	Image file 10개	10	부재 육안관찰, 현미경사진 등 응력과 시험, 초음파 시험 등
C	각 실험 방향에 대하여 Data file 1개 Raw Data file 1개 전달속도(전달시간,거리)	단면개수 × 실험방향개수 × 2	전달 속도를 관찰하는 실험법 등

- 실험 유형 A

**Table 17. 실험유형 A 생성시 입력항목**

입력 항목	내용	필수사항	예시	비고
test name	실험명	O	Ultrasonic CT	
test interval	실험한 단면 사이의 간격	O	150	단위 : mm

※ test interval

부재 길이는 3600mm이고 간격 100mm, 150mm 지점에서 실험 했을 경우, 최대 공약수인 50mm으로 입력하면 50mm 간격으로 단면이 생성되고 해당 지점에 데이터를 입력하면 된다.

- 실험 유형 B

**Table 18. 실험유형 B 생성시 입력항목**

입력 항목	내용	필수사항	예시	비고
test name	실험명	O	현미경사진	

- 실험 유형 C

**Table 19. 실험유형 C 생성시 입력항목**

입력 항목	내용	필수사항	예시	비고
test name	실험명	O	Ultrasonic Test	
test interval	실험한 단면 사이의 간격	O	150	단위:mm
Num of Path	각 단면별 전달파의 이동경로 개수	O	6	
양방향 실험	O:동일경로에 양방향으로 실험 X:동일경로에 한방향으로만 실험	O		

※ 양방향 실험

동일 경로에서 전달파가 지나가는 방법에는 방향에 따라 두가지가 있으며, 어느 방향으로 지나갔는지 구별해야한다. 이때 방향을 고려하여 동일 경로에서 두 번씩 실험한 경우 O를 선택하고, 전달파의 지나가는 방향을 고려하지 않아 동일 경로에서 한 번씩 실험한 경우 X를 선택하면 된다.

마) 데이터 입력

- 실험 유형 A

이미지화 된 데이터의 입력을 용이하게 할 수 있도록 현재 데이터의 입력상태를 페이지에 도시 하였으며, 해당 단면을 클릭하면 입력된 데이터를 확인할 수 있다. 각 단면에 입력된 데이터를 수정하는 것은 데이터의 관리를 위해 금지 하고 있으며, 삭제 후 재등록이 가능하다. CT Image를 입력할 때 비교할 이미지들을 순차적으로 입력하

면 추후 데이터의 비교 분석시 일목요연하게 비교가 가능하다. (ex : 1 X'ray CT, 2 Ultrasonic CT)

**Table 20. 실험유형 A의 입력항목**

입력 항목	내용	필수사항 여부	예시	비고
실험위치	실험명	O		
Raw data	실험 데이터	O		
CT Image	이미지화 된 CT 이미지	O		

- 실험유형 B

이미지화 된 데이터들을 정리하기 위한 실험유형으로, 육안으로 관찰한 외관 이미지, 현미경 사진들을 입력해 놓으면 비교 분석할 때 열화 원인 분석 등의 추가적인 분석시 용이하게 데이터를 활용할 수 있다. 총 10개의 이미지가 입력 가능하다.

**Table 21. 실험유형 B의 입력항목**

입력 항목	내용	필수사항 여부	예시	비고
데이터파일	보관용 데이터 파일	X		
이미지파일	비교분석을 할 이미지 데이터 파일	O	육안관찰	이미지 데이터 (10개)

- 실험유형 C

파장의 전달 속도로 열화 정도 또는 유무를 판단하는 비파괴 방법에 적절하며, 수치화된 데이터를 입력함으로써 다량의 데이터 축적시 분석이 용이할 것으로 사료된다. 실험되어진 각 단면에 대하여 이동 경로에 따라 데이터를 집적할 수 있으며, 파의 이동 방향도 고려하여 데이터 입력이 가능하다.

**Table 22 실험유형 C의 입력항목**

입력 항목	내용	필수사항 여부	예시	비고
전달속도	전달시간( $\mu$ s)/이동거리(mm)	O		
실험위치	길이방향(실험위치)	O	150	
	실험방향(전달과가 가로지르는 경로방향)	O	A	
데이터파일	측정 데이터 등 보관용	X		
View option	전체보기 : 부재 전체 데이터 확인가능	O		
	단면보기 : 해당 단면의 데이터만 확인가능			

#### 4) 데이터분석

##### - 비교 분석

동일 건축물의 부재, 즉 동일 시편에 대하여 특정 주기별로 실험이 진행되어지고, 다양한 비파괴적 방법이 적용되어 진다면, 다음과 같은 비교분석이 가능하다.

1. 특정부재에 대하여 실험 날짜별 열화 정도의 변화
2. 특정부재에 대한 다양한 실험 방법을 통한 결과들의 비교

##### 사용방법

1. 건축물 선택
2. 부재 선택
3. 실험일자 또는 실험 방법 선택

##### ※ 사용자 정의 간격 비교 :

실험간격이 서로 다른 실험들을 선택했을때에는 모든 실험 데이터를 볼 수 있는 실험간격을 자동으로 계산하여 출력합니다. 원하는 데이터가 특정 지점인 경우 사용자 정의 간격비교를이용해 분석이 필요한 데이터만 출력할 수 있습니다.

ex) 부재의 길이가 1300mm 이고

실험 간격이 550mm인 Ultrasonic CT와  
실험 간격이 50mm인 X'ray CT의 데이터중에서  
1100mm 지점의 데이터만 서로 비교해야 할 때

- 사용자 정의 간격비교를 사용하지 않는 경우  
50mm 간격으로 모든 데이터(총 26개지점)를 다 출력한다.
- 사용자 정의 간격비교를 550으로 지정한 경우  
550mm 지점과 1100mm 지점만을 출력한다.

## 2. 실용성 검증

### 가. DATABASE 프로그램의 실용성 검증

#### 1) 다양한 비파괴 시험방법을 통한 열화유무 판단

이미 개발된 비파괴 기술(초음파 및 X선 CT 기술)의 타당성을 확인하고 그 정확도를 비교 검토 하고자, 인공 열화시편을 이용하여 비파괴 평가를 실시하였다. 비파괴 시험후 시편을 절단하여 실제 단면과 비파괴 시험 결과를 대조, 분석하여 각 비파괴 기술별 열화탐지의 정확도 및 그 특성을 분석하였다. 인공열화 시편은 소나무(*Pinus densiflora*)를 사용하였고, 지름 20cm, 길이 30cm의 원형 단면을 갖는다. 시편의 중앙에 KS공시균인 *Fomitopsis palustris*와 ASTM공시균인 *gloeophyllum trabeum*(GT)을 주입하여 인공열화 시켰으며, 이 균의 최적 성장조건을 위하여 상대습도 100% 상태에 두었다.

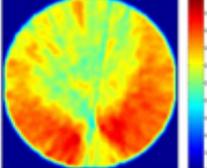
실험명 : Actual Cross section	Download : 
	
실험명 : FBP(0.95)	Download : 
	
실험명 : DET(mono)	Download : 
	
실험명 : X-ray CT	Download : 
	

Fig.4. *Fomitopsis palustris*로 인공 열화 된 시편의  
동일 단면에서 실험 방법들 간 비교

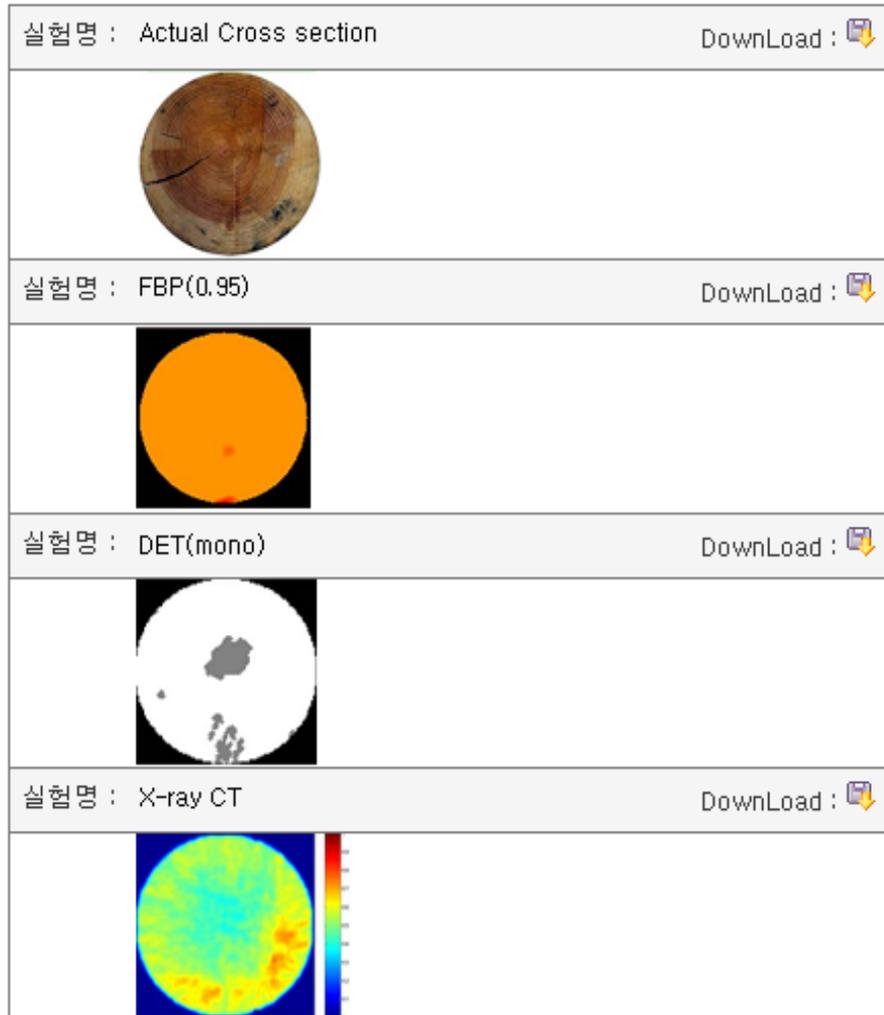


Fig.5. *gloeophyllum trabeum*로 인공열화 된 시편의  
동일 단면에서 실험 방법들 간 비교

Fig.4, 5는 데이터 베이스에서 추출한 2개월간 인공열화된 부재에 대한 Ultrasound CT 2가지 FBP(0.95), DET(mono), X-ray CT 그리고 실제 단면을 커팅한 사진이다. Fig.4는 KS공시균인 *Fomitopsis palustris*를 Fig.5는 ASTM공시균인 *gloeophyllum*

*trabeum*(GT) 주입하여 2달간 열화 시킨 시편에 대한 데이터이다. 특정 부재에 대한 동일 단면에서의 3가지 시험의 결과와 실제 단면을 서로 비교할 수 있도록 구성 되어 있으며 이 데이터 들의 비교로 TYP, GT 두가지 시험군에 대하여, 3가지 시험 방법 모두 열화를 비교적 잘 탐지해 냈으며, DET법이 열화의 위치를 보다 명확하게 판단 할 수 있었음을 알 수 있다.

