

발 간 등 록 번 호

11-1543000-000668-01

목재 생산성 향상을 위한 입목 내부 평가 기술 개발

Development of Technique for the Evaluation of the Properties in
Standing Tree for Improving Productivity of Wood

서울대학교

농 립 축 산 식 품 부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “목재 생산성 향상을 위한 입목 내부 평가 기술 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2014년 10월 22일

주관연구기관명 : 서울대학교
주관연구책임자 : 이 전 제
세부연구책임자 : 이 전 제
연 구 원 : 오 정 권
연 구 원 : 방 성 준
연 구 원 : 김 철 기
연 구 보 조 원 : Kyaw Ko Win
연 구 보 조 원 : 장 성 일
연 구 보 조 원 : 이 현 정
연 구 보 조 원 : 전 수 연
연 구 보 조 원 : 우 단 솔
연 구 보 조 원 : 박 지 수

요 약 문

I. 연구과제명

목재 생산성 향상을 위한 입목 내부 평가 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

나무는 가지의 고사나 줄기의 상처를 통하여 목질부가 썩는 경우가 많으며, 수중에 따라서는 상처 없이도 주간의 굽기가 굽어짐에 따라 수를 중심으로 내부 조직이 썩기도 한다. 입목 내부에서 발생한 부후는 직경생장 감소를 일으킬 뿐만 아니라, 나무를 쓰러지게 하거나 죽게 하는 원인이 될 수 있으므로 입목 내부에 발생한 부후를 적절히 평가할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 국내에서는 입목 내부 부후를 탐지하기 위해 성장추나 shigometer를 이용하는데, 이러한 방법은 나무에 상처를 남기고 검사 도중 나무에 부담을 주며, 검사 후 생긴 구멍으로 미생물 등이 침투하여 부후를 일으킬 수 있는 원인을 제공할 수 있다. 이에 본 연구에서는 입목에 상처를 남기지 않는 동시에 현장에서 적용 가능한 X선 CT 기술을 개발하여 입목 내부 상태를 시각화하고자 하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

입목 내부 평가 기술 개발을 위하여, 첫 번째로 목재에 대한 X선 감쇠 특성에 대한 연구를 진행하였다. 더불어 X선은 피시험체의 밀도에 따라 감쇠가 발생하기 때문에 목재의 밀도 변화에 영향을 미치는 인자들에 대한 조사도 함께 진행되었다. X선 감쇠 특성을 정량화 할 수 있도록 질량감쇠계수를 구하였으며, 계산된 질량감쇠계수는 CT 이미지 재구성 알고리즘에 사용되었다. 두 번째로 입목 내부를 시각화하기 위한 연구를 진행하였다. 여러 각도에서 얻어진 방사선 사진들을 이용하여 CT 이미지를 재구성하고자 하였으며, 일반적으로 사용되는 CT 알고리즘을 개선하여 정확도를 높이고 현장에서 CT 재구성이 가능하도록 프로그램 개발을 진행하였다. 마지막으로 개발된 기술을 임지에서 적용할 수 있도록 CT 장비를 개발하였으며, 완성된 CT 시스템을 임지에서 적용하여 검증하였다.

IV. 연구개발결과 및 성과활용 계획

본 연구를 통하여 입목에서 연속 X선 감쇠에 영향을 미치는 인자는 목재의 밀도와 함수율, 그리고 X선 투과 길이임을 확인하였다. 그에 따라 연속 X선 감쇠 특성을 정량화하기 위하여 거리에 따른 질량감쇠계수 식을 도출하여 이용하였다. X선 촬영으로 얻어진 방사선 사진을 질량감쇠계수 식을 이용하여 성공적으로 밀도 profile로 변환하여 CT 이미지를 재구성하는데 사용하였으며, 재구성된 CT 이미지는 목재의 내부 상태를 보다 정확하게 시각화 하였다. 현장에서 본 기술을 적용하기 위해서 여러 각도에서 얻어지는 많은 수의 방사선 사진을 얻을 수 있는 장비와 빠른 연산 처리를 위한 프로그램을 개발하였다. 개발된 CT 시스템을 이용하여 입목 심재부후 및 수분 변화를 탐지하였으며, 입목뿐만 아니라 목재 문화재에 적용한 결과를 본 보고서에 첨부하였다. 이러한 본 연구 결과를 통하여, 효율적인 산림 관리와 목재 열화 탐지가 필요한 분야에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

SUMMARY

I. Subject of Research

Development of technique for the evaluation of the properties in standing tree for improving productivity of wood

II. Necessity and Scope of Research

Wood can be easily deteriorated by micro-organism which would entered thorough dead branches or wound in stem. Some species might have heart rots as the standing tree is getting old. So, it is needed to develop technique for evaluation of inner state of standing tree, because the heart rots in standing tree cause reduction of annual diameter increment, or make standing tree fall down and withered. In Korea, an increment borer or shigometer was used to evaluate inner state of standing tree. Those methods, however, could have made second wound which can be passage for micro-organism, and imposed a burden during the test. Therefore, the method to visualize the condition of standing tree with the portable CT(Computed Tomography) system which can be applied in the field and do not make wound at the stem.

III. Content and Range of Research

First, this research was done to understand the attenuation characteristic of X-rays in wood for developing the technique to evaluate the properties in standing tree, and literature investigation research also done to know indices affected to change density of wood because X-rays is attenuated by density of object. From the attenuation characteristic of X-rays, the equation of mass attenuation coefficient was derived to quantify radiograph. Second, the research was also done to visualize the inner condition of standing tree by using X-ray CT image. X-ray CT image was reconstructed by using the FBP(Filterd Back Projection) algorithm with the radiograph which were gained at every certain angles.

And then, new CT reconstructing program was developed by revising general CT algorithm. Lastly, portable CT apparatus which can apply in the field was developed, and developed portable CT system was applied in the field to verify whether it can visualize inner condition of standing tree or not.

IV. Results of Research and Plan for Utilization

Through this study, it confirmed that the factor affecting X-rays attenuation are wood density, moisture content and the penetrating depth of X-rays. So, derived the equation of mass attenuation coefficient according to the penetrating depth was used to convert radiographs into density profiles. The density profiles were successfully used to reconstruct CT image. CT image using the equation of mass attenuation coefficient was more accurate than general CT image. Then CT apparatus and reconstructing CT image program were developed to apply this technique in the field. Using developed portable CT system, heart rots and distribution of moisture content in standing wood were investigated. And the results of applying other wooden materials with portable CT system also contain in this paper. It is considered that it can be used to manage forest effectively or to investigate inner condition of wooden materials such as wooden properties.

CONTENTS

| | |
|---|-----------|
| Chapter 1 Summary of Research | 15 |
| Section 1 Purpose of research | 17 |
| Section 2 Necessity and scope of research | 17 |
| 1. Outline | 17 |
| A. Damage of deterioration in standing tree | 17 |
| B. Domestic forest state | 18 |
| C. Current forest administration | 18 |
| 2. Necessity of research | 19 |
| A. Technical side | 19 |
| B. Economical and industrial side | 20 |
| C. Social and cultural side | 21 |
| 3. Scope of research | 22 |
| | |
| Chapter 2 Trend of Internal and External Techniques | 25 |
| Section 1 Nondestructive testing of wood | 27 |
| Section 2 Technique for evaluation of the properties in standing tree | 28 |
| Section 3 CT technique | 29 |
| Section 4 Summary | 30 |
| | |
| Chapter 3 Contents and Results of Research | 31 |
| Section 1 Investigation of standing tree characteristic | 33 |
| 1. Physical properties of standing tree | 33 |
| A. Specific gravity variation in standing tree cross section | 33 |
| B. Moisture content of green wood variation | 34 |
| 2. Internal deterioration in standing tree | 37 |
| Section 2 X-rays condition for testing | 40 |
| 1. Condition of X-rays tube and digital detector | 40 |
| A. X-rays tube | 40 |
| B. Digital detector | 41 |
| 2. Properties of X-rays tube and digital detector | 42 |

| | |
|---|-----|
| A. Angle of effective irradiation | 42 |
| B. X-rays intensity according to distance | 44 |
| 3. Influence factor of mass attenuation coefficient in wood | 47 |
| A. Species | 49 |
| B. Direction of X-rays radiation | 53 |
| C. X-ray intensity and mass attenuation coefficient of wood according to penetrating depth | 54 |
| Section 3 Condition of X-ray CT image reconstruction | 62 |
| 1. CT image reconstruction by using general algorism | 64 |
| A. Optimum number of X-ray radiograph | 64 |
| B. Verification of reconstructed CT image using general algorism | 71 |
| 2. Improvement of problem in reconstructed CT image using general algorism | 82 |
| A. Measurement of wood cross section | 82 |
| B. Difference of distance of X-ray radiation | 87 |
| C. Revised CT image | 90 |
| Section 4 Development of CT technique for field application | 95 |
| 1. Development of CT image reconstruction program | 96 |
| A. Improvement of CT image reconstruction process | 96 |
| B. Development of visualization program | 98 |
| C. Reconstruction of density CT image | 104 |
| D. Improvement of CT image accuracy | 115 |
| 2. Development of CT apparatus for field application | 119 |
| A. Consideration | 119 |
| B. Detail of developments | 120 |
| C. Explanation of CT apparatus for filed application | 121 |
| 3. Inspection system for detecting inner deterioration of standing tree | 131 |
| Section 5 Field Application | 133 |
| 1. Detection of inner deterioration of standing tree | 133 |
| A. Oak with hearts rots in Korea national arboretum | 133 |
| B. # 1 Oak with hearts rots in Unduryeong | 138 |
| C. # 2 Oak with hearts rots in Unduryeong | 143 |
| D. Teak with heart rots | 147 |

| | |
|--|------------|
| 2. Internal test of wood | 149 |
| A. Dismantled rafter | 149 |
| B. Round wood with termite damage | 151 |
| C. Column member of traditional house | 153 |
| D. Beam member of traditional house | 155 |
| E. Statue of wooden Buddha | 157 |
| F. 2×6 lumber | 160 |
| | |
| APPENDIX 1. General CT Image Reconstruction Algorithm (MATLAB) | 161 |
| APPENDIX 2. Revised CT Image Reconstruction Algorithm (C++) | 175 |
| | |
| Chapter 4 Achievement of Goal and Contribution to Related Field | 185 |
| Section 1 Annual aim of research and view point of evaluation | 187 |
| Section 2 Rate of achievement | 188 |
| Section 3 Rate of contribution | 191 |
| 1. Technique for evaluating of properties in standing tree | 191 |
| 2. Nondestructive evaluation of wood | 191 |
| | |
| Chapter 5 Results of Research and Plan for Utilization | 193 |
| Section 1 Plan of commercialization | 195 |
| Section 2 Plan of technical diffusion | 195 |
| Section 3 Plan of intellectual property right security | 197 |
| 1. Intellectual property right | 197 |
| 2. Research paper | 197 |
| 3. Conference presentation | 198 |
| | |
| Chapter 6 Research Facilities and Equipments | 199 |
| | |
| Chapter 7 Reference | 203 |

목 차

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 제 1장 연구개발과제의 개요 | 15 |
| 제 1절 연구개발의 목적 | 17 |
| 제 2절 연구개발의 필요성 및 범위 | 17 |
| 1. 개요 | 17 |
| 가. 입목의 부후 피해 | 17 |
| 나. 국내 산림 현황 | 18 |
| 다. 현행 산림 관리 | 18 |
| 2. 기술적, 경제적, 사회적 측면에서의 필요성 | 19 |
| 가. 기술적 측면 | 19 |
| 나. 경제, 산업적 측면 | 20 |
| 다. 사회, 문화적 측면 | 21 |
| 3. 연구개발의 내용 및 범위 | 22 |
| | |
| 제 2장 국내외 기술개발 현황 | 25 |
| 제 1절 목재 비파괴 검사 | 27 |
| 제 2절 입목 내부 평가 기술 | 28 |
| 제 3절 CT 기술 | 29 |
| 제 4절 종합 | 30 |
| | |
| 제 3장 연구개발수행 내용 및 결과 | 31 |
| 제 1절 입목 내부 탐지를 위한 입목 특성 조사 | 33 |
| 1. 입목의 물리적 특성 | 33 |
| 가. 횡단면 내 입목 비중의 변이 | 33 |
| 나. 생재함수율의 변이 | 34 |
| 2. 입목 내부 부후 | 37 |
| 제 2절 X선 조건 탐색 | 40 |
| 1. X선 선원 및 디지털 디텍터 | 40 |
| 가. X선 선원 | 40 |
| 나. 디지털 디텍터 | 41 |
| 2. X선 선원 및 디지털 디텍터 물성 | 42 |

| | |
|---|-----|
| 가. 선원의 유효 조사 각도 | 42 |
| 나. 거리에 따른 X선 강도 | 44 |
| 3. X선 감쇠계수 영향 인자 | 47 |
| 가. 수중 | 49 |
| 나. X선 투과 방향 | 53 |
| 다. X선 강도와 X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 | 54 |
| 제 3절 X선 CT 이미지 재구성 | 62 |
| 1. 일반 알고리즘을 이용한 CT 이미지 재구성 | 64 |
| 가. 적정 방사선 사진 횟수 산정 | 64 |
| 나. 기존 X선 CT 알고리즘의 정확도 검증 | 71 |
| 2. 일반 알고리즘으로 재구성된 CT 이미지 문제점 개선 | 82 |
| 가. 단면 형태 측정 | 82 |
| 나. X선이 조사된 거리 차이 | 87 |
| 다. 보정된 CT 이미지 | 90 |
| 제 4절 현장 적용을 위한 CT 기술 개발 | 95 |
| 1. CT 이미지 재구성 프로그램 개발 | 96 |
| 가. CT 이미지 재구성 과정 개선 | 96 |
| 나. 시각화 프로그램 개발 | 98 |
| 다. 밀도 CT 이미지 구성 | 104 |
| 라. CT 이미지 내 열화 탐지 정확도 개선 | 115 |
| 2. CT 장치 개발 고려 사항 및 개발 내역 | 119 |
| 가. 고려 사항 | 119 |
| 나. 개발 내역 | 120 |
| 다. 현장 적용 CT 장치 개발 내역 및 설치 매뉴얼 | 121 |
| 3. 입목 내 열화 평가를 위한 검사 체계 확립 | 131 |
| 제 5절 현장 적용 | 133 |
| 1. 입목 내부 열화 탐지 | 133 |
| 가. 안양수목원 참나무 심재부후목 | 133 |
| 나. 운두령 참나무 심재부후목 1 | 138 |
| 다. 운두령 참나무 심재부후목 2 | 143 |
| 라. Teak 심재부후목 | 147 |
| 2. 목재 내부 검사 | 149 |
| 가. 서까래 해체 부재 | 149 |

| | |
|--|------------|
| 나. 흰개미 피해목 | 151 |
| 다. 외암마을 기둥부재 | 153 |
| 라. 나주 최석기 가옥 보 부재 | 155 |
| 마. 영광 불갑사 나한상 머리 | 157 |
| 바. 2×6 제재목 | 160 |
| APPENDIX 1. 일반 CT 이미지 재구성 알고리즘 (MATLAB) | 161 |
| APPENDIX 2. 개선된 CT 이미지 재구성 알고리즘 (C++) | 175 |
| 제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 | 185 |
| 제 1절 연차별 연구목표 및 평가 착안점 | 187 |
| 제 2절 연구개발목표의 달성도 | 188 |
| 제 3절 관련분야의 기술발전예의 기여도 | 191 |
| 1. 입목 내부 평가 기술 개발 | 191 |
| 2. 목재의 비파괴 평가 방법 | 191 |
| 제 5장 연구개발 성과 및 성과활용 계획 | 193 |
| 제 1절 실용화·산업화 계획 | 195 |
| 제 2절 기술 확산 계획 | 195 |
| 제 3절 특허·품종·논문 등 지식재산권 확보 계획 | 197 |
| 1. 지식재산권 | 197 |
| 2. 논문 | 197 |
| 3. 학회 발표 | 198 |
| 제 6장 연구시설·장비 현황 | 199 |
| 제 7장 참고문헌 | 203 |

제 1장 연구개발과제의 개요

제 1장 연구개발과제의 개요

제 1절 연구개발의 목적

본 과제는 입목 내부에 발생하는 부후를 탐지하고 입목 내부 상태를 평가하기 위한 기술 개발에 그 목적이 있다. 이를 위하여 입목이 위치하고 있는 현장에서 적용할 수 있는 X선 CT(Computed Tomography) 기술 개발을 진행하였다.

제 2절 연구개발의 필요성 및 범위

1. 개요

가. 입목의 부후 피해

나무는 가지의 고사나 줄기의 상처를 통하여 목질부가 썩는 경우가 많으며, 수종에 따라서는 상처 없이도 주간의 굽기가 굽어짐에 따라 수를 중심으로 한 내부 조직이 썩기도 한다. 일단 부후가 시작되면 나무 내부라는 특수성으로 인하여 그 상태가 아주 심각해질 때까지 외부로는 전혀 증상이 나타나지 않고 부후가 지속적으로 진행되어 그 결과 나무가 이를 견디지 못하고 쓰러지거나, 심하면 고사되기도 한다(가오유량과 차, 2009). 심재부후의 경우에는 육안검사에서는 발견되지 않으므로, 부후가 표면까지 확대되어 피해가 커지고 난 후에야 진단되는 문제점이 있다.

심재부후는 직경생장감소(Bendz-Hellgren과 Stenlid, 1995)와 재적생장의 감소(Bendz-Hellgren과 Stenlid, 1997)를 일으켜 경제적 손실로 이어지며, 국산 낙엽송 입목에서도 심재부후 감염시점 이후 성장량의 급격한 감소가 보고된바 있다(박 등, 2009). 성장량의 감소로 인한 경제적 손실뿐만 아니라 목재로 이용할 때 부후로 인한 재적 손실은 목재 이용 측면에서 매우 심각하다고 할 수 있다. 북미의 경우 부후에 의한 피해가 전체 목재 재적의 30%에 해당된다고 보고된바 있다(Leininger 등, 2001).

목재를 얻기 위해서는 30년 이상의 숲가꾸기 노력이 필요하나, 장기간 숲가꾸기 후 입목 내 부후 발생률이 크다면 임산 자원의 가치를 저하시킬 뿐만 아니라 그 범위와 정도가 확대되므

로 조기에 탐지하여 제거 또는 그에 따른 조치를 취할 필요가 있다.

나. 국내 산림 현황

1950년대 한국전쟁의 발발로 황폐화된 우리나라의 산림은 녹화 사업을 통해 입목 축적량이 꾸준히 증가하고 있다. 우리나라는 국제식량농업기구(FAO)에서도 가장 단기간에 산림녹화로 성공한 국가로, 그 결과 우리나라의 산림은 수자원 함양기능, 토사유출 방지기능, 쾌적성, 소음 방지, 공기정화 등의 숲 기능을 훌륭히 수행해 오고 있다. 이러한 간접적인 가치창출 외에도, 별채하여 얻어진 산림자원을 목재와 같은 소재로서 이용하면 직접적인 가치 창출을 할 수 있으며 더 나아가서는 원목 수입으로 인한 외화 낭비를 줄이는 등의 부수적인 혜택을 기대할 수 있다.

그러나 우리나라 국산목재 자급률은 16.0%(산림청, 2011)에 불과하며, 국내 목재 수요의 대부분을 수입목재에 의존하고 있다. 국산목재의 자급률을 높이고 숲의 경제적인 가치를 증대시키기 위하여 꾸준한 노력이 진행되고 있으나, 산림에서 발생하고 있는 심재부후는 숲의 경제적인 가치를 떨어뜨리고 있는 실정이다. 국내 천연활엽수림에선 41.6%의 부후 발생률을 보이고 있으며(동부지방산림청, 2008), 포플러류의 경우 경기도는 79.3~89.1%, 강원도는 24.7~80.7%의 높은 수간 부후가 발생된다는 보고가 있다(임업연구원 연구보고서 제37호). 대표적인 구조용재 수종인 낙엽송 또한 심재부후가 빈번하게 발견되고 있고, 임지에 따라서는 높은 피해율로 나타나고 있다고 보고된바 있다(김, 1997). 강원도 평창지역 낙엽송 조림지에서 조사된 심재부후 발생률은 66%(진부면, VI령급), 72.1%(봉평면, V령급), 20%(대화면, V령급)으로 매우 높게 조사된바 있다(신, 2010).

다. 현행 산림 관리

열화(부후, 다습심재 등)가 있는 입목은 조기에 진단하여, 간벌 시에 제거하면 건강한 입목으로만 산림을 구성 할 수 있으며, 보다 양질의 산림자원을 제공할 수 있다. 하지만 수확을 위한 입목들은 그 입목의 품질(직경, 수고, 관찰 가능한 열화 등)과 임분의 특성(임령, 수종구성, 서식지 유형, 병충해의 유무, 조림목적 등)을 기준으로 육안 평가를 통하여 선택되어 왔다. 현재의 육안 평가를 통해서만 직경, 수고 등 입목 외부의 관찰을 통해 확인할 수 있는 문제점만 인지할 수 있어, 수간 내부에서 발생하는 심재부후와 같은 문제점은 탐지 되지 않는다, 탐지 되지 않은 심재부후는 그 범위와 정도가 시간이 지남에 따라 확대되기 때문에 최종 목재의 생산

성에는 심각한 손실을 야기할 수 있다.

따라서 심재부후를 탐지할 수 있는 기술 개발이 이루어진다면, 간벌 시 제거하는 등 적절한 조치를 취함으로써 보다 효율적인 목재 생산이 가능 할 것으로 기대되며, 보다 객관적인 방법으로 입목의 상태를 평가할 수 있어 효율적이고 체계적인 산림 관리가 가능할 것으로 기대된다. 경제림에 대한 관심 증대와 실질적인 산주 소득 증대를 위해서는 직접적인 소득을 창출할 수 있는 목재 생산을 위한 관점에서의 산림관리가 필요한 실정이다. 이를 위해서는 입목의 수간 내부의 상태를 진단하고 진단 결과에 따라 적절한 조치를 취하여 목재생산 효율성을 높일 필요가 있다. 그러나 현행 산림관리방법으로는 입목 내부 부후 등 육안으로 관찰되지 않는 문제점을 진단할 수 없으며, 보다 효율적인 산림 관리를 위해서는 입목의 수간 내부 상태 진단 기술의 개발이 시급한 실정이다.

2. 기술적, 경제적, 사회적 측면에서의 필요성

가. 기술적 측면

(1) 내부 열화의 조기 진단 필요성

입목 내부에 목재 부후균의 침투로 인해 부후가 시작되면 입목 내부라는 특수성으로 인하여 그 상태가 아주 심각해질 때까지 외부로는 전혀 증상이 나타나지 않고 부후가 지속적으로 진행된다(가오유량과 차, 2009). 이러한 내부 부후는 조기에 진단된다면 적절한 조치를 통하여 진행을 멈추게 할 수도 있고, 적어도 진행을 늦출 수 있으므로 나무의 건강을 위하여 부후의 조기발견은 매우 중요하다 할 수 있다.

이러한 내부 부후를 조기에 발견하여, 간벌 또는 적절한 조취를 취함으로써 국내 산림자원의 효율적인 관리가 가능하며 나아가 목재자원의 품질 및 생산성 향상에 기여 할 수 있을 것으로 기대한다.

(2) 입목 내부 수분의 탐지 필요성

입목은 광합성과 뿌리에서 흡수한 수분 및 양분에 의해 생육한다. 입목 내에서의 수분의 이동과 수분 분포는 입목의 생육상태, 열화유무 등을 판단할 수 있는 지표가 될 수 있다. 하지만,

이를 측정, 평가할 수 있는 기술이 없어 수목의 상태를 진단하는데 어려움이 있다.

박테리아는 다습심재에서 발생하며 건조, 재색, 가공 등 목재 생산 공정에 영향을 미쳐, 최종 생산품의 품질을 저하시킨다(Ward과 Pong, 1980). 또한 다습심재는 입목 내부에서 주로 발생하여 육안검사를 통해서만 확인되지 않으며, 적절한 조치가 취해지지 않는다면 박테리아에 의한 부후가 지속적으로 확대된다. 이러한 부후는 높은 함수율을 갖는 부분에서 주로 발생하므로, 수분 탐지는 다습심재의 탐지 및 생육상태 진단을 위한 지표가 될 수 있을 것이라 기대한다.

(3) 입목 진단 필요성

양질의 목재생산을 위해서는 보다 체계적이고 과학적인 숲 가꾸기가 필요하고, 이를 위해서는 현재 입목의 상태를 정확히 평가할 수 있는 기술이 필요하다. 목재 자원 생산의 효율성 향상을 위해서는 생육상태가 양호한 개체를 선별 집중 무육할 필요가 있으며, 생육환경 개선 및 위해 요소 제거를 위해 입목의 상태를 확인할 수 있는 기술이 필요하다. 내부의 열화, 수분을 확인할 수 있는 기술의 확보를 통해 입목의 생육상태에 대한 이해를 증진하고 수목 병리학, 생태학, 조림학의 발전을 위한 기초 자료 제공, 그리고 나아가 보다 다양한 계측시스템 제공을 통해 체계적이고 과학적인 입목 관리 시스템의 확보가 필요하다. 본 연구는 살아있는 입목에 피해를 주지 않고 입목의 생육상태를 평가하기 위한 정보를 제공할 수 있는 기술을 개발하고자 하며, 이를 통해 목재 이용 분야뿐만 아니라 수목 병리학, 생태학, 조림학 등의 기초자료로서 활용 될 수 있을 것으로 기대한다.

나. 경제, 산업적 측면

(1) 내부 열화의 조기 진단을 통한 목재생산의 효율성 증대

목재 자원은 장기간의 육림기간을 요하기 때문에, 생산품의 품질 및 생산성 저하 요인의 조기 진단은 생산효율 측면에서는 필수적이라 할 수 있다. 현재 목재를 생산하고 있는 낙엽송의 경우에서도 빈번히 내부 열화목이 발견되고 있으며, 이 열화는 수목의 외형 및 활성 등으로는 확인되지 않으나, 최종 수확 시 수율 저하 및 생산품 품질에 큰 영향을 미친다. 결국 이러한 열화목은 무육기간 중 수행되는 간벌시기에 탐지, 제거되어야하며, 이를 통해 목재 생산 효율성을 크게 증가시킬 수 있을 것이라 사료된다.

우리나라의 산림면적은 제한되어 있으므로, 입목 품질 및 목재생산수율 향상에 대한 기술요구는 목재수요의 증가와 함께 그 중요성이 더욱 강조되고 있다. 본 연구에서 개발될 기술은 입목 내부의 상태를 보다 정확히 파악함으로써 양질의 목재생산을 위해 사용될 수 있으며, 내부 열화목의 조기 진단을 통해 산림의 건강 증진뿐만 아니라 최종 수확하게 되는 목재 자원의 품질과 생산성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

(2) 국내 목재시장의 수급문제점에 대한 해결책 제시

현재 국산목재 자급률은 11.6%에 불과하여 국내 목재 수요의 대부분을 수입목재에 의존하고 있는 실정이다. 2008년 국제 금융위기로 인하여 목재 수요가 감소하였으나, 2009년에는 국제 환경단체들의 벌목 제한 압력, 해상운임 상승, 목재 자원 보유국의 수출규제 등으로 인하여 수입원목가격이 m³당 8월 90\$에서 9월 98\$, 10월 105\$, 11월 이후 110\$으로 지속적으로 상승하고 있다(진, 2009). 따라서 수익성 감소로 인하여 목재유통업계가 큰 어려움을 겪을 것으로 예상된다. 이와 같은 가격상승 양상을 보이고 있는 상황에서 수입원목만을 의존하기 힘들기 때문에 입목 진단 기술을 통해 입목 품질 및 목재생산 수율 향상을 이뤄 국산재의 신뢰도와 활용도를 높여야 할 것이다.

다. 사회, 문화적 측면

(1) 국산 목재 자원의 인식 개선

국산 목재에 대한 많은 연구와 홍보를 통해 국산 목재 자원에 대한 일반인의 인식이 많이 개선되었지만 일반적으로 저급재라 인식한다. 보다 선진화된 산림자원 관리 시스템의 구축을 통해 목재품질의 향상을 실현하고 이를 통해 국산 목재에 대한 인식의 개선이 필요하다. 목재 생산과정에 적용할 수 있는 기술 개발과 장기간의 육림을 통해 수확되는 목재 자원으로 고품질화를 실현하여 국산 목재에 대한 인식이 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 노거수 검진을 통한 효과적인 보호

보호수나 기념수와 같이 크고 오랜 세월을 버티어 온 나무는 학술적, 관상적, 역사적 가치가

높아 보존될 필요가 있다. 이러한 노거수는 우리 문화 형상과 발달에 필요한 사회적, 문화적, 심미적, 정신적 가치를 제공하는 중요한 자연 문화재이다(임정빈, 1992). 하지만 천연기념물 노거수 실태조사 연구보고서(문화재청, 2002)에 따르면 보호수로 지정받아 관리되고 있음에도 불구하고 절반가량의 수목에서 병해충이 발견되고 있으며, 더군다나 내부의 열화상태 조사가 이루어지고 있지 않기 때문에 실질적인 노거수의 피해는 더욱 클 것으로 추정된다. 현재 노거수의 보호와 보존을 위해 일부 토양 경도계 등 측정 장비를 이용하고 있을 뿐 주로 육안검사로 진단하는 주관적인 판단에 의존하고 있는 실정이다. 하지만 내부 부후의 경우, 육안검사에서는 발견되지 않으므로 부후가 표면까지 확대되어 피해가 커지고 난 후에야 진단되는 문제점이 있다. 특히 나무 내부에 존재하는 열화는 시간이 지남에 따라 확대되고 나무의 지지력에 큰 손실을 주며 태풍, 강풍 등에 의해 붕괴될 가능성이 크다. 나무 내부를 검사할 수 있는 기술 개발은 이러한 노거수를 보다 효과적으로 보호하고 보존할 수 있는 기회를 제공할 것이며, 우리 문화의 정신적 가치를 제공하고 있는 노거수의 효과적인 보호와 이를 통한 우리 문화의 보다 확고한 기틀을 마련할 것으로 기대한다.

3. 연구개발의 내용 및 범위

X선 CT를 이용한 입목 내부 평가 기술을 개발하기 위한 연구 내용 및 범위는 다음과 같다.

- X선 조건 탐색
 - 상용 X선 선원 및 디지털 디텍터 정보
 - X선 감쇠계수 도출
- X선 CT 기술 조건 탐색
 - X선 방사 횟수에 따른 목재 내부 상태 조사
 - 기존 X선 CT 기술의 정확성 검증
- X선 CT 프로그램 개발
 - CT 이미지 재구성 알고리즘 개발
 - 천연 결함(용이, 할렐 등)과 내부 열화 구분을 위한 알고리즘 개발
- 현장 적용을 위한 X선 CT 장치 개발
 - 상용 X선 선원 및 디지털 디텍터 적용 여부

- 입목에 적용 가능한 장비 설계 및 개발

○ 입목 내부 상태 조사

- 개발된 X선 CT 장치 현장 적용

- 입목 내부 상태 시각화

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 1절 목재 비파괴 검사

비파괴 검사란 피시험체에 손상 없이 검사 대상의 재질이나 내부에 존재하고 있는 결함을 탐지하는 기술을 일컫는다. 이를 통하여 비파괴 검사는 대상의 설계나 제작 과정에서의 품질을 보증하거나, 제품의 사용 중에 발생할 수 있는 문제점을 조기에 탐지하고 보완할 수 있는 정보를 제공함으로써 신뢰도와 안정성 확보에 필요한 정보를 제공하는 역할을 한다. 비파괴 검사법은 질병의 진단, 원재자의 선별, 생산품의 품질검사, 사용 중 안정성 확인 등 다양한 목적으로 광범위한 분야에서 적용되어 있고 있으며, 검사방식은 사용되는 에너지원, 방사선, 와전류, 자기장, 특수액체, 초음파, 중성자, 음향 등에 따라 표 1과 같이 구분된다(염, 2001). 비파괴 검사법은 의료 분야나 공업 분야를 중심으로 크게 발전되어 왔으며, 상대적으로 피시험체의 부가가치가 낮고 재료 자체의 불균질성으로 인해 정확한 결과의 도출이 어려운 목재 분야에서는 비파괴 검사법은 아직 초보적인 단계에 머무르고 있는 실정이다.

표 2-1-1. 비파괴 검사의 종류

| 목 적 | 종 류 |
|----------|---|
| 표면 결함 검출 | 육안검사 (Visual Testing) |
| | 침투탐상검사 (Liquid Penetrant Testing) |
| | 자분탐상검사 (Magnetic Particle Testing) |
| | 와전류탐상검사 (Eddy Current Testing) |
| 내부 결함 검출 | 방사선투과검사 (Radiographic Testing) |
| | 초음파탐상검사 (Ultrasonic Testing) |
| 기타 검사 방법 | 누설검사 (Leak Testing) |
| | 음향방출시험 (Acoustic Emission Testing) |
| | 중성자선투과검사 (Neutron Radiographic Testing) |
| | 스트레인측정 (Strain Measurement) |
| | 경도시험 (Hardness Testing) |
| | 재료확인시험 (Positive Material Identification) |

Szymani와 McDonald(1981)는 광학적인 방법과, 초음파, 극초단파, X선, 중성자를 이용하여 제재목 내부의 결함을 탐지하고 각 방법 간의 장단점을 비교하였다. 그 결과 초음파가 제재목 내부의 결함을 탐지하는데 효과적이거나 결함을 정확하게 탐지하기 위해서는 여러 방법이 동시에 사용되어야 한다고 보고하였다. 이 등(2003)은 초음파를 이용한 비파괴 검사법을 목재에 적용할 때 발생하는 제한을 극복하고자 목재 내에서 초음파 전달 경로를 구명하고자 하였으며, 목재 내에서 결함으로 인하여 초음파가 직접적으로 전달될 수 없는 경우에는 결함을 피해 초음파가 전달됨을 보고하였다. Ross 등(1998)은 목재의 비파괴 검사 방법이 표면검사나 MSR(Machine Stress Rated), 초음파를 이용한 방법에서 음향방사(acoustic emission), X선을 이용하여 목재 내부의 결함을 탐지하는 방법으로 전환되고 있다고 보고하였다. Nguyen 등(2004)는 비파괴 검사법을 이용하여 목재 전신주가 지면에 맞닿음으로써 발생하는 열화의 양상과 그 정확도를 탐지한 결과를 보고하였는데, X선과 초음파를 사용한 CT가 가장 효과적이라는 결과를 제시하였다. Bucur(2003)은 여러 비파괴 검사법을 이용하여 목재 내부의 결함의 존재 여부뿐만 아니라, 이온화 방사선을 이용한 CT와 열, 극초단파, 초음파, NMR(Nuclear Magnetic Resonance), 중성자를 이용하여 목재 내부 열화 영상을 구성하였는데, 기존의 목재 비파괴 검사법에 비해 상당히 정확한 결과를 도출하였다.

제 2절 입목 내부 평가 기술

입목 등급 구분 또는 내부 평가를 위한 기술은 산림 자원의 유용성을 높이기 위하여 중요한 과정이다. 과거에는 노숙림에서 목재를 구했기 때문에 입목 내부 평가 기술이 그리 중요치 않게 여겨졌으나, 현재는 지속가능한 숲 경영과 목재의 원활한 공급을 위하여 전 세계적으로 입목 내부 평가 기술의 중요성이 증가하고 있다(Pellerin과 Ross, 2002). 전통적으로, 입목은 육안 검사(직경, 수고, 식별 가능한 결점)와 임분 특성(수령, 수종, 임분 특성, 조림 목적)에 따라 입목의 품질이 평가되어 별채되었다. 그러나 입목 내부에서 발생하는 열화는 전통적인 방법으로는 탐지할 수 없기 때문에 문제가 발생할 수 있다.