## 2) 주기적 시험을 통한 열화의 진행 유무 판단

이미 개발된 기술(초음파 및 X선 CT 기술)들이 열화의 진행에 따른 변화를 감지 할 수 있는지를 확인하고자, 인공 열화시편을 이용하여 비파괴 평가를 실시하였다. 시험데이터 중 FBP(0.9, 0.95), DET(mono, color) 총 4가지 Ultrasound CT 분석방법을 그 대상으로 하였고, 열화 전, 열화 2개월, 열화 6개월 후의 데이터들만을 데이터베이스로부터 추출하였다.

인공열화 시편은 소나무(*Pinus densiflora*)를 사용하였고, 지름 20cm, 길이 30cm의 원형 단면을 갖는다. 시편의 중앙에 ASTM공시균인 *gloeophyllum trabeum*(GT)을 주입하여 인공열화 시켰으며, 이 균의 최적 성장조건을 위하여 상대습도 100% 상태에 두었다. 주입후 2개월후 초음파 CT 및 X'ray CT 측정을 하였으며, 6개월이 경과된 후에도 동일한 조건하에서 실험하였다.

Fig.6에서 확인할 수 있듯이 시간의 흐름에 따라 CT 형상에 변화가 있었으며, 이는 열화 진행을 감지한다고 평가할 수 있다. 이와 함께 FBP법을 통한 초음파 CT화상에는 6개월이 지나야 화상하단부위의 주입구 주변 열화가 탐지되었으나, DET법에서는 2개월열화 화상에도 열화가 탐지 되었음을 확인할 수 있었다. 또한 DET법에서는 목재의 이방성과 비균질성을 알고리즘에 반영하였기 때문에, 열화 전에는 어떠한 열화도 탐지되지 않았다. 그러나 단 2개월의 열화 만으로 DET법은 매우 민감하게 열화를 탐지하여 시편의 절반이 열화로 판정 되었다.

열화 6개월 후에는 2개월에 비해 시편 하부의 열화가 더욱 크게 탐지되었음을 두가지 분석방법에서 모두 확인 할 수 있었다. 실제 건축물에서는 결합부 등 비파괴 시험의 데이터의 단순 분석으로 열화유무를 판단하기 어려운 경우가 다수 존재하며, 이러한 경우, 수개월 또는 수년동안 주기적인 시험을 통한 CT이미지 데이터의 변화여부로 열화의 진행여부를 객관적으로 판단할 수 있을 것이라 사료된다. 또한 한가지 비파괴 시험이 아니라 다양한 시험 방

법을 동원하여 다각도로 평가하게 되면, 보다 정확하고 객관적인 자료를 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

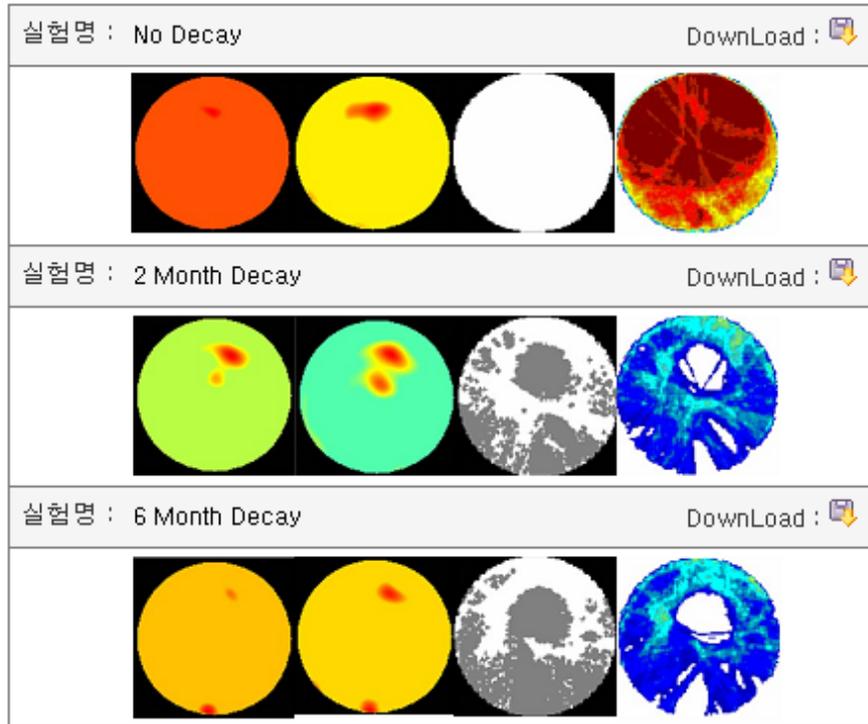


Fig. 6 시간 경과에 따른 인공열화재의  
초음파 CT와 X'ray CT 결과변화

#### 나. 활용 방안

제작된 데이터 베이스에 지속적으로 많은 양의 데이터를 집적하게 되면 실험실에서  
의 실험 결과가 아닌 실제 건축물에 대한 다양한 통계적 고찰이 가능하다. 다량의 데  
이터를 축적하게 되면 열화 경향에 따른 최적 비파괴 시험법을 선정하거나, 실제 건  
축물의 시간에 따른 열화 진행속도 등을 통계적인 방법을 통해 도출 할 수 있을 것이

다. 뿐만 아니라 특정 부재에 대하여 지속적으로 비파괴 실험 데이터를 집적하게 되면 부재들의 변화상태를 모니터링 할 수 있으므로 해당 부재의 교체 및 보수 여부를 결정하는데 객관적인 자료를 제공할 수 있을 것이다. 특히 결합부 등 비파괴 시험결과를 단순 분석하는 것으로 열화유무를 판단하기 어려운 경우, 일정 기간동안 동일 시험을 반복하면, 열화 진행 여부를 판단할 객관적 자료를 제공할 수 있을 것이다. 또한 기상 및 지리정보와 함께 분석하면, 건축물의 지리적, 지형적, 기후적 특성에 따른 열화 원인과 진행 속도 등에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 부재의 용도별 열화 원인 또는 열화 경향등을 파악 할 수 있을 것이다. 무엇보다도 본 데이터 베이스의 개발은 많은 양의 데이터를 효율적으로 수집 보관하는 것이 그 목적이며, 본 취지에 맞게 다량의 데이터를 수집하면, 다양한 분석과 고찰이 추가적으로 가능할 것으로 사료된다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 목표 달성도

#### 1. 1차년도

##### 가. 비파괴법을 이용한 부재 내 열화탐지

###### 1) 생물학적 열화 피해목재 확보

본 연구의 실험재료로 활용할 목적으로 생물학적 열화 피해 목재를 실제 고건축물에서 확보하고자 하였다. 문화재 보수공사 과정에서 심각한 열화피해로 인하여 교체된 부재를 대상으로 하였으며, 전체적인 건축물에 대한 열화 탐지기술의 개발에 이용될 수 있도록 기둥, 보, 서까래, 인방 등의 구조부재에 대하여 다양한 형태 및 크기의 부재를 확보하고자 하였다.

전국에 산재되어 있는 문화재 보수공사 현장 및 관리 관청을 방문하여 실제 확보 가능한 부재들을 확인하고, 향후 지속적인 부재 확보를 위한 협조를 요청하였다. 1차로 전라남도 지역을 대상으로 여수 흥국사를 포함한 7곳의 문화재 보수현장에서 확보된 기둥 등 총 221개의 열화부재들을 연구실로 운반하여 실험에 활용하고 있다.

###### 2) 다양한 비파괴법에 의한 목재의 열화측정 가능여부 및 민감도 조사

비파괴 검사법은 원래 금속이나 콘크리트와 같이 비교적 균질한 재료 내부의 결함을 찾기 위한 목적으로 개발되었다. 비파괴 검사법에는 다양한 원리가 이용되며, 각각의 원리 및 사용 목적에 따라 여러 장치들이 개발되어 사용되고 있다. 최근 이렇게 개발된 장치들을 목재용으로 변화하여 사용하거나 기존의 원리를 응용하여 새로운 장치를 개발하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 최근까지 목재의 열화탐지를 위한 목적으로 주로 이용되고 있는 음력과 및 초음파 전달속도 측정 장치와 드릴저항 시험장치가 다양한 목재의 열화원인(부후, 충해, 할렬 등)을 얼마나 효과적으로 탐지할 수 있는지를 확인하고자 하였다. 또한 현재 연구 및 개발이 진행되고 있는 여러 장치들에 대하여 목재용으로의 적용 가능성도 함께 확인하고자 하였다. 다양한 목적에 대한 적용 가능성 및 현장 적용성

을 고려하여 본 연구에서는 이동사용이 가능한 비파괴 장비에 초점을 맞추어 검토하였다.

응력과 및 초음파 전달속도 측정 장치를 이용하여 목재의 열화를 탐지해 본 결과, 파의 전달 속도를 측정하는 이러한 방법은 열화 유무의 판단은 가능하지만 열화의 정량적 평가에는 상당한 제약이 있음을 확인하였다. 특히 열화의 초기단계에서는 건전재와 거의 차이가 나타나지 않았다. 두 방법 사이에도 차이가 나타났는데, 초음파를 이용한 방법은 재료의 표면상태에 크게 영향을 받으며, 열화원인에 따른 전달속도의 차이가 비교적 크게 나타남을 확인하였다. 초음파는 한가지 형태의 파(종파)만을 발생시키기 때문에 전달 경로가 비교적 단순하여 충해나 할렬로 인해 전달경로 상에 빈틈이 있는 경우에는 재료의 밀도를 감소시키는 부후에 비해 파의 전달속도가 급격하게 느려지지만, 여러 형태의 파를 동시에 발생시켜 다양한 전달경도를 가지는 응력파의 경우에는 이러한 영향이 비교적 적게 나타나는 것으로 사료된다.