입목 내부에서 발생하는 열화를 탐지할 수 있는 효과적인 비파괴 방법은 건강한 임분, 별채 목 선정, 재적 손실 감소, 열화 확산 방지에 도움을 줄 수 있다(Pellerin과 Ross, 2002). 그러한 방법 중에 하나로, Boyce(1938)와 McCracken(1985)는 입목에 망치 등으로 발생시킨 응력파를 이용하여 입목 내 열화를 탐지할 수 있음을 보고하였다. 한편, X선과 중성자 방사선 사진, CT, MR(Magnetic Resonance)를 입목에 적용시키기 위한 연구는 입목 내부 특성을 시각화하기 위

하여 진행되었다(Hailey와 Morris, 1987; Funt와 Bryant, 1987; Oja 등, 2000; Wei 등, 2011). 그 중 응력파를 이용한 CT 이미지 재구성 기술(그림 2-2-1)은 현장에 적용하기 쉽고 입목 내부 특성을 시각화할 수 있다는 장점 때문에 널리 사용되고 있다. 그러나 일정 크기 이상의 심재부후만 탐지할 수 있으며, 연륜 수나 용이의 위치 등을 구분하지 못하는 문제점이 있다.

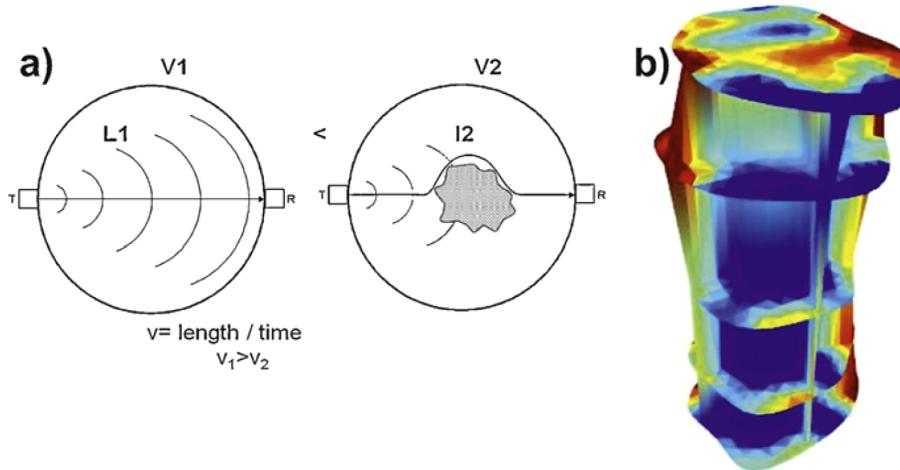


그림 2-2-1. a) 건진재와 부후재 내에서의 응력과 전달 모식도, b) 수간의 응력과 CT 이미지 (Niemz와 Mannes, 2012)

현재 우리나라에서 가장 많이 사용하고 있는 입목의 비파괴 검사법은 Shigometer법으로, 입목의 활력도를 측정하여 입목 내부 부후 여부를 예측하는 방법이다. 입목에 2.5mm의 구멍을 뚫어 수피 근처에 존재하는 입목의 형성층에서 전기저항을 측정하여 입목 내부 부후를 예측하나, 활력도와 입목 내부 부후는 상관관계가 없다는 연구 결과(Clark 등, 1992)가 발표되는 등 그 정확도가 높지 않다. 또한 생장추를 이용하여 입목 내부 부후를 검사하는 방법도 널리 사용되고 있으나 두 방법 모두 입목에 상처를 남기므로, 입목에 부담을 주는 동시에 비파괴 검사 후 생긴 구멍으로 미생물 등이 침투하여 부후를 일으킬 수 있는 원인을 제공할 수도 있다.

제 3절 CT 기술

Hounsfield와 Cormack이 CT 개발을 시작한 이래로, 1973년과 1983년 사이 전 세계에 CT 장비를 설치한 병원의 수가 급격하게 증가하였다. 이후 방사선 사진을 획득하는 스캐너의 개발과 더불어 CT 기술은 총 4세대에 걸쳐 꾸준히 발전하고 있다. 현재에는 고속 CT 스캐너 및 나선형 CT 스캐너를 이용하여 환자의 체적을 스캐닝 할 수 있는 정도까지 개발되었으며, 최소

0.4mm 이하의 등방성 분해능을 획득할 수 있을 정도로 개발이 진행되었다. CT 기술의 진화에서 한 가지 놀랄만한 사건은 증상이 심각하거나 외상이 심해 고정 CT 스캐너가 있는 곳으로 이동이 불가능한 환자들의 영상을 찍을 수 있는 이동용 CT 스캐너의 개발이었다. 필립스 메니컬 시스템에서는 이러한 스캐너를 도입하여 특히 수술실, 집중치료실, 응급실에서 사용할 수 있도록 하였다. 이동 CT 스캐너는 소형이며 바퀴가 달려 있어 방사선사들이 병원 내에서 멀리 떨어진 장소까지 장비를 이동할 수 있는 특징이 있다(Seeram, 2013).

CT는 목재 분야에서도 유용하게 사용되고 있는데, Funt와 Bryen(1987)은 제재소에서 사용할 CT 기술을 연구하였으며, Habermehl과 Ridder(1997)은 입목의 영상을 촬영하여 목질부의 썩은 부분을 알아내거나, 속이 빈 곳이나 웅이, 그리고 기타 결함이 있는 곳의 위치를 찾아내는 연구를 진행하였다. 여기서 휴대용 CT 스캐너는 세슘 137 감마 방사선원과 요오트화나트륨 검출기를 이용하여 구성하였다. 뿐만 아니라 고인류학에서도 완벽하게 보존된 이집트 미이라 내부의 해부학적 구조를 시각화 하였으며(Yasuda 등, 1992), 고조류학과 원유탐사, 식용 가축의 품종개발, 기타 동물 연구에 CT 기술을 사용한 예가 있다.

제 4절 종합

목재 분야의 비파괴 검사법은 타 분야에 비하여 초보적인 단계에 머무르고 있으나, 목재 내 존재하고 있는 열화의 유무를 탐지하는 데에서 머무르지 않고 다양한 종류의 비파괴 검사법을 이용하여 열화 영상을 구성하는 방향으로 진행되고 있다. 반면 우리나라는 생장추나 Shigometer 법과 같이 입목에 부담을 주는 방법을 사용하고 있으며, 더욱이 그러한 방법은 열화 영상을 구성하지 못하고 국부적으로 조사가 진행되기 때문에 문제점이 발생할 수 있다.

의료 분야에서는 이미 이동 가능한 CT 장비를 개발하였으나, 이는 병원 내에서만 가능하며 장비의 정밀성과 복잡성 때문에 입목이 위치하고 있는 임지에서는 적용하기 어렵다. 목재 분야에서도 이미 휴대용 CT 스캐너를 사용하여 목질부의 썩은 부분을 알아내거나, 결함의 위치를 찾은 연구가 진행되었으나, 사용된 선원의 세기가 강한 γ 선을 사용하기 때문에 사용자의 안전이 보장되지 않는 문제점이 있다.

이에 본 연구에서는 선원이 약한 X선을 사용하여 사용자의 안전을 보장하는 동시에, 우리나라 임지의 상황에 맞는 이동형 CT 장비를 개발하는데 그 목적이 있다. 그를 위하여 입목에 적용하기 위한 X선 및 CT 기술 조건을 탐색하였으며, 현장 적용을 위한 CT 장비 개발과 동시에 CT 프로그램 개발도 함께 진행하여 현장에서 바로 입목 내부를 평가할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 입목 내부 탐지를 위한 입목 특성 조사

입목 내부 평가 기술 개발에 앞서 입목의 물리적 특성 및 입목 내부 부후에 대한 문헌을 조사하였다. 문헌 조사 내용을 통하여 X선 강도 감쇠 측정을 위한 소시편 선정, 입목 내 함수율 등 변수를 설정하기 위한 근거를 마련하였다.

1. 입목의 물리적 특성

X선을 이용한 방사선 촬영 결과로 얻어지는 방사선 사진은 피시험체의 밀도에 따라 그 결과가 달라진다. 밀도가 낮은 부분은 밀도가 높은 부분보다 X선을 적게 흡수하기 때문에 방사선 사진에 나타나는 결과는 검정색, gray scale(계조)이 0에 가까운 값, 에 가까워진다. 이러한 결과를 분석하여 피시험체의 밀도를 예측할 수 있다. 그렇기 때문에 입목에 X선을 이용하여 내부 밀도를 정량적으로 평가하기 위해서는 X선 감쇠에 영향을 미치는 피시험체(입목)의 밀도에 대한 조사가 필요하다.

입목의 밀도 또는 비중에 영향을 미치는 인자는 크게 세포벽실질, 무기염류 함량, 함수율 세 가지로 요약할 수 있다. Liu 등(1988)은 목재를 구성하고 있는 원소 중 X선 감쇠에 영향을 미치는 원소를 C(탄소)와 O(산소)라고 보고하였다. 또한 무기염류의 함량은 전체 목질부에 비하여 0.1~0.5%만 차지하고 있어 목재 전체의 X선 감쇠에 영향을 거의 미치지 않는다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 입목의 밀도 또는 비중에 영향을 미치는 인자는 밀도와 함수율로 가정하였다. 이에 입목 내에서의 비중의 변이와 함수율에 대한 특성을 조사하였다.

가. 횡단면 내 입목 비중의 변이

입목의 횡단면 내에서 목재 비중은 여러 유형으로 나타난다. Panshin과 Zeeuw(1980)에 따르면 침엽수와 활엽수의 횡단면 내에서 나타날 수 있는 목재 비중의 변이는 4가지 유형으로 나눌 수 있다.

1) 수에서 수피로 향해 증가하는 유형

- 일부 침엽수를 제외한 대부분의 침엽수재는 목재의 비중이 수에서 수피로 향해 증가하는 유형에 속한다.
- 미송의 수령이 450년을 넘으면 유령목의 비중보다 감소할 수 있다(그림 3-1-1).

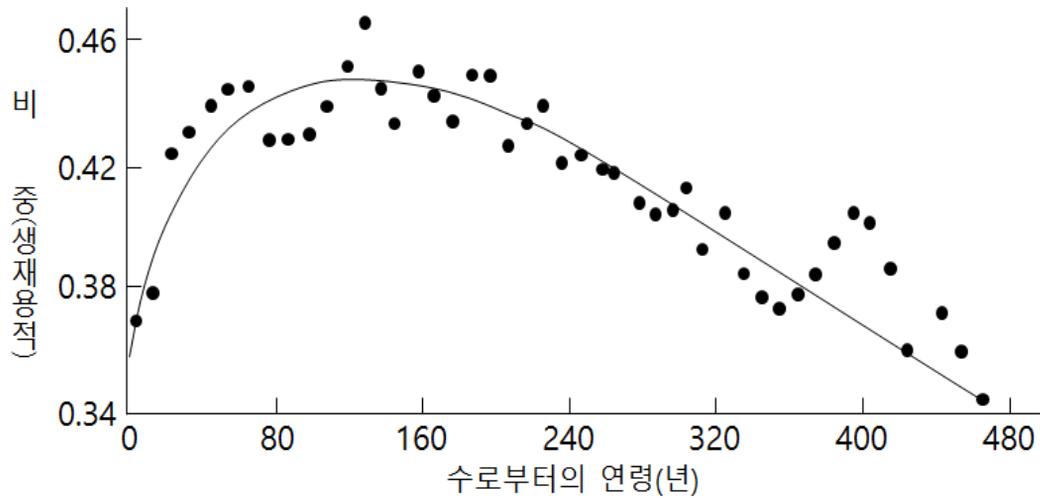


그림 3-1-1. 미송 500년생의 원구에서 방사방향으로의 비중 변이(Kendedy와 Warren, 1969)

2) 수에서 밀도가 가장 크고 처음 몇 해 동안 감소한 후, 다시 외부로 향해 계속 증가하는 유형

- 소나무류에서 수심보다 수 연륜에서 감소하다 10~15연륜에서 급증한 뒤 안정된다.

3) 수 부근 연륜에서 증가한 후 일정하게 유지되다 수피 쪽에서 감소하는 유형

4) 수에서 수피에서 계속 감소하는 유형

활엽수는 수에서 수피로 향해 일정하게 증가하거나, 감소하는 경향을 나타낸다고 보고되어 있다(정, 1991).

나. 생재함수율의 변이

입목의 생재함수율은 수종, 수령, 개체별로 다르며 동일 개체 내에서도 심재와 변재, 수고, 수간과 가지 등 생장부위에 따라 다를 뿐만 아니라 지리적 입지와 계절에 따라서도 변이를 나타낸다.

(1) 수종

생재함수율은 수종에 따라 많은 차이를 보이며, 일반적으로 비중이 큰 수종일수록 생재함수율은 낮은 경향을 나타낸다. 우리나라 소나무속의 주요 수종과 주요 활엽수종의 생재함수율 평균치와 표준편차는 표 3-1-1과 같다.

표 3-1-1. 주요 국내 수종의 평균 생재함수율(정, 1991)

| 침엽수재 | | | 활엽수재 | | |
|--------|----------|-------|-------|----------|------|
| 수종 | 생재함수율(%) | 표준편차 | 수종 | 생재함수율(%) | 표준편차 |
| 소나무 | 115.4 | ±16.5 | 층층나무 | 113 | ±13 |
| 잣나무 | 105.7 | ±10.3 | 느릅나무 | 87 | ±16 |
| 리기다소나무 | 111.4 | ±17.1 | 다릅나무 | 72 | ±15 |
| | | | 사시나무 | 66 | ± 9 |
| | | | 신갈나무 | 64 | ± 7 |
| | | | 들메나무 | 55 | ±12 |
| | | | 고로쇠나무 | 50 | ±13 |
| | | | 박달나무 | 48 | ± 7 |

(2) 수령

수령이 많아지면 심재율이 증가하고 아울러 비중도 커지기 때문에 대체로 생재함수율은 감소하는데, 이러한 현상은 침엽수에서 현저하다. 동일 수목일지라도 유령목의 생재함수율은 노령목보다 높고, 특히 심재가 아직 형성되지 않은 미숙재의 생재함수율은 성숙재보다 훨씬 높다.

(3) 생장부위

심재와 변재 간에 생재함수율의 차이가 나타나며, 그 정도는 수종에 따라 다르다. 미송의 심재는 37%에 불과하며 변재 함수율 115%의 1/3정도이다. 일반적으로 침엽수재의 생재함수율은 변재가 심재보다 높은 반면에, 활엽수재는 일정한 경향이 없으며(표 3-1-2 참조), 춘재의 생재함수율은 추재보다 높은 것이 일반적이다.

표 3-1-2. 변재와 심재의 함수율(정, 1991) (단위: %)

| 수종 | 침엽수재 | | 활엽수재 | | |
|------|-------|------|------|------|-------|
| | 변재 | 심재 | 수종 | 변재 | 심재 |
| 삼나무 | 159.2 | 55.0 | 황철나무 | 79.0 | 205.0 |
| 편백 | 153.3 | 33.5 | 졸참나무 | 74.6 | 67.2 |
| 소나무 | 145.0 | 37.4 | 물참나무 | 78.9 | 71.5 |
| 전나무 | 162.6 | 89.4 | 피나무 | 91.9 | 108.3 |
| 분비나무 | 211.9 | 76.1 | 들메나무 | 53.0 | 71.6 |

수고에 따른 생재함수율의 변이에 대하여, 일반적으로 침엽수는 수간의 상부로 갈수록 현저한 증가를 보이거나 활엽수의 경우는 다양한 양상을 보인다. 변재와 심재 간에 생재함수율 차이가 뚜렷한 수종일수록 수간 상부에 변재율이 높고 생재 함수율도 높아진다. 우리나라 소나무·잣나무 및 리기다소나무의 생재함수율은 수고부위가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 수간 전체의 평균 생재함수율과 유사한 수준의 생재함수율을 나타내는 수고부위는 소나무와 잣나무의 경우 지상고 3.2m이고, 리기다소나무는 지상고 5.2m이었다(정 1991).

(4) 계절

변재에서 이동하는 수분의 양은 계절에 따라 달라지며, 계절에 따른 수종별 생재함수율의 변이도 각각 다르게 나타난다. 수목은 생장기간 중인 봄과 여름의 수분함유량이 높을 것으로 생각되지만, 그림 3-1-2에 제시되어 있는 바와 같이 실제로 수목의 생재함수율과 벌채 계절 간에 일정한 경향은 없다.

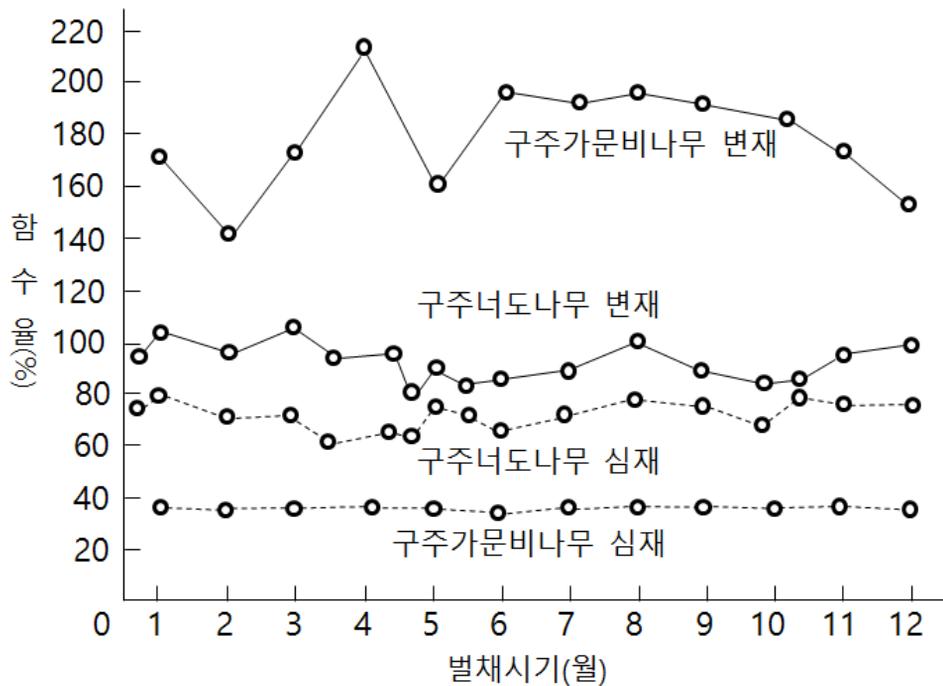


그림 3-1-2. 계절별 생재 함수율(Trendelenburg, 1940)

입목의 물리적 특성(비중, 함수율)은 수중에 따라 크게 다를 뿐만 아니라, 수간 내 횡단면에서도 차이를 보였다. 이를 통하여 입목 내부 평가기술을 검증 할 때는 이러한 점을 유의하여 진행할 필요가 있다고 판단된다. 또한 추후 검증된 결과와 CT 결과를 데이터베이스화하여 입목 내부 평가 기술의 신뢰성을 향상 시켜, 실제 검증 절차 없이 입목 내부 평가를 할 수 있도록 추가적인 연구가 진행될 필요가 있다고 판단된다.

2. 입목 내부 부후

입목 내부 부후의 원인은 크게 나무의 수령과 목재부후균의 침입으로 나눌 수 있다. 나무의 수령에 관한 예로 문화재청(2002)에 따르면 보호수로 지정받아 관리되고 있음에도 불구하고 수령이 많아지고 줄기가 몇 아름이 되도록 커진 노거수의 경우 내부 부후가 발생하였다. 이는 나무의 수령이 많아짐에 따라 줄기에서 늙은 물관들이 모여 있는 심재부분의 활력이 매우 떨어졌기 때문이다. 또 다른 원인인 목재부후균의 침입은 목재부후균의 침입 경로에 대하여 학설이 다소 갈린다. 지금까지 발표된 학설 가운데 가장 널리 받아들여지고 있는 학설을 소개하자면 다음과 같다(가오유량, 2009).

첫째, 목질세포를 분해하는 담자균류가 침입하여 부후가 일어난다는 것으로 담자균류의 포자가 줄기에 있는 상처, 죽거나 또는 부러진 가지, 불탄 자리 등을 통하여 침입한 이후에 균사가 심재까지 자라감으로 발생된다는 주장

둘째, 목재부후균이 아주 작은 가지를 감염하여 나무에 침입한 후 잠복상태로 지내다가 나무가 스트레스를 받거나 상처를 받으면 그 조직을 감염하여 부후를 일으킨다는 주장

셋째, 정상적인 활동이 이루어지고 있는 변재에는 수분이 과다하게 존재하고 산소는 부족하여 부후균의 활동을 억제하기 때문에 썩음이 시작하거나 번지지 못하다가 심재와 같은 상태가 된 변재에서 부후가 시작된다는 주장

넷째, 나무가 상처를 받으면 그 부분으로 선구적 미생물들이 침입하여 조직을 변화시키고, 그 변화된 조직으로 목재부후균이 감염된다는 주장

위와 같은 원인으로 발생한 입목 부후는 우리나라 경우에는 낙엽송, 잣나무, 참나무에서 대게 발생한다. 그림 3-1-3과 같이, 낙엽송과 잣나무는 대계 수령에 따라 발생하는데, 신(2010)은 낙엽송이 V, VI령급에서 높게 발생한다고 보고하였다. 낙엽송의 심재부후는 지상에서 약 1~3m이었으며, 수를 중심으로 평균적으로 3~5개의 연륜이 포함되었다. 또한 입목 내부 부후가 발생한 입목의 평균 밀도를 살펴보았을 때, 건전재의 밀도는 $0.53\sim 0.68\text{g/cm}^3$ 이었으며, 부후재의 밀도는 $0.41\sim 0.47\text{g/cm}^3$ 이었다(김, 1996).



(a)



(b)

그림 3-1-3. 입목 내부 부후 발생

(a) 낙엽송 입목 내부 부후(신, 2010), (b) 잣나무 입목 내부 부후(박, 2007)

조 등(2008)은 신갈나무 굴참나무 등과 같은 활엽수에서는 평균 부후율이 38%로 내외로 높은 편이라고 보고하였다. 참나무는 미생물(주로 담자균류)에 의해 수목의 줄기나 뿌리, 가지의 심재부가 감염된다(그림 3-1-4).



그림 3-1-4. 수목의 가지를 통해 부후된 참나무

제 2절 X선 조건 탐색

입목의 물리적 특성과 입목 내부 부후에 대한 문헌 조사를 통하여, 입목 내부 평가 기술에서는 목재의 밀도를 정량적으로 평가하는 것이 중요하다고 판단했다. 앞서 언급한 바와 같이, X선선은 피시험체의 밀도에 따라 감쇠가 달라져 입목 내부 평가에 유리하다고 할 수 있다. 일반적으로 피시험체의 내부 밀도를 측정하기 위해서는 CT 분야에서는 Hounsfield Unit이라고 일컬어지는 CT 번호를 이용하여 X선 밀도를 측정하는 방법을 사용하거나 Beer의 법칙을 이용하여 하나의 X선 방사선 사진을 정량적인 밀도 값으로 변환하여 구성하는 방법을 사용하고 있다.

본 연구에서는 피시험체에 따라 선원의 세기가 달라지고, Hounsfield Unit 설정을 위한 기준 물질(Motion phantom)을 실험 때마다 측정할 수 없기 때문에, Beer의 법칙을 이용하여 목재의 내부 밀도를 평가하고자 하였다. 그를 위하여 상용화된 X선 선원 및 디지털 디텍터를 선정하였으며, 그를 따라 X선이 감쇠하는 경향을 살펴보았다.

1. X선 선원 및 디지털 디텍터

가. X선 선원

과거 방사선 사진을 획득하는 방법은 X선 필름을 사용하는 것이었다. X선 필름을 사용하여 의미 있는 방사선 사진을 획득하기 위해서는 강한 X선과 긴 노출 시간이 요구되었으나, 영상 기술의 발달로 인하여 현재에는 CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) silicon active pixel sensor나 CCD(Charge Coupled Device)를 사용하는 저전력 고해상도 디텍터의 개발로, 약한 X선 선량과 짧은 시간동안 X선을 노출시켜도 의미 있는 결과를 얻을 수 있게 되었다. 따라서 상용화된 X선 선원을 이용하여도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료되었다.

선정된 X선 선원은 CP 120(ICM, Belgium)으로, 그림 3-2-1와 표 3-2-1에 그에 대한 모습과 사양이 제시되어 있다.



그림 3-2-1. X선 선원(CP 120) 모습

표 3-2-1. X선 선원(CP 120) 사양 (www.icmxray.com/ndt)

| 항 목 | 사 양 |
|---------------------------------------|-------------|
| Output voltage range(kV) | 40-120 |
| Tube current range(mA) | 0.1-1.5 |
| Maximum useful angle of X-ray beam(°) | 50×50 |
| Overall dimension(mm ³) | 470×155×227 |
| Total weight(kg) | 7 |
| Focal spot(mm ²) | 0.8×0.5 |

나. 디지털 디텍터

현장에서 입목에 대한 방사선 사진을 획득하여야 되기 때문에 과거와 같이 X선 필름을 이용하여 방사선 사진을 획득할 수 없다. X선 필름을 이용하면 방사선 사진을 획득하는데 긴 노출 시간이 필요할 뿐만 아니라, 필름을 인화하고 인화된 방사선 사진을 디지털 파일로 변경하여야 되기 때문이다. 이에 본 연구에서는 이동 가능한 디지털 장비, NX 06(RF system, Japan), 를 선정하였다(그림 3-2-2).



그림 3-2-2. 디지털 디텍터(NX 06) 모습

NX 06을 통해 얻어진 방사선 사진의 최대 해상도는 $2540 \times 2060 \text{pixel}^2$ 이었다. 또한 선정된 디지털 디텍터는 방사선 사진을 얻기 위해서 CCD를 사용하고 있기 때문에 낮은 선원에서 무리 없이 작동이 가능하며, 필름과 같이 인화 과정을 생략하고 디지털 파일로 저장할 수 있다. 그림 3-2-3에 디지털 디텍터 NX 06을 이용하여 X선이 방사선 사진으로 표현되는 과정이 나타나 있다. 또한 밀도를 구분할 수 있는 gray scale 값이 깊고, 넓은 파장 영역에 반응하기 때문에 본 연구에서 사용하는 CP 120 선원에서 발생하는 백색 X선에 사용하기 적합하다.



그림 3-2-3. 디지털 디텍터(NX 06)에서 X선이 방사선 사진으로 표현되는 과정

2. X선 선원 및 디지털 디텍터 물성

가. 선원의 유효 조사 각도

X선의 유효 각도(Maximum useful angle of X-ray beam)는 피시험체의 양질의 방사선 사진을 얻는데 유용한 정보임으로 실제 사용하고 있는 선원의 유효 각도를 검증할 필요가 있다. 선

원의 유효 각도는 피시험체의 중심과 선원의 거리를 산정할 수 있기 때문에 추후 CT 장비 설계에 중요한 인자가 되기 때문이다. X선 선원 CP120 제조사인 ICM 사(社)에서 사양을 살펴보았을 때, X선 유효 각도는 $50 \times 50^\circ$ 이었다.

(1) 재료 및 방법

X선 선원 CP 120(ICM, Belgium)이 X선을 조사하기 위해서 사용되었다. 디지털 디텍터 NX 06(RF system, Japan)은 방사선 사진을 얻고자 사용되었다. X선 선원으로부터 380mm 떨어진 곳에 디지털 디텍터를 설치한 후 3초 동안 X선을 조사하여 방사선 사진을 획득하였다. 획득된 방사선 사진 내 유효 픽셀은 Matlab R2014a(Mathworks, USA)을 이용하여 gray scale 값으로 변환되어 분석되었다.

식 1과 같이 디지털 디텍터의 전체 길이, 디지털 디텍터의 전체 픽셀 수, 유효 픽셀의 수를 이용하여 유효 길이를 도출하였으며, 식 2를 이용하여 유효 방사선 각도를 계산하였다. 얻어진 유효 방사선 각도를 이용하여 디지털 디텍터의 절반을 X선으로 조사할 수 있는 X선 선원과 디지털 디텍터 사이 거리를 계산하였다.

$$l : a = x : b \quad (1)$$

$$\theta = \frac{360 \times \arctan(x/2d)}{\pi} \quad (2)$$

여기서,

l 은 디지털 디텍터의 전체 길이(mm),

a 는 방사선 사진 내 전체 픽셀 수,

b 는 방사선 사진 내 유효 픽셀 수,

x 는 유효 길이(mm),

θ 는 X선 유효 각도의 절반($^\circ$)

(2) 결과 및 토의

그림 3-2-4에 획득된 방사선 사진과 분석된 유효 픽셀 그래프가 제시되어 있다. 방사선 사진 내 전체 픽셀 수(a)는 2540이다. 실제 방사선 사진에서 gray scale 범위는 $0 \sim 2^{11}$ 에 있으나, 방사선 사진 내 gray scale을 0(검정)~255(흰색) 범위로 축소시켜 분석에 사용하였으며, gray scale 값이 255가 되는 양 끝점 사이의 거리를 계산하여보았을 때, 방사선 사진 내 유효 픽셀 수(b)는 964이었다.

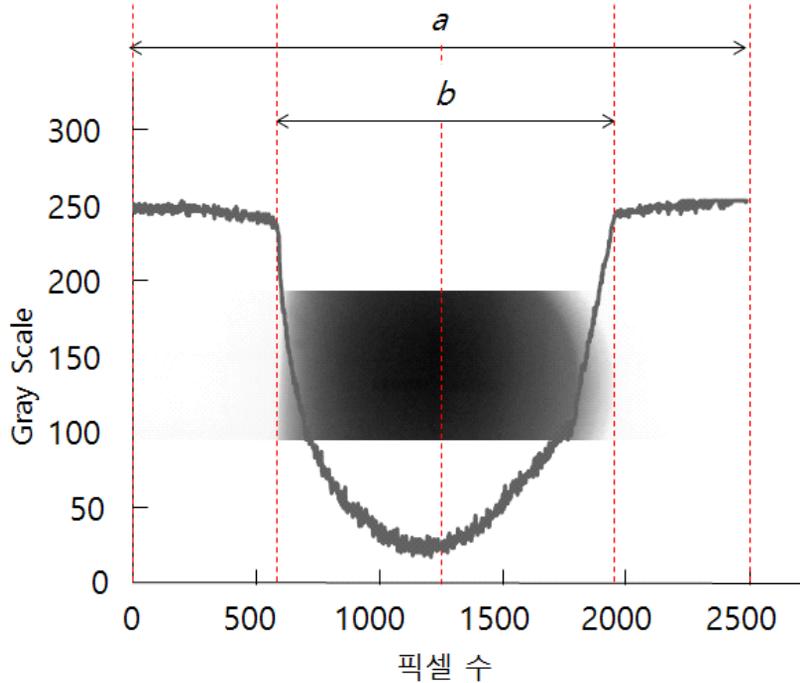


그림 3-2-4. 방사선 사진과 유효 픽셀 수

계산된 방사선 사진 내 유효 픽셀 수를 이용하여 X선 유효 각도의 절반을 계산하였을 때, 14.51°로 도출되었다. 따라서 실제 X선 유효 각도는 29.03°로 계산되었다. 이는 제조사에서 제공한 X선 유효 각도 50°에 비해서 작았다. CP 120에서 X선은 부채꼴 모양으로 조사되므로 유효 각도가 잘못 설정되면 자칫 디지털 디텍터 전체에 X선이 조사되지 못하는 결과를 얻을 수 있다. 현재 제조사에서 제공한 X선 유효 각도와 계산된 X선 유효 각도 차이 원인에 대해서는 추가적인 고찰이 필요하나 계산된 X선 유효 각도가 더 보수적으로 평가되었으므로 CP 120의 X선 유효 각도는 29.03°로 설정하여 추후 장비 개발에 사용되었다. 따라서 현장에서 X선 CT 기술을 적용할 때에는 X선 선원은 적어도 입목과 490mm는 떨어진 곳에서 X선이 조사되어야 디지털 디텍터에 X선이 고르게 조사된다는 것을 확인할 수 있었다.

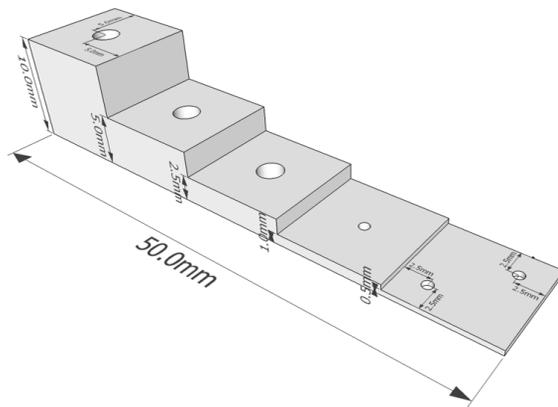
나. 거리에 따른 X선 강도

입목 내부 평가를 위해 현장에서 X선 선원과 디지털 디텍터를 이용하여 X선 CT 기술을 적용할 때 피시험체인 입목의 직경과 주위 환경에 따라 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리가 달라질 수 있다. 일반적으로 X선은 특정 위치에서 거리의 제곱에 반비례하여 강도가 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 거리에 따른 선원의 강도 감소 경향에 대한 고찰이 필요하다고 판

단된다.

(1) 재료 및 방법

X선을 조사하기 위한 선원은 CP 120(ICM, Belgium)을 사용하였으며, 방사선 사진을 얻기 위해서 디지털 디텍터 NX 06(RF system, Japan)을 사용하였다. 균일한 X선 사진을 얻는 동시에 X선의 조사 에너지 측정을 위하여 디지털 디텍터 상단에 알루미늄으로 만든 상질계를 제작하여 설치하였다. 상질계는 한국산업규격 KS B ISO 19232-2 비파괴 검사 - 방사선 투과 시험 사진의 상질-제2부: 상질계(계단형/유공형)-상질값의 결정을 참고하여 제작하였으며, 치수 및 모습이 그림 3-2-5a에 제시되어 있다. 상질계가 위치한 방사선 사진의 gray scale 값을 이용하여 상대적인 X선 강도를 측정하였다.



(a)



(b)

그림 3-2-5. X선 상대적 강도 측정을 위한 디지털 디텍터 NX 06 내 상질계 설치

(a) 상질계 치수 및 모습, (b) 디지털 디텍터 내에 상질계가 설치된 모습

거리에 따른 상대적 X선 강도 감쇠의 변화를 알아보기 위하여, X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리를 410, 420, 430, ..., 480, 490, 500으로 바꿔가며 방사선 사진을 얻었다. X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리는 그림 3-2-6에 나와 있는 것과 같이 자체 제작한 실험실적 스케일의 CT 장비를 이용하여 변경하였다.



그림 3-2-6. X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리 변경을 위한 실험실적 스케일의 CT 장비

X선 조사를 위한 선원의 관전압과 관전류는 각각 42kV, 1.5mA이었으며, 조사된 X선에 1초간 디지털 디텍터를 노출시켜 방사선 사진을 획득하였다. 획득된 여러 장의 방사선 사진 내에서 같은 위치의 상질계 gray scale 값을 Matlab R2014a(Mathworks, USA)을 이용하여 분석하였다. 데이터 손실을 줄이기 위하여 원본 DICOM 파일을 이용하였다.

(2) 결과 및 토의

그림 3-2-7에 상대적 X선 강도(gray scale)와 X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리 제곱 간의 상관관계가 제시되어 있다. 일반적으로 알려진 바와 같이 거리 제곱에 반비례함을 알 수 있었다. 결정 계수(R^2)은 0.93이었다.