드릴저항 시험장치는 측정 부위에 대한 열화의 위치 및 정도를 비교적 정확하게 확인할 수 있음을 확인하였으나, 드릴날이 통과한 국소위치에 대한 정보만을 알려주며 측정 부위에 드릴 구멍이 남는 단점이 있다. 드릴저항 시험은 음파속도 측정 장치와 같은 방법으로 대략적으로 확인된 열화 부위에 대해서 정확한 열화의 위치와 정도를 확인하고자 할 때 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

X-ray 투과장치를 이용하여 부재 내부의 열화상태를 확인하였다. 장비의 확보가 2003년 6월중에 완료되었으며, 초기에는 건전재에서 나타나는 목재의 여러 특성들이 X-ray 필름에 어떻게 반영되는지를 확인하는 연구를 수행하였다. 현재는 CT 기법을 도입하여 열화의 보다 정량적인 판단이 가능한 정도의 발전이 이루어져 있는 상황이다.

### 3) 열화원인 및 정도에 따른 비파괴 측정결과의 변화 평가(열화의 정량적 평가)

목재에는 다양한 원인에 의해 열화가 발생하며, 열화의 효과적인 대처방안도 그 원인에 따라 다르다. 따라서 열화의 원인과 그 피해정도를 정확하게 확인할 수 있는 방법이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 기존의 비파괴 검사법을 이용하여 목재 내부에 존재하는 열화의 원인을 식별하고, 각 열화의 위치 및 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다.

재료 내에서 음파의 전달속도는 재료의 밀도와 탄성계수에 의해 결정되며, 재료에

열화가 발생하여 진행됨에 따라 초음파 전달속도는 점점 느려지게 된다. 본 연구실을 포함한 이전의 많은 연구자들은 열화 정도에 따른 응력과 및 초음파 전달속도 기준을 제시하였는데, 본 연구에서는 이전 연구에 의해 제시된 기준값들을 실제 열화부재에 적용하여 그 실효성을 검증하였다. 음파의 전달속도는 목재 내부의 열화뿐만 아니라 여러 조건에 의해 크게 영향 받기 때문에 단지 음파의 전달속도만을 고려하여 열화를 정량적으로 평가하는 것은 어렵다는 것을 확인하였다.

음파의 전달속도 이외에도 재료를 통과하고 나온 초음파의 파형을 오실로스코프로 받아 분석함으로써 재료 내부의 상태를 예측하기 위한 연구를 진행하였다. 연구에 사용되었던 초음파 장비가 현장에서 손쉽게 초음파의 전달시간을 측정할 수 있도록 소형으로 제작된 장비임에 따라 얻어지는 신호의 출력이 약하고 신호 대 잡음비(S/N비)가 커서 만족할만한 결과는 얻지 못하였다. 현재 목재용으로 개발되어 출력이 강하고, 표면상태의 영향을 적게 받아 S/N비를 줄일 수 있는 초음파 탐촉자의 확보하였고 CT 영상 구성을 위한 초음파 시스템이 구축되어 활용되고 있다.

X-ray 투과장치를 이용하면 부재 내부에서의 밀도 분포에 대한 투영도를 얻을 수 있다. 이러한 투영도를 통해 열화의 대략적인 위치와 크기를 확인할 수 있지만, 이 결과는 평면상으로 얻어지므로 정확한 열화의 정도와 크기를 확인하는 데는 제약이 따른다. 이러한 제약을 극복하기 위해 X-ray CT(Computed Tomography)가 사용되고 있지만 상당한 고가이고, 부피가 큰 고정식 장비가 대부분이므로 목재에 적용하기에는 어렵다. 최근 목재용으로 사용하기 위한 이동식 X-ray CT 장비가 몇몇 연구자들에 의해 개발되고 있지만 목재 전신주와 같이 단순하고 비교적 일정한 형태를 가지는 경우에 대해서만 그 실효성이 확인된 상태이다. 따라서 본 연구에서는 부재의 주변을 일정한 각도로 회전하면서 촬영한 적은 수의 X-ray 필름으로부터 부재의 내부 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하였다. 이러한 방법을 통해 다양한 형태 및 크기를 가지는 목재나 접합부와 같은 복잡한 구조에 대해서도 현장에서 내부 상태를 평가함이 가능해졌다.

#### 나. 수종별 주요 열화원인 확인

##### 1) 고건축물 및 조경시설물 목부재의 생물학적 열화원인 및 분포 조사

고건축물의 목부재, 고건축물 해체부재, 조경시설재를 대상으로 열화원인과 열화원인의 지역간 차이, 즉 분포 조사를 실시하였다. 고건축물의 목부재, 고건축물 해체부

재, 조경시설재를 대상으로 열화원인을 조사한 결과, 고건축물의 경우에는 유지 및 관리 상태에 따라 생물열화의 피해 정도가 상이하였으나, 피해 목부재에서는 부후, 연부후, 건재가해충해, 흰개미 가해 등의 심각한 복합 피해가 관찰되었다. 고건축물의 해체 부재 또한 고건축물과 동일하게 심각한 복합 생물열화 피해가 관찰되었다. 해체부재의 경우, 부후는 모두 갈색부후로 나타났으며, 흰개미 피해가 매우 심각한 것으로 나타났다. 육안 관찰을 통한 현존 고건축물의 목부재 조사 시에는 그리 심각하지 않았던 흰개미 피해가 실제 해체부재 조사 시는 예상외로 심각하여 향후 부후 탐지를 위한 비파괴검사 기술 개발도 중요하지만 흰개미 가해 탐지를 위한 비파괴검사 기술 개발이 중요함을 알 수 있었다. 조경시설재의 경우에도 방부처리재 대신 미처리 목재를 사용하거나 방부처리 대신 발수제나 페인트를 이용한 표면 도장 처리한 목재를 사용한 경우 심각한 부후 피해와 일부 흰개미 피해가 관찰되었다. 이처럼 현재 상당량의 고건축물의 목부재와 조경시설재가 생물열화의 피해를 받고 있음은 고건축물 및 조경시설재의 생물열화 탐지(진단)를 위한 비파괴검사 기술의 개발의 필요성을 제시한다고 할 수 있다. 지역에 따른 열화 종류의 차이는 거의 없었으나 남부지방의 경우, 중부지방에 비하여 흰개미 가해가 많은 것으로 관찰되었다.

### 2) 목부재로부터 부후균의 분리 및 동정

부후가 진행되는 것으로 판단되는 다양한 야외용 목제품으로부터 부후균 분리용 시편을 채취하여 이들로부터 부후균을 분리하고 동정하였다. 분리 및 동정 결과, 14종의 부후균을 최종 동정하였는데 KS 규격의 목재방부제 시험용 공시균인 갈색부후균, *Formitopsis palustris*와 백색부후균, *Trametes versicolor*는 동정되지 않았다. 2차로 110여종의 부후균을 분리하여 현재 동정중인데, 육안적으로 판단할 때 대략 50-60여종의 새로운 부후균 동정이 가능하다고 본다.

### 3) 시험용 흰개미 확보

야외조사를 통해 연구 시 필요한 흰개미 서식처(서울 및 수도권 지역의 일본흰개미 서식처 여러 곳과 경상남도 진주 일원의 일본흰개미와 집흰개미 서식처 여러 곳)를 확인하여 포집하였다.

#### 다. 국산수종의 조직특성 조사

##### 1) 고건축물에 사용된 열화부재의 수종 식별

나주, 광주, 여수, 영광, 부산 등지에서 확보한 고건축물 부재 212개를 대상으로 조직 특성 및 결함을 조사하고 아울러 수종 식별을 실시하였다. 전체 212개 부재 가운데 침엽수재가 207개 그리고 활엽수재가 5개로 고건축물용 부재로 주로 침엽수재가 이용되었음을 알 수가 있었다. 침엽수재의 경우 경송류 206개, 솔송나무 1개로 거의 대부분을 경송류가 차지하였는데 이러한 경송류 가운데 소나무 또는 곱솔이 202개 그리고 소나무 또는 곱솔을 제외한 수종이 4개인 것으로 드러났다. 이는 우리나라에 있어 예로부터 건축물 부재로 우리나라산 경송류인 소나무나 곱솔이 거의 대부분 사용되었음을 의미한다. 활엽수재로는 느티나무 4개, 졸참나무류인 갈참나무 1개인 것으로 밝혀졌다.

##### 2) 열화부재의 해부학적 특성 조사

광학현미경을 이용한 해부학적 특성 및 결함 조사 그리고 수종 식별을 실시하였으며, 보다 세부적인 특성 조사를 알아내기 위하여 전자현미경을 이용한 실험을 진행하였다.

## 2. 2차년도

### 가. 비파괴검사법 정도개선 및 정량적 평가기술 개발

#### 1) 비파괴검사법의 정도개선

응력파, 초음파, X선, 드릴링 등의 여러 가지 방법을 이용한 비파괴검사법 중 최근 매우 정확한 검사를 가능하게 하는 것으로 평가되는 초음파와 X선을 주로 이용하였다. 1차년도에 확보된 열화 피해목재를 지속적으로 비파괴 평가하였고, 건전한 상태의 아카시나무와 소나무, 라디에타파인을 새로 확보하여 비파괴법의 정도개선을 위하여 이용하였다. 이와 더불어 초음파 및 X선을 통한 목재의 열화 평가능력을 더욱 향상시키기 위하여 영향 인자를 파악하였다. 특히 초음파는 피시험체 내부를 투과 시에 회절 및 굴절 현상이 나타남으로 이에 주목하였다. 그리하여 목재가 자체적으로 가지는 이방성 및 비균질성이 초음파 시험을 통한 결과 산출에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이 결과를 개발된 CT 영상 기술에 접목하여 알고리즘을 개선시켜 나갔다. 또한 X선을 목재에 적용하기 위한 영향인자가 파악되었는데, 목재의 이방

성 및 비균질성에 영향을 주는 것이 아닌 투과 길이에 X선 감쇠 계수가 함수적인 관계를 보이는 것으로 확인되었다. 이러한 결과가 나타난 이유에 대한 정확한 분석이 명확하게 이루어지지 않은 상태이지만, 이 결과를 이용하여 X선을 이용한 비파괴 평가를 더욱 향상시킬 수 있었다.

초음파에 있어서 재료 및 재료 자체의 변이는 표면의 상태가 가장 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. X선과는 달리 초음파는 송신과 수신 탐촉자를 시편에 직접 접촉시켜야 하는 것이므로 표면의 상태가 매우 크게 영향을 준다. 그래서 수피가 남아있는 시편이나 표면 열화가 많이 진행된 시편의 경우에는 본질적으로 정확한 비파괴 평가가 불가능했다. 이러한 영향을 줄이기 위해서는 접촉면을 최소화하여야 했는데, 그래서 1cm 가량의 작은 고무패드를 이용했다. 목조 고건축물에서 확보한 열화 피해 목재에 있어서는 대체로 표면 상태가 초음파 실험을 진행하는데 있어 문제가 발생할 정도로 나쁘지 않았기 때문에 별도의 처리 없이 진행하는 것에 무리는 없었다. 비파괴 평가에 영향을 주는 표면 상태의 또 다른 한 가지 경우는 고건축물에 나타나는 단청에 의한 것이었다. X선 실험을 할 때에 단청이 찍혀 나오기 때문에 열화 피해목재는 사포나 대패 등으로 표면의 단청을 제거하고 비파괴 평가를 수행하였다. 특히 X선을 이용한 목재의 비파괴 평가에 있어서 함수율이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이는 X선의 감쇠가 목재의 비중에 가장 크게 영향을 주기 때문이라고 사료된다. 사용된 아카시나무는 천연 건조된 것이었으나, 소나무는 촉진열화실험 중에 비파괴 평가를 수행하여 함수율이 매우 높아진 상태였기 때문에, 소나무를 비파괴 평가하는데 있어서는 X선의 강도를 높이거나 노출시간을 길게 하는 등의 조치를 취하여 평가를 진행하였다. 초음파를 이용하여 함수율이 매우 높은 시편의 비파괴 평가를 수행하는데 있어서도 초음파의 발생 전압을 조절하여 최적의 신호를 얻고자 하였으며, 앰플리파이어(amplifier)를 이용한 실험 장비의 구성은 이런 면에서 적절하였다고 판단된다.

본 연구에 이용한 초음파 및 X선 장비는 현장 적용이 가능하도록 구성된 것이다. 또한 설치 방법과 실험 방법을 고려하여 현장 적용성 뿐 아니라 비파괴 평가의 질을 높이기 위한 방향으로 진행하였다. 주변 상태의 제약으로 비파괴 평가가 어려운 경우, 즉 기둥이나 보의 일부가 벽에 묻혀있거나 접합부분인 경우들에 있어서 초음파 탐촉자와 접촉면의 크기가 작은 것은 실험에 매우 큰 장점이 된다. X선 실험에 있어서는 필름의 부착 방법을 확립하였고, 피사체의 지름이나 밀도에 맞추어 감도가 다른 필름을 사용함으로써 효과적인 실험을 할 수 있도록 하였다. 그러나 서까래와 같이 반 이상의 많은 부분이 묻혀 있는 부재에 대한 비파괴

평가의 방법은 앞으로 더욱 연구하고 개선해나가야 할 부분이라고 사료된다.

## 2) 열화의 정량적 평가기술 개발

이전부터 수행되어 온 다양한 비파괴검사법으로 열화의 유무는 판단할 수 있었으나, 열화의 크기, 정도 등 그 정량적인 정보는 파악하기 어려웠다. 이를 극복하기 위하여 초음파와 X선을 이용한 CT (Computed Tomography) 기법을 도입하였다. CT의 개념은 이미 의료용으로 많이 이용되고 있지만 장비의 자동화도와 피사체의 종류 등이 다른 차이점이 있다. 그 목적에 있어서도 입목, 원목, 제재목, 구조부재 등 현장에서 목재의 내부 정보를 최소의 측정횟수로 최대한 얻기 위한 것이기 때문에 일반적 CT 개념과는 차이가 있다.

실제 외기에 노출되어 있는 목조 부재는 풍화, 부후, 충해 등 다양한 원인에 의해 열화 피해를 받는다. 이 중 매우 작은 중량감소에도 큰 강도감소를 야기 시키는 것으로 잘 알려져 있는 갈색부후균을 이용하여 인공 열화시편을 제작하고 열화 단계에 맞추어 정량적 평가를 수행하였다. 지름 20cm 가량의 대시편을 이용하여 초음파와 X선을 이용한 CT 이미지의 질을 높이는 데 주력하였다. 열화가 진행됨에 따라 각 단계의 CT 이미지가 어떻게 변화하는지를 확인하여 열화의 진행 양상을 파악하였고, 또한 어느 정도 열화가 진행되었다고 판단되면 시편을 절단하여 실제 단면과 실험을 통해 얻어진 CT 영상을 직접 비교하였다. 이를 통해 비파괴 평가 방법 및 CT 알고리즘을 발전시켜 나갔다. 다만 대시편의 경우 갈색부후균을 시편의 중앙, 즉 심재 부분에 이식하였기 때문에 부후의 속도가 느린 난점이 발견되었다. 대시편과 함께 단면 3cm×10cm 정도의 소시편 실험을 병행하였다. 소시편 실험을 통해 비파괴 평가 간 인자들과 강도 사이의 상관관계를 규명하고자 하였다.

영향 인자를 파악하기 위한 실험에서 확인된 바와 같이, CT 영상 구성에 있어서 가장 큰 문제가 된 것은 목재의 이방성이었다. 많은 재료들 중 목재는 대표적 이방성, 비균질성 재료이기 때문에 이를 고려하여 CT를 구성하고자 하였다. 또한 본래 목재 내부에 존재하는 옹이, 미성숙재, 할렬 등의 변이부와 부후로 인해 나타난 열화를 구별하는 데에 매우 많은 어려움이 있었다. 특히 초음파와 CT의 경우에 있어서, 초음파는 X선과 달리 열화나 목재 내 변이부 혹은 목재의 방사, 접선 방향에 대해 휘어서 진행되는 경향이 있기 때문에 정확한 열화 탐지가 어려웠으나 많은 부분 개선하였다.

## 나. 자연내후성 및 내충성 평가

### 1) 주요 국산재의 자연내후성 및 내충성 평가

주요 국산재인 소나무, 잣나무, 낙엽송을 대상으로 수종·산지·개체간 자연내후성 및 내충성 차이를 평가하였다. 국내에 이러한 연구에 의한 자료가 거의 전무한 바, 본 연구가 국산 주요 수종의 활용에 있어 매우 큰 의의를 가지게 될 것으로 사료된다.

### 2) 단계별 열화시편 제작

#### 가) 부후시편의 제작

실대 크기의 소나무 시험편(이하 '대시편'이라 칭함)을 갈색부후균인 *Formitopsis palustris*(KS, JIS, JAS의 공시 갈색부후균)와 *Gloeophyllum trabeum*(ASTM의 공시 갈색부후균)을 이용하여 인위적으로 열화 시켰으며, 또한 비파괴시험법에 의한 초기단계 열화 탐지 시 목재 자체 결점(옹이, 목리경사 등)에 의하여 발생할 수 있는 변이를 배제하기 위하여 소나무와 라디에타소나무 무결점 소형 시험편(이하 '소시편'이라 칭함)을 제작하여 대시편 열화에 사용된 동일 갈색부후균을 이용하여 단계적으로 열화시킴으로써 대시편을 이용한 초기열화 탐지결과를 보완하고자 하였다. 대시편과 소시편은 단계적 열화를 위하여 27℃ 항온실에서 보관·부후 하였으며, 주어진 열화단계에 도달 시 강제부후를 중단시킴으로써 단계별 열화시험편을 제작, 지속적으로 서울대학교로 이관하였다.

#### 나) 흰개미 가해시편의 제작

흰개미 가해용 시편 제작은 완료된 상태이며, 대형 시험편의 가해를 위하여 대량의 흰개미가 필요하기 때문에 대량 수집하였다. 그러나 제작한 시편에 흰개미가 원활히 착상하지 못하여 흰개미 가해시편의 제작에는 무리가 있었다.

## 다. 열화에 의한 목재의 조직변화 조사

### 1) 인위적 열화시편에 대한 단계적 조직변화 조사

갈색부후균인 *Formitopsis palustris*, *Gloeophyllum trabeum*으로 부후시킨 침엽수재인 소나무와 라디에타소나무 시편을 각각 10주 간격으로 관찰하여 열화에 의한 목재의 조직 변화 조사를 실시하였다. 부후균 균사가 방사조직을 통해 인접한 가도관으로 침투하는 것이 관

찰되었으며 부후균 균사가 다량으로 관찰된 곳에서 목재 조직이 많이 파괴되어 있음이 관찰되었다.

광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 열화에 의한 목재의 조직 변화를 조사하였으며, 부후 경과가 지날수록 목재 시편의 상태가 양호하지 못하므로 보다 세부적인 특성을 조사하기 위해 파라핀 용액으로 매몰하여 제조한 광학현미경용 시편과 특수 처리에 의한 투과전자현미경용 시편을 이용한 실험을 진행하였다.

### 3. 3차년도

#### 가. 열화판단 기준값 결정 및 DATABASE 구축

##### 1) 측정결과 분석을 통한 열화판단 기준값 결정

당초 연구 계획이었던 열화 판단 기준값 결정은 이미 초음파 및 응력과 실험을 통한 1차년도의 연구 수행 중에 연구가 종료되었다. 또한 2차년도에 시작된 초음파 및 X선 시험을 이용한 CT 영상의 구성은 열화의 정량적인 탐지에 획기적인 결과 산출을 가능하게 했다. 따라서 본 년도에는 1, 2차년도에서부터 이어진 연구의 흐름을 종합하고 개선시켜 나가는 의미에서 CT 이미지의 구축 및 개선에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 그리하여 목재의 이방성 및 비균질성을 고려한 초음파 CT 알고리즘이 구축되었으며 열화 탐지의 정확성이 많은 부분 개선되었다. 또한 현장 적용을 위한 초음파 시스템의 구축이 완료되었으며, 이를 통해 향후 더욱 정확한 실험 데이터를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. X선을 이용한 CT 영상 구성은 이미 연구실적으로는 완료된 상황이며, 현장 적용성을 제고하기 위한 반복계산에 의한 알고리즘을 적용 중에 있다. 또한 직접촬영법에 의한 오차 발생을 최소화하기 위하여 디지털 플레이트의 사용을 점검 중에 있다.

##### 2) DATABASE 프로그램 개발

데이터베이스 프로그램이 개발되어 현장 적용 시험 시 산출되었던 결과가 데이터베이스화

되어 있으며, 이와 더불어 아직 데이터의 축적이 많이 이루어지지 않는 탓에 그간 매우 많은 데이터를 축적해 온 단계별 인공열화 시편에 대한 데이터를 추가 정리하였다. 구축된 데이터베이스 프로그램은 사용자 인터페이스에서 다양한 비파괴 평가 방법에 따른 분석과 열화의 진행 양상을 일목요연하게 확인할 수 있음이 검증되었다. 향후 더욱 많은 현장 적용 실험을 통한 결과를 데이터베이스로 구축하여 다양한 통계적 접근을 시도할 계획에 있다.