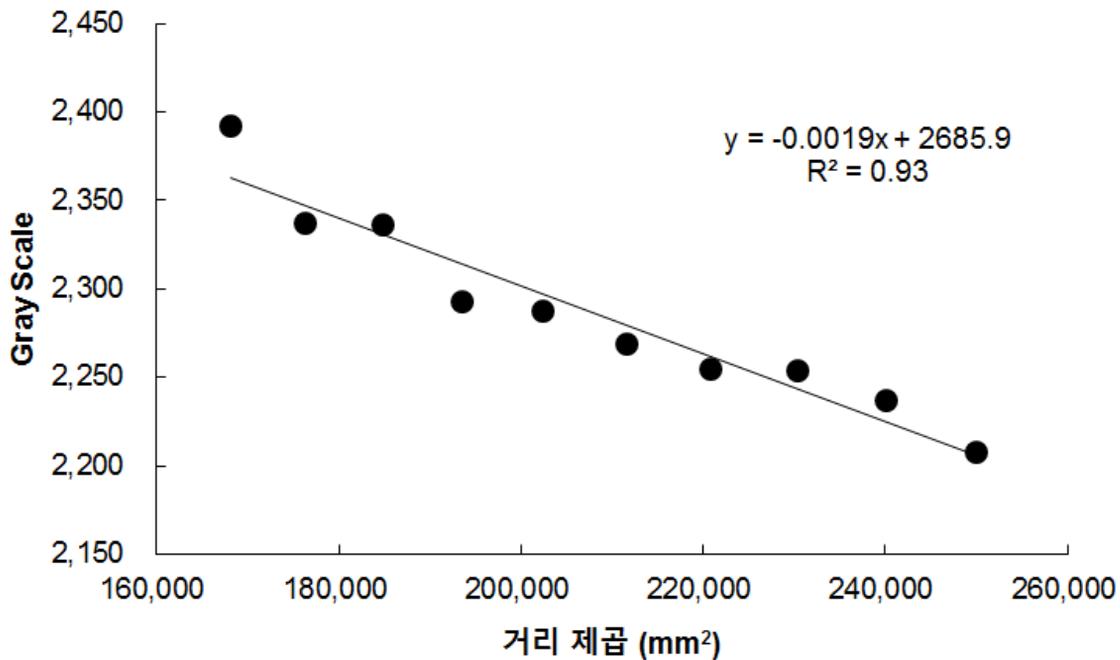


그림 3-2-7. Gray scale(상대적 X선 강도)과 X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리 제곱과의 관계

본 연구의 최종 목적은 입목 내부 상태 조사를 위한 기술 개발로, X선 CT 기술을 이용하여 입목 내부를 밀도 CT 이미지로 재구성하는 것이다. 따라서 거리에 따른 X선 강도의 감쇠는 반드시 고려되어야 할 사항이다. 앞서 언급한 바와 같이, 현장에서 입목의 직경이나 장비의 설치 조건에 따라 X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리가 달라질 수 있다. 또한 X선 선원에서 조사되는 X선의 형태는 한 점에서 넓게 퍼져나가는 cone beam 형태이며, 디지털 디텍터는 평면이기 때문에 디지털 디텍터의 평면 내에서도 X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리가 바뀌게 된다. 본 연구 결과로 얻어진 선형관계식은 추후 X선 CT 이미지 구성 알고리즘에 고려되었다.

3. X선 감쇠계수 영향인자

Beer의 법칙을 이용하여 방사선 사진을 밀도 값으로 변환하고자 목재에 대한 질량감쇠계수를 구하고자 하였다. 수종, 목재 방향, 함수율에 따른 목재의 질량감쇠계수를 측정하고자 하였으며, 목재 두께에 따른 목재의 질량감쇠계수 또한 측정하였다. 일반적으로 목재의 밀도 측정

에 사용되는 단일(monochromatic) X선의 경우, 목재의 두께에 대한 X선 감쇠 메커니즘이 크게 다르지 않으나, 본 연구에서 사용되고 있는 선원에서 조사되는 X선은 연속(continuous spectrum) X선이기 때문에 X선 피시험체의 밀도뿐만 아니라 투과되는 거리에 따라 X선 감쇠의 변화가 생길 수 있다고 판단했기 때문이다.

그림 3-2-8에 제시되어 있는 것과 같이, 연속 X선은 X선 강도에 따라 연속 X선 내의 파장 분포가 달라진다. X선 강도가 작을수록 상대적으로 파장이 긴 영역이 차지하는 비율이 높다. 장파장의 X선은 쉽게 흡수되는 한편 X선 투과 거리가 두꺼워질수록 산란선이 많이 발생되어 입목 검사 시 두께의 영향이 클 것으로 사료되어 그에 대한 연구가 필요하다고 판단했다. 이에 수종, 목재의 방향, 함수율에 따른 목재의 질량감쇠계수 산출과 더불어 X선 강도 및 거리에 따른 질량감쇠계수 산출을 통하여 입목 내부를 시각화하고 밀도 CT를 구성하기 위해서 연구를 진행하였다.

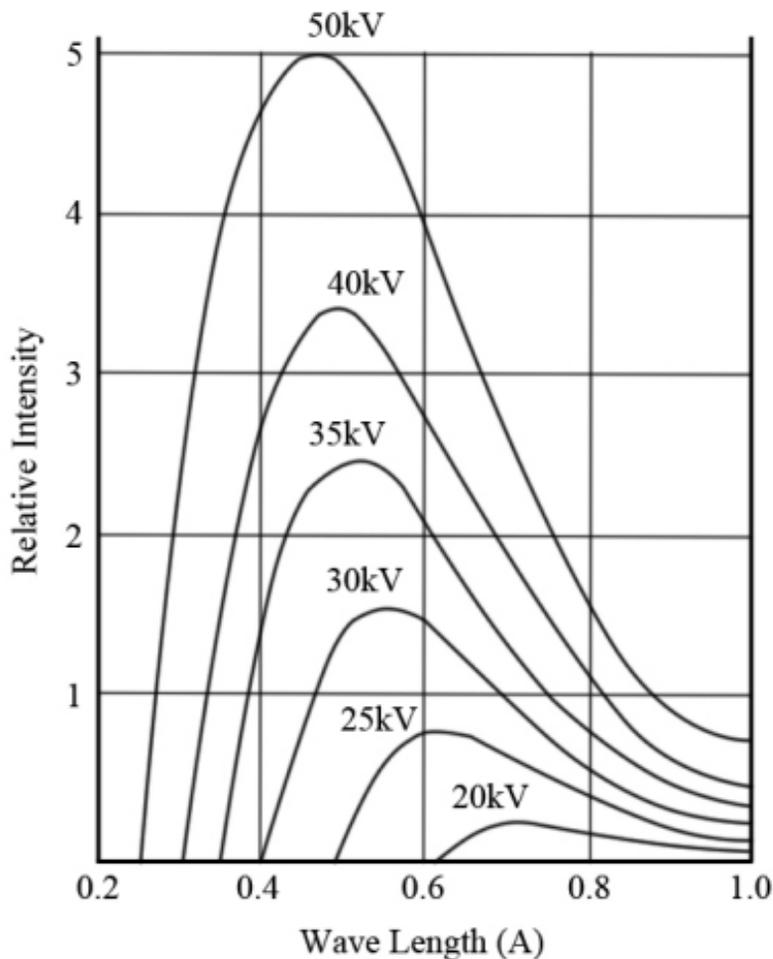


그림 3-2-8. 관전압에 따른 연속 X선 내의 파장 분포(김 외, 2004)

가. 수종

(1) 재료 및 방법

수종에 따른 목재의 질량감쇠계수를 측정하고자 우리나라 대표적인 경제조림 수종인 낙엽송, 잣나무, 백합나무를 준비하였다. 천연재료인 목재의 경우, 수종에 따라 고유 밀도가 다르고 같은 수종 내에서도 횡단면 내 위치에 따라 밀도가 달라질 수 있기 때문에 그에 따른 질량감쇠계수의 검토가 필요하다고 판단했다.

낙엽송, 잣나무, 백합나무 각 수종에 따른 시편의 개수는 20개이었다. 일부 시편에는 수를 포함하도록 제작하여 같은 수종 내에서도 밀도 분포를 가지도록 시편을 준비하였다. 제작된 시편의 단면 치수는 $20 \times 20 \text{mm}^2$ 이었으며, 시편의 길이방향 길이는 70mm이었다. 실험이 끝난 후 단면 치수와 길이가 $20 \times 20 \times 20 \text{mm}^3$ 인 시편을 제작하여 총 60개 시편의 기건 밀도를 측정하였다. 낙엽송, 잣나무, 백합나무 각 수종의 함수율은 12%이었다. 표 3-2-2에 목재의 수종별 질량감쇠계수 측정을 위한 시편 정보가 제시되어 있다.

표 3-2-2. 목재의 수종별 질량감쇠계수 측정을 위한 시편 정보

| 수종 | 치수(mm) | | | 개수 (개) | 함수율 (%) | 평균 기건 밀도 (g/cm^3) |
|------|--------|----|----|-----------|------------|---------------------------------|
| | 가로 | 세로 | 길이 | | | |
| 낙엽송 | | | | | | 0.55 |
| 잣나무 | 20 | 20 | 70 | 20 | 12% | 0.42 |
| 백합나무 | | | | | | 0.44 |

X선을 조사하기 위한 X선 선원은 CP 120(ICM, Belgium)이었으며, X선 선원의 관전압과 관전류는 각각 40kV, 1.5mA으로 X선을 조사하였다. 조사된 X선에 3초간 노출 시킨 후 방사선 사진을 획득하였다. 각 수종별 시편은 그림 3-2-9와 같이 디지털 디텍터 중심에 놓아두었으며, 디지털 디텍터와 시편 사이의 간격이 없도록 시편을 위치시켰다. X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리는 500mm이었으며, 그림 3-2-6에 제시되었던 실험실적 스케일의 CT 장비를 이용하여 선원과 시편, 디지털 디텍터를 설치하였다.

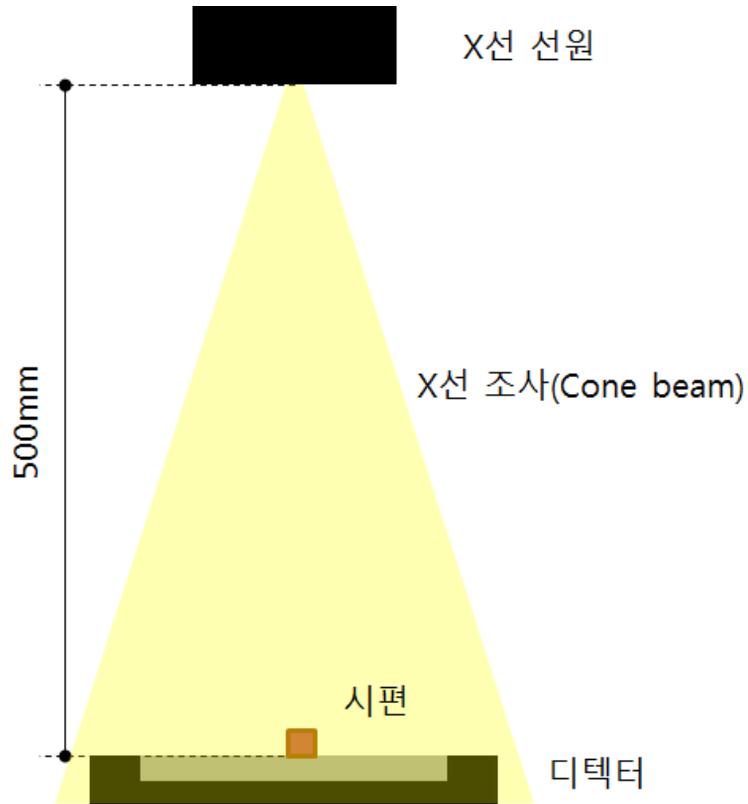


그림 3-2-9. 목재의 수종별 질량감쇠계수를 측정하기 위한 실험 모습

얻어진 목재의 수종별 질량감쇠계수 방사선 사진은 imagej 프로그램(Rasband, 2012)을 이용하여 분석되었으며, 시편 전체의 gray scale의 평균값을 선원의 세기로 환산하여 목재의 질량감쇠계수 도출에 사용하였다.

식 3, Beer의 법칙, 과 식 4 따라 시편을 통과한 X선 강도, 소시편의 두께 등을 이용하여 수종별 목재의 질량감쇠계수를 측정하였다.

$$I = I_0 e^{-\mu \rho t} \quad (3)$$

$$\mu \rho t = \ln(I_0/I) \quad (4)$$

여기서,

I 는 시편을 통과한 X선의 선량(mSv),

I_0 는 초기 X선의 선량(mSv),

μ 는 시편의 질량감쇠계수(cm^2/g)

ρ 는 시편의 밀도(g/cm^3),

t 는 시편의 두께 혹은 X선이 투과한 거리(cm)

(2) 결과 및 토의

그림 3-2-10에 목재의 수종별 질량감쇠계수 측정을 위한 소시편 방사선 사진의 결과가 제시되어 있다. 제시된 방사선 사진을 이용하여 gray scale의 평균값을 계산하였으며, X선 강도(선량)와 명도 사이의 상관관계를 이용하여 평균 gray scale 값을 선량으로 변환하여 식 4에 대입하여 목재의 수종별 질량감쇠계수를 도출하였다.

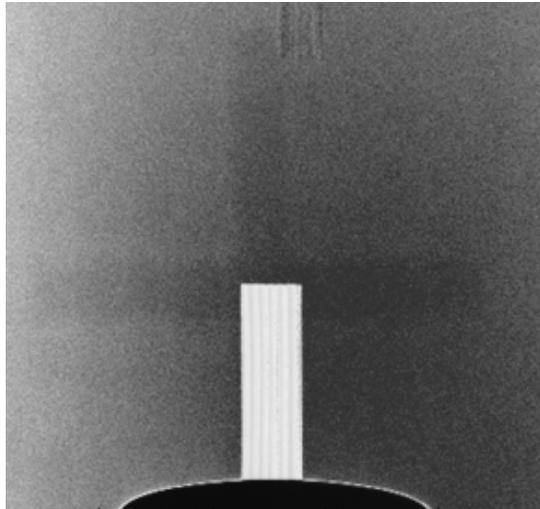


그림 3-2-10. 목재의 수종별 질량감쇠계수를 측정하기 위한 잣나무 소시편의 방사선 사진

낙엽송, 잣나무, 백합나무 수종별 시편의 기건 밀도와 질량감쇠계수의 상관관계가 그림 3-2-11에 제시되어 있다. 수종별 시편의 기건 밀도에 상관없이 약 0.04 정도의 질량감쇠계수를 나타내는 것으로 확인되었다. 이와 같이 수종별 시편의 기건 밀도에 상관없이 질량 감쇠 계수가 일정한 값을 가지는 것은 목재를 구성하고 있는 원소의 비율이 거의 일정하기 때문이다 (James 등, 1981). 목재를 구성하고 있는 원소는 크게 C(탄소), O(산소), N(질소), H(수소)인데, 절대량은 수종에 따라 다를 수 있으나 상대적 비율은 비슷하기 때문에 수종 혹은 밀도에 따른 질량 감쇠 계수가 일정한 것이다. James 등(1981)은 수종에 따라 목재의 원소 구성과 질량감쇠 계수의 관계를 고찰하였으며, 표 3-2-3과 표 3-2-4에 제시되어 있는 바와 같이 수종에 상관없이 목재의 질량감쇠계수는 일정한 것으로 확인되었다. 그러나 같은 밀도 내에서 본 실험의 결과에서는 같은 밀도의 시편에 대해서도 디지털 디텍터의 정확도 때문에 다소 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

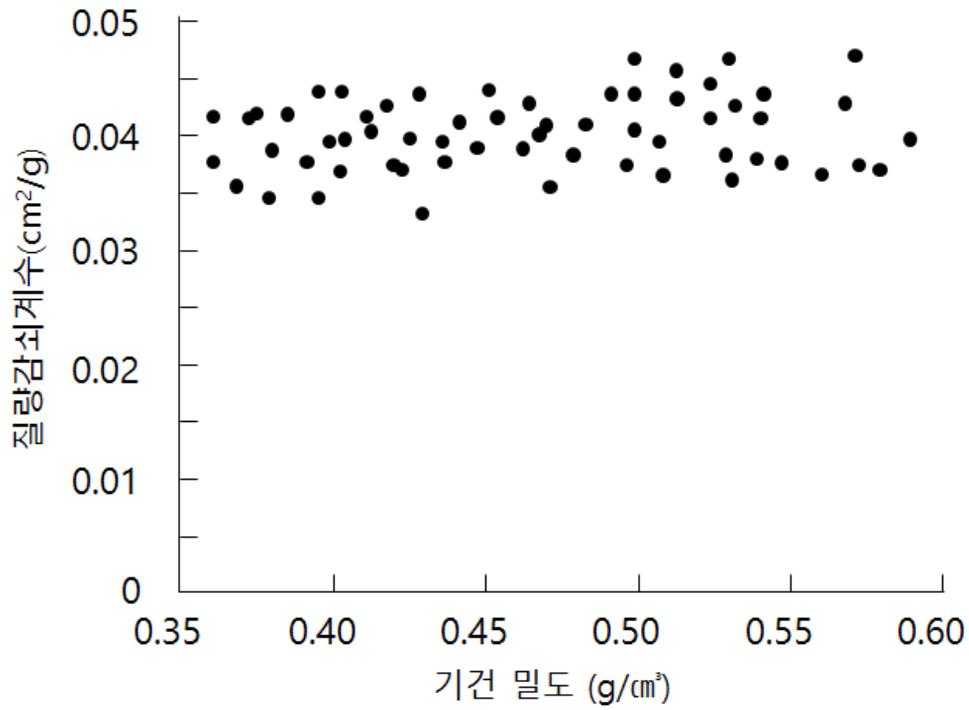


그림 3-2-11. 기건 밀도에 따른 질량감쇠계수

표 3-2-3. 수종에 따른 주요 원소 비율(단위: %)

| Species | Elemental analysis | | | | |
|-----------------|--------------------|-------|------|------|------|
| | C | O | N | H | Ash |
| Larch sapwood | 49.57 | 44.19 | 0.17 | 5.85 | 0.22 |
| Larch heartwood | 49.86 | 43.99 | 0.12 | 5.91 | 0.12 |
| Pine sapwood | 50.18 | 43.38 | 0.17 | 6.08 | 0.19 |
| Pine heartwood | 54.38 | 39.16 | - | 6.31 | 0.15 |

표 3-2-4. 수중에 따른 목재의 질량감쇠계수

| Photon energy (keV) | Mass attenuation coefficients | | | |
|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------|-----------------|
| | Pine sapwood | Pine heartwood | Larch sapwood | Larch heartwood |
| 20 | 0.598 | 0.581 | 0.601 | 0.600 |
| 30 | 0.310 | 0.305 | 0.311 | 0.311 |
| 40 | 0.237 | 0.235 | 0.237 | 0.237 |
| 50 | 0.206 | 0.205 | 0.206 | 0.206 |
| 60 | 0.193 | 0.192 | 0.192 | 0.192 |

나. X선 투과 방향

(1) 재료 및 방법

X선 CT 이미지를 재구성하기 위해서는 일정 각도에 따른 방사선 사진을 얻어야 한다. 일정 각도에 따라 방사선 사진을 얻을 때 X선 투과 방향은 목재의 방사방향 또는 접선 방향으로 나눌 수 있다. 목재의 수중에 따른 질량감쇠계수의 차이가 없어 X선 투과 방향별 목재의 질량감쇠계수도 차이가 없을 것으로 사료되었으나 본 실험을 통하여 확인해보았다.

목재의 수중에 따른 질량감쇠계수에 사용된 시편 중 그림 3-2-12와 같은 연륜 형태를 가진 시편을 선택하였다. 그 후 선택된 시편에 대하여 방사방향과 접선방향으로 X선을 조사하여 방향별 목재의 질량감쇠계수를 도출하였다.

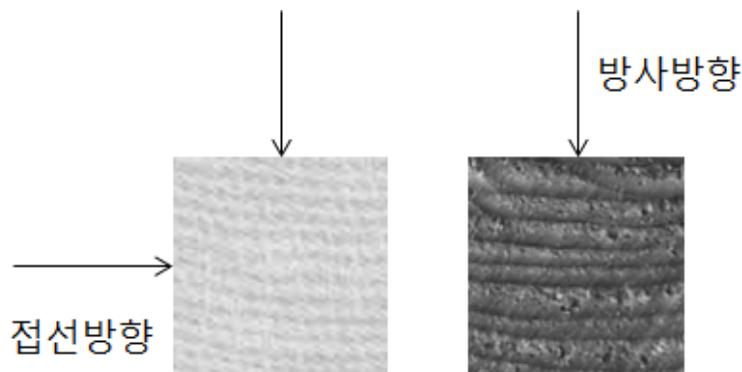


그림 3-2-12. 소시편 단면과 X선 투과 방향

방사선 사진을 얻기 위한 X선 조사 강도와 디지털 디텍터의 조건은 목재의 수종별 질량감쇠 계수와 동일하게 적용하였다.

(2) 결과 및 토의

표 3-2-5에 X선 투과 방향에 따른 목재의 질량감쇠계수가 제시되어 있다. 앞선 목재 수종에 따른 질량감쇠계수 결과와 같이 목재의 질량감쇠계수는 차이가 없었다. 이는 목재를 구성하고 있는 원소 비율에 따라 X선이 감쇠되기 때문이라고 사료된다.

표 3-2-5. X선 투과 방향에 따른 목재의 질량감쇠계수

| 수종 | 질량감쇠계수 (g/cm ³) | |
|------|-----------------------------|-------|
| | 방사방향 | 접선방향 |
| 낙엽송 | 0.042 | 0.041 |
| 잣나무 | 0.039 | 0.039 |
| 백합나무 | 0.040 | 0.041 |

다. X선 강도와 X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수

(1) 재료 및 방법

X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 변화를 알아보기 위하여 소시편을 준비하였다. 수종은 삼나무, 낙엽송, 리기다소나무, 잣나무를 준비하였으며 표 3-2-6에 X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 도출을 위한 소시편의 치수와 기건 밀도, 함수율이 제시되어있다. 삼나무의 경우 심재 및 변재 구분 없이 시편을 준비하였으며, 낙엽송의 경우 용이를 포함시켜 소시편 밀도 변이를 크게 하고자 하였다.

표 3-2-6. X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 도출을 위한 시험편 치수 및 밀도

| 수종 | 크기(mm) | | | 기건 밀도(g/cm ³) | | 함수율 (%) |
|--------|--------|-------|-------|---------------------------|------|---------|
| | 폭 | 깊이 | 높이 | 평균 | 표준편차 | |
| 삼나무 | 31.51 | 33.37 | 80.00 | 0.33 | 0.41 | 12 |
| 낙엽송 | 32.87 | 38.58 | | 0.46 | 0.75 | |
| 리기다소나무 | 31.50 | 33.58 | | 0.51 | 0.27 | |
| 잣나무 | 32.90 | 39.95 | | 0.41 | 0.37 | |

X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 산출에 사용된 X선 선원은 CP 120(ICM, Belgium), 디텍터로는 NX 06(RF system, Japan)을 사용하였다. 관전압을 세 단계, 25, 35, 37kV, 로 바뀌가며 X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수를 측정하였다. X선 선원의 관전류는 1.5mA로 일정하게 유지하여 방사선 사진을 획득하였다.

그림 3-2-13과 같이 표 3-2-6에 제시된 소시편을 겹쳐가며 X선 투과 거리를 변경시켰다. X선 선원과 디지털 디텍터의 사이의 거리는 650mm이었으며, X선에 5초간 노출시켜 하나의 방사선 사진을 획득하였다. 획득된 방사선 사진은 Matlab R2014a(Mathworks, USA)를 이용하여 gray scale을 X선 강도로 변환하였으며, 식 4, Beer의 법칙, 에 따라 시편을 통과한 X선의 강도, 소시편의 두께 등을 이용하여 질량감쇠계수를 도출하였다.

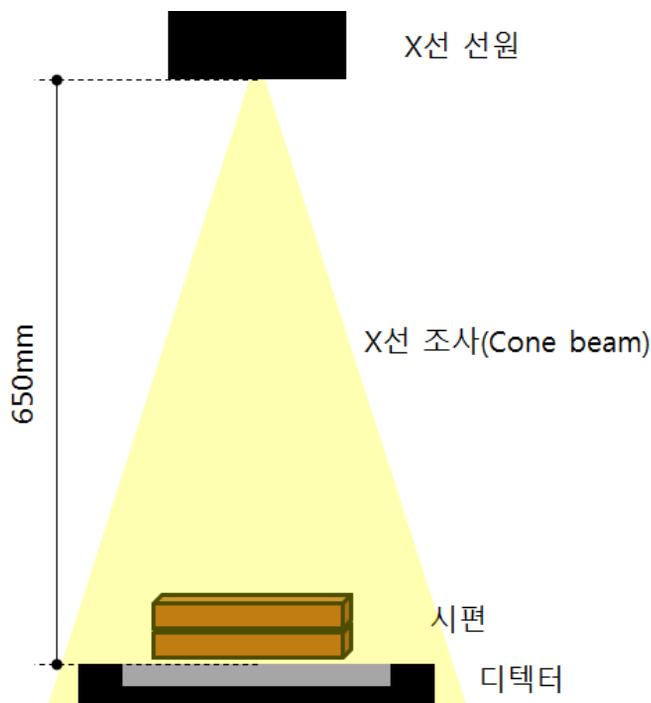


그림 3-2-13. X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 도출을 위한 실험 모습

(2) 결과 및 토의

그림 3-2-14는 소시편을 겹쳐가며 얻은 방사선 사진이다. 그림 3-2-14에서 보는 바와 같이 재현성을 확보하고자 상질계를 측면과 상단에 설치하여 디지털 방사선 사진을 얻었다. 얻어진 방사선 사진 내에서 목재의 gray scale 값을 선량계의 gray scale 값과 X선 상대강도 상관관계에 대입하여 목재 소시편을 통과한 X선 강도 값을 계산하였다.

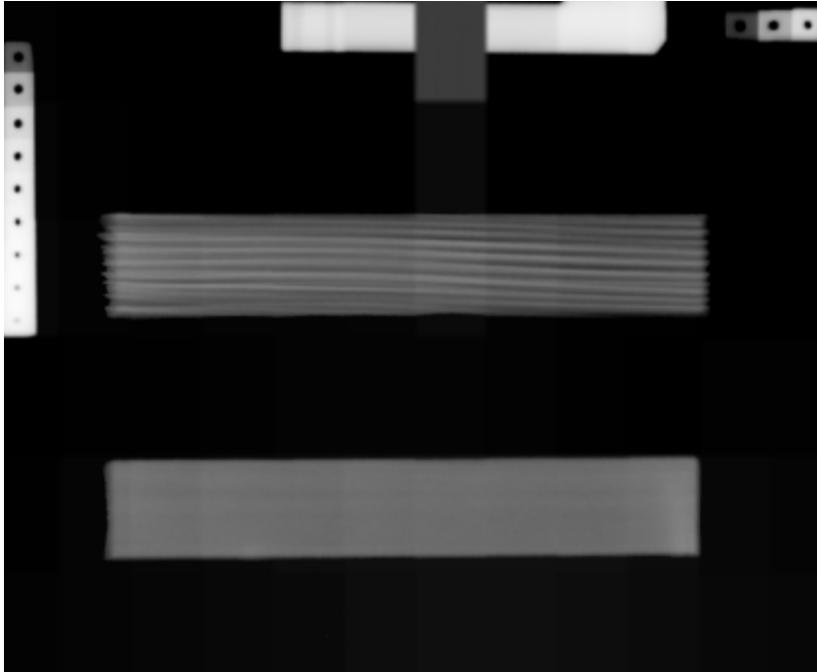
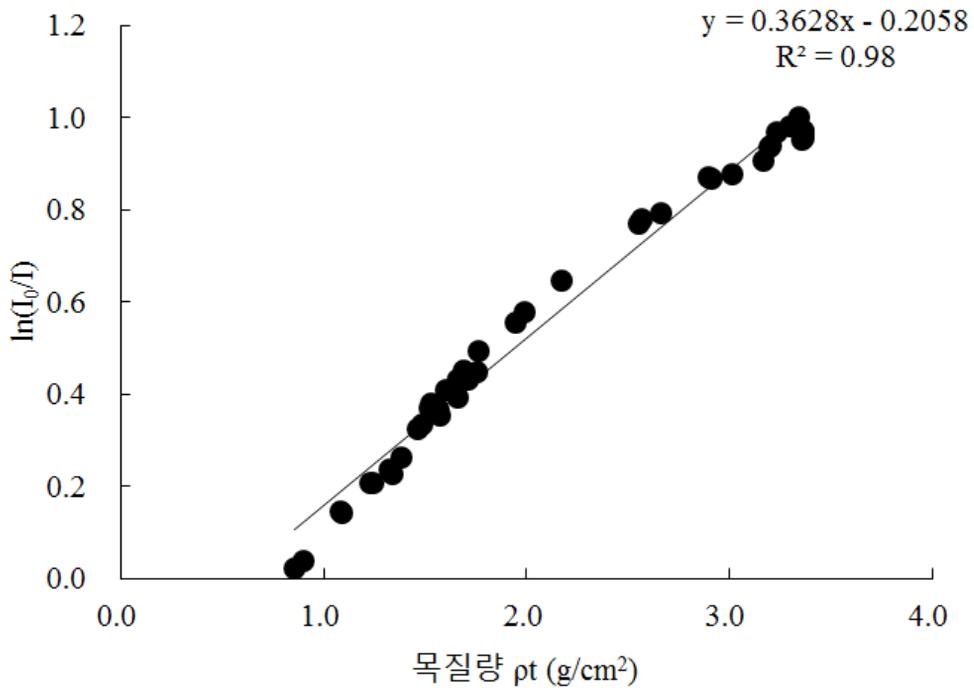


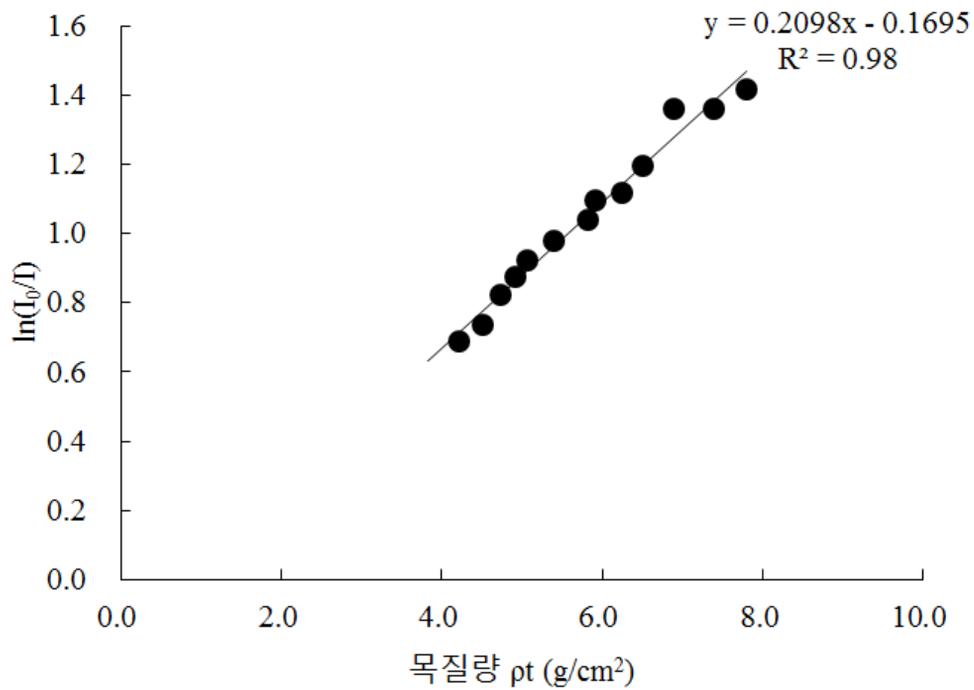
그림 3-2-14. X선 강도와 X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 도출을 위한 소시편 방사선 사진

(가) X선 강도에 따른 목재의 질량감쇠계수

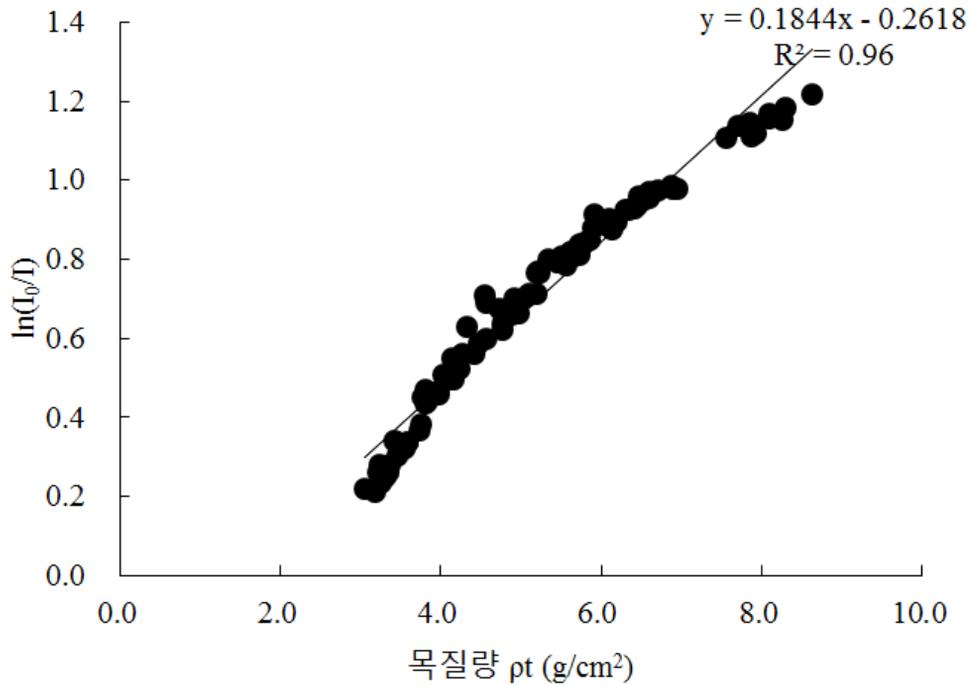
Beer의 법칙, 식 4, 을 이용하여 질량감쇠계수를 도출하였을 때, 관전압이 25, 35, 37kV일 때 질량감쇠계수는 각각 0.3628, 0.2098, 0.1844 이었다. 그림 3-2-15에 제시되어있는 것과 같이, 관전압의 크기가 커질수록 질량감쇠계수가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 상용화된 선원에서 발생하는 X선이 연속 파장을 가지는 연속 X선이기 때문에, 그림 3-2-8에 제시되어 있는 바와 같이 관전압의 크기가 작아질수록 연속 X선 내에서 장파장이 차지하는 비율이 커 쉽게 흡수가 일어나 X선이 관전압이 높은 경우에 비해 많이 감소되었기 때문이라고 판단된다. 이는 Hoag와 Krahmer(1991)가 발표한 결과와 동일하였다. Hoag와 Krahmer(1991)는 20keV에서 30keV로 최대 전자에너지를 증가시켰을 때 질량감쇠계수가 감소한다고 보고하였다.