### 3) 열화탐지기술의 현장적용 시연

3개년을 통한 과제의 진행 중, 3회의 현장적용 시연을 실시하였다. 비파괴 평가법의 지속적인 개선을 통해 본 차년도에 진행될 여산향교 대성전을 대상으로 한 실험에서는 매우 정확하고 의미 있는 결과를 산출할 수 있었다. 향후 데이터베이스의 구축과 병행하여 지속적으로 현장 적용 시연을 실시하여, 현장 적용성을 높이고 목조 고건축물의 유지, 보수에 과학적이고 객관적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 나. 열화에 의한 목재의 물성변화 평가

### 1) 열화단계에 따른 목재의 제반 물성변화 평가

열화에 따른 목재의 물리적 성질 및 역학적 성질이 규명되었다. 본 연구는 목재 열화의 진행에 따른 기본적인 이해에 매우 중요한 자료가 될 것으로 사료된다. 또한 비파괴 평가 결과와의 상관관계를 통해 향후 목조 고건축물의 안전진단을 위한 주요한 결과를 산출할 수 있었다.

## 다. 재질변화와 비파괴 측정결과 간의 관계 구명

### 1) 목재의 조직변화와 비파괴 측정결과간의 관계 조사

열화에 의한 목재의 조직변화는 과제의 수행 중에 지속적으로 연구되었다. 그리하여 많은 해부학적인 자료를 확보한 상태이며, 이를 통해 조직변화가 비파괴 측정 결과에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 근거를 제시할 수 있었다.

표 1. 연구 평가의 착안점 및 달성도

구 분	평가의 착안점 및 척도		
	착 안 사 항	척도	달성도
1차년도 (2002년)	○ 비파괴 검사방법의 적합성	25	25
	○ 비파괴 검사결과의 유효성	25	25
	○ 분리 및 동정된 부후균의 적합성	15	15
	○ 흰개미의 적합성	15	15
	○ 해부학적 특성의 적합성	20	20
2차년도 (2003년)	○ 비파괴법 정도 개선 방법의 타당성	25	25
	○ 열화의 정량적 평가기술의 적합성	25	25
	○ 국산재 자연내후성 및 내충성의 타당성	25	25
	○ 열화 단계에 따른 목재 조직변화의 타당성	25	25
3차년도 (2004년)	○ 목재의 조직변화 및 물성변화가 비파괴 검사 결과에 미치는 영향의 타당성	25	25
	○ 열화판단 기준의 타당성	40	40
	○ DB의 적합성	20	20
	○ 고건축물 열화탐지의 적합성	15	15
최종평가	○ 목재 내 열화탐지를 위한 비파괴 검사방법의 적합성	30	30
	○ 국산재에 대한 비파괴 평가기준의 타당성	40	40
	○ DB의 활용가능성	30	30

## 제 2 절 관련 분야에의 기여도

### 1. 기술적 측면

#### 가. 목재의 비파괴 평가방법 확립

##### 1) 다양한 비파괴 검사법의 장단점 분석 및 목재에의 적절한 적용방법 개발

목재에 적용되고 있는 많은 비파괴 평가법 중 초음파 및 X선을 이용하는 방법이 가장 신뢰도가 높고 현장 적용성이 우수한 것으로 분석되었다. 각 방법에 존재하는 장점과 단점이 정확히 파악된 상태이며, 단점을 극복하기 위한 연구가 과제의 수행을 통해 많은 부분 진행된 상태에 있다. 또한 상황이 허락할 시에는 준비파괴평가인 드릴저항시험이 유용하게 사용되어 정확한 결과 산출이 가능한 것으로 판명되었다.

##### 2) 비파괴 검사 결과의 DATABASE 구축 및 정량적 평가기준 제시

구축된 데이터베이스 프로그램은 향후 지속적인 데이터의 축적을 통해 시일이 지날수록 더욱 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 특히 주요 목조 고건축물에 적용된다면 무분별한 수리 및 보수에 의한 경제적 손실 및 건축물의 역사적 의의가 훼손되는 것을 최소화 할 수 있을 것이다.

#### 나. 목재의 생물학적 열화에 대한 이해

##### 1) 국내 지역별, 수종별 생물학적 열화 분포 파악

제2장에서 상술한 바와 같이 국내에서 목재에 나타나는 열화에 대한 지역별, 수종별 분포를 파악하는 연구는 거의 전무한 상황이었다. 본 연구가 주요 국산재의 체계적인 활용에 기여할 것으로 생각되며, 고건축물에 나타나는 수종별, 지역별 생물학적 열화에 대한 기초 자료로써 보수 및 관리에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 활용계획

#### 1. 원목의 사용용도 결정 및 부재의 등급구분

##### 가. 제재 전 원목단계에서 부재의 내부 상태 및 물리적 성능 평가

구축된 목재의 비파괴 평가를 이용하여 각각의 원목 상태에 적합한 용도를 사전에 결정할 수 있을 것이다. 목재는 수종별, 산지별로 또한 동일 입목 내에서도 변이가 매우 큰 대표적인 이방성, 비균질성 천연 재료이다. CT 기술의 적용을 통해 구축된 정확한 시각화 기술을 이용하여 내부 정보에 대한 정량적인 파악이 가능할 것으로 사료된다. 이를 통해 목부재의 잘못된 사용으로 인한 재료 및 에너지, 인력 낭비를 예방하고 목재 자원의 부가가치를 향상시킬 수 있을 것이다.

##### 나. 구조용 제재목의 과학적인 등급구분 체계 수립

제재목의 생산 공정 과정 중의 등급 구분 체계는 매우 중요하다 할 수 있다. 기존의 육안에 의존하는 방법은 객관성이 떨어지는 방법이므로 지양되어야 할 것이며, MSR(machine stress rating)과 같이 부피가 크고 고가의 장비를 사용하는 것은 효율성이 매우 떨어지며 소규모 제재소나 공장에서의 적용이 불가하다는 단점을 가진다. 이러한 면에서 과제 수행 중에 구축된 비파괴 검사 결과와 목재의 물리적, 역학적 상관관계를 이용한 활용이 가능할 것이다. 그리하여 쉽게 현장에 적용할 수 있는 등급 구분 체계의 수립 및 보급을 통해 국산재의 안정적인 성능확보 및 고부가가치화 유도가 가능할 것으로 사료된다.

#### 2. 목조 고건축물 주요 부재의 열화 탐지

##### 가. 전국에 산재되어 있는 문화재급 목조 고건축물의 적절한 관리방안 모색

본 과제 수행을 통하여 최종적으로 수행된 현장 적용 실험에서 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 구축된 데이터베이스 프로그램을 통해 산출된 결과에 대한 다

양한 분석이 가능하다. 사용부재들의 주기적인 검사가 이루어진다면 수리 및 보수에 대한 과학적이고 객관적인 관리방안 및 열화 원인 및 정도에 따른 보수·보강 방법의 제시가 가능할 것으로 사료된다. 이를 통해 열화에 의한 부재 교체를 최소화 할 수 있고, 또한 목조 문화재의 유지 및 보수에 대한 효율적 계획 수립으로 불필요한 예산 낭비를 방지할 수 있다.

#### **나. 목조 시설물의 안전진단**

본 과제를 수행하면서 열화에 따른 목재의 물리적, 역학적 성질의 변화가 비파괴 평가 결과의 변화와 함께 제시되었다. 이러한 부재에 진행되는 열화가 비파괴 측정결과에 미치는 영향을 토대로 부재 내 응력분포를 비파괴적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 부재 내부 뿐 아니라 부재 간 또는 이질 재료와 접합부위에 대한 근거 자료를 제시할 수 있다. 이러한 연구들을 통해 비파괴 측정결과를 토대로 전체 구조물의 안전성을 해석하여 피해 원인의 규명 및 적절한 조치방안을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 제 1 절 연구 개발 과정에서 수집한 해외과학기술정보

#### 1. 휨시험

기존 강제부후 시편의 휨 시험은 통상적으로 3점 하중(three-point loading) 방식을 사용하였다. 그러나 본 실험에서는 Winandy와 Morrell(1993)이 제안한 4점 하중 방식(four-point loading)을 실시하였다. 3점 하중 방식은 최대 휨 모멘트가 스펜의 정 중앙부, 즉 하중이 적용되는 점에서 발생한다. 그러나 일반적인 강제부후 방식에서 균 가해는 비교적 광범위한 면적에서 발생하게 된다. 따라서 3점 하중 방식을 이용한 휨 시험은 최대 휨 모멘트 발생 위치와 균 가해에 의해 약해진 시험편 부위가 일치하지 않아서 휨성질 감소를 정확하게 평가할 수 없게 된다. 반면에 4점 하중 방식에서는 최대 휨 모멘트가 시험편의 중앙부 지점에서 균일하게 발생하면서 균 가해에 의해 가장 심하게 약해진 부분과 정확하게 일치하여 균 가해에 따른 휨성질 감소를 정확하게 평가할 수 있게 된다.

## 제 7 장 참고문헌

1. 강호양. 2001. 촉진열화목재의 흡습성과 초음파 전달 속도. In: Proc. The Korean society of wood science and technology annual meeting. pp. 11-14.
2. 고진현, 국정환, 권호영, 박종건, 1998, 비파괴검사개론, 원창출판사, pp. 342.
3. 김광철, 배문성, 이진제. 2001. 목조 고건축물의 안전성 평가(I)-Ultrasonic method 를 이용한 목조 고건축물의 정성적 열화 평가. 한국 목재 공학회 학술 발표 요지 집.36~42
4. 김병호, 이용희. 1990. 목조문화재 파손상태 조사. 보존과학연구. 11. 국립문화재연구원.
5. 김사덕, 이용희, 윤희상. 1994. 목조 문화재 파손요인에 관한 연구. 보존 과학 연구. 15:125~155.
6. 김운수·김규혁·김영숙. 2004. 목재보존과학. 전남대학교 출판부
7. 김익선. 1995. 환경이 목재 문화재에 미치는 영향에 관한 조사. 보존과학회지. 4(1) : 53 - 58.
8. 남상호. 1996. 한국의 곤충. 교학사 : pp. 56-317.
9. 대한건축학회. 2000. 건축물 하중 기준 및 해설
10. 민경희, 안희균, 한성희, 정희진. 1984. 창덕궁 소장 지류 및 섬유질물의 가해생물 분포조사. 보존과학연구. 5 : 166-191.
11. 박상진, 안희균. 1982. 화암사 고목재의 구조와 수종. 전남대 연습림 보고. 5: 87~102.
12. 박상진, 정기호, 김재우. 1999. 고려대장경 경판전 기둥의 재질. 한국목재공학회 지.27(1):1~8.
13. 박상진.1983. 범어사 및 무량사 고건축재의 구조와 수종. 보존 과학연구. 4:59~69.
14. 박왕희. 1998. 한국의 향교 건축. 문화재 관리국. 13~676.
15. 산림청. 2004. 목재의방부방충처리기준. 산림청 고시 제 2004-62.
16. 안희균, 이필순, 한성희, 김춘자. 1986. 문화재 가해 곤충의 분류. 보존과학연구(7 집) : 347-368
17. 엄영근, 1999/2000, 목재의 비밀, 초판/재판, WIT건설팅, 서울.

18. 이 용, 1996, 비파괴검사의 기초, 세진사, pp. 364.
19. 이동흡, 강창호, 손동원. 1998. 국내에서 흰개미 분포 및 피해사례조사. '98 학술발표 논문집. 한국목재공학회. pp. 216-220.
20. 이동흡, 강창호, 손동원. 1999. 목조 사찰문화재의 생물열화 피해실태 조사. '99 학술발표논문집. 한국목재공학회. pp. 144-149.
21. 이명혜, 이규식, 한성희, 안희균. 1992. 유물의 보존환경에 대한 생물학적 조사연구. 보존과학연구. 13 : 117-135.
22. 이의중, 1997, 결함 및 초음파탐상검사, 도서출판골드, pp. 463.
23. 이필우, 1988, 목재해부학, 서울대학교 출판부, pp. 467.
24. 이호봉. 1992. 문화재의 생물열화 방제: 훈증처리를 중심으로. 보존과학연구. 13 : 83-97.
25. 정희석, 1986, 목재이학, 서울대학교 출판부, pp.437.
26. 한국건축가협회, 2000. 한국전통목조건축도집
27. 한성희, 이규식. 1989. 벌류에 의한 문화재 가해에 관한 연구. 보존과학연구(10집) : 233-252
28. 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.
29. Abraham M. Hasofer and Neils C. Lind, 1974, Exact and Invariant Second-Moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE. vol 100, No. Em1, pp 111-121
30. Alfredo H-S. Ang, 1973. Structural Risk Analysis and Reliability Based Design. Journal of the Structural Division. ASCE. vol 99, No. ST9, pp 1891-1910
31. American Society for Testing and Materials. 1996. Annual Book of ASTM Standard. West Conshohoke, PA. pp. 646.
32. American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods. ASTM D2017-81. ASTM, Philadelphia, PA, U.S.A.
33. American Wood-Preservers' Association. 2001. Book of Standards. Granbury, TX. pp. 518.

34. American Wood-Preservers' Association. 2001. Standard for inspection of wood products treated with preservatives. AWPA M2-01. AWPA, Grandbury, TX, U.S.A.
35. American Wood-Preservers' Association. 2001. Standard method for laboratory evaluation to determine resistance to subterranean termites. AWPA E1-97. AWPA, Grandbury, TX, U.S.A.
36. American Wood-Preservers' Association. 2001. Standard method of testing wood preservatives by laboratory soil-block cultures. AWPA E10-01. AWPA, Grandbury, TX, U.S.A.
37. Arango, R. A., Green III, F., Hintz, K., Miller, R. B. 2004. Evaluating the natural durability of native and tropical wood species against *Reticulitermes flavipes*. The International Research Group on Wood Preservation. Document No. IRG /WP 04-10539. Stockholm, Sweden.
38. Aratake, S. and Arima, T. 1994. Estimation of modulus of rupture (MOR) and modulus of lumber using higher natural frequency of log in pile of logs. ?. Possibility of application for sugi square lumber with pith. *Mokuzai Gakkaishi* 40(9): 1003-1007
39. Arima, T., N. Mauymura, S. Maruyama and S. Hayamura. 1990. Natural frequency of log and lumber hit with hammer and applications for production processing. In: Proceedings, 1990 International timber engineering conference, 1990 October 23-25;Tokyo, Japan. Tokyo, Japan: Science University of Tokyo : 527-533
40. Armstrong, J.P., D.W. Patterson and J.E. Sneckenberger. 1991. Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle. *Wood and Fiber Science* 23(1):32-43
41. Barnett, H.L. and B.B. Hunter, 1987. Illustrated genera of imperfect fungi. Collier Macmillan Publishers.
42. Benson-Cooper, D.M., R.L. Knowles., F.J. Thompson and D.J. Cown. 1982. Computed tomographic scanning for the detection of defects within logs. Bull. 8. Forest Research Institute, New Zealand Forest Service, Rotorua, New

Zealand: 9

43. Berghem, L. E. R. and L. G. Pettersson. 1973. The mechanism of enzymatic cellulose degradation : Purification of a cellulolytic enzyme from *Trichoderma viride* active on highly ordered cellulose. *Eur. J. Biochem.* 37: 21-30.
44. Berlyn, G. P. and J. P. Miksche. 1976. *Botanical microtechnique and cytochemistry*. The Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa.
45. Bilal M. Ayyub, and Gregory J. White. 1987, *Reliability-conditioned Partial Safety Factors*. Univ. of Maryland
46. Bjokman, E. 1944. Om rothardigheten hos larkvirke. *Norrlands Skogsvardforbunds Tidskrift* 1994(1): 18-45
47. Blanchette, R. A., J. E. Haight, R. J. Koestler, P. B. Hatchfield, and D. Arnold. 1994. Assessment of deterioration in archaeological wood from ancient Egypt. *Jour. Amer. Inst. Conserv.* 33: 55-70.
48. Bowyer, J. L., R. Shmulsky, and J. G. Haygreen. 2003. *Forest products and wood science: An introduction*. 4th ed., The Iowa State Univ. Press, 554pp.
49. Braun, U. P.W. Crous, F. Dugan, J.Z. Groenewald and G.S. Hoog. 2003. *Mycological Progress* 2: 3-18
50. Bray, D. E. and McBride D. 1992. *Nondestructive Testing Techniques*. John Wiley & Sons. pp. 765.
51. Bray, D. E. and Stanley R. K. 1997. *Nondestructive Evaluation - A Tool in Design, Manufacturing and Service*. CRC Press. pp. 586.
52. Breyer. D. E., 1993. *Design of wood structures*. 3rd Ed.
53. Bruce Ellingwood, Fames G. MacGregor, Theodore V. Galambos, C. Allin Cornell, 1982, *Probability Based Load Criteria : Load Factor and Load Combination*, *Journal of the Structural Division*. ASCE. vol 108, No. st5, pp 978-997
54. Bruce R. Ellingwood. 2000. *LRFD : implementing structural reliability in professional practice*. *Engineering Structure* 22 106-115
55. Bucur, V. 1995. *Acoustics of Wood*. CRC Press. pp. 284.

56. Burdsall, H. H. 1985. A contribution to the taxonomy of the genus *Phanerochaete* (Corticaceae, Aphylliphorales). *Mynol. Mem.* 10:1-165
57. Butcher, J. A. 1968. The ecology of fungi infecting untreated and preservative treated sapwood of *Pinus radiata*. *Can. J. Bot.* 46:1577-1589
58. Canadian Wood Council, 1995. Wood design manual.
59. Canadian Wood Council, 1999. Introduction to wood design.
60. Carey, J. K. 1988. Some observations on miniaturised soil/block tests.
61. Cartwright, K. St. G., W.P.K. Findlay, C.J. Chaplin. And W. G. Campbell. 1931. The effect of progressive decay by *Trametes serialis* Fr. On the mechanical strength of the wood of Sitka spruce. *Forest Prod. Res. Bull. No. 11.* BRE, Garston, UK.
62. Chaffey, N. J. 2002. Wood formation in trees: Cell and molecular biology techniques. Taylor & Francis. 364pp.
63. Chang, S.J., P.C. Wang. and J.R. Olson. 1987. Nuclear magnetic resonance imaging of hardwood logs In: Szymani, R., ed. Proceedings, 2d international conference on scanning technology in sawmilling; 1987, October 1-2; Oakland/Berkeley Hills, CA. San Francisco, CA: Forest Industries/World Wood: 8
64. Chou, C. K. and M. P. Levi. 1971. An Electron microscopical study of the penetration and decomposition of tracheid walls of *Pinus sylverstris* by *Poria vaillantii*. *Holzforschung* 25: 107-112.
65. Clausen, C. A. 1997. Immunological detection of wood decay fungi - an overview of techniques developed from 1986. *Int. Biodeter. Biodegr.* 39:133-143
66. Clubbe, C. P., Levy, J. F. 1977 Isolation and identification of the fungal flora in treated wood. Revised technique. The International Research Group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 159. Stockholm, Sweden.
67. Cornell, C. A, 1967. A Proposal for a Reliability-Based Code Suitable for Immediate Implementation. Memorandum to member of ASCE Task Committee on Structural Safety.

68. Cowling, E. B. 1961. Comparative biochemistry of the decay of sweetgum by white- and brown-rot fungi. USDA Tech. Bull. 1258, Washington, DC.
69. Cowling, E. B. 1961. Comparative biochemistry of the decay of sweetgum sapwood by white-rot and brown-rot fungi. Technical Bulletin 1258. U. S. Department of Agriculture, Washington, DC. 79 pp.
70. Curling, S., J. E. Winandy, and C. A. Clausen. 2000. An experimental method to simulate incipient decay of wood by basidiomycete fungi. The International Research Group on Wood Preservation, IRG Document, IRG/WP/00-20200
71. David S. Gromala, P. E. 1996. Implementation of load and resistance factor design in the united states. Proceeding of the international wood engineering conference vol. 3 40-47. Oct.
72. Desch, H.E. and J. M. Dinwoodie. 1981. Timber: Its structure, properties, and utilisation. 6th ed., The MacMillan Press Ltd.
73. Dirk Helms and Peter Niemz. (1994) New applications of drill resistance method for quality evaluation of wood and wood products. Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.
74. Document No. IRG/WP 2317. Stockholm, Sweden.
75. Duncan, C. G., Lombard, E. F. 1965. Fungi associated with principal decays in wood products in the United States. Report No. WO-4. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, WI.
76. Emerson, N. R., D. G. Pollock., J. A. Kainz., K. J. Fridley., D. L. Mclean., and R. J. Ross. 1998. Nondestructive evaluation techniques for timber bridges. 5th World conference of timber engineering, Pro. vol (1).
77. Eom, Y. G. and B. G. Butterfield. 1997. Anatomical comparisons of compression, opposite, and lateral woods in New Zealand radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *Mokchae Konghak* 25: 88-99.
78. Eriksson, K. E., R. A. Blanchette, and P. Ander. 1990. Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer Verlag, New York, NY.
79. Erwin Kreyszig. 1993, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons
80. Eslyn, W. E., Highley, T. L. 1976. Decay resistance and susceptibility of