(a)



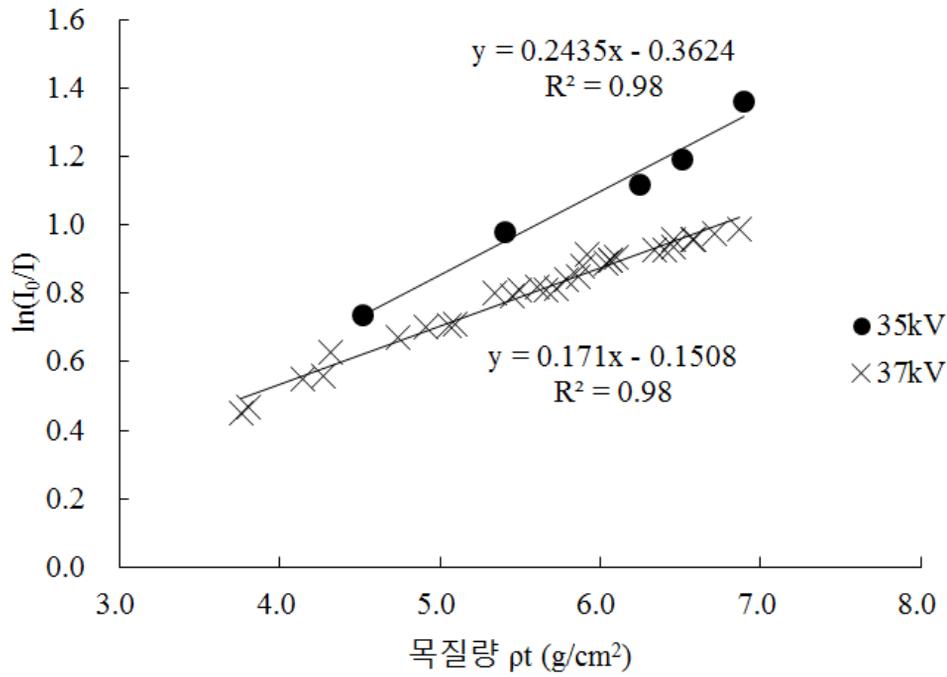
(b)



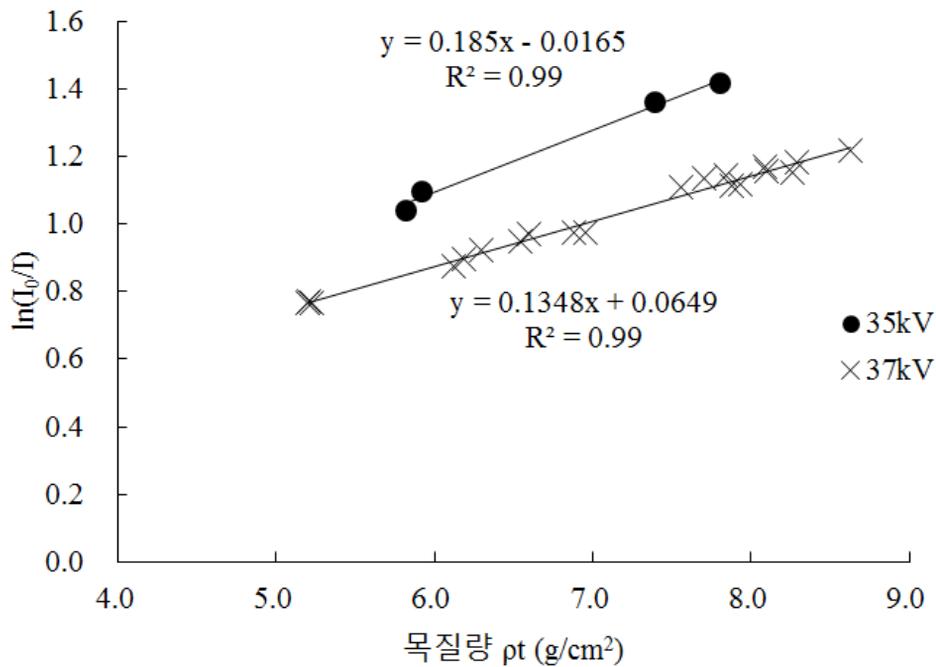
(c)

그림 3-2-15. X선 강도에 따른 목재의 질량감쇠계수
(a) 관전압 25kV, (b) 관전압 35kV, (c) 관전압 37kV

X선 강도에 따라 질량감쇠계수가 감소하는 경향은 그림 3-2-16에서 명확히 확인할 수 있다. X선 투과 거리가 비슷한 실험 결과에 대하여 X선 강도에 따른 질량감쇠계수를 살펴보았을 때, 관전압이 셀수록 질량감쇠계수가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 현장에서 X선 CT 기술을 적용할 때에는 X선 강도에 따른 목재의 질량감쇠계수의 변화 또한 고려해야 할 것으로 판단된다. 일반적으로 일정 강도 이상에서는 목재의 질량감쇠계수는 일정하다고 알려져 있으나 본 연구에서 사용되는 X선 강도는 그 범위에 속하지 않는 것으로 사료된다.



(a)



(b)

그림 3-2-16. 유사한 X선 투과 거리에서의 관전압에 따른 목재의 질량감쇠계수

(a) 투과거리: 12.52~13.09cm(35kV), 12.59~13.17cm(37kV)

(b) 투과거리: 15.68~16.38cm(35kV), 15.36~16.46cm(37kV)

(나) X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수

그림 3-2-15를 보면, 목질량이 증가함에 따라 초기 X선 강도와 시편을 통과한 후의 X선 강도의 대수비가 선형적으로 증가하지 않고, 직선의 기울기가 감소하면서 증가하는 모습을 보이고 있다. 소시편의 밀도 변이를 만들기 위하여 낙엽송 시편에 옹이를, 삼나무 시편에 심재를 포함하는 시편을 준비하였으나 밀도 변이가 0.32~0.51g/cm³에 불과하므로 목질량에 영향을 미치는 변수는 밀도보다는 X선 투과 거리라고 할 수 있다. 따라서 X선 투과 거리가 목질량이 따른 초기 X선 강도와 시편을 통과한 후의 X선 강도 대수비의 증가를 감소시키는 원인이라 판단되어, X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수를 도출하여보았다.

표 3-2-7에 나와 있는 것과 같이 동일한 X선 강도 내에서 X선 투과 거리가 증가함에 따라 질량감쇠계수가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 대한방사선물리학연구회(2005)에 따르면 넓은 선속이거나 흡수체의 두께가 두껍게 되면 흡수체내에서 산란선이 많이 발생하여 추가로 측정기에 도달하게 된다고 밝혔다. 따라서 동일한 X선 강도에서 목재의 두께가 바뀔 때 따라 X선 투과 거리가 길어져 투과 후 X선 강도와 더불어 산란된 X선이 함께 디지털 디텍터에 탐지되어 X선 투과 거리가 길어짐에 따라 목재의 질량감쇠계수가 감소한 것으로 사료된다.

표 3-2-7. X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수

| 관전압(kV) | 투과 거리(cm) | 질량감쇠계수(cm ² /g) | R ² |
|---------|-------------|----------------------------|----------------|
| 25 | 3.12~3.28 | 0.4991 | 0.99 |
| | 6.25~6.55 | 0.2919 | 0.98 |
| 35 | 9.40~9.82 | 0.2667 | 0.99 |
| | 12.52~13.09 | 0.2435 | 0.98 |
| | 15.68~16.38 | 0.1850 | 0.99 |
| 37 | 6.32~7.85 | 0.3049 | 0.99 |
| | 9.44~11.99 | 0.2226 | 0.96 |
| | 12.59~13.17 | 0.1710 | 0.98 |
| | 15.36~16.46 | 0.1348 | 0.99 |

앞선 X선 강도에 따른 목재의 질량감쇠계수와 X선 투과 거리에 따른 목재의 질량감쇠계수 변화에 대한 결과를 살펴보았을 때, 방사선 사진을 밀도 profile로 바꾸기 위해서는 X선 강도와 X선이 목재를 투과하는 길이에 따라 목재의 질량감쇠계수를 적용하여야 함을 알 수 있었다.

그림 3-2-17은 X선 투과 길이에 따른 목재의 질량감쇠계수 식을 보여주고 있다. 관전압 37kV, 관전류 1.5mA에 대하여 목재의 질량감쇠계수 식을 도출하였으며, 이러한 질량감쇠계수 식은 방사선 사진을 밀도 profile로 바꾸는데 사용하였다.

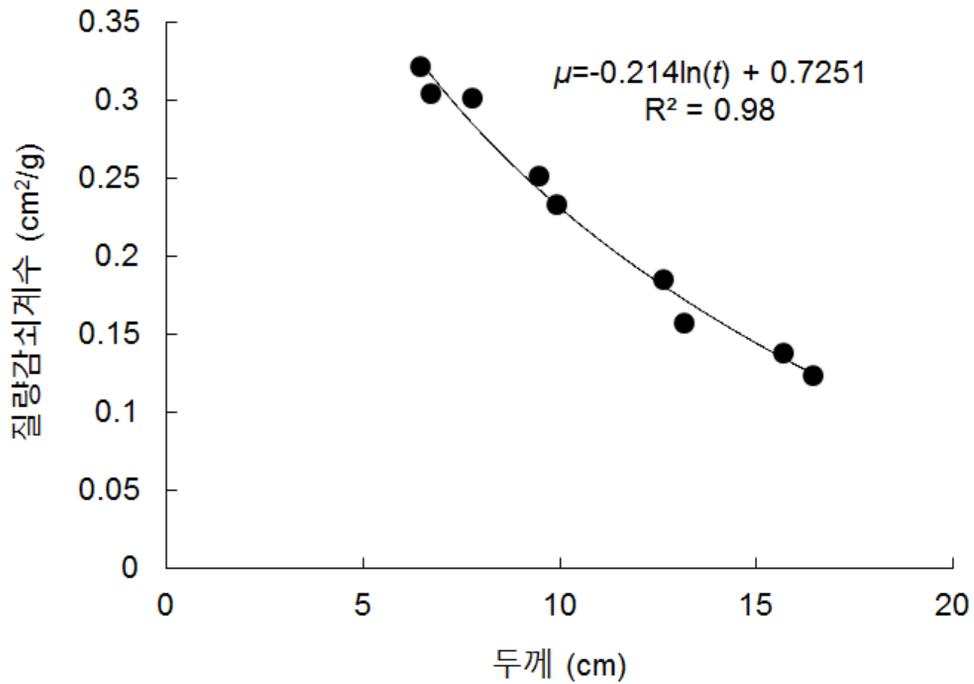


그림 3-2-17. X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수(관전압 37kV, 관전류 1.5mA)

제 3절 X선 CT 이미지 재구성을 위한 조건

앞선 연구를 통하여 방사선 사진을 얻기 위한 X선 선원과 디지털 디텍터 조건을 알아보았다. 또한 본 연구에서 사용되는 X선 선원, CP 120(ICM, Belgium), 에서 조사되는 X선의 특성상 일반적인 X선의 거동과 다른 특징을 고려하여 방사선 사진을 밀도 profile로 바꿀 수 있는 목재의 질량감쇠계수 도출도 마쳤다. 이와 같은 결과를 이용한다면 방사선 촬영으로 얻어진 하나의 방사선 사진은 목재의 내부 밀도를 시각화 할 수 있기 때문에 입목 내부 부후 탐지에 사용할 수 있다. 그러나 방사선 사진의 최대 단점은 그림 3-3-1과 같이 X선이 선원으로부터 디지털 디텍터로 지나가는 경로에 있는 모든 물체에 대하여 감쇠가 일어나 그 결과가 중첩된다는 점이다. 따라서 입목 내부에 부후의 유무는 알 수는 있으나 그 부후가 단면에서 어느 위치에 있는지 얼마나 큰 것인지는 방사선 사진을 통해서 확인할 수 없다(그림 3-3-2).

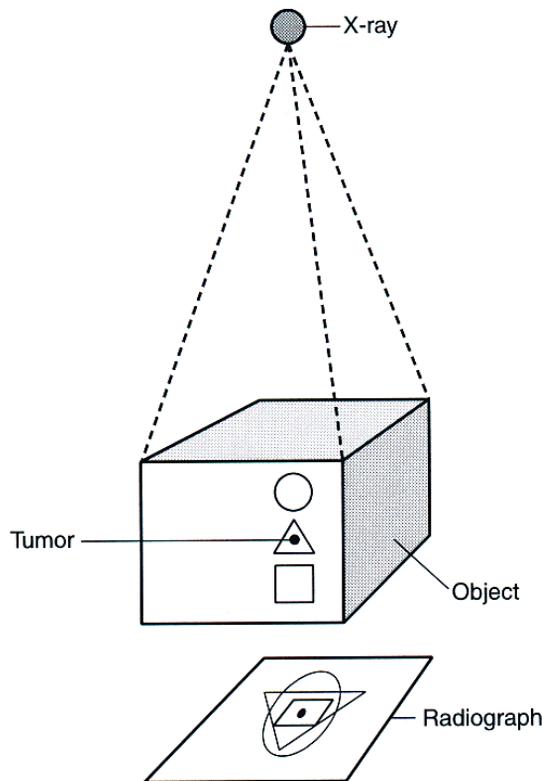


그림 3-3-1. 방사선 사진의 한계(Seeram, 1982)



그림 3-3-2. 부후가 발생한 입목에 대한 방사선 사진 결과. 방사선 사진의 오른쪽에서 상대적으로 밀도가 낮은 부분이 관찰된다.

방사선 사진의 단점을 극복하고자, 관심을 가지고 있는 부위의 위쪽과 아래쪽 구조를 다른 방향에서 촬영함으로써 제거하고자 하는 노력(단층 촬영술)들이 시도되었지만 그 결과는 좋지 못했다. 이에 1973년 Hounsfield에 의하여, 여러 방향에서 얻어진 방사선 사진을 이용하여 피대상체의 단면 영상(CT 이미지)를 구성하는 방법이 제안되었다. CT 기법을 통하여 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다고 보고하였다.

- 중첩의 최소화
- 영상 대조도 개선
- 조직 대조도의 미세한 차이 표현

CT 기술의 장점을 성취하고자 Hounsfield(1973)는 다음의 기본적인 방법론적 접근법을 제시하였다.

- X선은 환자(피시험체)의 특정한 가로 단면을 투과한다. 이 과정은 특정한 가로 단면이나 조직 절편의 위쪽과 아래쪽에 있는 구조의 중첩 문제를 해결해 준다.
- X선은 정확하게 콜리메이션(collimations)되어 영상화할 조직의 가로 단면만 투과하는 매우 폭이 좁은 빔을 사용한다. 이 과정은 산란방사선의 발생을 최소화하여 영상의 대조도를 개선하는 데에 목적이 있다.

- 환자(피시험체)를 투과한 X선은 X선 선원 맞은편에 있는 검출기에 도달한다. 검출기에 도달하는 신호는 디지털 자료로 변환된 후, 특수 연산을 사용하여 CT 이미지를 재구성하는 알고리즘에 사용된다.

위와 같은 기본적인 방법론적 접근법을 통하여 많은 연구자들에 의하여 CT 기술이 발전되어 왔다. 그 결과 CT 이미지를 재구성하는 알고리즘은 누구나 쉽게 이용할 수 있으며, 컴퓨터 산업의 발전으로 개인용 PC에서 재구성 알고리즘을 이용하여 CT 이미지를 도출할 수 있다. 그러나 일반적인 알고리즘들은 본 연구에서 사용되는 X선 선원과 디지털 디텍터의 특징, 예를 들어 CP 120에서 조사되는 X선의 유효 조사각은 29.03° 이며, 콜리메이션되어 있지 않음, 을 고려하지 않고 만들어졌기 때문에 CP 120과 NX 06을 이용하여 얻어진 방사선 사진을 일반적인 CT 재구성 알고리즘으로 구성 가능한지에 대한 검토가 필요하다.

본 절에서는 본 실험에서 사용된 X선 장비를 통하여 얻어진 방사선 사진 결과를 일반 CT 재구성 알고리즘으로 구성하였을 때 발생하는 문제점과 그에 대한 해결 방법에 대한 연구 결과가 제시되어 있다.

1. 일반 알고리즘을 이용한 CT 이미지 재구성

가. 적정 방사선 사진 횟수 산정

본 연구는 현장에서 입목 내부 평가를 위한 X선 CT 기술을 개발하는데 목적이 있으므로, 짧은 시간에 결과를 도출하는 것이 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 CT 이미지의 재구성은 여러 각도에서 얻어진 다수의 방사선 사진을 이용해야하므로, CT 촬영 시간은 방사선 촬영 수와 밀접한 연관을 갖는다. 부수적으로 CT 촬영 시간이 줄어든다면 기술 사용자가 방사선에 노출될 수 있는 시간 또는 위험성도 낮아져 사용자의 안전을 도모할 수 있다.

또한 현장에서 X선 장비를 이용하여 입목 내부를 평가하기 할 때에는 여러 가지 제약이 많이 발생할 수 있을 것으로 사료된다. 그리하여 본 절에서는 여러 가지 제약 중 가장 빈번하게 발생할 수 있을 것 같은 상황을 설정하여, 그 때 적정 촬영 횟수를 산정하는데 초점을 맞추었다.

(1) 재료 및 방법

CT 이미지를 구성하기 위한 적정 촬영 횟수를 산정하기 위하여 지름이 200mm인 리기다소 나무를 준비되었다. 준비된 리기다소나무 중앙부와 외곽부에 직경 21mm인 인공 열화를 만들어 촬영 횟수에 따른 열화 탐지가능성을 확인하고자 하였다. 본 실험에 사용된 리기다소나무의 모습과 열화의 위치 정보는 그림 3-3-3에 제시되어 있다.

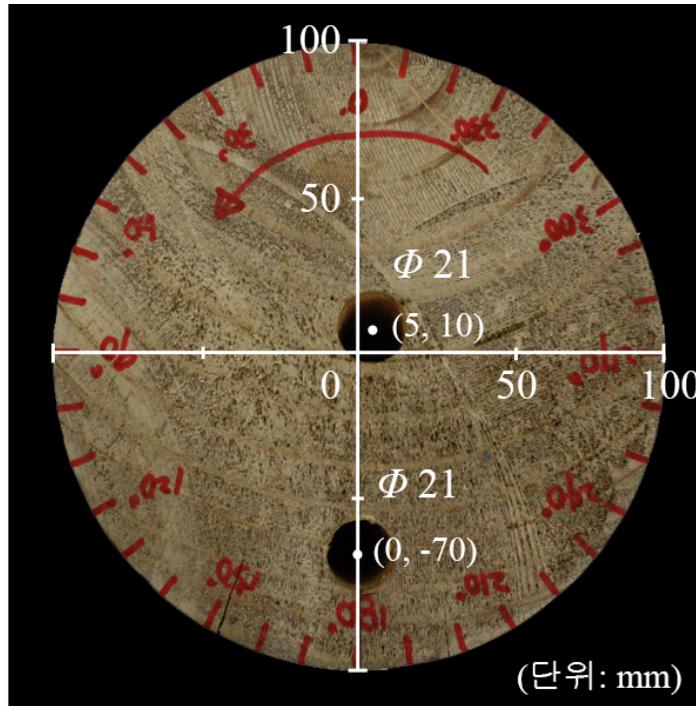


그림 3-3-3. 시편 모습 및 열화 위치 정보

방사선 사진을 획득하기 위하여 사용된 선원과 디지털 디텍터는 CP 120(ICM, Belgium)과 NX 06(RF system, Japan)이었다. X선 선원의 관전압과 관전압은 60kV, 1.5mA이었으며, 조사되는 X선에 디지털 디텍터를 1초간 노출시켜 방사선 사진을 획득하였다. 그림 3-2-6에 제시된 실험실적 스케일의 CT 장비를 이용하여 여러 각도에서 다수의 방사선 사진을 획득하였다. 획득한 방사선 사진 수는 9, 18, 36, 72개이었다.

앞서 언급했듯이, 본 실험에서는 현장에서 발생할 수 있는 제약 중 가장 빈번하게 발생할 수 있는 상황을 설정하여 실험을 진행하였다. 디지털 디텍터는 현상 인화가 필요 없어 즉시 영상을 확인할 수 있는 장점을 가지고 있으나 피시험체의 크기가 큰 경우 측정 영역을 벗어나 CT 이미지 구성 시 불완전한 X선 영상을 사용하게 되는 경우가 빈번히 발생한다. 그림 3-3-4와 같이 리기다소나무 시편을 위치시키면 디지털 디텍터의 측정범위를 벗어나는 경우를 재현할

수 있으며, 이러한 불완전 방사선 영상을 이용하여 내부 열화를 탐지할 수 있는지 여부를 확인하였다.

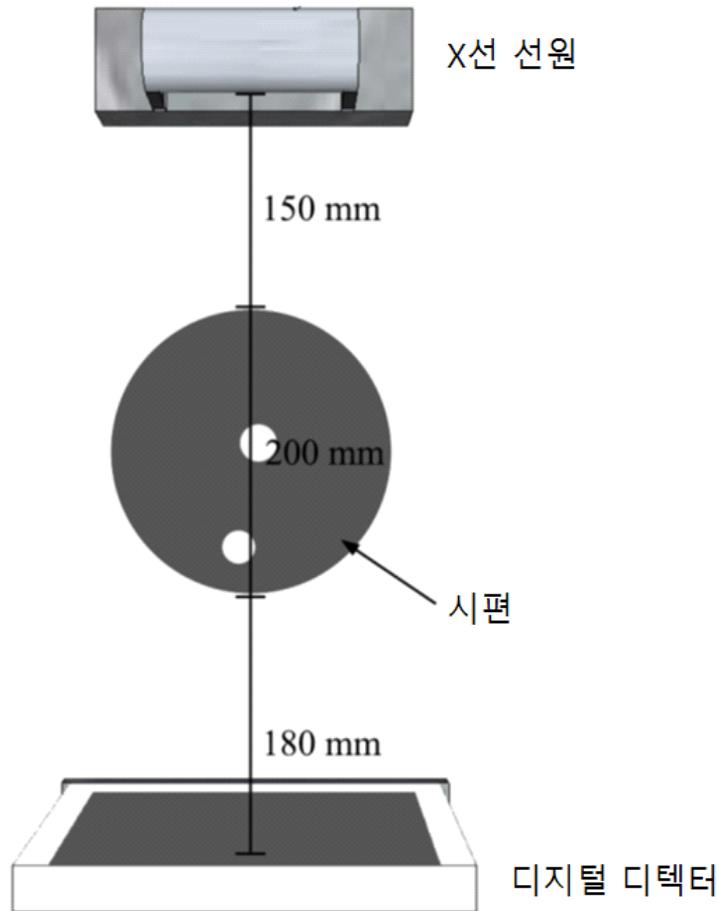


그림 3-3-4. 실험 모습

획득한 방사선 사진 수에 따라 CT 이미지를 재구성하였으며, 일반적으로 사용되고 있는 CT 이미지 재구성 알고리즘인 FBP(Filtered Back Projection) 법을 사용하였다. FBP 법은 convolution 법이라고도 불리며, 여러 방사선 사진을 중첩하여 얻은 CT 이미지를 역과시키거나 convolution 처리하여 영상을 명확하게 처리하는 방법이다(그림 3-3-5). FBP법을 사용하기 위해 얻어진 다수의 방사선 사진을 디지털화하였으며, 그 정보들을 이용하여 CT 이미지를 구성하였다. CT 이미지 구성 일련의 과정에 대한 프로그램 코드는 1) 방사선 사진의 디지털화하는 과정, 2) 거리에 따른 좌표 설정, 3) FBP 알고리즘을 통한 CT 이미지 재구성으로 구성되었으며, Matlab 프로그램을 이용하여 코딩되었다. 사용된 알고리즘 코드는 Appendix 1에 제시되어 있다.

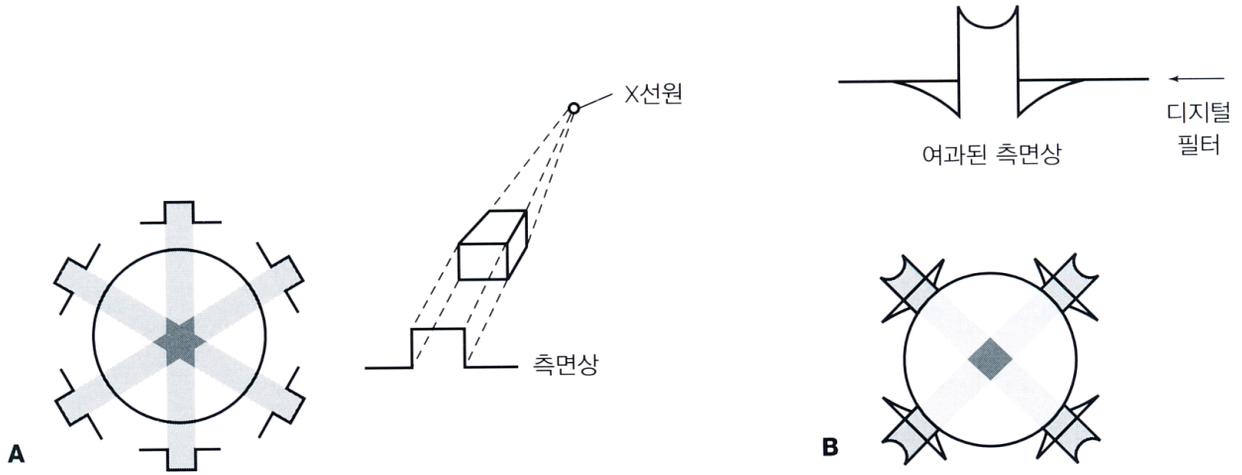
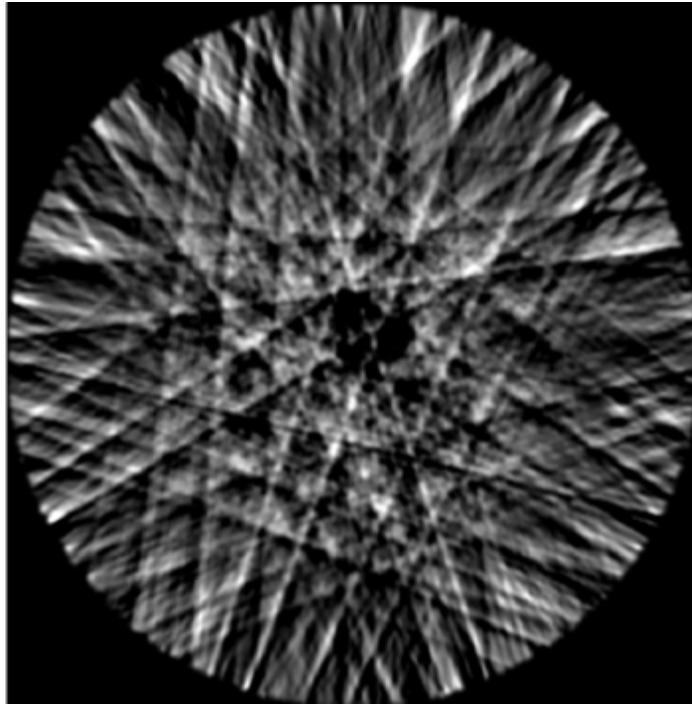


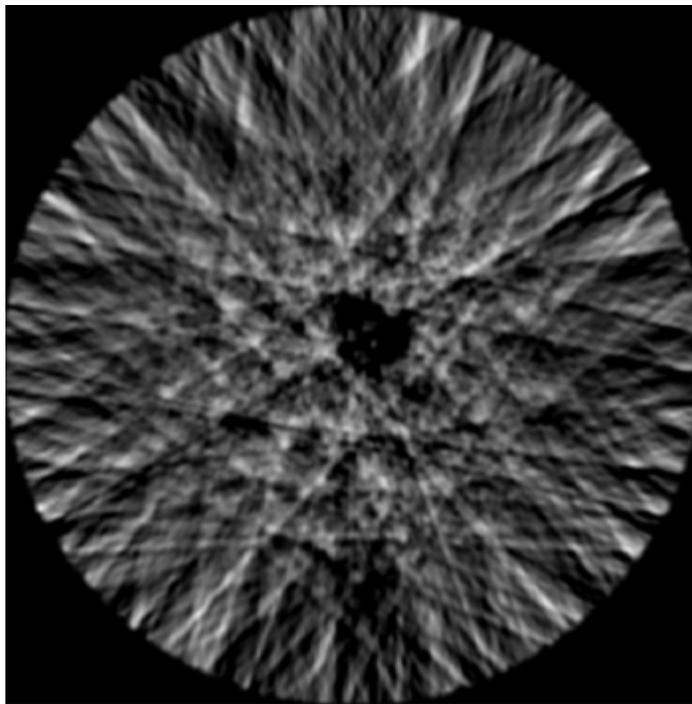
그림 3-3-5. 그림 17. CT에 사용되는 역투영과 필터보정 역투영 기술 (Serram, 2013)
 (A: BP 법은 흐릿한 영상을 낳는다, B: FBP 법은 디지털 필터를 사용하여 흐릿함을 제거한 영상을 만들어낸다.)

(2) 결과 및 토의

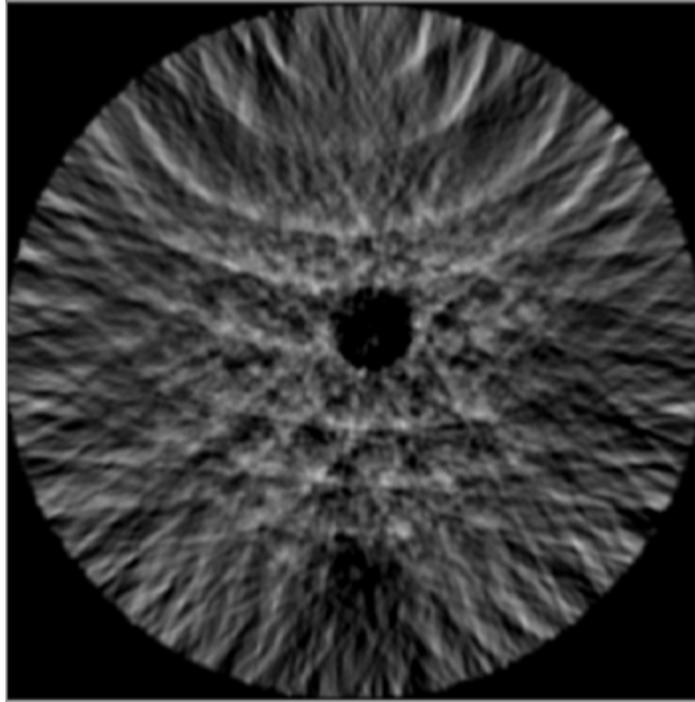
그림 3-3-6에 9, 18, 36, 72개의 방사선 사진을 이용하여 CT 이미지를 재구성한 결과가 제시되어 있다. 그림 3-3-6b를 살펴보면 18개의 방사선 사진을 이용하면 시편 중심에 있는 직경 21mm의 인공 열화를 충분히 탐지 할 수 있는 해상도를 가짐을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 김 등(2006)에 의해서 발표된 결과와 동일하였다. 그러나 김 등(2006)은 CT 이미지를 재구성하기 위하여 X선 필름을 사용하였으며, X선이 시편 전체에 충분히 조사된 후 도출된 결과이었다.



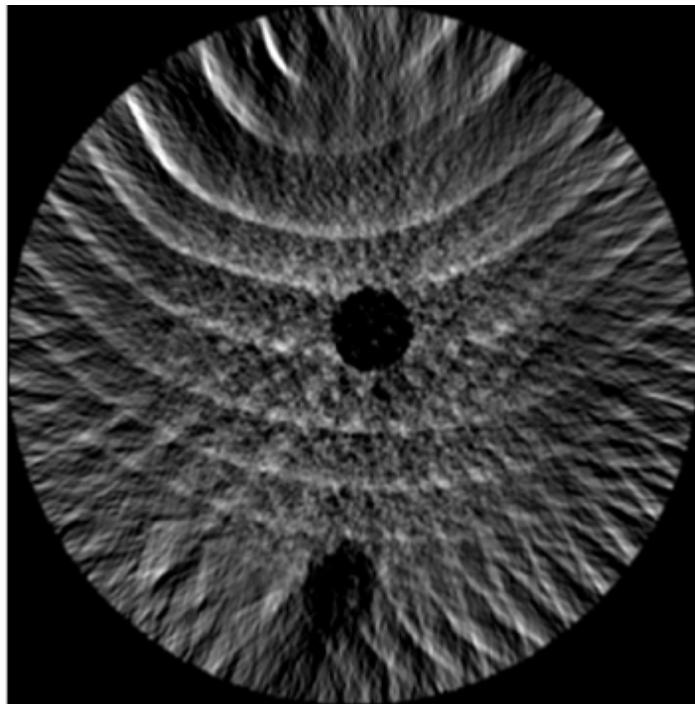
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-3-6. FBP법으로 재구성한 방사선 사진 수에 따른 CT 이미지
(a) 9개의 방사선 사진 이용, (b) 18개의 방사선 사진 이용,
(c) 36개의 방사선 사진 이용, (d) 72개의 방사선 사진 이용

9개 또는 18개의 방사선 사진을 이용하여 CT 이미지를 재구성할 때, 표 3-3-1에서 볼 수 있듯이 외곽부분의 인공 열화를 탐지 할 수 없었다. 그러나 CT 이미지 재구성을 위해 사용된 방사선 사진의 수가 늘어날수록 시편 외곽부분에 존재하고 있는 인공 열화를 확인할 수 있었고, 그림 3-3-6c, d 및 표 3-3-1을 보았을 때 외곽부분에 위치한 열화를 충분히 탐지할 수 있는 해상도의 CT 이미지를 획득할 수 있음을 확인하였다.

표 3-3-1. CT 이미지 재구성을 위해 사용된 방사선 사진 수에 따른 인공 열화 직경 예측

| 인공열화 위치 | 인공열화 직경(mm) | | | | 인공열화 실제 크기 |
|------------|--------------|-------|-------|-------|---------------|
| | 사용된 방사선 사진 수 | | | | |
| | 9 | 18 | 36 | 72 | |
| 중심부분 | - | 17.66 | 20.51 | 21.08 | 21 |
| 외곽부분 | - | - | 18.80 | 21.08 | 21 |

그림 3-3-7에 X선 조사각(29.03°)를 고려하여 시편에 도달하는 X선 조사 범위를 모식도로 나타내었다. 현장에서 입목 내부 평가를 실시할 때, X선 조사가 입목에 충분히 되거나 디지털 디텍터가 입목보다 크다면 기존 CT 이미지를 이용하여 이미지를 재구성하는데 문제가 없겠지만 현장에서는 그림 3-3-7과 같은 상황이 빈번하게 발생할 수 있다. 그림 3-3-7에서 빗금 친 부분은 X선이 조사되는 부분이고, 그 외는 특정 각도에서 X선이 조사되지 않아 방사선 사진에 결과가 나타나지 않는 부분이다. 그러나 외곽부분의 데이터 손실이 있음에도 불구하고, 결함을 탐지할 수 있는 수준의 CT 이미지를 재구성 할 수 있었다.

따라서 현장에서 CT 기술을 적용할 때는 입목에 충분히 X선이 방사되어 외곽 부분의 데이터 손실이 없도록 유의하여야 할 것이며, 부득이 디지털 디텍터의 크기 또는 X선이 충분히 방사되지 않을 경우에는 72개 이상의 방사선 사진을 획득하여 CT 이미지를 재구성하여야 입목 내부 평가를 원활히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

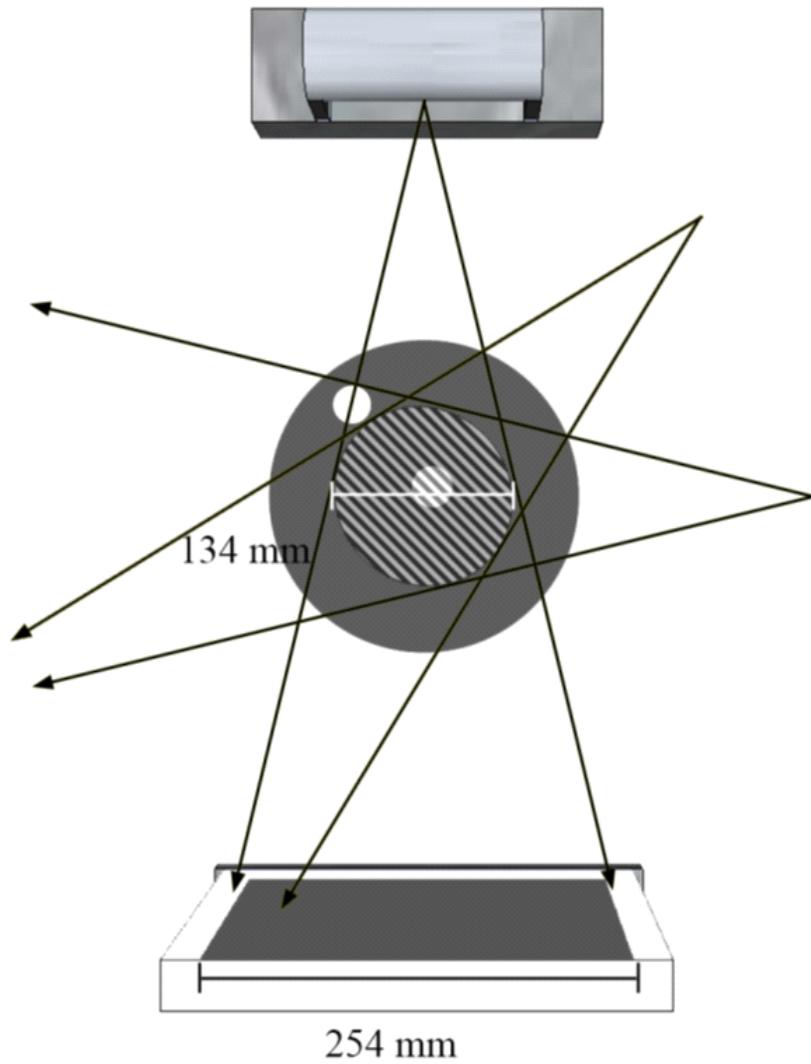


그림 3-3-7. X선 조사 범위 모식도

나. 기존 X선 CT 알고리즘의 정확도 검증

앞선 연구를 통하여 CT 이미지의 정확도를 위해 적어도 72개의 방사선 사진을 이용해야함을 확인할 수 있었다. 실제로 충분한 방사선 사진을 이용하였을 때, 기존 X선 CT 알고리즘의 정확도를 검증하고자 본 연구가 진행되었다. 그를 위하여 형태가 다른 3 가지의 목재 시편을 준비하여 방사선 사진을 획득하였으며, 획득된 방사선 사진을 이용하여 CT 이미지를 재구성하여 결과를 비교하였다.

○ 직경 200mm 원주목

(1) 재료 및 방법

적정 방사선 사진 수에 사용되었던 시편이 열화 탐지 정확도를 고찰하기 위해서 사용되었다. 그림 3-3-8에 시편 모습이 제시되어 있다.



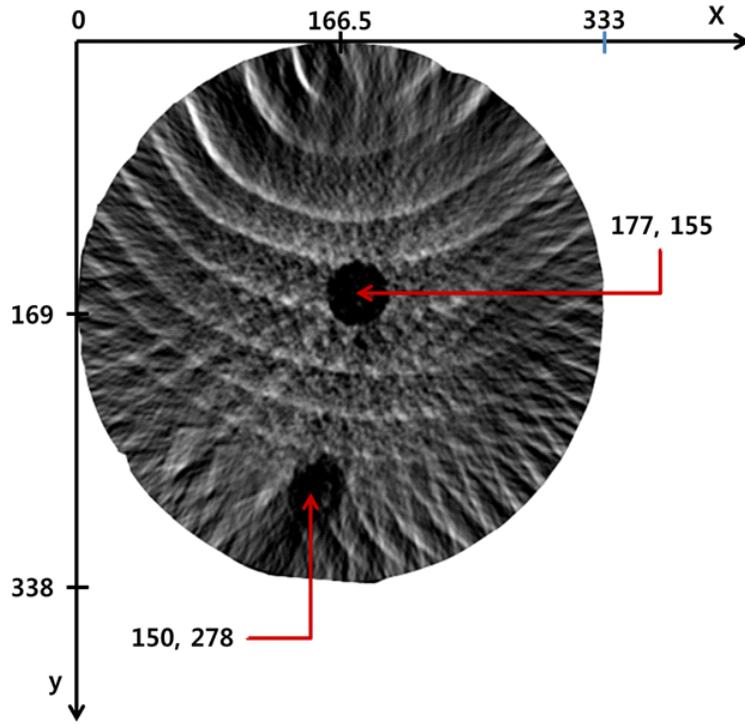
그림 3-3-8. 시편 모습

X선 선원의 관전압, 관전류를 각각 60kV, 1.5mA로 설정하여 X선이 조사되었다. 조사된 X선에 1초간 디지털 디텍터를 노출시켜 방사선 사진을 획득하였다. 획득된 방사선 사진 수는 72개이며, FBP 법을 이용하여 CT 이미지로 재구성되었다. 재구성된 이미지의 열화 탐지 정확도를 고찰하기 위하여 의료용 CT 이미지와 비교하였다. 의료용 CT 스캐너에서 X선은 관전압 120kV, 관전류 110mA 조건 하에서 조사되었으며, 약 2.7초간 의료용 CT 스캐너에 노출되어 방사선 사진이 획득되었다. 획득된 CT 이미지는 동일한 알고리즘을 이용하여 재구성되었다.

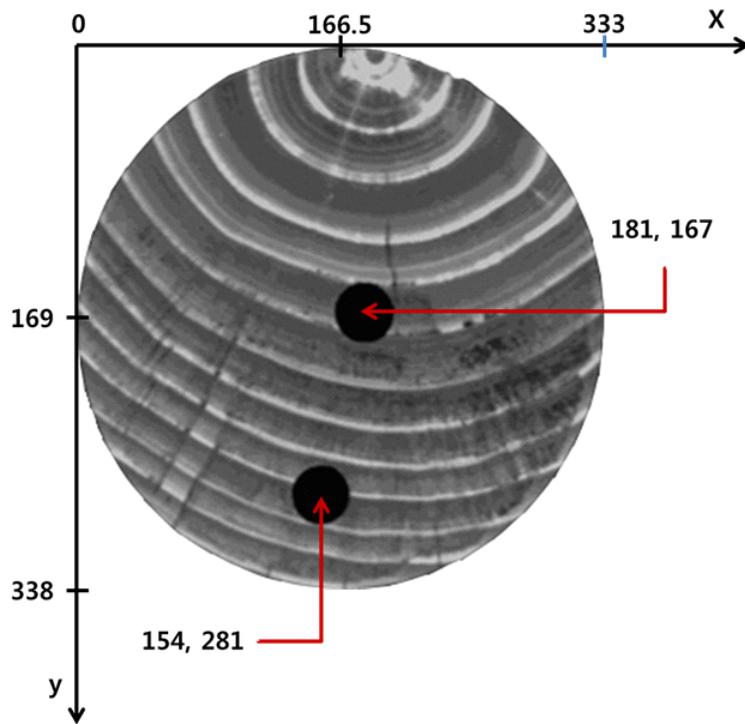
열화 탐지 정확도를 고찰하기 위하여 열화가 발생한 위치 정보를 비교하였다. 재구성된 CT 이미지를 Matlab R2014a(Mathworks, USA)를 이용하여 분석하였으며, 열화의 중심 위치를 탐지하여 CT 이미지를 비교하였다.

(2) 결과 및 토의

재구성된 CT 이미지의 해상도는 500×500 픽셀이었으며, 그림 3-3-9와 같이 얻어진 X선 CT 이미지와 의료용 CT 이미지를 비교하였다.



(a)



(b)

그림 3-3-9. 직경 200mm 원주목에 대한 X선 CT 이미지와 의료용 CT 이미지(단위: 픽셀)

의료용 CT 스캐너에서 획득된 CT 이미지와 비교하였을 때, 적은 수의 방사선 사진을 이용하였음에도 불구하고 연륜의 모양이나 시편의 전체적인 형태가 일치하였다. 다만 시편 외곽으로 갈수록 CT 이미지의 해상도가 떨어져 부정확한 결과가 나타났다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 시편 외곽 부분에서 데이터의 손실 때문이라고 사료된다. 그 결과 외곽의 인공 열화보다 시편 중앙에 위치한 인공 열화의 형태가 더 정확하게 나타났다. 입목 내부 부후가 대개 입목 중심에서 발생한다는 사실을 고려한다면 CT 이미지의 정확도가 높다고 할 수 있다. 중앙의 인공 구멍 중심의 좌표는 X선 CT 이미지와 의료용 CT 이미지 내에서 각각 (177, 155), (181,167)이었으며, 측면의 인공 구멍 중심의 좌표는 각각 (150, 278), (154, 281)로 확인되었다. CT 이미지의 분해능은 1 픽셀 당 0.4mm(직경 200mm에 대한 500×500 픽셀 CT 이미지)이므로 가장 큰 오차와 작은 오차는 4.8, 1.2mm 이었다.

○ 직경 110mm 서까래 부재

(1) 재료 및 방법

의료용 CT 이미지와 비교를 위해 사용된 시편은 인공 열화를 만들어 사용했기 때문에 목재 내부 건전부와 열화부가 명확히 구분된다. 그림 3-3-10a과 같이 동공으로 발생하기도 하지만, 대개 목재 내부에 발생하는 열화는 건전부와 열화부의 경계가 명확하지 않다(그림 3-3-10b).



(a)



(b)

그림 3-3-10. 심재부후 유형(조 등, 2008)

(a) 동공, (b) 조직 괴사

일반적인 열화 형태를 지니는 목재의 경우에도 일반적인 CT 알고리즘을 사용하여 내부 열화를 탐지할 수 있는지 확인하기 위하여 그림 3-3-11과 같은 서까래 부재에 대하여 방사선 사진 촬영을 진행하였다. 서까래부재는 최대 직경이 110mm이며, 지붕과 맞닿아 있는 부분이 심하게 열화된 상태이다.



(a)



(b)

그림 3-3-11. 서까래 부재 모습

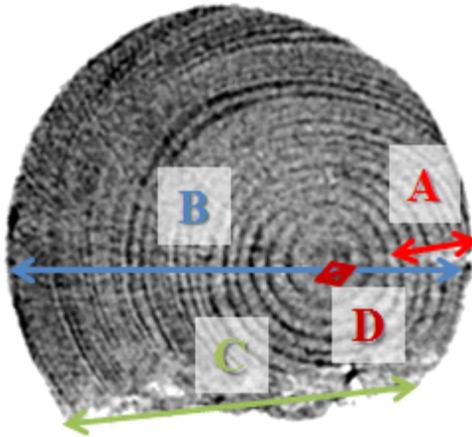
X선 선원의 조건은 관전압 45kV, 관전류 1.5mA이었으며, 디지털 디텍터에 X선을 1초간 노출시켜 방사선 사진을 획득하였다. 불규칙한 열화를 잘 탐지하기 위하여 서까래 부재를 2°씩 회전시켜가며 방사선 사진을 획득하였고, 그 결과 획득된 방사선 사진 수는 180개이었다. 마찬가지로 방법으로 FBP 법을 사용하여 CT 이미지를 재구성하여 실제 단면과 비교하였다. 픽셀 수와 gray scale에 대한 그래프를 통해 계산된 픽셀의 개수와 실제 알고 있는 길이의 비를 통하여 CT 이미지를 통해 예측된 결함 길이와 실제 단면에서의 측정된 결함 길이를 비교하는 방법을 사용하였다.

(2) 결과 및 토의

재구성된 CT 이미지 결과와 해당 단면이 그림 3-3-12에 제시되어 있다. 인공열화를 가진 시편의 결과와 달리 시편 외곽에서 해상도가 낮은 부분이 본 결과에서는 상당히 개선된 것을 확인할 수 있었다. 이는 CT 이미지 재구성에 사용된 방사선 사진 수가 증가하였고, 시편의 외곽 정보가 손실되는 부분이 인공열화를 가진 시편보다 적기 때문이라고 사료된다.



(a)

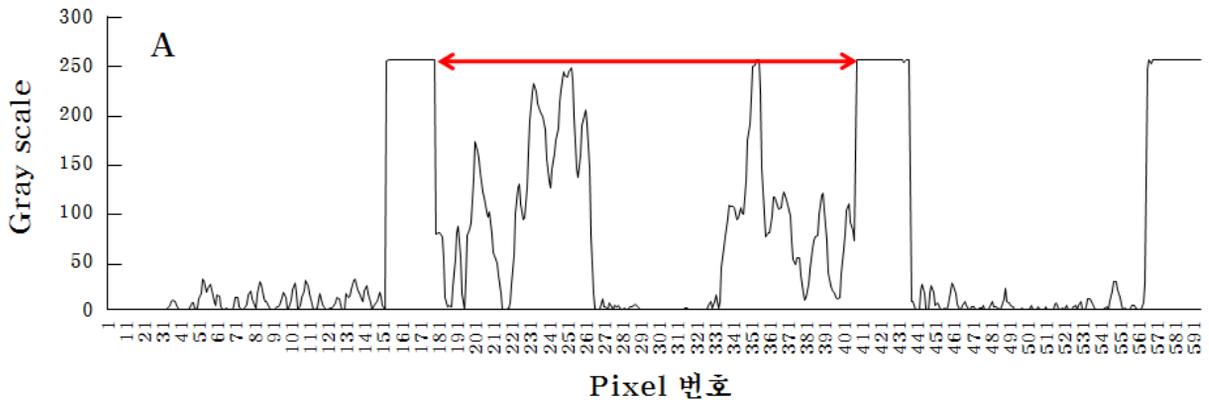


(b)

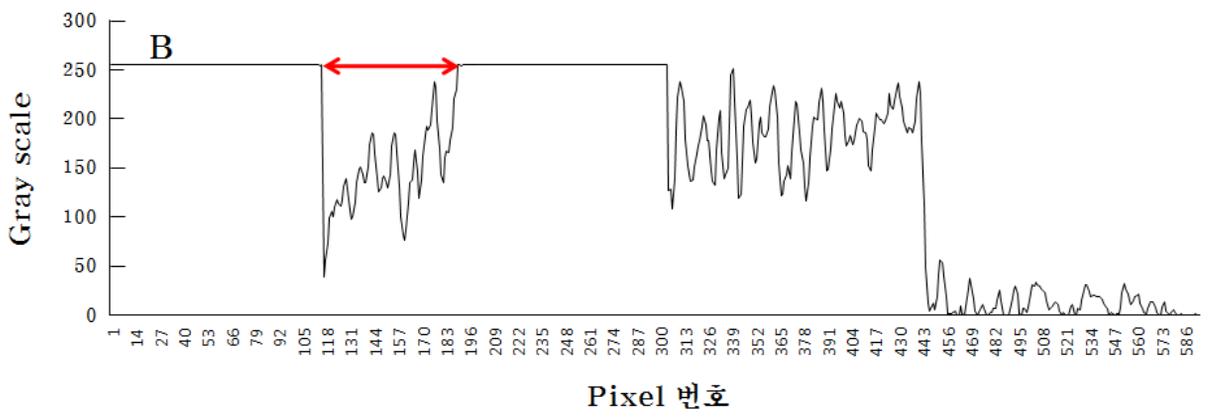
그림 3-3-12. 서까래 부재의 단면 사진과 재구성된 X선 CT 이미지

(a) 실제 단면 사진, (b) CT 이미지

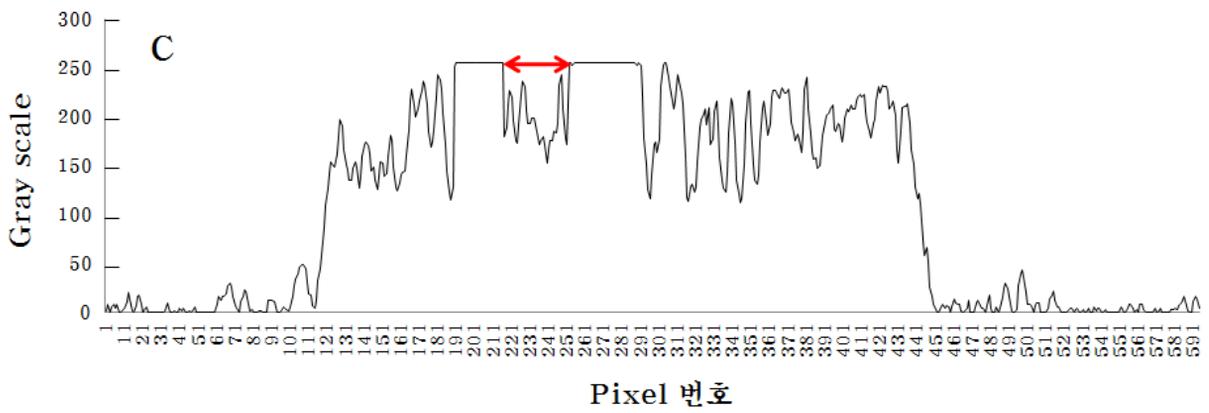
결함의 크기 예측 정확도를 평가하기 위하여 그림 3-3-12b의 위치 A, B, C, D에서 픽셀의 개수를 계산하였다. 위치 A는 표면에서 시작된 활렬, 위치 B는 서까래 부재의 최대 직경, 위치 C는 표면 열화 길이, 위치 D는 심재에서부터 연륜 1개까지의 거리를 나타낸다. 위치 A, B, C, D에 대한 픽셀 수와 gray scale에 대한 그래프(그림 3-3-13)를 통해 계산된 픽셀의 개수와 실제 단면에서 측정된 결함 길이가 표 3-3-2에 제시되어 있다.



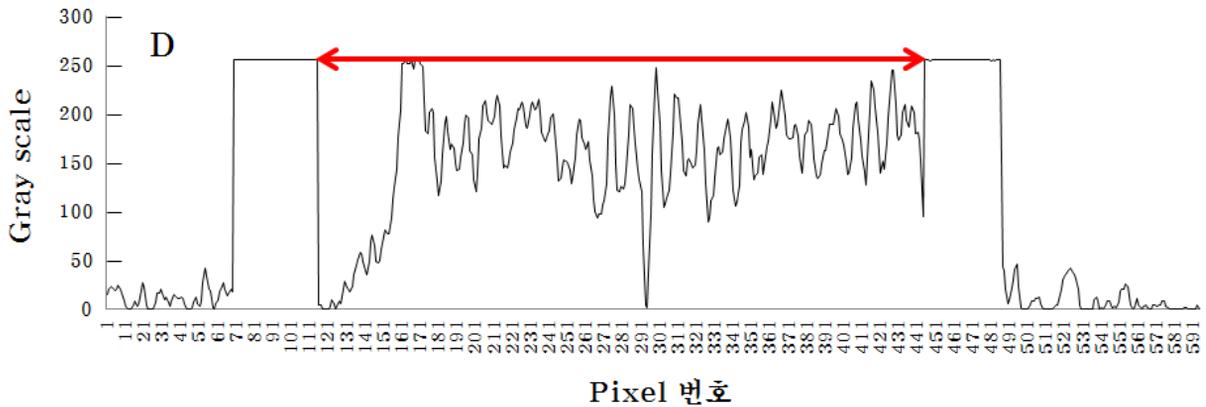
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-3-13. 위치 A, B, C, D에서의 픽셀 수와 gray scale 그래프

(a) 위치 A, (b) 위치 B, (c) 위치 C, (d) 위치 D

표 3-3-2. 위치 A, B, C, D의 결함에 대한 실제 길이와 예측 길이

| 결함 위치 | 실제 길이(mm) (a) | 픽셀 수(개) | 예측 길이(mm) (b) | 길이 비 (a/b) |
|-------|---------------|---------|---------------|------------|
| A | 84 | 228 | 97.22 | 0.86 |
| B | 28.5 | 76 | 32.41 | 0.88 |
| C | 12.5 | 38 | 16.20 | 0.77 |
| D | 117 | 329 | 140.29 | 0.83 |

전체적으로 재구성된 CT 이미지를 이용하여 예측된 길이는 실제 측정 길이보다 과대평가되었다. 또한 시편의 외곽에 위치한 결함일수록 더욱 과대평가되었다.

○ 직경 190mm인 원주목

(1) 재료 및 방법

그림 3-3-14에 제시된 직경이 190mm인 원주목에 대하여 CT 촬영을 실시하였다. X선 선원의 조건은 관전압 45kV, 관전류 1.5mA이었으며, 디지털 디텍터에 X선을 1초간 노출시켜 방사선 사진을 획득하였다. 총 180개의 방사선 사진을 이용하여 CT 이미지를 재구성하였다.



그림 3-3-14. 원주목 모습과 밀도 측정 시편 위치

X선 CT 촬영 후 그림 3-3-14에 나와 있는 것과 같이 밀도 측정 시편을 만들어 기건 밀도를 측정하였다. 측정된 기건 밀도는 CT 이미지 내 pixel 값과 비교하였다.

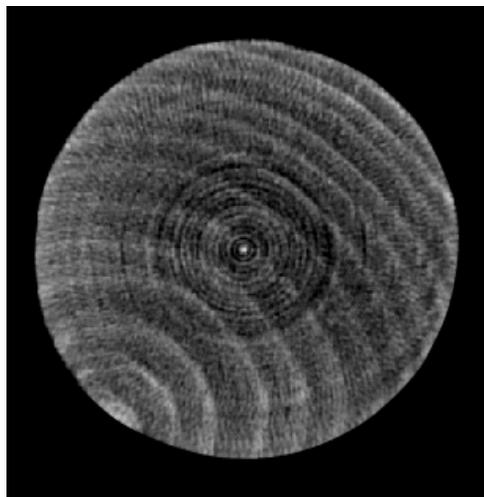
(2) 결과 및 토의

목재의 밀도 예측 가능성을 살펴보기 위하여 측정된 기건 밀도와 CT 이미지를 비교하여 보았다. 표 3-3-3에 원주목에서 잘라 낸 시편의 기건 밀도가 제시되어 있다. 잘라낸 6개의 기건 밀도는 0.41g/cm^3 으로 거의 일정하였다. 원주목의 경우 심재가 대개 중심에 있어 위치 3, 4 시편의 경우 기건 밀도가 높게 나타날 수 있으나, 본 실험에서 사용된 원주목의 경우, 수가 왼쪽 하단에 위치하여 채취한 6개의 시편에 심재가 거의 포함되지 않아 기건 밀도 값이 큰 편차 없이 일정하게 나타났다.

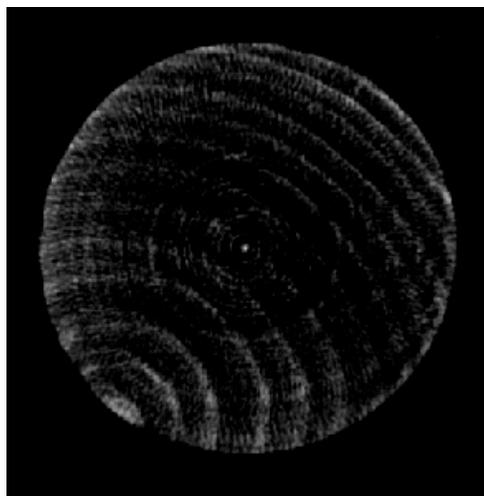
표 3-3-3. 밀도 시편의 기건 밀도

| 위치 | 기건 밀도(g/cm^3) |
|----|--------------------------|
| 1 | 0.41 |
| 2 | 0.42 |
| 3 | 0.41 |
| 4 | 0.42 |
| 5 | 0.42 |
| 6 | 0.41 |

그림 3-3-15a에 원주목에 대한 CT 이미지 결과가 제시되어 있다. 주목 단면과 비교해 볼 때 CT 결과가 정확하다는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 3-3-15b과 실제 기건 밀도를 비교할 때, 실제로 측정된 시편의 기건 밀도가 위치 1~6에서 약 0.41g/cm^3 으로 거의 일정했음에도 불구하고 CT 이미지 외곽부분과 중앙 부분에서 다소 차이가 났다. 시편 외곽에서는 상대적으로 밀도를 과대평가하고 있었다. 이는 연속 X선을 사용함으로써 발생할 수 있는 X선 산란을 고려하지 않거나 서까래 실험 결과와 마찬가지로 본 연구에서 사용된 디지털 디텍터의 형태는 평면인데 비해 X선은 조사 각도를 가지고 방사되어 디텍터의 중앙보다 측면으로 갈수록 시편을 통과한 X선의 조사 길이가 더 길어진 점을 일반적인 CT 알고리즘에서 고려하지 못했기 때문이라고 판단된다.



(a)



(b)

그림 3-3-15. 원주목에 대한 CT 이미지 결과와 관심 픽셀을 조절한 CT 이미지

2. 일반 알고리즘으로 재구성된 CT 이미지 문제점 개선

앞선 연구 내용을 통하여 CT 이미지 재구성 시 고려해야 할 사항과 일반 알고리즘으로 재구성된 CT 이미지의 문제점을 알 수 있었다.

1. X선 선원의 조사 각도에 따라 X선 선원과 시편 사이의 거리나 X선 선원과 디텍터 사이의 거리를 고려해야 한다.
2. 180개의 방사선 사진으로 재구성한 CT 이미지는 목재 내 부후를 탐지하기에 충분한 해상도를 가지고 있다.
3. 일반적인 CT 재구성 알고리즘을 사용하면, 본 연구에서 사용된 X선 선원의 조사 각도와 디지털 디텍터의 기하학적인 모습(평면) 때문에 피시험체의 외곽으로 갈수록 밀도나 결함 크기의 예측 정확도가 떨어진다.

X선 선원 조사 각도와 방사선 사진의 개수는 일반 CT 재구성 알고리즘과 관계없이 고려가 가능하나 본 연구에서 사용된 평면 디지털 디텍터를 사용하여 발생한 문제점은 알고리즘의 수정 없이 고치기 어렵다. 따라서 이번 연구에서는 일반 알고리즘으로 재구성된 CT 이미지의 문제점을 개선하고자 단면 형태 측정 및 시편을 통과한 후 X선이 조사된 거리를 계산하는 방법과 그를 이용해 일반 알고리즘을 수정한 결과가 제시되어 있다.

가. 단면 형태 측정

식 4에서 알 수 있듯이, Beer의 법칙을 이용하여 피시험체의 밀도를 측정하기 위해서는 X선이 시편을 통과한 거리를 알아야 한다. 형태가 규칙적인 원주목의 경우, 원주목을 원형이라 가정하고 X선이 시편을 통과하는 거리를 수학적으로 계산하여도 실제 X선 투과 거리와 예측된 거리의 오차가 크지 않을 것으로 사료된다. 그러나 입목의 경우 단면 형태가 규칙적이지 않아 원주목과 같은 계산법을 통해서는 오차가 많이 발생할 수 있다. 따라서 입목의 형태에 따른 좌표를 측정할 필요가 있는데, 보통 좌표를 측정하기 위해 사용되는 3차원좌표 측정기는 측정 정확도는 높으나 전체 좌표를 측정하려면 시간이 오래 걸리고, 측정하는 방법이 현장에서 적용하기에 쉽지 않아 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 그리하여 본 연구진은 레이저 거리 측정기를 이용하여 간단히 단면 형태를 비파괴 방법으로 측정하고자 하였다.

(1) 재료 및 방법

그림 3-3-16에 실험에 사용된 거리 측정기가 나와 있다. 거리 측정기, DLE40(BOSCH, Germany)는 일반 건설 현장에서 사용되는 레이저 측정 장치이다. 최대 40m까지 정확하게 측정할 수 있으며, 측정 정확도는 $\pm 1.5\text{mm}$ 이다.



그림 3-3-16. 휴대용 거리 측정기 모습

거리 측정기를 이용하여 시편의 단면 측정을 위하여 그림 3-3-17과 같은 목재를 선정하였다.



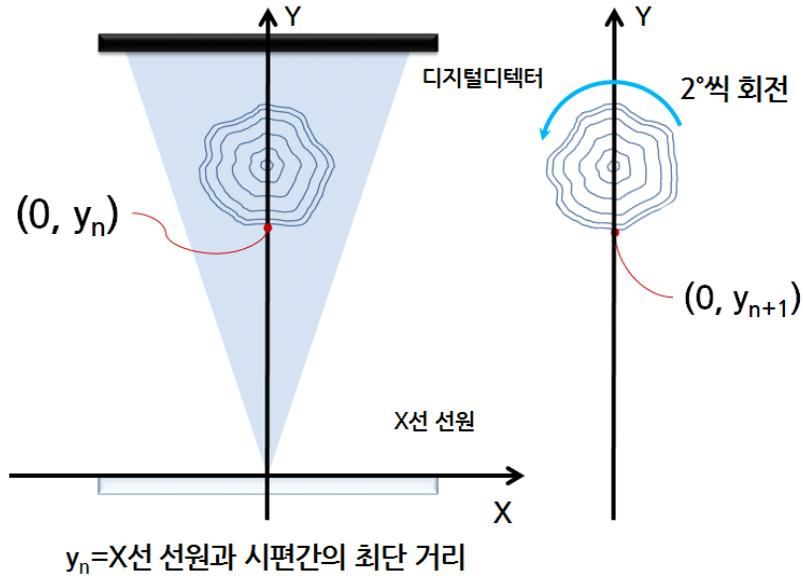
그림 3-3-17. 형태가 불규칙한 목재

거리 측정기를 이용하여 형태가 불규칙한 목재의 단면 형상은 목재를 CT 촬영 시와 동일하게 회전하면서 얻어지는 목재와 거리 측정기의 최단 거리를 회전 변환시켜 얻어진 좌표를 선형 보간 하여 얻었다. 여기서 목재와 거리 측정기의 최단 거리는 목재와 X선 선원의 중심 사이의 거리와 같게 되도록 한다. 그림 3-3-18에 휴대용 거리 측정기를 이용하여 목재와 X선 선원의 중심 사이의 거리를 측정하는 모습이 제시되어 있다.

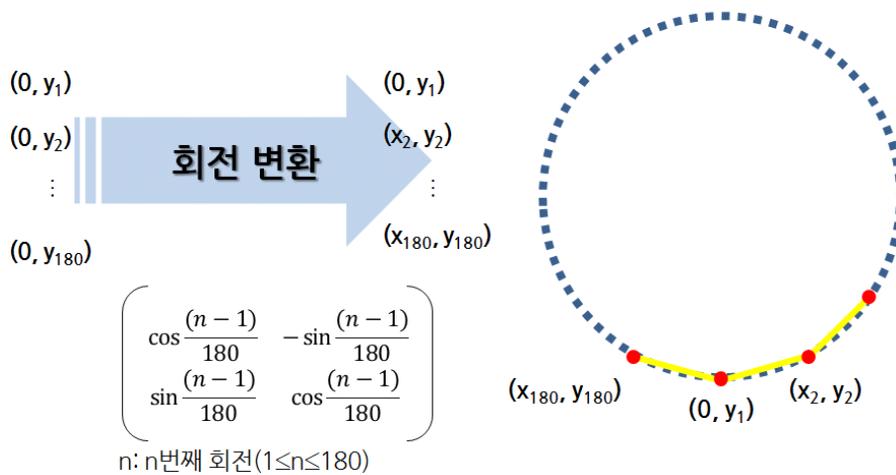


그림 3-3-18. 목재와 X선 선원의 중심 사이의 최단 거리 측정 모습

X선 선원의 중심과 목재 사이의 최단거리는 총 180번 측정하였다. 얻어진 180개의 최단거리는 실험실적 스케일의 CT 기계의 회전 중심을 이용하여 좌표로 변환할 수 있다. 변환된 180개의 좌표는 다시 CT 기계의 회전 중심을 이용하여 2°씩 회전변환 시켜 그림 3-3-19와 같이 새로운 좌표로 변환할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3-3-19. 휴대용 거리 측정기를 이용한 목재 단면 측정

(2) 결과 및 토의

그림 3-3-20에 거리 측정기를 이용한 목재 단면 측정 결과가 나와 있다. 시편의 단면 사진과 교하였을 때 간단한 방법임에도 불구하고 시편의 형태나 좌표를 정확히 얻을 수 있으며, 선형으로 보간 하였기 때문에 임의의 점의 좌표도 구할 수 있었다. 이렇게 얻어진 좌표를 이용하여 두 점 사이의 거리를 계산할 수 있다. X선이 각각의 선들의 집합이라고 가정할 때, 좌표를 이

용하여 계산된 거리는 X선이 시편을 통과한 거리라고 할 수 있으며 Beer의 법칙에 사용할 수 있다. 결과적으로 형태가 불규칙한 입목에서도 사용하여 밀도 예측의 정확도를 높일 수 있을 것이라 사료된다. 거리 측정기를 이용하여 얻어진 목재 단면 예측 결과와 실제로 측정된 길이의 최대 오차는 2mm로 정확도가 높음을 확인할 수 있었다.

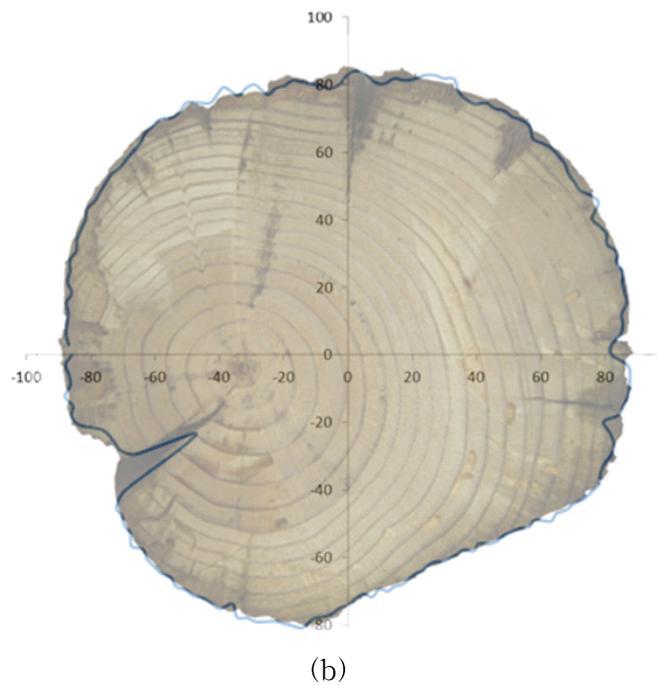
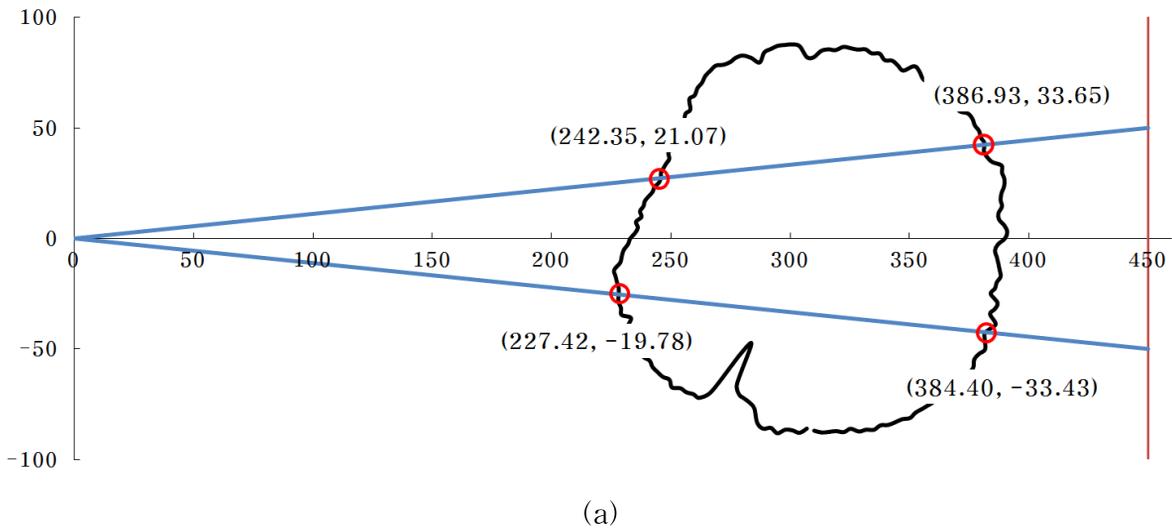


그림 3-3-20. 거리 측정기를 이용한 목재 단면 측정 결과
(a) 단면 내 좌표 설정 예 (b) 실제 단면과 비교

나. X선이 조사된 거리 차이

(1) 재료 및 방법

앞서 살펴본 바와 같이, 일반적인 CT 재구성 알고리즘을 사용하면 본 연구에서 사용된 X선 선원의 조사 각도와 디지털 디텍터의 기하학적인 모습(평면) 때문에 피시형체의 외곽으로 갈수록 밀도나 결함 크기의 예측 정확도가 떨어진다. 그 결과 결함 크기나 밀도를 과대평가하는 것을 확인하였다. 밀도의 과대평가는 질량감쇠계수와도 관계가 있기 때문에 여기서는 논외로 치더라도, 결함의 크기를 과대평가하는 원인은 시편을 통과한 X선의 조사되는 거리가 평면 디텍터 내에서의 위치에 따라 달라지기 때문이다. 의료용 CT 스캐너는 CT 스캐너 내에서 조사되는 선원의 유효 조사 각도를 고려하여 디지털 디텍터를 원형으로 배열되어 있기 때문에, X선의 조사되는 거리가 어느 위치에서든지 일정하다.

따라서 평면 디지털 디텍터와 의료용 CT 스캐너 내의 원형 디텍터 내에서 X선이 조사되는 거리 차이를 기하학적으로 계산할 수 있으면 그 차이를 알 수 있고, 그러한 차이만큼 X선의 감쇠 또는 위치 정보가 어느 정도 차이 나는지 확인할 수 있다면 과대평가된 부분을 보정할 수 있을 것이다.

(2) 결과 및 토의

같은 위치에서 X선 선원으로부터 X선이 조사되었다고 가정할 때, 본 연구에서 사용된 평면 디지털 디텍터와 원형 의료용 디텍터에서 X선이 조사된 위치가 그림 3-3-21에 제시되어 있다.