- sapwood of fifteen tree species. *Phytopathology* 66:1010-1017
81. Exley, R. C., B. G. Butterfield, and B. A. Meylan. 1974. Preparation of wood specimens for the scanning electron microscope. *Jour. Microsc.* 101: 21-30.
  82. Flank Rinn. 1994. Catalog of relative density profiles of trees, poles and timber derived from resistograph micro-drillings. Ninth international symposium on nondestructive testing of wood
  83. Gerhards, C. C. 1975. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC. *Forest Prod. J.* 25(4): 51-57
  84. Ginns, J. H. 1986. Compendium of plant disease and decay fungi in Canada 1960-1980. Publication No. 1813. Agriculture Canada.
  85. Ginns, J. H., Lefebvre, M. N. L. 1993. Lignicolous corticioid fungi of North America. Systematics, distribution and ecology. *Mycol. Mem.* 19:1-127
  86. Glenn, J. K., Gold, M. H., 1983. Decolorization of several polymeric dyes by the lignin-degrading basidiomycetes *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.* 45, 1741~1747
  87. Greaves, H. and J. F. Levy. 1965. Comparative degradation of the sapwood of scots pine, beech and birch by *Lentinus trabea*, *Polystictus versicolor*, *Chaetomium* and *Bacillus polymyxa*. *Jour. Inst. Wood Sci.* 15: 55-63.
  88. H. Kang and R. E. Booker. (2002) Variation of stress wave velocity with MC and temperature. *Wood Science and Technology* 36: 41-54
  89. Hoberb, N., Land, C. J. 2004. Identification of *Serpula lacrymans* and other decay fungi in construction timber by sequencing of ribosomal DNA - a practical approach. *Holzforschung* 58:199-204
  90. Han, W. and R. Birkeland. 1992. Ultrasonic scanning of logs. *Industrial Metrology* 2(3/4):253-282
  91. Hawksworth D.L., P.M. Kirk, B.C. Sutton and D.N. Pegler. 1995. Dictionary of the fungi. 8th Edition. CABI International.
  92. Helms, D. and P. Niemz. 1994. New applications of drill resistance method for quality evaluation of wood and wood products. Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.

93. Hibbett, D. S., Thorn, R. G. 2001. Basidiomycota: Homobasidiomycetes. In : Systematics and Evolution: The Mycota VII. Part B. Eds. McLaughlin, D. J., McLaughlin, E. G., Lemke, P. A. Springer-Verlag, Heidelberg. pp. 121-168
94. Higgins, D. G., A. J. Bleasby, and R. Fuchs. 1991. CLUSTAL W: improved software for multiple sequence alignment. CABIOS 8:189-191.
95. Highley, T. L., L. L. Murmanis, and J. K. Palmer. 1985. Micromorphology of degradation in western hemlock and sweetgum by the brown-rot fungus *Poria placenta*, *Holzforschung* 39: 73-78.
96. Highley, T. L. 1977. Requirements for cellulose degradation by a brown-rot fungus. *Material und Organismen* 12: 25-36.
97. Highley, T. L. 1999. Biodeterioration of wood. In: Wood handbook: Wood as an engineering material. Chapter 13, General Technical Report FPL-GTR-113, USDA For. Serv., For. Prod. Lab., Madison, Wisconsin.
98. Highley, T. L., L. L. Murmanis, and J. G. Palmer. 1983a. Decomposition of cellulose by *Poria placenta*: Light and electron microscopy study. *Holzforschung* 37: 179-184.
99. Highley, T. L., L. L. Murmanis, and J. G. Plamer. 1983b. Electron microscopy of cellulose decomposition by brown-rot fungi. *Holzforschung* 37: 271-278.
100. Higuchi, T. 1985. Biosynthesis and biodegradation of wood components, Academic Press.
101. Hof, T., 1972. Answers to the questionnaire on *Gloeophyllum trabeum*. The International Research Group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 107. Stockholm, Sweden.
102. Holoyen, S. and R. Birkeland. 1987. Industrial methods for internal scanning of log defects: a progress report on an ongoing projection Norway. In: Proc. 2nd Inter. Conference on scanning Technology in Sawmilling. Pap. No. X1-X18. San Francisco, Calif.
103. Hoyle, R. J. 1968. Background to machine stress grading. *Forest Prod. J.* 18(4): 87-97
104. Ian Smith, M. and Greg Foliente, A. M. 2002. Load and Resistance factor

- design of timber joint. *Journal of structural engineering*, vol. 128, no1, january 1
105. J. J. Lee, K. M. Kim and M.S. Bae. (2002) Evaluation of deterioration for structural members using nondestructive testing. (2002) Proceedings of the korean society of wood science and technology fall meeting.
  106. James J. Fuller, Robert J. Ross, John R. Dramm. 1994. Honeycomb and Surface Check Detection Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation. Res. Note FPL-RN-0261.
  107. Jasalavich, C. A., Ostrofsky, A., Jellison, J. 2000. Detection and identification of decay fungi in spruce wood by restriction fragment length polymorphism analysis of amplified genes encoding rRNA. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:4725-4734.
  108. 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.
  109. Jozsef Bodig, Kevin C. K. Cheung and Thomas P. Cunningham Jr. 1995. Engineered wood construction : structural properties for LRFD. *Journal of structural engineering*, vol 121, No. 9 september
  110. 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.
  111. Jung, H. S. 1994. Floral studies on Korean wood-rotting fungi(II) - on the flora of the Aphylophorales (Basidiomycotina). *Kor. J. Mycol.* 22:62-99.
  112. Jung, H. S. 1994. Taxonomic study on Korean Aphylophorales(I) - on some unrecorded genera and species. *Kor. J. Mycol.* 23:266-274
  113. Juroek L. 1958. Microstructure of *Pinus sylverstris* sapwood when attacked by brown rot fungi. *Drev Vysk* 3: 129-135.
  114. Juroek L. 1964. Changes in the microstructure at the destruction of wood

- destroying fungi. *Drev Vysk* 3: 127-144.
115. Jutte, S. M. and I. B Sachs. 1976. SEM observations of brown-rot fungus *Poria placenta* in normal and compression wood of *Picea abies*. *Scanning Electron Microscopy/1976(Part VII), Proc. Workshop Plant Sci. IIT Res. Inst., Chicago, IL: 535-542.*
  116. K. Bethe and C. Mattheck. 1998. Instruments for detection and evaluation of decay and wood quality in standing trees. Eleventh international symposium on nondestructive testing of wood
  117. Kai Yang. 1996. Failure probability evaluation for normally distributed load-strength model with unknown parameter. *Reliability Engineering and System safety* 51 115-118
  118. Kanda, T., K. Wakabayashi, and K. Nisizawa. 1976. Purification and properties of an endo-cellulase of avicelase type from *Irpex lacteus* (*Polyporus tuliferue*). *J. Biochem.* 79: 977-988.
  119. Kartal, S. N. 1999. The leachability, biological resistance, and mechanical properties of wood (*Pinus sylvestris* L.) treated with CCA and CCB preservatives. The International Research Group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 30207. Stockholm, Sweden.
  120. Kim, G. H., H.M. Barnes. And D. E. Lyon. 1994. Effect of decay on the mechanical properties of full-sized lumber. *Holzforechung* 48(2): 145-149
  121. Kim, G. H., Jee, W. G., and Ra, J. B. 1996. Assessment of incipient decay of radiata pine wood using stress-wave technique in the longitudinal direction. *Mokchae konghak* 24(2): 1-6
  122. Kim, G. H., Jee, W. G., Ra, J. B. 1996. Reduction in the mechanical properties of radiata pine wood associated with incipient brown-rot decay. *J. Kor. Wood Sci. Technol.* 24:81-86.
  123. Kim. G.H. 1989. Detection of incipient decay and assessment of residual strength of wood using nondestructive techniques. UNpublished Ph.D. dissertation. Dept. of Forest Products. School of Forest Resouces. Mississippi State. Mississippi : 105

124. Koizumi, A., Y. Iijima., T. Sasaki. and Y. Okazaki. 1997b. Strength properties of sugi(*Cryptomeria Japonia*) grown in Akita Prefecture: Mechanical properties of lumber. *Mokuzai Gakkaishi* 43(2): 210-214
125. Koizumi, A., Y. Iijima., T. Sasaki., Y. Kawai., Y. Okazaki. and H. Nakatani. 1997a. Strength properties of sugi (*Cryptomeria Japonia*) grown in Akita Prefecture I: Young's moduli of logs. *Mokuzai Gakkaishi* 43(1):46-51
126. Kuo, M.-L., D. D. Stokke, and H. S. McNabb. 1988. Microscopy of progressive decay of cottonwood by the brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum*. *Wood and Fiber Sci.* 20: 405-414.
127. Kwon, M. 1993. Anatomical characteristics of Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) wood degraded by a brown-rot fungus (*Lentinus lepideus*). *Mokchae Konghak* 21: 39-50.
128. Larsson, K. H., Larsson, E., Koljalg, U. 2004. High phylogenetic diversity among cortidioid homobasidiomycetes. *Mycol. Res.* 108: 983-1002.
129. Lee, I.D.G. 1965. Ultrasonic pulse velocity testing considered as a safety measure for timber structure. In: Galligan, W.L., ed. *Proceedings, 2d nondestructive testing of wood symposium; 1965 April; Spokane, WA. Pullman, WA: College of Engineering Research Division, Washington State University: 185-203*
130. Lee, J. J. and J. K. Oh. 1999. Stress wave technique for detecting decay of structural members in ancient structures. *Journal of the Korean wood sci. and tech. Mokchae Konghak. Vol (27) : No. 4 pp 43-50*
131. Lee, J. J., G. C. Kim and M. S. Bae. 2002. Nondestructive assessment of deterioration for structural members in ancient buildings. *The proceeding of "7 th World Conference on Timber Engineering. vol (1).*
132. Lee, T. S., Lee, J. Y. 2000. Rearranged list of recorded mushrooms in Korea. *Korea Forest Research institute.*
133. Leightley, L. E. and R. A. Eaton. 1980. Micromorphology of wood decay by marine microorganisms. In : Oxley, T. A., G. Becker & D. Allsopp, eds., *Biodeterioration. Proceedings of the Fourth International Biodeterioration*

Symposium, Pitman Publ., Ltd., Berlin, London.

134. Lemke, P. A. 1964. The genus *Aleurodiscus* (sensu stricto) in North America. *Can. J. Bot.* 42:213-282.
135. Liese, W. 1970. Ultrastructural aspects of woody tissue disintegration. *Ann. Rev. Phytopathology* 8: 231-258
136. Liese, W. and R. Schmid. 1966. Untersuchungen über den Zellwandabbau von Nadelholz durch *Trametes pini*. *Holzwerk Roh-und Werkst.* 24: 454-460.
137. Lim, Y. W. 2001. Systematic study of corticioid fungi based on molecular sequence analyses. PhD Dissertation. Seoul National University, Korea.
138. Lim, Y. W., Kim, J. J., Chedgy, R., Morris, P. I., Breuil, C. 2005. Fungal diversity from western red cedar fences and their resistance to  $\beta$ -thujaplicin. *Antonie van Leeuwenhoek* 87:109-117
139. Madsen, B., 1992, *Structural Behaviour of Timber*, Timber Engineering LTD.
140. Masonodu Shinozuka, 1983. Basic Analysis of Structural Safety. *ASCE Journal of the Structural Engineering*, Vol 109, No 3, pp 721-740
141. Meier, H. 1955. Decomposition of the cell wall by wood-destroying fungi and the submicroscopic structure of tracheids of spruce and wood fibers of birch. *Holzwerk Roh-und Werkst.* 13: 323-338.
142. Messner, K. and H. Stachelberger. 1984. Transmission electron microscope observations of the micromorphology of brown rot caused by *Fomitopsis pinicola* with respect to osmiophilic particles. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 83: 113-130.
143. Messner, K., E. Stebotnik, and H. Stachelberger. 1986. Electron microscopical indication of the demethylation of lignin in wood by osmium tetroxide. *Proc 3rd Intern. Conf. Biotechnol. In the Pulp and Paper Ind.*, Stockholm: 17-19.
144. Miller, G. L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. chem.* 31: 426-428.
145. Moreth, U., Schmidt, O. 2000. Identification of indoor rot fungi by taxon-specific priming polymerase chain reaction. *Holzforschung* 54:1-8.
146. Mulholland, J. R. 1954. Changes in weight and strength of Sitka spruce

- associated with decay by a brown-rot fungus *Poria monticola*. J. Forest Prod. Soc. 4(1): 410-416
147. NICEM. 2003. Transmission electron microscopy using cryo substitution or chemical fixation of biological samples. The 7th Workshop of Transmission Electron Microscope, June 23-27, 2003.
  148. Nicholas, D. D., Jin, Z. 1996. Use of compression strength loss for measuring decay in the soil block test. The International Research Group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 20083. Stockholm, Sweden.
  149. Nilsson, T., Caniel, G. F. 1983. Micromorphology of *Schizophyllum commune* attack in pine (*Pinus sylvestris*) wood. The International Research Group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 1184. Stockholm, Sweden.
  150. Nilsson, T. 1974. Comparative study of the cellulolytic activity of white rot and brown rot fungi. *Material und Organismen* 9: 173-198.
  151. Nobles, M. K. 1965. Identification of cultures of wood inhabiting hymenomycetes. *Can. J.Bot.* 43: 1097-1139.
  152. Palfreyman, J. W., White, N. A., Bultgens, T. E. J., Glancy, H. 1995. The impact of current research on the treatment of infestations by the dry rot fungus *Serpular lacrymans*. *Int. Biodeter. Biodeg.* 35:369-395.
  153. Peter Niemz, Ladislav J. Kucera. 1998. Possibility of defect detection in wood with ultrasound. Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.
  154. Theodore V. Galambos, Bruce Ellingwood, 1986, Serviceability Limit States : Deflection. ASCE. *Journal of the Structural Engineering*, Vol 112, No 1, pp 67-84
  155. Proctor, P. 1941. Penetration of the walls of wood cells by the hyphae of wood-destroying fungi. *Bull. School of Forestry, Yale Univ.* 47: 31
  156. R. Jiang and K. N. P. Murthy. 1995. Reliability modeling involving two Weibull distribution.: *Reliability Engineering and System safety* 47(1995) 187-198
  157. R.O. Foschi, H. Li, J. Zhang. 2002. Reliability and performance-based design : a computational approach and applications. *Structural Safety* 24(2002)

158. Raper, K.B. and D.I. Fennell. 1973. The genus *Aspergillus*. KRIEGER. 309-312
159. Ratrick J. Pellicame, Marvin E. Criswell, 2000. Comparison of ASD and LRFD Codes for Wood Member. ASEC. Practice Periodical on Structural Design and Construction, v0l. 5, No. 2, pp. 54-69
160. Ricardo O. Foschi, 1985. Reliability of Wood Structural System. ASCE Journal of the Structural Engineering, Vol 110, No 12, pp 2995-1556
161. 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.
162. Richard L. Lemaster, Jacek M. Biernacki, and Frank C. Beall. 1994. The feasibility of using acousto-ultrasonics to detect decay in utility poles. Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.
163. Rinn, F. 1994. Catalog of relative density profiles of trees, poles, and timber derived from Resistograph micro-drillings. Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.
164. Robert J. Ross. et al. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs. Research Paper. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
165. Robert J. Ross., Kent A. Mcdonald., David W. Green. and Kristin C Schad. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. Forest Products Journal 47(2):89-92.
166. 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.
167. Rodney C. DeGroot, Robert J. Ross, 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.
168. Ross, R. J. 1895. Stress wave propagation in wood products. In: Proceedings, 5th nondestructive testing of wood symposium. Pullman, WA: Washington State University: 291~318
  169. Ross, R. J. 1999. Using sound to evaluate standing timber. *International Forestry Review* 1(1).
  170. Ross, R. J. and Pellerin, R. F. 1988. NDE of wood based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*. 38(5):39~45.
  171. Rowell, T. M. and Barbour, R. J. 1990. *Archaeological Wood Properties, Chemistry, and Preservation*. American Chemical Society. pp. 472.
  172. 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
  173. Saka, S. and R. J. Thomas. 1982. Evaluation of the quantitative assay of lignin distribution by SEM-EDXA technique. *Wood Sci. Tech.* 16: 1-18.
  174. 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.
  175. Saranpaa, P., Peespanen, R. 1993. Resin canals and resin acids of sapwood and heartwood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). In: Abstracts of the XV International Botanical Congress, Yokohama. Section 3, No. 3034.
  176. SAS Institute. 1988. *Statistical Analysis System (SAS), User's Manual*. Cary, NC.
  177. Sato, T. 1968. A modified method for lead staining of thin sections. *Jour. Elec. Microsc.* 17: 158-159.
  178. Scheffer, T. C. 1973. Microbiological Degradation and its causal organism. In: *Wood Deterioration, etc.* Vol. I. D.D. Nickolas, ed., pp 31-306. Syracuse Univ. Press.

179. Scheffer, T. C., Goodell, B. S., Lombard, F. F. 1984. Fungi and decay in western red cedar utility poles. *Wood Fiber Sci.* 16:543-548.
180. Schmidt, C. J. 1980. The role of oxalic acid in the nonenzymatic decomposition of cellulose. Unpublished Master Thesis, Institute of wood Research, Michigan Tech. Univ., Houghton, MI.
181. Schmidt, O., Liese, W. 1980. Variability of wood degrading enzymes of *Schizophyllum commune*. *Holzforschung* 34:7~72
182. Schmidt, O., Moreth, U. 2000. Identification of the dry rot fungus, *Serpular lacrymans*, and the wild merulius, *S. himantioides*, by amplified ribosomal DNA restriction analysis(ARDRA). *Holzforschung* 53:123-128.
183. Schmidt, O., Moreth, U. 2002. Data bank of rDNA-ITS sequences from building-rot fungi for their identification. *Wood Sci. Technol.* 36:429-433.
184. 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
185. Stalpers, J.A. 1978. Identification of wood-inhabiting fungi in pure culture. *Stud. in Mycol.* 16: 1-248.
186. Suhara, H., Maekawa, M., Kaneko, S., Hattori, T., Sakai, K., Konco, R. 2003. A new species, *Ceriporia lacerata*, Isolated from white-rotted wood. *Mycotaxon* 86:335-347.
187. Tokao, S. Y. Kamgata, and Sasaki. 1985. Cellulase production by *Penicillium purpuroenum*. *J. Agri. Sci. Camb.* 93: 217-222.
188. Tsoumis, G. 1991. *Science and technology of wood: Structure, properties, utilization*. Van Nostrand Reinhold.
189. U.S. Department of Agriculture. 1974. *Wood handbook-Wood as an engineering material*. Agricultural Handbook 72. Washington, DC.
190. Viitanen, H. A., Paajanen, L. M., Nurmi, A., ja Viitaniemi, P. 1993. Korvaako lehtikuusi kyllastetympuun. (Does larch substitute impregnated wood?). *Paperi ja Puu* 75 (9~10): 680-681.
191. Viitanen, H. A., Paajanen, L. M., Saranpaa, P., Viitaniemi, P. 1997. Durability

- of larch (*Larix* spp.) wood against brown-rot fungi. The International Research Group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 10228. Stockholm, Sweden.
192. Viitanen, H. A., Ritschkoff, A. C. 1991. Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture. *Swed. Univ. Agric. Sci.* 222:155
  193. Wang, C. J. K. and R. A. Zabel. 1990. Identification manual for fungi from utility poles in the eastern United States Allen Press Inc. Lawrence, KS. U.S.A. 356 p.
  194. Waterman, A. M. and J. R. Hansbrough. 1957. Microscopical rating of decay in sitka spruce and its relation to toughness. *Forest Prod. Jour.* 7: 77-84.
  195. Weakley, B. S. 1972. A beginner's handbook in biological electron microscopy. Churchill Livingstone, Edinburgh, UK.
  196. Webster J. 1980. Introduction to fungi. 2nd edition. Cambridge University Press.
  197. Wilcox, W. W. 1964. Preparation of decayed wood for microscopical examination. USDA For. Serv. Res. Pap. FPL-056.
  198. Wilcox, W. W. 1968. Changes in wood microstructure through progressive stages of decay. USDA For. Serv. Res. Pap. FPL-70.
  199. Wilcox, W. W. 1970. Anatomical changes in wood cell walls attacked by fungi and bacteria. *Bot. Rev.* 36: 1-28.
  200. Wilcox, W. W., Dietz, M. 1997. Fungi causing above-ground wood decay in structures in California. *Wood Fiber Sci.* 29:291-298.
  201. Wilcox, W. W., E. E. Botsai, and H. Kubler. 1991. Wood as building material: A guide for designers and builders. John Wiley & Sons.
  202. Wilcox, W. W. 1978. Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. *Wood and Fiber Science.* 9(4): 252-257
  203. Winandy, J. E., and Morrell, J. J. 1993. Relationship between incipient decay, strength, and chemical composition of douglas-fir heartwood. *Wood and Fiber Science* 25(3): 278-288

204. Yan-Gang Zhao, Tetsuro One. 2001. Moment methods for structural reliability. *Structural Safety* 23 47-75
205. Zabel, R. A., Moore, R. A. 1958. Relative effectiveness of several oil-soluble wood preservatives. *Forest Prod. J.* 8:258-263.
206. Zabel, R. A., Morrell, J. J. *Wood Microbiology: Decay and its Prevention.* Academic Press, San Diego, CA,
207. Zych, Slepmann and Linnemann. 1969. Mucorales (Lehre: Cramer). 159-161