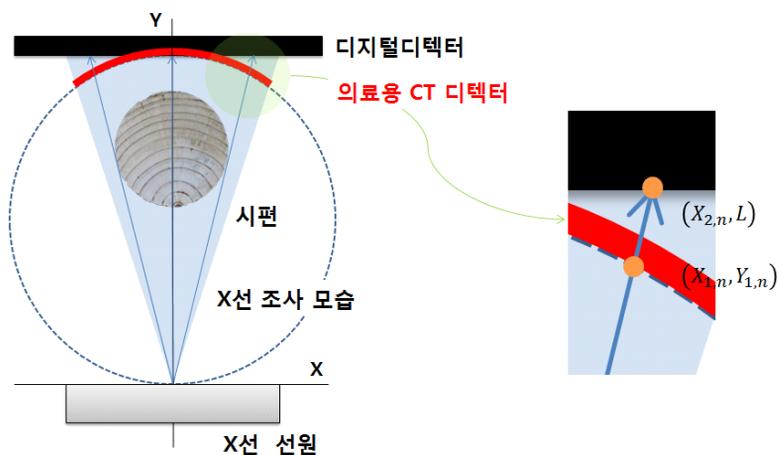


그림 3-3-21. 평면 디지털 디텍터와 원형 의료용 디텍터에서 X선이 조사된 위치 모식도

평면 디지털 디텍터 내의 n번째 픽셀에 X선이 탐지되었을 때 좌표를 $(X_{2, n}, L)$ 이라 하면, 디지털 디텍터의 전체 픽셀 수와 실제 길이의 비를 통하여 좌표를 구할 수 있다(식 5, 6).

$$P_{total} : P_n = L_h : X_{2, n} \quad (5)$$

$$X_{2, n} = \frac{D_h}{P_{total}} \times P_n \quad (6)$$

여기서,

$X_{2, n}$ 은 평면 디텍터의 n번째 픽셀에 X선이 탐지되었을 때의 좌표,

P_n 은 n번째 픽셀,

P_{total} 은 평면 디텍터의 전체 픽셀 수의 절반,

D_h 는 디텍터 실제 길이의 절반(mm),

L 은 X선 선원과 평면 디텍터 사이의 거리(mm)

또한, 평면 디지털 디텍터 내의 n번째 픽셀에 탐지된 X선이 의료용 디텍터에 탐지되었을 때의 좌표를 $(X_{1, n}, Y_{1, n})$ 이라 하면, 이 좌표는 선원의 중심과 평면 디텍터에서 구한 좌표 $(X_{2, n}, L)$ 을 지나는 직선(식 7)과 원형 의료용 디텍터의 방정식(식 8)을 연립함으로써 구할 수 있다(식 9). 원형 의료용 디텍터는 선원으로부터 같은 거리에 배열되어 있으므로 선원과 디텍터의 거리를 지름으로 가지는 원 방정식을 만족한다.

$$Y = m \cdot X \quad (7)$$

여기서,

m 은 선원의 중심과 $(X_{2, n}, L)$ 을 지나는 직선의 기울기

$$(= L / X_{2, n} = 2(L \cdot P_{total}) / (D_h \cdot P_n))$$

$$X^2 + Y^2 = (L/2)^2 \quad (8)$$

$$(X_{1, n}, Y_{1, n}) = \left(\frac{L}{2\sqrt{1+m^2}}, \frac{m \cdot L}{2\sqrt{1+m^2}} \right) \quad (9)$$

마지막으로, 평면 디지털 디텍터 내의 n번째 픽셀에 X선이 탐지되었을 때의 좌표와 그 때 원형 의료용 디텍터의 좌표 $(X_{2, n}, L)$, $(X_{1, n}, Y_{1, n})$ 의 사이 거리를 구하면 평면 디지털 디텍터와 원형 의료용 디텍터에서 같은 X선이 조사되었을 때 거리의 차이를 알 수 있다.

식 10과 그림 3-3-22을 살펴보았을 때, 거리의 차이는 대략적으로 평면 디지털 디텍터에서 X선이 탐지되었을 때 픽셀 위치의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다. 다시 말해 평면 디텍터의 중심에서 거리가 멀어지면 질수록 과대평가가 발생한다는 것을 수식으로도 확인할 수 있다.

$$d = \sqrt{(X_{2,n} - X_{1,n})^2 + (L - Y_{1,n})^2} \quad (10)$$

여기서,

d 는 같은 X선이 탐지되었을 때 평면 디지털 디텍터와 원형 의료용 디텍터 사이의 차

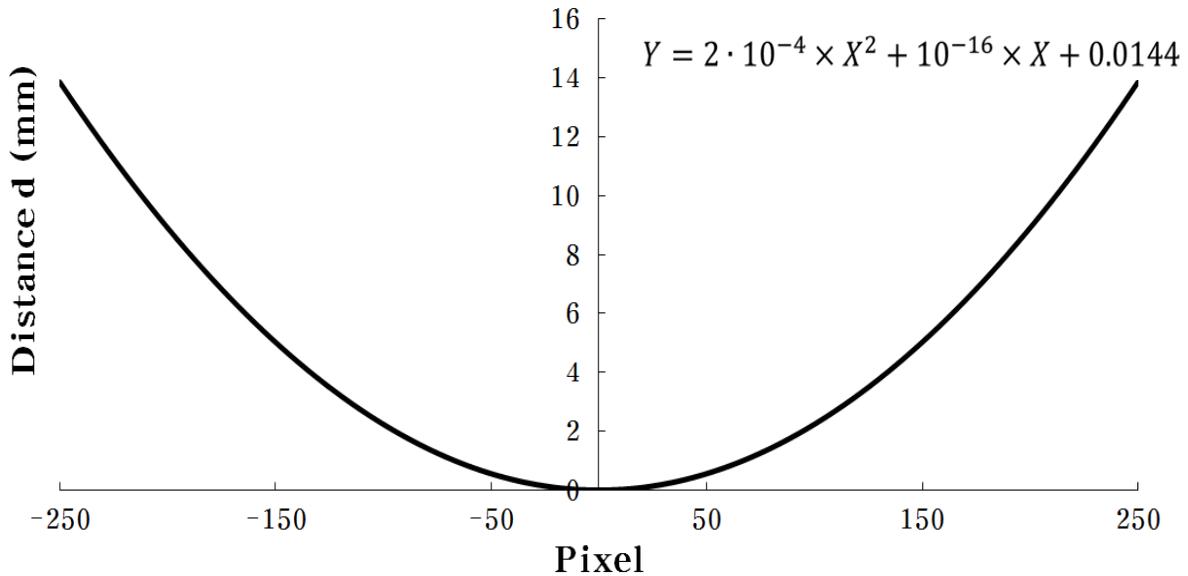


그림 3-3-22. 평면 디지털 디텍터의 픽셀 위치에 따른 평면 디지털 디텍터와 원형 의료용 디텍터 사이의 거리

이와 같은 차이를 일반적인 X선 CT 재구성 알고리즘에서는 고려되지 않아 피시험체의 외곽으로 갈수록 결함의 크기를 과대평가하는 것으로 사료된다. 또한 평면 디지털 디텍터를 사용함에 오는 오차와 그림 3-2-7에 제시되어 있는 거리에 따른 X선 강도 감쇠 관계를 이용하여 상대적 밀도(gray scale)을 보정할 수 있을 것으로 사료되었다.

다. 보정된 CT 이미지

○ 결함 크기 보정

(1) 재료 및 방법

평면 디지털 디텍터의 픽셀 위치에 따른 평면 디지털 디텍터와 원형 의료용 디텍터 사이의 거리를 이용하여 일반적인 CT 이미지 재구성 알고리즘을 수정하였다. 수정된 알고리즘을 통하여 결함의 크기 예측 정확도를 높일 수 있는지 확인하기 위하여 서까래 부재에 대한 방사선 사진 결과를 이용하였다. 거리측정기를 이용하여 측정된 서까래 부재의 반지름 길이를 구하고, 식 6과 식 9를 이용하여 디지털 디텍터 중심으로부터 멀어질 때 얼마나 결함의 길이가 과대평가되는지 확인하였다.

확인된 과대평가 값을 이용하여 CT 이미지 재구성을 위한 방사선 사진의 사이즈를 수정하여 CT 이미지를 재구성하였다. 재구성된 CT 이미지 내 결함의 크기는 실제 측정 결함 크기와 비교하여 보았다.

(2) 결과 및 토의

그림 3-3-23에 거리측정기를 이용하여 측정된 서까래 부재의 반지름이 표시되어 있다. 거리측정기를 이용하여 측정된 서까래의 반지름은 58.5mm이었다. 식 6과 9를 이용하여 전체 반지름을 예측하였을 때 실제보다 1.02배 과대평가된 것으로 확인되어, X선 CT 재구성을 위한 방사선 사진을 500×500 픽셀에서 490×500 픽셀로 축소시켜 다시 이미지를 다시 재구성하였다.

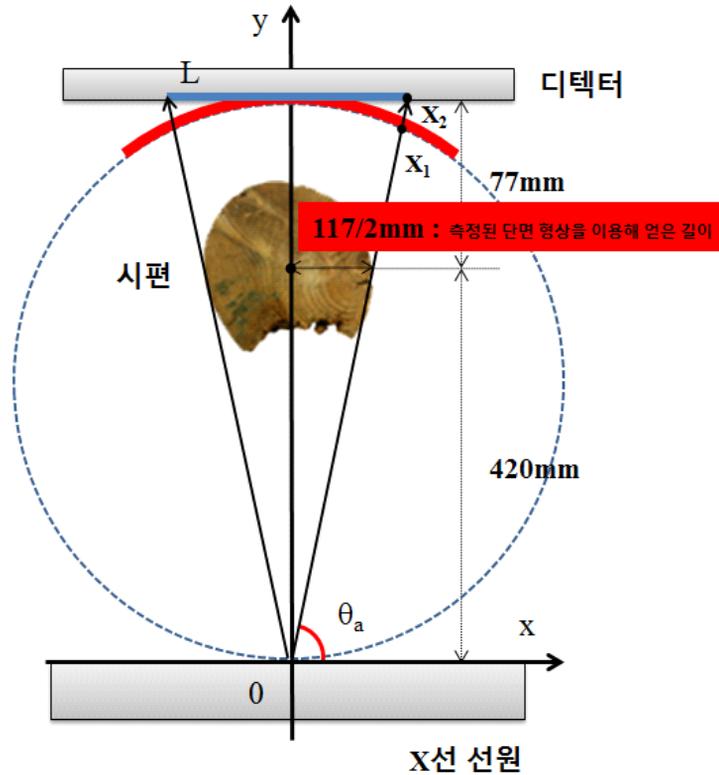


그림 3-3-23. 거리측정기를 이용하여 측정된 서까래 부재의 반지름 길이

표 3-3-4에 일반적인 X선 CT 알고리즘과 보정된 알고리즘으로 예측된 결함 길이가 제시되어 있다. 측정 위치는 그림 3-3-12에 제시되어 있다.

표 3-3-4. 서까래 부재에 대한 예측 길이와 보정된 예측 길이

| 결함 위치 | 실제 길이(mm) | 예측 길이(mm) | 보정된 예측 길이(mm) |
|-------|-----------|-----------|---------------|
| A | 28.5 | 32.41 | 26.12 |
| B | 117 | 140.29 | 110.56 |
| C | 84 | 97.22 | 82.77 |
| D | 12.5 | 13.70 | 10.23 |

서까래 부재의 CT 이미지를 일반적인 CT 알고리즘으로 재구성한 후 CT 이미지를 통하여 결함을 예측하였을 때, 앞서 언급한 바와 같이 시편의 외곽에 위치한 결함일수록 예측 길이가 과대평가되었다. 그러나 보정된 CT 이미지를 통하여 결함을 예측하였을 때 실제 길이와 그 차

이가 줄어들 것을 확인할 수 있었다. 더불어 중심에 위치한 결함을 예측한 결과도 줄어들어 위치 D의 경우 오히려 과소평가되는 결과를 나타내었다. 이는 하나의 방사선 사진을 보정할 때 전체 반지름을 예측하였을 때를 기준으로 전체 방사선 사진을 축소시켜 CT 이미지를 재구성하였기 때문으로 사료된다.

○ 상대적 밀도(gray scale) 보정

(1) 재료 및 방법

직경이 190mm인 원주목(그림 3-3-14)에 대한 CT 이미지를 보정하여 상대적 밀도(gray scale)를 보정할 수 있는지 확인하였다. 이를 위하여 평면 디지털 디텍터의 픽셀 위치에 따른 평면 디지털 디텍터와 원형 의료용 디텍터 사이의 거리(그림 3-3-22), gray scale(상대적 X선 강도)과 X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리 제곱과의 관계(그림 3-2-7)을 이용하여 평면 디지털 디텍터의 위치에 따라 상대적 밀도가 어떻게 과대평가되는지 확인하였다.

(2) 결과 및 토의

그림 3-3-24에 X선의 세기가 평면 디지털 디텍터의 픽셀 위치에 따라 얼마나 과대 또는 과소평가 되었는지 나타나있다. 평면 디지털 디텍터를 바라보았을 때 가장 왼쪽을 0 픽셀이라 하면, 0 픽셀과 500 픽셀, 즉 평면 디지털 디텍터의 가장 끝에서 하나의 방사선 사진에 대하여 1.03배 정도 상대적 밀도가 과대평가되는 것을 확인하였다(그림 3-3-24).

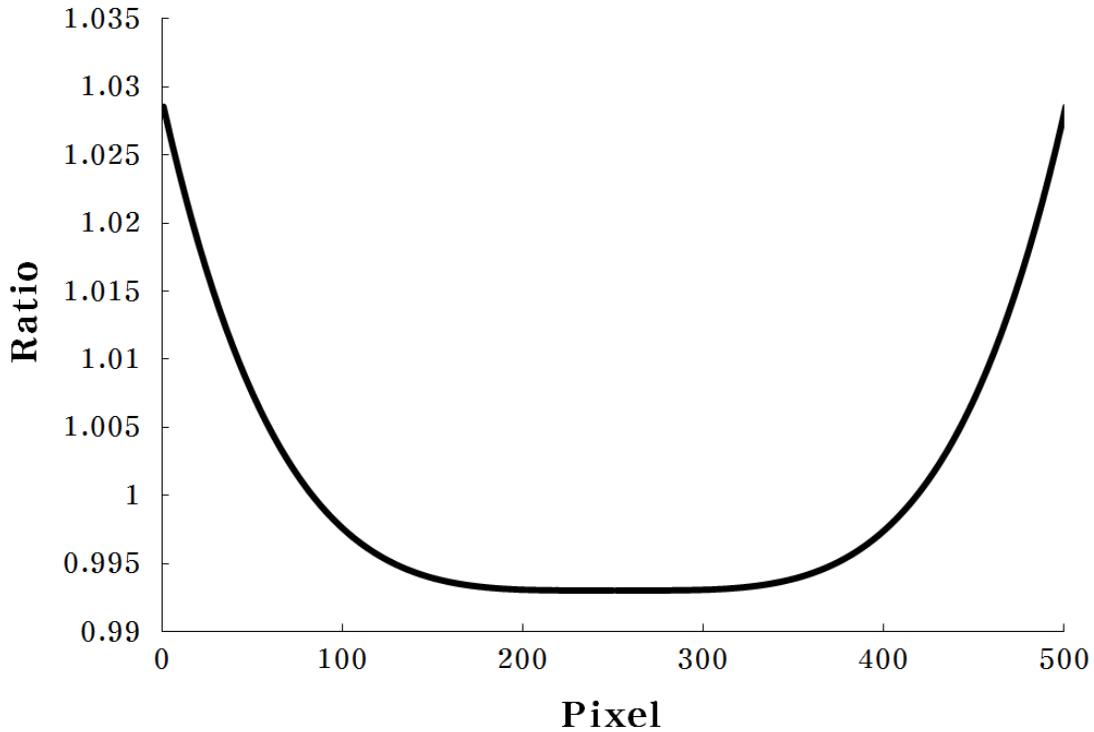


그림 3-3-24. 평면 디텍터 위치에 따른 상대적 밀도 과대평가 비율

하나의 방사선 사진에 대해서 생각할 때 1.03배는 작다고 할 수 있으나 본 연구에서 하나의 CT 이미지를 재구성하는데 사용되는 방사선 사진의 수는 180개이므로 과대평가되는 부분이 누적되어 결과적으로 과대평가된다. 계산된 과대평가 비율을 이용하여 하나의 방사선 사진에 대하여 값을 보정하여 CT 이미지를 구성하였으며, 그 결과는 표 3-3-5에 제시되어 있다. 시험편에 대한 원래 값과 보정된 평균 gray scale 값을 비교해 보았을 때, 시험편의 외곽에서 과대평가된 부분이 보정된 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 3-3-25에서 나타난 것과 같이 원래 CT 이미지와 보정된 CT 이미지의 중간 1 픽셀에 대한 gray scale를 비교해보았을 때도 역시 과대평가된 외곽부분이 보정된 것을 알 수 있다.

표 3-3-5. 직경이 190mm인 원주목에 대한 예측 gray scale 값

| 위 치 | 평균 값 | 보정된 평균 값 |
|-----|-------|----------|
| 1 | 89.39 | 88.62 |
| 2 | 88.56 | 88.63 |
| 3 | 87.83 | 87.96 |
| 4 | 88.28 | 88.40 |
| 5 | 88.39 | 88.46 |
| 6 | 89.33 | 88.59 |

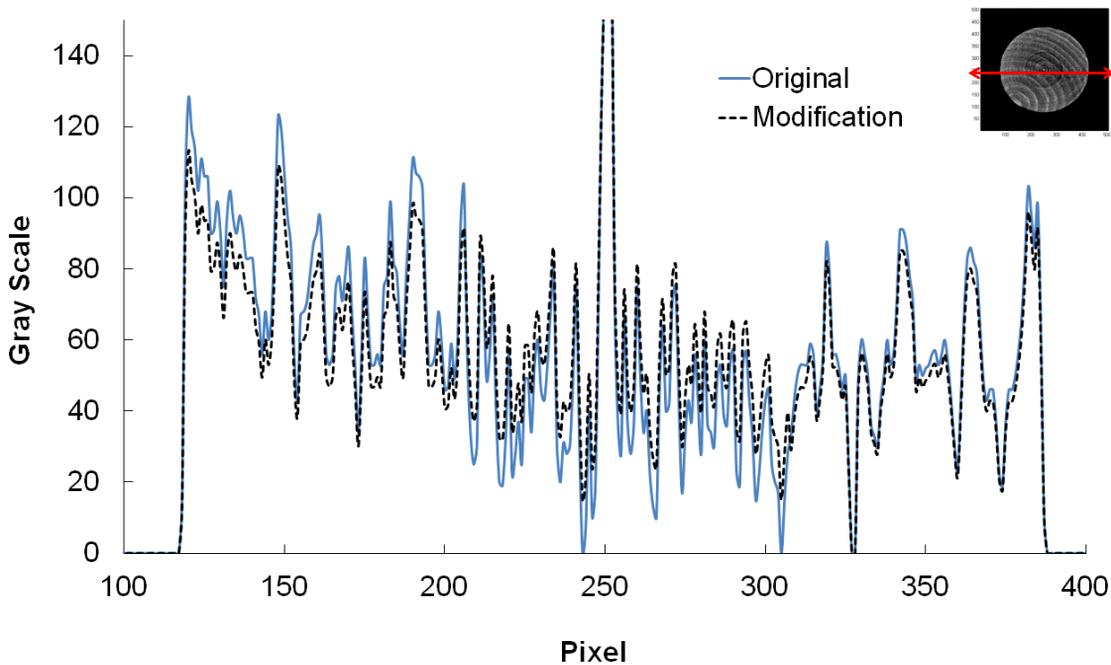


그림 3-3-25. 원주목에 대한 중간 픽셀 분석

이상에서 일반 CT 재구성 알고리즘을 이용하여 본 연구에서 사용하는 X선 선원과 디지털 디텍터를 사용하였을 때, 발생하는 문제점을 살펴보고 해결책을 찾아보았다. 결함의 크기나 상대적 밀도를 과대평가하는 것은 X선 선원에서 조사되는 X선의 형태와 디지털 디텍터 형태에 의해서 기인함을 확인하였다. 그러나 그림 3-3-25에서 볼 수 있듯이 여전히 시편의 외곽에서는 상대적 밀도를 과대평가하고 있어, 연속 X선의 특성 또한 고려되어야 할 것으로 사료된다. 본 내용을 바탕으로 새로운 CT 알고리즘을 개발하고자 하였다.

제 4절 현장 적용을 위한 CT 기술 개발

기존의 CT 이미지 재구성하는 과정은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 기존 CT 이미지 재구성 과정은 그림 3-4-1에 제시되어있다.

첫째, 여러 각도에서 얻어진 다수의 방사선 사진을 얻는 과정이다. 본 연구에서는 최소 72개 방사선 사진을 얻어 CT 이미지를 재구성하고자 하였으며, 일반적으로 사용한 방사선 사진 수는 180개이다. 이는 입목의 형태, 내부 결함의 위치, 결함의 형태 등을 고려하여 실험적으로 결정하였다. 여러 각도에서 방사선 사진을 얻기 위하여 이제까지는 실험실적 CT 장치를 이용하였으며, 피시험체인 목재가 회전하는 방식을 사용하였다.

둘째, CT 이미지 재구성 과정이다. 일반적인 CT 이미지 재구성 알고리즘인 FBP 법을 사용하여 CT 이미지를 재구성하였다. 그러나 본 연구에서 사용하는 X선 선원과 디지털 디텍터의 특성을 반영하지 못해, 시편의 외곽에서 오차가 발생하는 문제가 있었다. FBP 법은 Matlab R2014a(Mathworks, USA)를 이용하여 코딩되어 CT 이미지가 재구성되었다.

셋째, 재구성된 CT 이미지를 시각화 하는 과정이다. 현재는 특정 위치의 2차원 CT 이미지만 재구성 한 후 시각화 하고 있다. Matlab R2014a 프로그램은 인터프리트형 프로그램 언어를 사용하기 때문에 2차원 CT 이미지를 재구성하는데 많은 시간이 소요되기 때문이다.

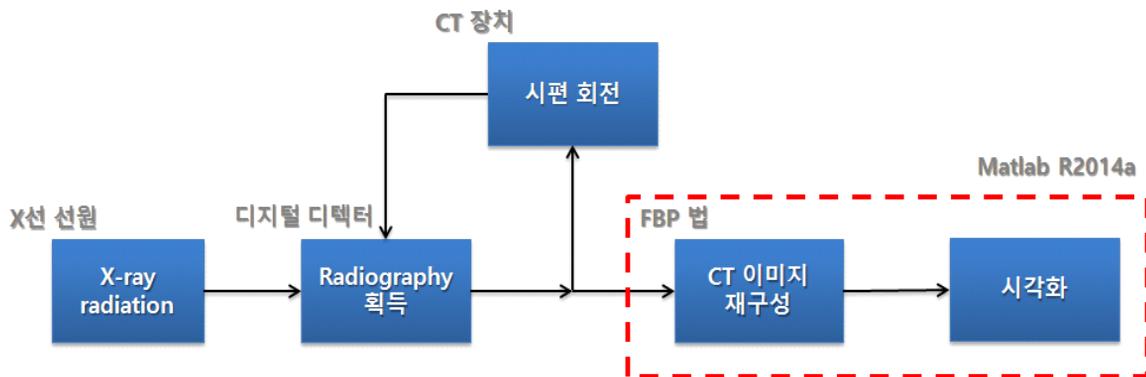


그림 3-4-1. CT 이미지 재구성 과정

이제까지 사용된 CT 이미지 재구성 과정은 앞선 연구 결과와 현장에서 본 기술을 적용하고자 할 때 다음과 같은 문제점이 있음을 확인하였다.

1. CT gantry가 시편을 회전시켜 여러 각도에서 다수의 방사선을 얻음
2. 밀도 CT 구성 불가능
3. X선 선원에서 cone beam 형태로 X선이 조사되고, 방사선 사진을 획득하기 위해 사용되는 디지털 디텍터가 평면 디텍터라는 점을 고려하지 못함
4. CT 이미지 재구성과 시각화를 위한 연산 시간이 많이 소요됨

따라서 위에 언급된 문제점을 개선하기 위하여 본 절의 연구를 진행하였다.

1. CT 이미지 재구성 프로그램 개발

현재 보유하고 있는 Matlab 프로그램으로 코딩된 CT 이미지 재구성 알고리즘(Appendix 1)은 인터프린트형 프로그램 언어로 구성되어 있어 다양한 각도에서 얻어진 많은 수의 방사선 사진 데이터를 현장에서 처리할 수 없다. 또한 본 연구에서 사용한 디지털 디텍터는 특정한 가로 단면에 대한 정보뿐만 아니라, 상하 정보도 함께 제공하는 2차원 디지털 디텍터이므로 한 방사선 사진 내에 포함되어 있는 데이터양이 매우 많다. 그렇기 때문에 인터프린트형 프로그램 언어로 코딩된 알고리즘을 이용하여서는 본 연구에서 사용한 디지털 디텍터의 데이터를 모두 사용할 수 없었다. 더군다나 현재 사용하고 있는 알고리즘은 X선 선원과 디지털 디텍터의 특성을 반영하지 못하고 있어 개선될 필요가 있었다.

프로그램 언어 중 C++는 1980년대까지 많은 사람들에게 널리 사용된 프로그래밍 전문 언어인 C를 개선하기 위해서 만들어진 프로그래밍 언어로, 고도로 복잡한 프로그램을 관리하기 위하여 개발되었다. 프로그램 언어 C++을 이용하여 프로그램을 작성할 경우 프로그램이 단순화되고, 생산량과 신뢰성이 높은 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있어(Parata, 2006), 본 연구와 같은 CT 이미지 재구성 알고리즘을 프로그래밍 하기에 적합하다고 판단되었다. 이에 서울대학교 컴퓨터 공학 연구실의 도움을 받아 CT 이미지 재구성 프로그램을 개발하였다.

가. CT 이미지 재구성 과정 개선

프로그램 개발에 앞서, 그림 3-4-2에 제시되어 있는 것과 같이 CT 이미지 재구성 과정을 개선하여, 프로그램의 흐름을 정리하였다. 앞선 일반 CT 이미지 재구성 과정의 문제점인 연속 X선의 특성을 반영하지 못하는 부분과 cone beam 형태의 X선 선원과 평면 디지털 디텍터 사용

에 따른 재구성 알고리즘이 추가 되었다. 개선된 CT 이미지 재구성 알고리즘은 Appendix 2에 제시되어 있다.

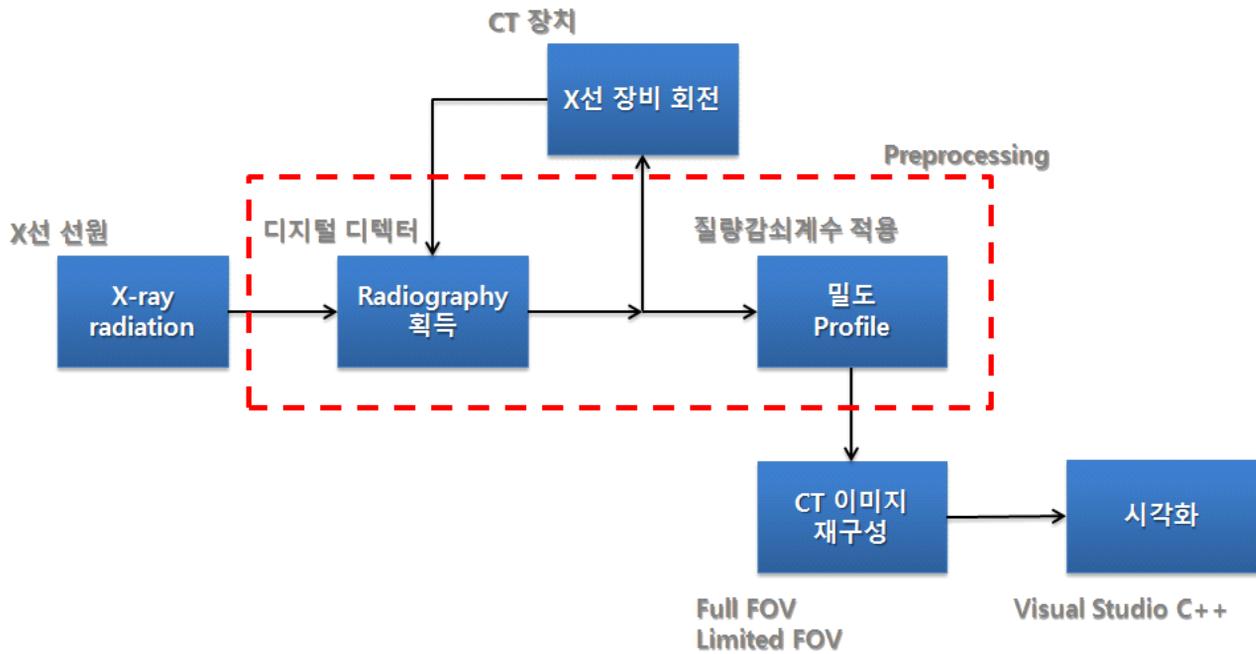


그림 3-4-2. 개선된 CT 이미지 재구성 과정

Preprocessing 과정은 획득된 방사선 사진을 밀도 profile로 변경하는 과정으로 연속 X선의 특성인 X선 투과거리에 따른 질량감쇠계수 식이 적용되는 부분이다. 그림 3-2-17에 제시되어 있는 것과 같이 질량감쇠계수를 X선 투과거리에 따른 대수함수식으로 표현되어 적용되었다.

CT 이미지 재구성 알고리즘은 본 연구에서 사용한 X선 선원과 평면 디지털 디텍터로 인해 발생할 수 있는 경우를 크게 두 가지로 가정하여 변경되었다. 첫째는 한 번의 방사선 사진으로 시험체 정보가 다 들어오는 경우로 Full FOV(Field of View)라고 일컫는 경우다. 이러한 경우에는 cone beam과 평면 디지털 디텍터를 사용함으로써 발생하는 오차를 수정하고, FBP 법을 사용하여 CT 이미지를 재구성하였다. 둘째는 한 번의 방사선 사진으로 피시험체 정보를 다 획득할 수 없는 경우로 Limited FOV라고 표현하였다. 이 경우에는 본 연구에서 사용하는 X선 선원과 디지털 디텍터에서 오는 오차 수정과 함께, 한 번의 방사선 사진으로 얻을 수 없는 시편 외곽 정보를 가정하여 재구성하는 방법을 사용하였다. 그림 3-4-3에 두 가지 경우를 도식하였다.

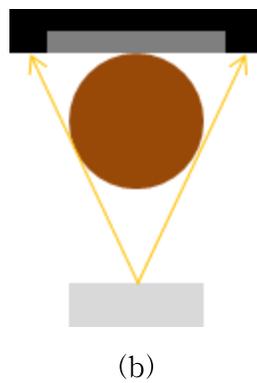
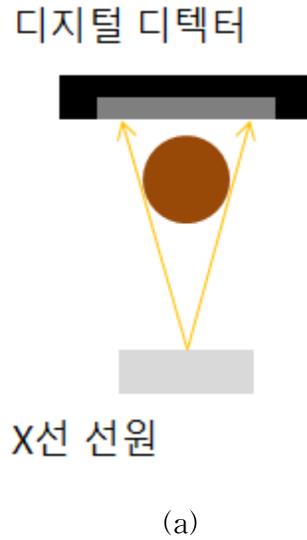


그림 3-4-3. X선 실험 시 발생할 수 있는 상황
(a) Full FOV, (b) Limited FOV

나. 시각화 프로그램 개발

개발된 CT 재구성 알고리즘은 시각화 프로그램을 통하여 구동된다. 시각화 프로그램을 따로 개발한 이유는 사용자가 CT 재구성 알고리즘에 대한 이해 없이도 프로그램 구동 방법만 파악하고 있다면 누구나 쉽게 CT 이미지를 재구성할 수 있게 하기 위해서다. 또한 현장에서 CT 이미지를 재구성할 수 있도록 laptop에서 프로그램이 구동 가능하게 만들어졌다.

최근 GPU 연산 방법을 통하여 복잡한 수식이나 많은 데이터 처리를 병렬로 처리하는 기술이 개발되고 있다. 본 연구에서도 CT 이미지를 재구성하기 위해서 필요한 방사선 사진 데이터

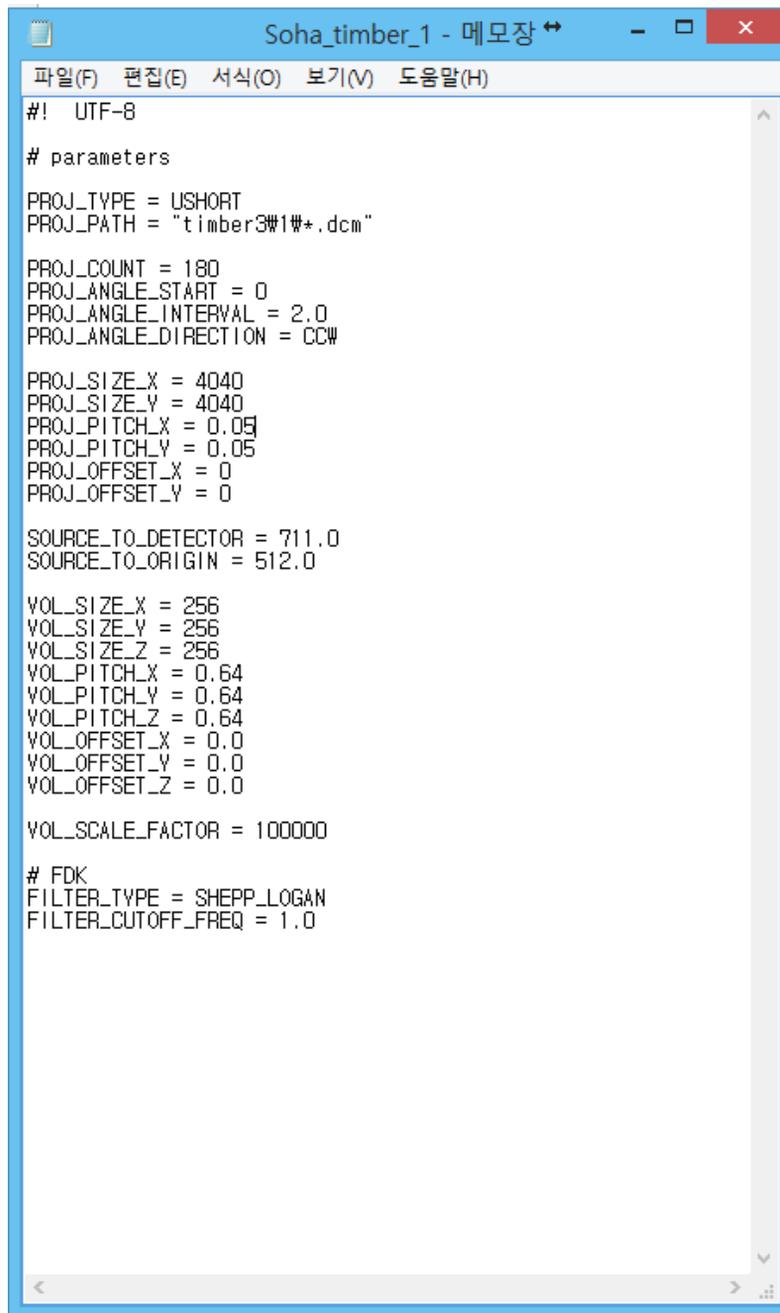
가 많기 때문에 GPU 연산 방법을 적용하여 3차원 CT 이미지를 재구성하였다. CT 이미지를 재구성하는데 소요되는 시간은 약 1분 정도이다.

○ 시각화 프로그램 구성

시각화 프로그램이 구동되기 위해서는 세 가지가 필요하다.

첫째, CT 이미지를 재구성하기 위한 데이터. 여러 각도에서 얻어지는 방사선 사진은 디지털 디텍터의 프로그램에 따라 자동으로 저장된다. 이때 방사선 사진이 저장될 때 파일 형식은 DICOM 또는 JPEG 파일로 지정하여 저장할 수 있다. 파일명은 (N번째 촬영-1).dcm 또는 (N번째 촬영-1).jpg로 저장하여야 오류 없이 프로그램이 구동된다. 예를 들어 4번째 촬영한 방사선 사진 파일을 저장하고자 한다면 3.dcm이라고 저장되어야 할 것이다.

둘째, 재구성 설정 파일. 재구성 설정 파일에는 X선 CT 촬영 조건과 CT 재구성 시 필요한 설정을 포함하고 있다. 파일 이름은 반드시 영문으로 작성되어야 하며, 확장자는 text 파일이다. 그림 3-4-4에 재구성 설정 파일의 모습이 제시되어 있다.



```
파일(F) 편집(E) 서식(O) 보기(V) 도움말(H)
#! UTF-8
# parameters
PROJ_TYPE = USHORT
PROJ_PATH = "timber3\1#\*.dcm"

PROJ_COUNT = 180
PROJ_ANGLE_START = 0
PROJ_ANGLE_INTERVAL = 2.0
PROJ_ANGLE_DIRECTION = CCW

PROJ_SIZE_X = 4040
PROJ_SIZE_Y = 4040
PROJ_PITCH_X = 0.05
PROJ_PITCH_Y = 0.05
PROJ_OFFSET_X = 0
PROJ_OFFSET_Y = 0

SOURCE_TO_DETECTOR = 711.0
SOURCE_TO_ORIGIN = 512.0

VOL_SIZE_X = 256
VOL_SIZE_Y = 256
VOL_SIZE_Z = 256
VOL_PITCH_X = 0.64
VOL_PITCH_Y = 0.64
VOL_PITCH_Z = 0.64
VOL_OFFSET_X = 0.0
VOL_OFFSET_Y = 0.0
VOL_OFFSET_Z = 0.0

VOL_SCALE_FACTOR = 100000

# FDK
FILTER_TYPE = SHEPP_LOGAN
FILTER_CUTOFF_FREQ = 1.0
```

그림 3-4-4. 재구성 설정 파일 구성

재구성 설정 파일 내에서 CT 재구성 시 수정해야 하는 부분은 다음과 같다.

1. PROJ_PATH = "timber3\1*.dcm"

- 저장된 방사선 사진 위치

2. PROJ_COUNT = 180

- 방사선 사진 촬영 수

3. PROJ_ANGLE_INTERVAL = 2.0

- 1회 촬영 시 X선 선원과 디지털 디텍터가 회전한 각도

4. PROJ_ANGLE_DIRECTION = CCW

- X선 선원과 디지털 디텍터 회전 방향 (위에서 봤을 때)

5. PROJ_SIZE_X = 4040

- 디지털 디텍터의 전체 가로 픽셀 수

6. PROJ_SIZE_Y = 4040

- 디지털 디텍터의 전체 세로 픽셀 수

7. PROJ_PITCH_X = 0.05

- 디지털 디텍터 가로 셀 하나의 크기 (단위: mm)

8. PROJ_PITCH_Y = 0.05

- 디지털 디텍터 세로 셀 하나의 크기 (단위: mm)

9. PROJ_OFFSET_X = 0

- 회전베어링 중심에서 디지털 디텍터가 가로로 벗어난 길이 (단위: mm)

10. PROJ_OFFSET_Y = 0

- 회전베어링 중심에서 디지털 디텍터가 세로로 벗어난 길이 (단위: mm)

11. SOURCE_TO_DETECTOR = 711.0

- X선 선원과 디지털 디텍터 사이의 거리(단위: mm)

12. SOURCE_TO_ORIGIN = 512.0

- X선 선원과 회전 베어링 중심까지의 거리(단위: mm)

13. VOL_SIZE_X = 256

- 재구성 CT 이미지 가로 픽셀 크기

14. VOL_SIZE_Y = 256

- 재구성 CT 이미지 세로 픽셀 크기

15. VOL_SIZE_Z = 256

- 재구성 CT 이미지 높이 방향 픽셀 크기

16. VOL_PITCH_X = 0.64

- 재구성될 volume을 구성하는 voxel 하나의 가로방향 공간상 크기(mm)

17. VOL_PITCH_Y = 0.64

- 재구성될 volume을 구성하는 voxel 하나의 세로방향 공간상 크기(mm)

18. VOL_PITCH_Z = 0.64

- 재구성될 volume을 구성하는 voxel 하나의 높이방향 공간상 크기(mm)

19. VOL_OFFSET_X = 0.0

- 재구성될 volume을 구성하는 voxel이 가로방향으로 벗어난 길이(mm)

20. VOL_OFFSET_Y = 0.0

- 재구성될 volume을 구성하는 voxel이 세로방향으로 벗어난 길이(mm)

21. VOL_OFFSET_Z = 0.0

- 재구성될 volume을 구성하는 voxel이 높이방향으로 벗어난 길이(mm)

22 FILTER_TYPE = SHEPP_LOGAN

- 재구성 시 사용 필터, ram_lak, cosine, shepp_logan, hamming, hann 등으로 설정 가능

셋째, 컴퓨터. 프로그램을 구동하기 위해서는 Window 8.1 운영체제와 Geforce 사(社) GFX 700 또는 600 시리즈, 혹은 동등의 사양을 가지는 Geforce 사(社) 그래픽 카드를 탑재한 컴퓨터가 필요하다.

○ 시각화 프로그램 인터페이스

시각화 프로그램을 실행 시킨 후 열기 버튼(그림 3-4-5에서 ①)을 눌러 재구성 설정 파일을 선택하면, CT 이미지 재구성 설정에 따라 CT 이미지가 재구성된다. 그림 3-4-5는 앞서 결과가 제시된 서까래 부후 부재에 대한 CT 이미지 재구성 결과가 함께 나와 있는 시각화 프로그램 인터페이스다. 시각화 프로그램은 크게 Axial, Sagittal, Coronal, 그리고 VR 화면으로 구성되어 있다. Axial 화면은 시편의 단면 영상을 나타내며, Sagittal과 Coronal 화면은 피시힘체의 측면을 동쪽과 북쪽에서 본 모습을 보여준다. 마지막으로 VR 화면은 피시힘체의 3차원 CT 이미지 재구성 결과를 보여주고 있다.

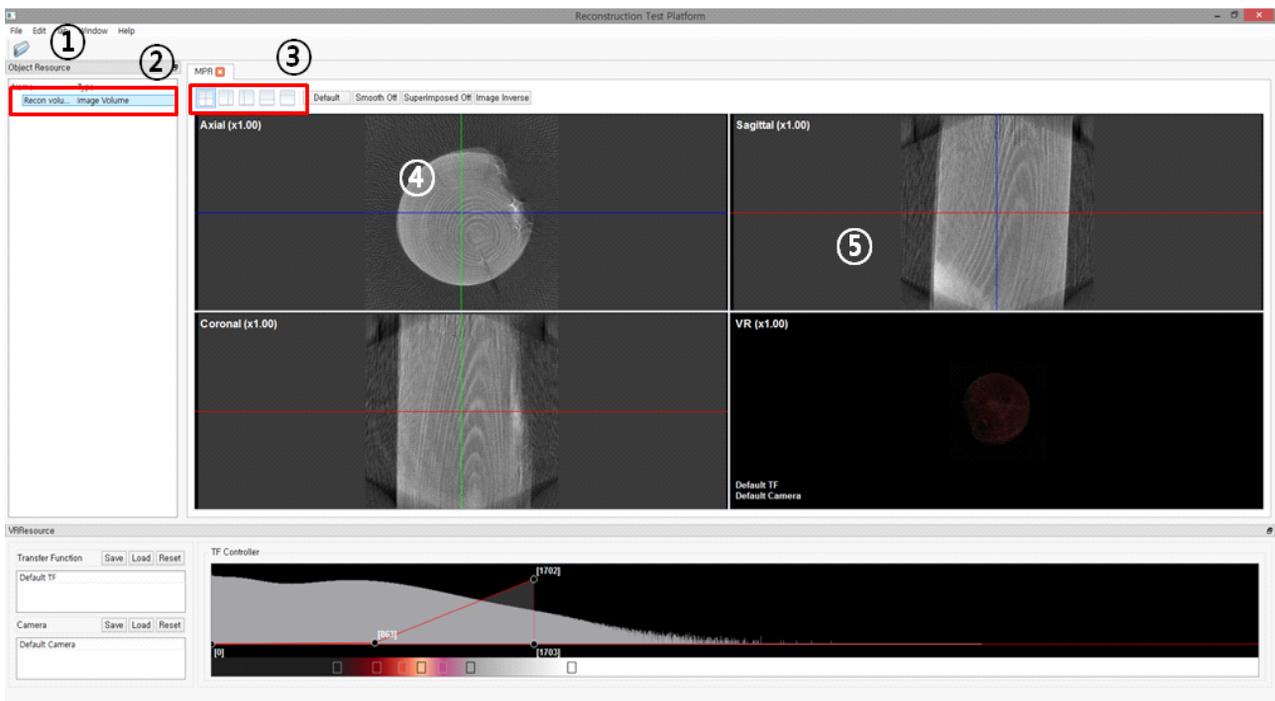


그림 3-4-5. 시각화 프로그램 모습

그림 3-4-5에서 ② 위치에 있는 파일 이름을 위에서 오른쪽 마우스 버튼을 누르면, 현재 재구성된 파일명을 바꾸거나 Axial 이미지를 저장할 수 있다. 또한 ③ 위치에는 화면 구성을 다르게 선택할 수 있는 버튼이 있어, 사용자가 관심을 가지는 이미지를 크게 볼 수 있다. ④, ⑤ 위치에 있는 직선은 Axial, Sagittal, Coronal 화면이 구성된 위치를 나타낸다. 마우스를 이용하여 각 선을 이동시키면 화면을 바꿀 수 있다. 이를 이용하여 관심 위치의 CT 이미지를 확인할 수 있다.

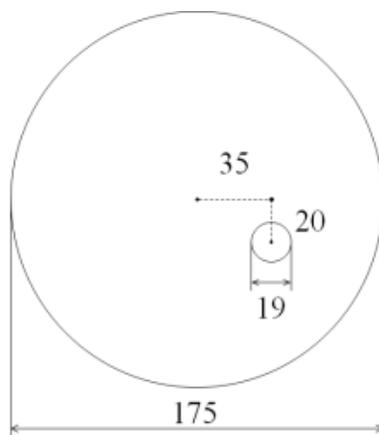
다. 밀도 CT 이미지 구성

(1) 재료 및 방법

재구성된 CT 이미지 재구성 알고리즘을 검증하기 위하여, 밀도 CT 이미지를 구성하였다. 사용된 시편은 직경 175mm인 리기다소나무이었다. 준비한 리기다소나무의 기건 밀도와 함수율은 각각 0.43g/cm^3 , 12%이었으며, 밀도 CT 이미지의 정확도를 검증하기 위하여 그림 3-4-6와 같이 시편의 중심으로부터 가로, 세로 각각 35mm, 20mm 떨어진 위치에 타공하여 인공 열화를 제작하였다.



(a)



(b)

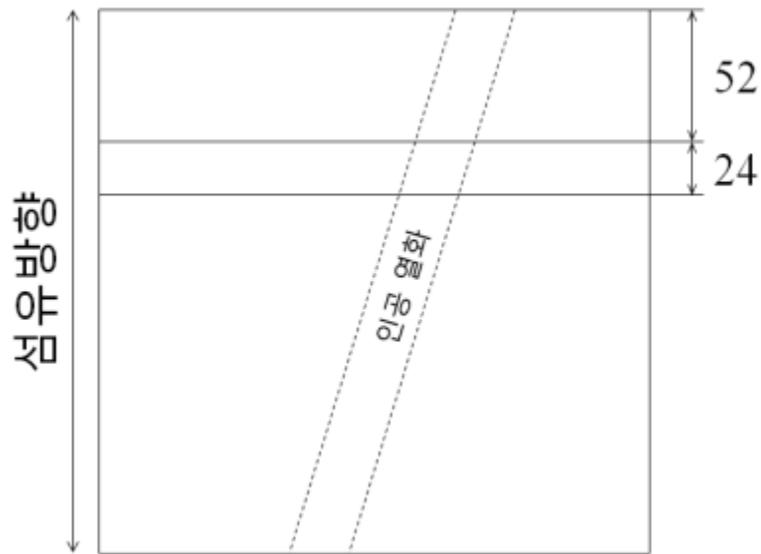
그림 3-4-6. 밀도 CT 이미지 재구성을 위한 시편 모습과 그 정보

(a) 리기다소나무 모습, (b) 윗면과 인공열화 위치

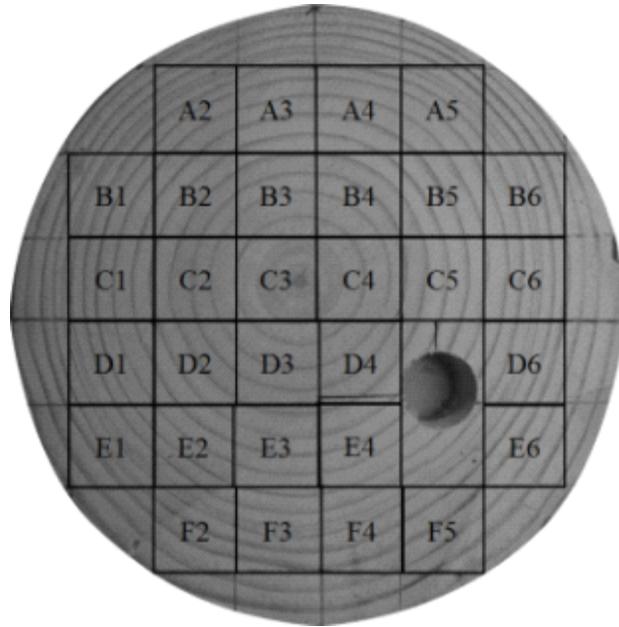
방사선 사진을 얻기 위하여 관전압 37kv, 관전류 1.5mA로 조사되는 X선에 디지털 디텍터를 5초간 노출시켰다. 또한 여러 각도에 따른 방사선 사진을 얻기 위하여, 실험실적 스케일의 CT 장비(그림 3-2-6)을 이용하여 시편을 2°씩 회전시켜 가며 촬영을 진행하였다. X선 CT 이미지 재구성에 사용된 방사선 사진은 모두 180장이다.

그림 3-4-1과 같은 과정으로 X선 CT 이미지를 재구성하였다. CT 이미지 재구성 알고리즘에서 사용된 측정 상황은 Limited FOV이었다. 재구성된 CT 이미지는 시각화 프로그램을 이용하여 화면에 표시되었으며 결과 분석에 사용되었다.

밀도 CT 이미지의 정확도를 확인하기 위하여 CT 이미지가 구성된 위치에서 높이 24mm인 디스크를 제작하여, 제작된 디스크에서 소시편을 만들어 기건 밀도를 측정하였다. 기건 밀도 시험편의 위치는 그림 3-4-7에 나와 있다.



(a)



(b)

그림 3-4-7. 밀도 CT 검증을 위한 기건 밀도 측정 위치 (단위: mm)

(a) 원주목에서 기건 밀도 측정을 위한 디스크 제작 위치, (b) 디스크 내에서 기건 밀도가 측정된 위치와 시편 번호

(2) 결과 및 토의

(가) 축방향 CT 이미지 구성

그림 3-4-8과 같이 원주목에 대하여 방사선 사진을 얻었다. 관전압 37kV, 관전류 1.5mA의 약한 X선 세기임에도 불구하고 연륜과 인공결함이 뚜렷이 관찰되는 것을 확인할 수 있었다.

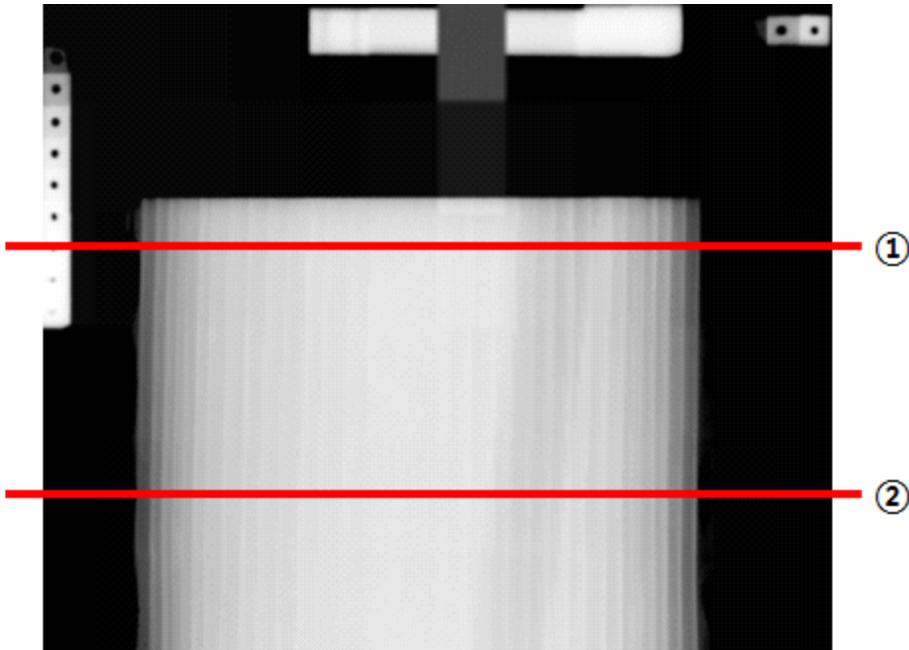
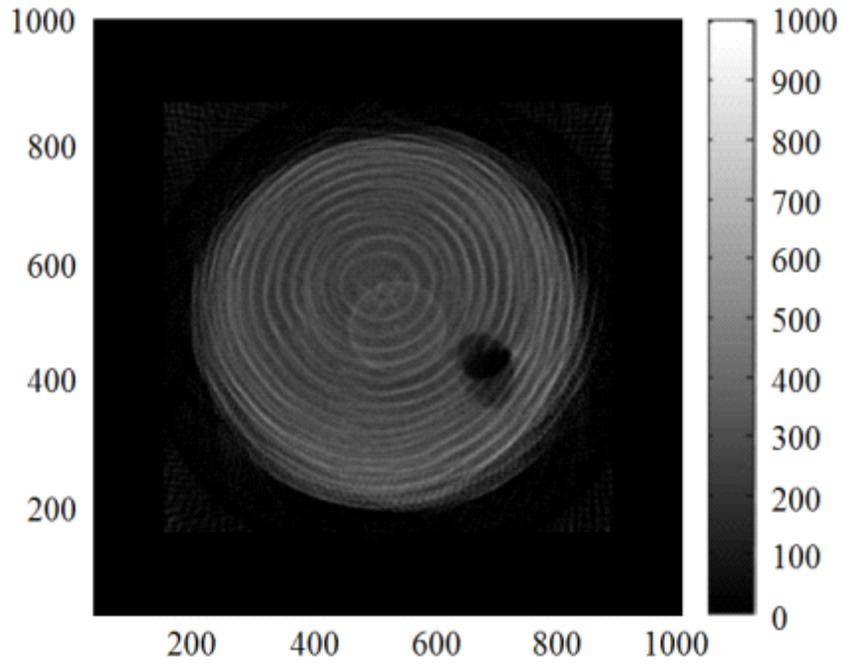
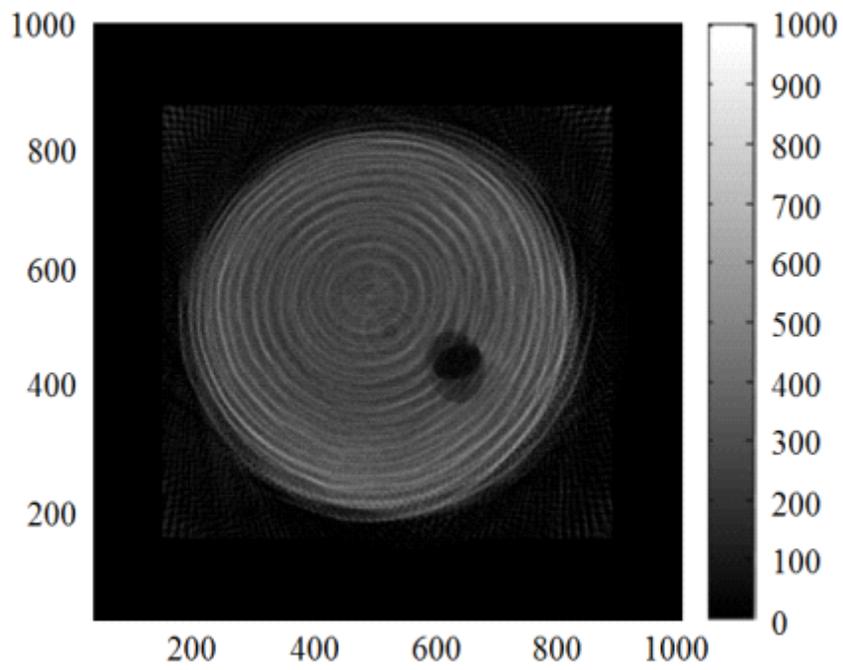


그림 3-4-8. 원주목에 대한 방사선 사진 결과

한 번의 X선 사진에서 시편의 축방향으로 약 20cm의 정보를 얻을 수 있기 때문에 해당 범위 내 부후가 의심되는 위치의 CT 이미지를 쉽게 구성할 수 있다. 그림 3-4-9에 그림 3-4-8의 ①과 ② 위치에서 얻어진 CT 결과가 제시되어 있다. 그림 3-4-9a에서 볼 수 있듯이 19mm의 인공 열화를 비스듬히 제작하였기 때문에 그림 3-4-8의 ② 위치에서 인공 열화가 원주목 수 근처에서 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3-4-10에 3차원 CT 이미지 결과가 제시되어 있다. 2차원 CT 이미지에 비하여 열화의 위치나 크기 등을 명확히 확인할 수 있었다.



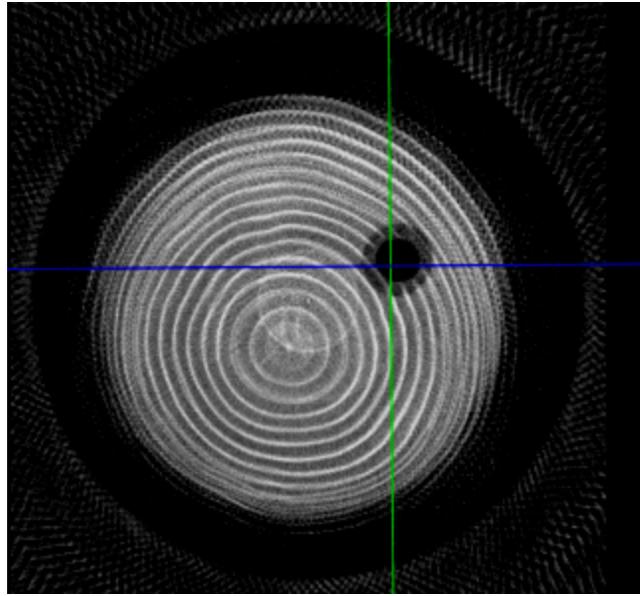
(a)



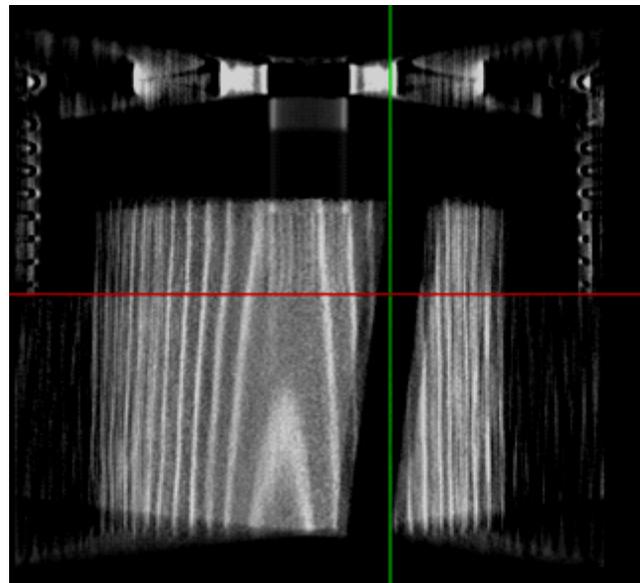
(b)

그림 3-4-9. 축방향 CT 이미지 결과

(a) 그림 3-4-8 ① 위치 (b) 그림 3-4-8 ② 위치



(a)



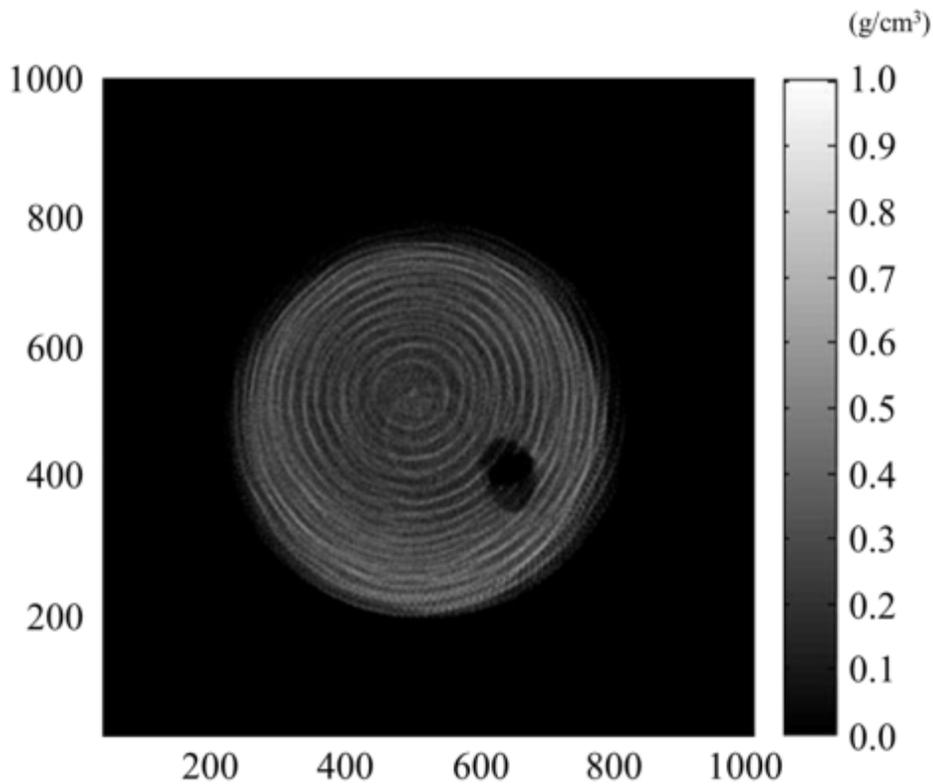
(b)

그림 3-4-10. 3차원 CT 이미지 결과
(a) Axial 화면 (b) Coronal 화면

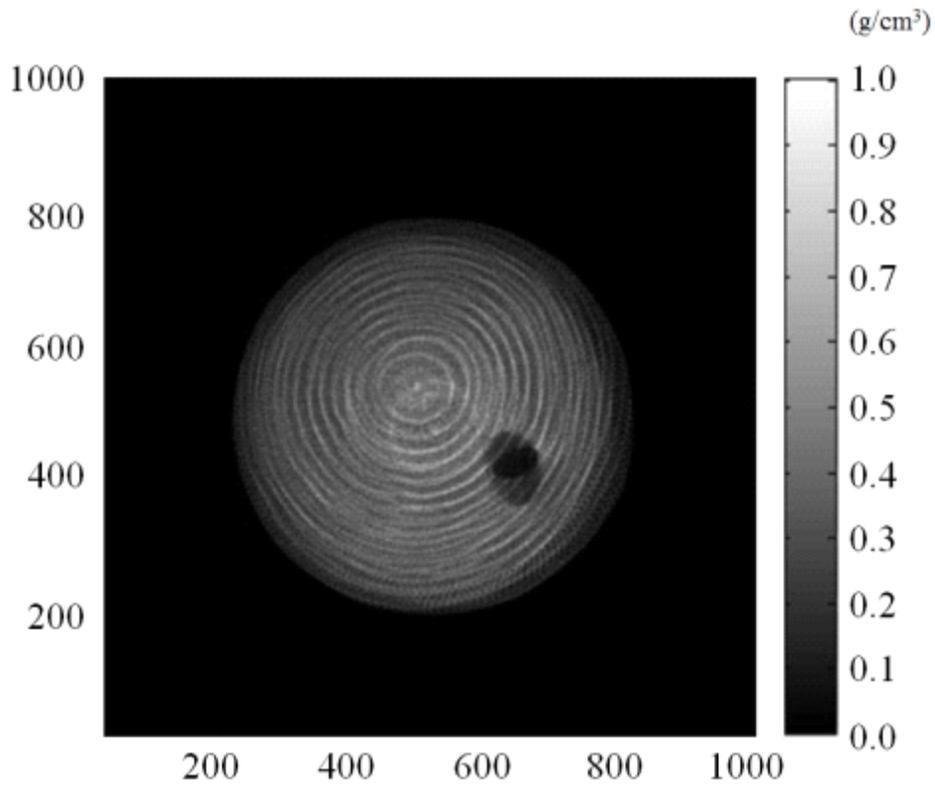
(나) 밀도 CT 이미지 구성

얻어진 180개의 방사선 사진은 전체 결과에 대하여 질량감쇠계수 0.1844(상수)와 X선 투과 거리별 질량감쇠계수 식을 적용하여 밀도 profile로 전환되었다. 얻어진 두 가지 밀도 profile을 이용하여 CT 이미지를 재구성하였다(그림 3-4-2, CT 이미지 재구성 과정 참고). 이를 통하여 X선 투과 거리별 질량감쇠계수를 적용할 때 밀도 예측 정확도를 검증할 수 있을 것이다.

그림 3-4-11에 두 가지 밀도 CT 이미지가 제시되어 있다. 두 영상 모두 인공 결함과 연륜이 잘 표현되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 질량감쇠계수 0.1844(상수)를 적용한 밀도 CT 이미지는 중앙 부분의 밀도가 주변부의 비해 낮게 표현된 반면에 X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수 식을 적용한 밀도 CT 이미지는 고른 밀도 분포를 가진 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

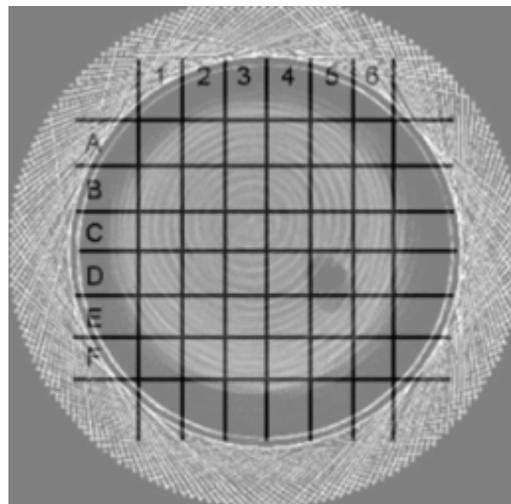
그림 3-4-11. 밀도 CT 결과

(a) 질량감쇠계수 0.1844(상수)를 적용한 밀도 CT 이미지, (b) X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수 식을 적용한 밀도 CT 이미지

이에 그림 3-4-12과 같이 시편을 제작하여 실제 기건 밀도와 밀도 CT 이미지에서 얻어진 예측 밀도 값과 비교하였다.



(a)



(b)

그림 3-4-12. 실제 기건 밀도와 예측 밀도 비교

(a) 실제 기건 밀도 측정 시편 모습, (b) 밀도 CT 이미지에서 밀도를 예측한 위치

표 3-4-1은 질량감쇠계수 0.1844(상수)를 적용한 결과로, 시편의 중앙 부분은 과소평가된 반면에 외곽부분은 과대평가된 것을 확인할 수 있다. 식 2를 밀도에 대해서 정리하면 $\rho_0 = \ln(I_0/I) / \mu/t$ 가 된다. 이 때 질량감쇠계수 0.1844는 X선 투과 거리가 11.99cm 이하 일 때 질량감쇠계수 0.2226보다 작고, X선 투과 거리 15.36cm 이상 일 때 질량감쇠계수 0.1348보다 크기 때문에 시편의 중앙 부분은 과소평가된 반면에 외곽부분은 과대평가되었다고 사료된다.

표 3-4-1. 실제 기건 밀도와 질량감쇠계수 0.1844를 이용한 밀도 CT 이미지 내 예측 밀도 비교

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|
| A | 치수법 | | 0.37 | 0.40 | 0.40 | 0.42 | |
| | X선 CT | | 0.66 | 0.48 | 0.43 | 0.70 | |
| B | 치수법 | 0.4 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.44 | 0.45 |
| | X선 CT | 0.72 | 0.35 | 0.32 | 0.34 | 0.37 | 0.73 |
| C | 치수법 | 0.42 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.43 | 0.45 |
| | X선 CT | 0.65 | 0.36 | 0.37 | 0.32 | 0.33 | 0.68 |
| D | 치수법 | 0.41 | 0.42 | 0.41 | - | - | 0.46 |
| | X선 CT | 0.64 | 0.33 | 0.33 | - | - | 0.55 |
| E | 치수법 | 0.42 | 0.43 | 0.41 | 0.41 | - | 0.46 |
| | X선 CT | 0.62 | 0.32 | 0.32 | 0.34 | - | 0.67 |
| F | 치수법 | | 0.45 | 0.48 | 0.46 | 0.46 | |
| | X선 CT | | 0.65 | 0.53 | 0.62 | 0.64 | |

표 3-4-2는 X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수를 이용한 밀도 CT 이미지 결과이다. 전체적으로 밀도 예측의 정확도가 높았다. 그림 3-4-13과 같이 실제 밀도와 밀도 CT 이미지의 예측 밀도 값에 대하여 RMSE(Root Mean Square Error)를 비교하였을 때 질량감쇠계수 0.1844(상수)를 적용한 밀도 CT 이미지는 0.165g/cm³, X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수 식을 적용한 밀도 CT 이미지는 0.041g/cm³로 후자의 정확도가 높은 것으로 확인되었다. 그러나 X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수를 적용한 CT 이미지에서 시편 중심에 비하여 시편 외곽의 RMSE가 다소 높은 것으로 확인되었다; 시편 중앙: 0.012g/cm³, 시편 외곽: 0.054g/cm³

표 3-4-2. 실제 밀도와 X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수를 이용한 밀도 CT 이미지 내 예측 밀도 비교

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|
| A | 치수법 | | 0.37 | 0.40 | 0.40 | 0.42 | |
| | X선 CT | | 0.36 | 0.38 | 0.39 | 0.41 | |
| B | 치수법 | 0.4 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.44 | 0.45 |
| | X선 CT | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.41 | 0.41 | 0.43 |
| C | 치수법 | 0.42 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.43 | 0.45 |
| | X선 CT | 0.37 | 0.41 | 0.41 | 0.43 | 0.42 | 0.37 |
| D | 치수법 | 0.41 | 0.42 | 0.41 | - | - | 0.46 |
| | X선 CT | 0.39 | 0.41 | 0.40 | - | - | 0.38 |
| E | 치수법 | 0.42 | 0.43 | 0.41 | 0.41 | - | 0.46 |
| | X선 CT | 0.37 | 0.42 | 0.41 | 0.40 | - | 0.44 |
| F | 치수법 | | 0.45 | 0.48 | 0.46 | 0.46 | |
| | X선 CT | | 0.37 | 0.42 | 0.36 | 0.38 | |

CT 이미지를 통하여 열화를 탐지하는 것은 밀도 CT를 이용하지 않고도 그림 3-4-9 또는 그림 3-4-10에서 볼 수 있듯이 가능하다. 그러나 인공열화와 달리 입목 내부에서 발생하는 부후의 경우, 열화와 건전재 사이가 연속적으로 이루어져 있는 경우가 많다고 예상되기 때문에 열화와 건전재의 경계치를 설정하는 것이 중요하다. 경계치 설정에 있어서 일반 CT 이미지에서는 사용자 또는 검사자의 주관이 개입될 수 있으나 밀도 CT에서는 건전재의 밀도 값을 기반으로 하여 열화정도를 판단할 수 있기 때문에 열화 판단 알고리즘을 개발한다면 객관적으로 신속하게 열화를 판단할 수 있을 것으로 기대된다.

X선 투과 거리에 따른 질량감쇠계수를 이용한 밀도 CT가 정확도가 높았으나, 시편 외곽부분의 RMSE나 그림 3-4-13에서 F3의 기건 밀도 예측 정확도가 다소 낮았다. 실제로 질량감쇠계수를 측정할 때 선원의 관전압이 높아질수록 X선 감쇠를 측정할 수 있는 목재의 두께가 두꺼워지고, F3 위치 또는 시편의 외곽부분에서 밀도 예측이 실제보다 낮아지는 것을 통해서, 시편의 두께가 얇은 부분의 X선 감쇠를 디지털 디텍터가 탐지하지 못했기 때문이라고 사료된다. 디지털 디텍터의 감도를 높일 수 있는 방안도 고려할 수 있으나 장비의 비용 문제를 고려하지 않을 수 없으며, 설사 시편의 외곽 부분을 검사하고자할 때는 육안 검사 또는 다른 비파괴 검사법을 통하여도 충분히 검사를 실시할 수 있기 때문에 본 절의 결과를 통해서 충분히 좋은 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

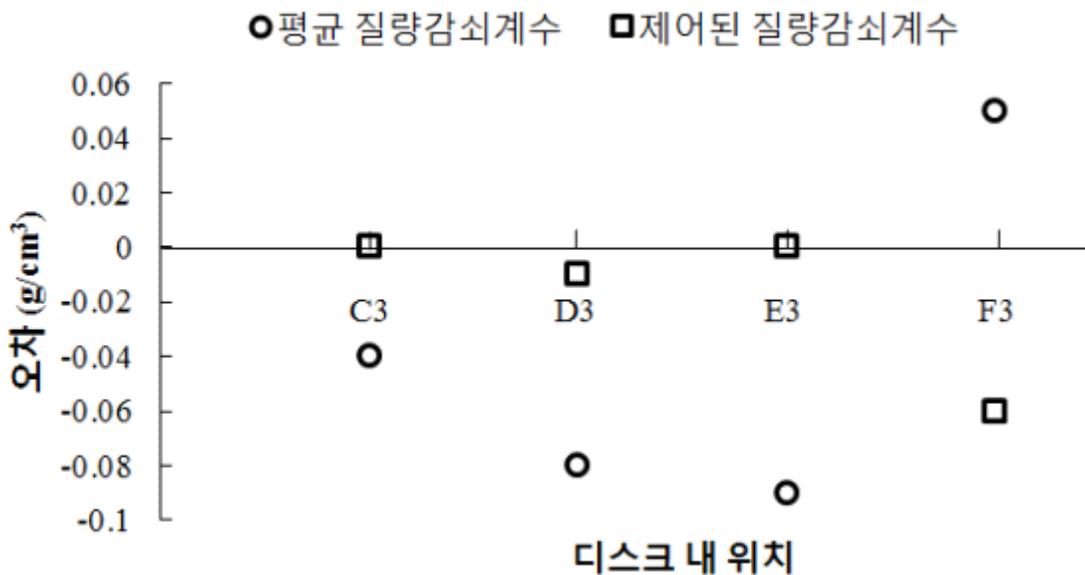


그림 3-4-13. 수법으로 측정된 기건 밀도와 밀도 CT 이미지를 이용하여 예측한 밀도 오차=밀도 CT를 이용한 예측 밀도-치수법으로 측정된 기건 밀도

라. CT 이미지 내 열화 탐지 정확도 개선

인간은 다양한 정보를 얻기 위해서 여러 가지 경로를 이용하고 있다. 통계에 의하면 인간이 취득하는 정보의 70%는 시각작용에 의해 얻는다고 알려져 있다. 과거에는 이러한 정보를 문자라는 매체를 통하여 전달되는 경우가 많았으나, 컴퓨터와 정보기술의 발달로 영상을 통하여 정보를 획득하는 경우가 많아지고 있다. 본 연구에서 사용하고 있는 CT 이미지 역시 그와 같은 경우라고 할 수 있다.

그러나 시각은 다소 주관적이라 열화를 탐지하는데 있어 개인별로 다른 판단 근거를 내릴 수 있다. 이런 문제점을 해결할 수 있는 방법은 일정한 근거를 기반으로 영상 처리를 하여 부후재와 건전재를 구분하는 것이 될 수 있다.

○ 이진 영상 처리

(1) 재료 및 방법

영상 처리를 이용하여 CT 이미지의 열화 탐지 정확도가 개선된 것을 확인하기 위하여 그림 3-3-6인 방사선 사진 수에 따른 CT 이미지를 재구성한 결과를 이용하였다.

영상 처리를 하는 데이터는 칼라, 그레이, 이진으로 분류할 수 있다. 본 연구에서 사용되고 있는 CT 이미지의 경우 gray scale 값을 X선이 투과한 거리에 따른 질량감쇠계수를 적용하여 밀도 값으로 변환하였기 때문에 gray data라고 할 수 있다. gray data는 흑백사진과 같이 정보를 농담으로 나타내주므로 색깔의 구분은 없지만 작은 데이터 용량을 이용하여 정보를 효과적으로 표현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 그레이 영상을 경계값(threshold)를 이용하여 흑과 백의 두 가지로 데이터를 취급할 수 있는데 이러한 영상 처리방법을 이진 영상 처리(binary image processing)이라고 한다. 이진 영상 처리는 그 과정이 단순하므로 영상 처리의 실험에 널리 이용되고 있다. 입목 내 부후 또는 입목 내에서 발생할 수 있는 할렬의 경우에 그것들의 밀도는 건전부의 밀도보다 낮고, 웅이 같은 천연 결함은 건전부의 밀도보다 높기 때문에, 입목 내에서 발생할 수 있는 결함을 이진 영상 처리를 이용하면 천연결함과 내부 부후를 구분할 수 있을 것으로 사료되었다.

앞서 언급했듯이, 이진 영상 처리는 gray data의 경계값을 처리하는 과정인데, 경계값 처리라는 것은 입력 영상의 각 화소에 대해서 명도가 있는 일정 값 이상의 경우 대응하는 출력 영상의 화소 값을 1로, 그 외의 경우에는 0으로 처리하는 것이다. 경계 값 처리를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$g(x, y) \begin{cases} 1 & \text{if, } f(x, y) \geq t \\ 0 & \text{if, } f(x, y) < t \end{cases} \quad (11)$$

여기서,

$f(x, y)$ 는 영상 처리 전의 (x, y) 에 있는 화소의 농도 값,

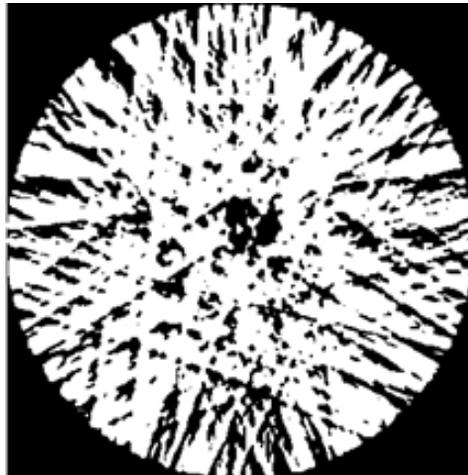
$g(x, y)$ 는 영상 처리 후의 (x, y) 에 있는 화소의 농도 값,

t 는 경계 값

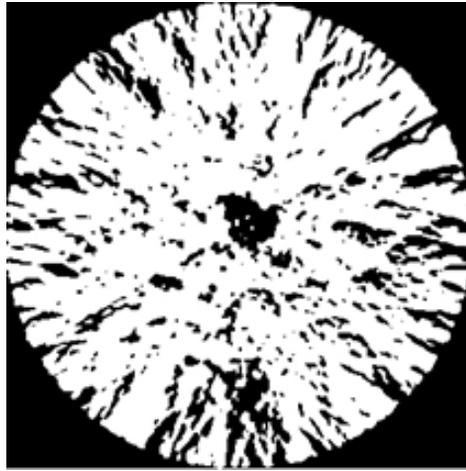
밀도 CT 이미지 검증을 위한 디스크 시편의 평균 기건 밀도는 0.43g/cm^3 이었다. 강춘원 등 (2008)에 따르면 침엽수의 경우 조재와 만재의 밀도차이는 약 2.5배가 난다고 보고하였다. 그렇기 때문에 건전재의 가장 낮은 밀도인 조재의 밀도 0.12g/cm^3 을 건전재와 부후재의 경계 값 처리에 사용하여 영상을 구성하였다.

(2) 결과 및 토의

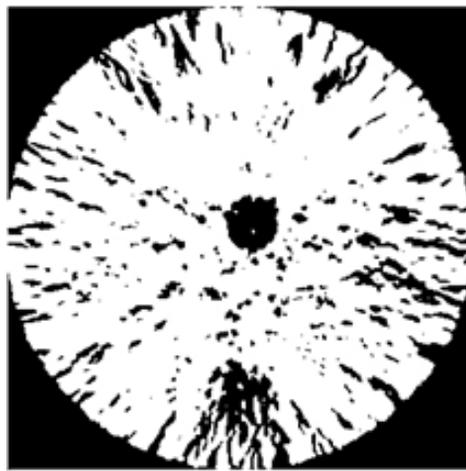
72개의 방사선 사진을 이용한 그림 3-4-14d를 살펴보면 열화뿐만 아니라 피실험체 내에서 밀도가 낮은 부분을 화소 값이 0으로 표시하여 사용자가 밀도 분포를 쉽게 파악할 수 있게 도움을 주고 있는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



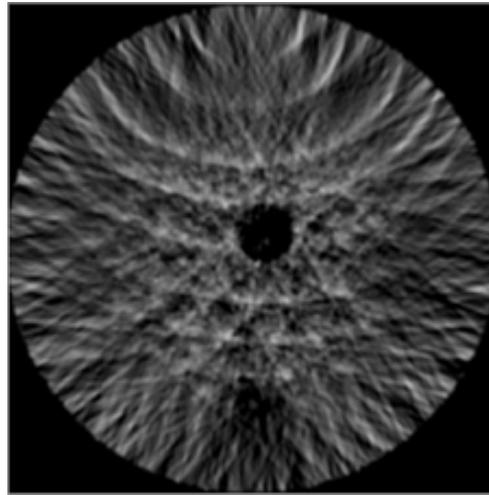
(c)



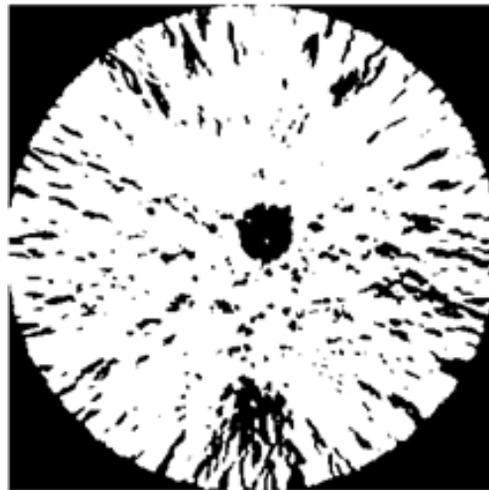
(d)

그림 3-4-14. 이진 영상 처리를 한 CT 이미지 결과
(a) 방사선 사진 수 9, (b) 방사선 사진 수 18,
(c) 방사선 사진 수 36, (d) 방사선 사진 수 72

특히 36개의 방사선 사진을 이용하여 CT 이미지를 구성한 결과인 그림 3-4-15를 보면, 외곽 부분의 인공 열화를 이진 영상 처리되었을 때 보다 명확하게 표시하고 있음을 확인할 수 있다. 입목 내에서 발생할 수 있는 열화는 본 연구에서 사용된 인공 열화와 같이 천공 형태로 발생할 수도 있으나 건진 부분과 열화된 부분이 점진적으로 밀도의 변화가 생길 수 있으므로, 이진 영상 처리를 통하여 점진적으로 발생하는 열화의 경계치를 설정하여 해석의 용이함을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.



(a)



(b)

그림 3-4-15. 36개의 방사선 사진을 이용한 CT 이미지의 이진 영상 처리 효과

(a) 원본 CT 이미지 (b) 이진 처리된 CT 이미지

2. CT 장치 개발 고려 사항 및 개발 내역

가. 고려 사항

현장에서 입목 내부 평가를 위한 X선 CT 기술 개발을 위해 언급된 문제점 중 하나는 CT 장치가 시편을 회전시키는 것이다. 입목이 베어져 CT 장치에 올라가지 않는 이상 CT 이미지 구성을 위해 여러 각도에서 다수의 방사선 사진을 얻을 수 없다. 그런 이유로 입목을 베지 않고, 현장에서 CT 이미지를 구성하기 위한 CT 장치의 개발이 필요하다. 따라서 일정 각도로 X선 선원과 디지털 디텍터를 회전시켜가며 방사선 사진을 얻을 수 있는 장비를 개발하였다. 현장에서 CT 이미지를 얻기 위한 장비 개발을 위해서 우리나라 산림의 특성을 고려하여 현장 적용 CT 장치 개발을 진행하였다. 현장에서 입목에 적용하기 위한 장비 개발 시 고려한 사항은 다음과 같다.

첫째, 산림청은 2008년 산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙을 개정하여 지금까지는 공·사유림을 기준으로 소나무의 경우 50년, 잣나무 60년, 낙엽송 40년과 같이 수종별 일정 수령이 되어야만 벌채가 가능하도록 했으나 2008년 6월부터는 모든 수종에 대하여 흉고 직경이 30cm 이상인 나무가 50% 이상 분포하는 산림에 대해서는 나무를 벌채하여 목재로 이용할 수 있도록 개정함에 따라, 흉고 직경이 30~40cm 정도의 입목 내부를 검사할 수 있는 CT 장비를 개발하고자 하였다.

둘째, 우리나라의 입목 또는 임지는 평지가 아니라 경사지에 있는 점을 고려하여 CT 장비 무게를 경량화 하고 비탈진 산지에서 CT 장비의 설치가 용이하도록 고정 장치를 고려하였다.

셋째, 최소 72회 이상의 방사선 사진 획득, X선 선원의 유효 선원 각도를 고려하여 X선 선원과 디지털 디텍터 간 거리 또는 X선 선원과 피시험체 간 거리가 490mm 이상, 입목 단면 비파괴 측정을 위한 선원과 입목의 최단 거리 측정 도구와 같은 앞선 연구 결과를 포함할 수 있도록 장비를 설계하였다.

나. 개발 내역

(1) 현장 적용 CT 장치 컨셉트

그림 3-4-16에 현장 적용 CT 장치의 컨셉트가 제시되어 있다. 본 장비의 특징은 다음과 같다.

- 현장에서 조립 가능한 장비 구성 및 케이스에 장비 보관 가능
- 입목에 직접 설치할 수 있는 장치
- X선 선원과 디지털 디텍터, CT 장치 회전 원격 조종 가능
- 소형 발전기를 이용하여 X선 CT 장비 전체 구동 가능

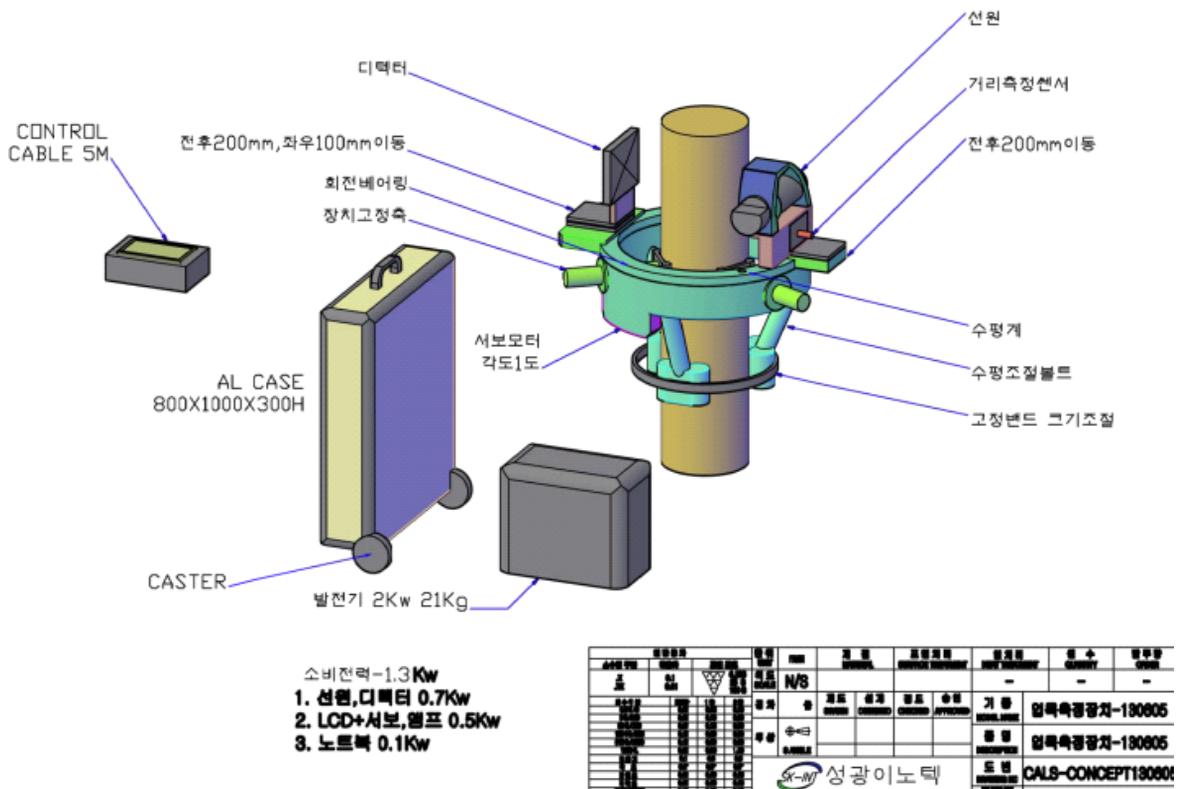


그림 3-4-16. 현장 적용을 위한 CT 장치 컨셉트

(2) 현장 적용 CT 장치 상세도면

현장 적용 CT 장치의 컨셉트를 바탕으로 그림 3-4-17과 같이 현장 적용 CT 장비의 상세도면이 완성되었다. 흉고 직경이 30~40cm 정도인 입목 내부 검사를 위하여 X선 선원과 디지털 디텍터를 회전시킬 수 있는 베어링이 설치되었는데, 직경은 600mm이다. 또한 X선 선원에서 조사되는 X선 focal spot과 디지털 디텍터의 중심이 일직선이 되도록 장치 구성을 하였다.

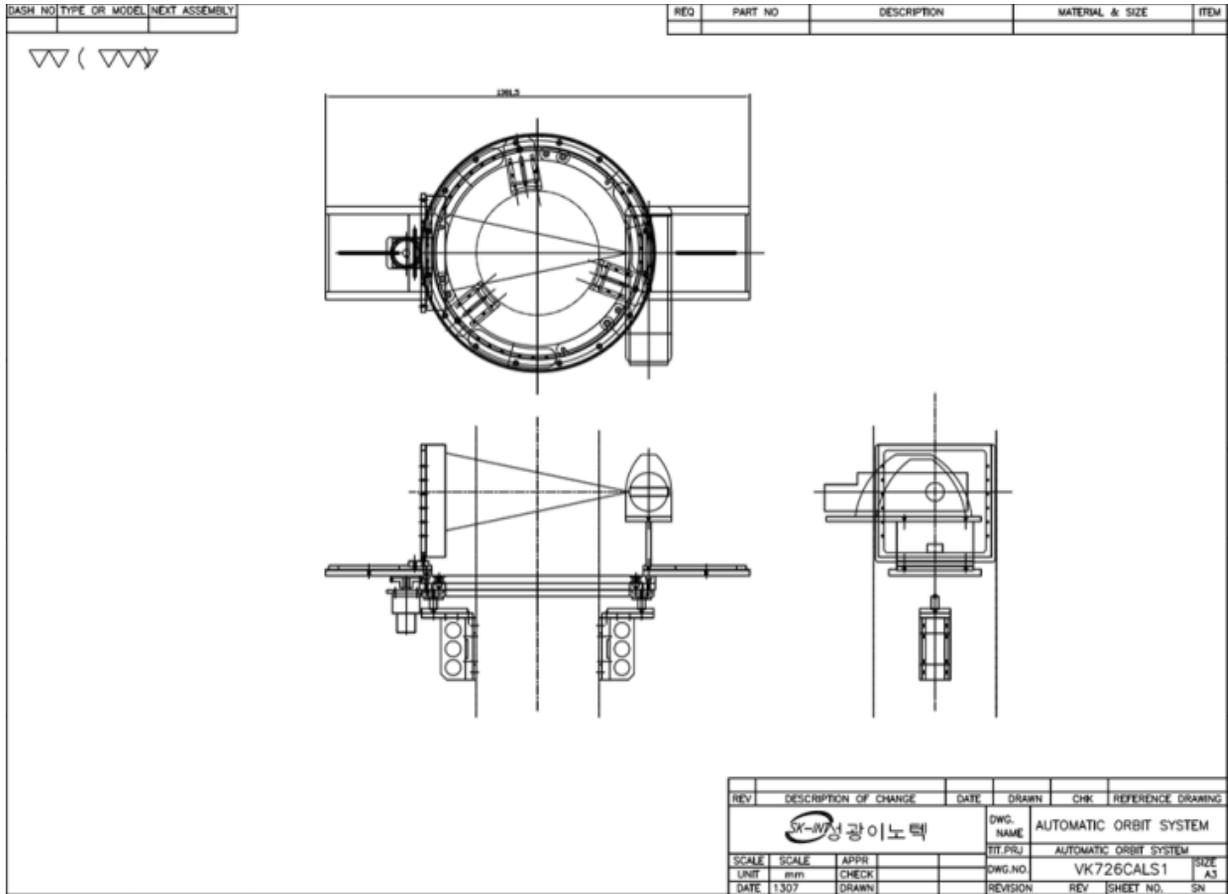


그림 3-4-17. 현장 적용 CT 장비 상세도면

다. 현장 적용 CT 장치 개발 내역 및 설치 매뉴얼

(1) 입목 고정 장치

기준에 보유하고 있는 실험실적 스케일의 CT 장비는 입목이 베어지지 않는 여러 각도에서 많은 수의 방사선 사진을 획득하기 어렵다. 또한 입지로 이동이 불가능한 장비이기 때문에 설사 입목이 베어진다고 하더라도 입지에서 적용할 수 없다. 또한 우리나라는 다른 나라와 달리 경

사지에 입목이 많이 존재하고 있기 때문에 CT 장비를 지면에 세울 수 있는 장치를 개발하는 것보다 직접 입목에 고정 장치를 부착하는 방법이 유리하다고 판단하여 개발을 진행하였다. 그림 3-4-18에 제시되어 있는 것과 같이 3개의 고정 장치를 이용하여 입목에 직접 고정한 후 CT 장치를 설치 할 수 있게 설계되었다.

<입목 고정 장치 설치 순서>

- (가) 방사선 사진을 촬영하고자 하는 위치에서 70cm 떨어진 곳에 그림 3-4-18a에 나와 있는 입목 고정 장치 보조 장비를 설치한다. 설치 시 입목 고정 장치 보조 장비의 간격이 비슷하게 유지시킨다.
- (나) 입목 고정 장치 보조 장비 위에 3개의 고정 장치를 설치한 후 고정벨트를 이용하여 단단히 고정한다.



(a)



(b)

그림 3-4-18. 입목 고정 장치 설치 모습
 (a) 입목 고정 장치 보조 장비, (b) 입목 고정 장치

(2) 보조구 설치

일정 각도씩 X선 선원과 디지털 디텍터가 회전할 때 수평을 유지하는 것이 중요하다. 입목 고정 장치를 설치할 때 처음부터 수평을 맞추기 어렵기 때문에 보조구를 이용하여 X선 선원과 디지털 디텍터가 수평을 유지할 수 있도록 설계하였다. 선원과 디지털 디텍터의 수평을 유지할 수 있도록 보조구와 세 개의 입목 고정 장치는 회전 나사로 이어져 있으며, 이 회전 나사를 이용하여 X선 선원과 디지털 디텍터의 높이를 조절할 수 있게 설계하였다. 보조구의 모습은 그

림 3-4-19에 나와 있다. 또한 베어링으로 구성된 보조구 내 치구는 X선 선원과 디지털 디텍터가 올라가는 회전부를 부상하게 만들어 마찰에 의한 오차를 줄여주는 역할을 수행한다.

<보조구 설치 순서>

(가) 입목 고정 장치 위에 보조구를 하나씩 설치한다. 입목이 보조구 중심에 올 수 있도록 입목 고정 장치에 있는 치구를 앞뒤로 움직여가며 조정한다.

(나) 그림 3-4-19b에 나와 있는 것과 같이 보조구에 있는 회전 나사를 이용하여 수평을 맞춘다.



(a)



(b)

그림 3-4-19. 보조구 설치 모습

(a) 입목 고정 장치에 보조구를 설치하는 모습, (b) 보조구 내 회전 나사로 수평을 맞추는 모습

(3) 서보 모터 설치

그림 3-4-20에 나와 있는 장비는 서보 모터이다. 서보 모터는 X선 선원과 디지털 디텍터를 고정하고 있는 회전부를 회전시키기 위한 장비로, 최소 1°씩 X선 선원과 디지털 디텍터를 회전시킬 수 있다. 따라서 최대로 얻을 수 있는 방사선 사진은 360개이다.

<서보 모터 설치 순서>

(가) 보조구에 있는 서보 모터를 설치할 수 있는 위치는 3곳이다. 주변 환경이 가장 복잡하지 않은 위치에 서보 모터를 설치하되, 서보 모터 위 톱니가 손상이 가지 않도록 주의하여 설치한다.



그림 3-4-20. 서보 모터 설치된 모습

(4) 회전부 설치

회전부는 X선 선원과 디지털 디텍터를 회전시켜주는 부분으로 보조구 위에 놓이는 치구와 회전 베어링으로 구성되어 있다(그림 3-4-21). 서보 모터에 의해서 회전부가 회전할 때 마찰을 줄여주기 위해서 공중에 부상한 상태로 회전을 할 수 있게 설계되었다.

<회전부 설치 순서>

- (가) 보조구 위에 놓이는 원형 장치를 설치한다.
- (나) 치구 설치 후 3 조각난 회전 베어링을 설치한다. 서보 모터가 있는 곳부터 설치하는 것이 유리하다. 조각난 회전 베어링을 설치할 때 금속 치구를 이용하면 쉽게 원형을 유지하면서 베어링을 설치할 수 있다.
- (다) 회전 베어링을 다 설치한 뒤, 보조구 내 치구를 고정시켜 회전 베어링을 부상하게 한다.



(a)



(b)



(c)

그림 3-4-21. 회전부 설치 모습

(a) 보조구 위에 놓이는 원형 장치 설치, (b) 보조구 내 치구 고정 시키는 모습, (c) 회전부가 부상되어 있는 모습

(5) X선 선원과 디지털 디텍터 치구 설치

X선 선원과 디지털 디텍터가 설치되는 치구는 각 장비의 중심이 일치하도록 제작되어 있다. 또한 CT 이미지를 재구성하는데 있어 선원과 디텍터 간의 거리, 선원과 회전 베어링 중심 간의 거리 정보가 필요하기 때문에 치구 뒷면에 위치를 표시해 두었다. 앞서 X선 유효 조사 각도를 조사한 결과, 입목에서 적어도 490mm 떨어져야 하는 점 또한 고려되어 제작되었다.

<X선 선원과 디지털 디텍터 치구 설치 순서>

(가) X선 선원과 디지털 디텍터가 설치되는 치구는 앞뒤상하로 움직일 수 있게 제작되었기 때문에 회전부에 각 치구를 설치할 때는 중심에 위치하도록 설치한다.



(a)



(b)

그림 3-4-22. X선 선원과 디지털 디텍터 치구 설치 모습

(a) X선 선원 치구 설치 모습, (b) 디지털 디텍터 치구 설치 모습

(6) 거리 측정기 설치

입목의 단면형상을 비파괴적으로 평가하기 위하여 거리 측정기를 X선 선원이 놓이는 치구에 설치할 수 있도록 설계하였다. 거리 측정기를 눌러주는 치구와 서보 모터를 연결하여 일정 각

도 회전 후에 거리를 측정할 수 있도록 시스템화 하였다. 이를 통하여 빠른 시간 내로 입목과 X선 선원 사이의 최단 거리를 측정할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3-4-23. 거리 측정기와 회전 시스템 모습

(a) 거리 측정기 모습, (b) 회전 시스템 모습

(7) X선 선원과 디지털 디텍터 설치

본격적인 CT 재구성을 위한 일정 각도별 방사선 사진을 획득하기 위하여 X선 선원과 디지털 디텍터를 각 치구에 설치한다. 설치된 X선 선원과 디지털 디텍터의 모습은 그림 3-4-24에 제시되어 있다. X선 선원과 디지털 디텍터는 회전 시스템을 이용하여 일정 각도로 회전이 가능하게 설계되었다. 회당 회전 각도는 최소 1°로 제작이며 회당 회전 속도는 최소 1°/s이다.



그림 3-4-24. CT 장치에 X선 선원 및 디지털 디텍터를 설치한 모습

(8) 현장 적용 CT 시스템

개발 완성된 현장 적용 CT 시스템의 구성과 내용을 표 3-4-3에 제시하였다. 완성된 현장 적용 CT 시스템을 설치하는데 2인 1조로 하면 20분정도 소요되며, 하나의 입목에 대하여 CT 이미지를 얻는 데 한 시간 가량이 소요된다. 일반적으로 입목 내부 부후 검사에 사용되는 목재의 응력과 시험 장비의 경우 설치에서 검사까지 약 40분 정도 소요된다. 응력과 시험 방법과 비교하였을 때 다소 시간이 오래 소요되나 방사선 사진을 이용하면 입목 내부의 시각화가 쉽고 명확하여 더 좋은 결과를 기대할 수 있다.

표 3-4-3. 현장 적용 CT 시스템 구성과 특징

| 구성 내용 | 특 징 | 설비 가격 (천원) |
|-------------------------|--|----------------------------|
| X선 선원 (CP 120, Belgium) | 이동 가능 (충전식) 피폭 가능성이 낮은 저선량 soft X선 | 33,682 |
| 디지털 디텍터 (NX 06, Japan) | 이동 가능 (배터리 작동가능) CCD 형식으로 경량 | 21,722 |
| 현장 적용 CT를 위한 회전 치구 | 입목에 직접 부착 입목의 물리적 손상 방지를 위하여 접촉부에 폴리우레탄 적용 회전 모터 및 베어링 수평 조절부 X선 투과거리 측정부 | 42,900 (발전기 등 부대 장비 포함) |
| | 최소 1도 간격으로 회전 가능 작은 회전 오차 (의료용 CT 베어링 사용) 경사지 설치 시 수평 조절 신속한 장비 설치 (전자식 수평계 적용) X선 투과 거리 측정 신속한 입목 외형 측정 (레이저 변위 측정기) | |

3. 입목 내 열화 평가를 위한 검사 체계 확립

본 연구에서 개발된 CT 시스템은 그 정확도는 높으나 다소 시간이 오래 걸리고, 구성 시스템 중 디지털 디텍터의 크기 제약으로 인하여 입목 전체를 CT 이미지화 할 수 없는 단점이 있다. 따라서 입목 내 열화 평가를 위한 검사 체계 확립을 통하여, 입목 하나를 검사하는 시간을 단축하고 열화를 정확하게 평가할 수 있어야 한다. 그림 3-4-25에 입목 내 열화 평가를 위한 검사 체계가 도식화 되어 있다.

육안검사

- 뿌리, 가지 썩음 및 잎 마름 확인
- 균사체 피해 여부 확인

X선 촬영

- 흉고 높이에서 X선 1회 촬영
(가지가 고사된 경우, 그 근처에서 촬영)
- CT 촬영 범위 설정
(상·하 디텍터 이동 후 2~3회 촬영)

CT 촬영

- 입목 내부 상태 시각화
- 벌목 또는 치료 여부 판단



그림 3-4-25. 검사 체계

검사 체계에 대한 설명은 다음과 같다.

첫째, 육안검사를 통하여 기술 적용 입목을 선정한다. 일반적으로 균사체 유무, 뿌리·가지 썩음 및 잎 마름은 입목 내부 부후의 대표적인 특성이다. 참나무류와 같이 입목 내부 부후가 빈번하게 발생하는 수종의 경우, 육안 검사를 통해 나타나지 않아도 기술을 적용할 필요가 있다.

둘째, 선정된 입목의 촬영 범위를 설정하기 위하여, 선원을 고정시켜 놓고 X선을 1회 촬영한다. 촬영 결과 내부 밀도가 감쇠된 부분이 확인된다면, 선원은 고정해두고, 디지털 디텍터를 상·하로 이동 후 2~3회 촬영하여 CT 촬영 범위를 설정한다. 흉고 높이에서 밀도가 감쇠된 부분이 확인되지 않는다면 다음 입목 선정으로 이동한다. 또한 2~3회 촬영을 하여도, 밀도 감쇠된 부분이 나타난다면 다음 단계로 진행하지 않고 바로 벌목한다.

마지막으로, 선정된 범위의 입목 내부 상태를 시각화하여 벌목 또는 치료 여부를 판단한다.

제 5절 현장 적용

현장에서 입목 내부 열화 탐지를 위해 X선 CT 장치와 CT 재구성 프로그램을 이용하였다. 또한 입목 외에 개발된 기술이 적용될 수 있는 대상에 대한 검사 결과가 본 절에 제시되어 있다.

1. 입목 내부 열화 탐지

가. 안양수목원 참나무 심재부후목

서울대학교 관악수목원의 도움을 받아 침엽수와 활엽수 혼효림인 안양사 뒷부분 임지에서 실험을 진행하였다. 실험을 진행할 당시 숲 가꾸기 사업을 진행을 하고 있어, 숲 가꾸기 사업이 끝난 임지를 대상으로 실험을 진행하였다. 그림 3-5-1에 나와 있는 것과 곳곳에서 심재부후목이 별목되어 있는 것을 확인하였으며, 심재부후가 많이 발생된 지역에서 X선 실험을 진행하였다.



그림 3-5-1. 숲 가꾸기 사업 후 참나무 그루터기에서 발견된 열화 모습

느티나무의 방사선 사진을 얻기 위해, X선은 관전압 60kV, 관전류 1.5mA 조건에서 조사되었다. 디지털 디텍터를 X선에 5초간 노출시켜 한 장의 방사선 사진을 획득하였으며, 그림

3-5-2와 같이 X선 CT 장비를 설치하여 X선 선원과 디지털 디텍터를 1°씩 회전시켜가며 총 180개의 방사선 사진을 구하였다. 얻어진 방사선 사진은 CT 이미지로 재구성되었다.



그림 3-5-2. X선 장비 설치 모습

그림 3-5-3에 CT 이미지를 구성한 위치에서의 참나무 시편의 단면이 제시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 수의 오른쪽 상단에 동공이 발생되어 있는 것을 확인할 수 있었다.



그림 3-5-3. CT 이미지를 구성한 위치에서의 참나무 시편 단면

재구성된 CT 이미지 결과는 그림 3-5-4와 그림 3-5-5에 제시되어 있다. 실제 참나무 단면

에서 발생한 동공이 잘 표현되어 있는 것을 확인할 수 있었으며, 방사 단면을 보여주는 CT 이미지 결과(그림 3-5-4)으로 미뤄보았을 때, 가지를 통하여 부후균이 침투하여 참나무 내부까지 부후가 진행된 것으로 추측된다. 또한 그림 3-5-5b에서부터 그림 3-5-5f에서 동공 이외에 참나무 시편의 단면에서 확인할 수 없었던 심재부분에서 밀도가 낮아지는 결과를 얻었다.

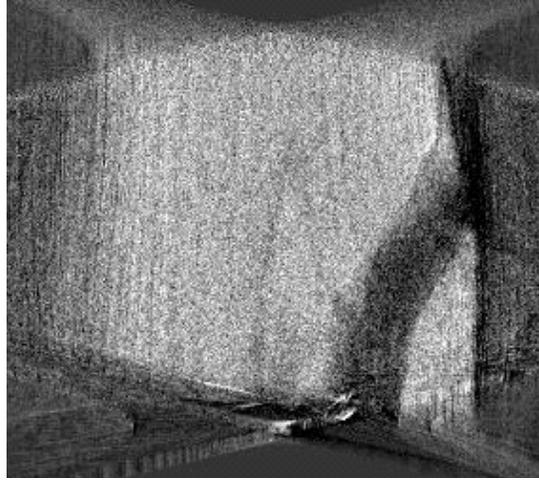
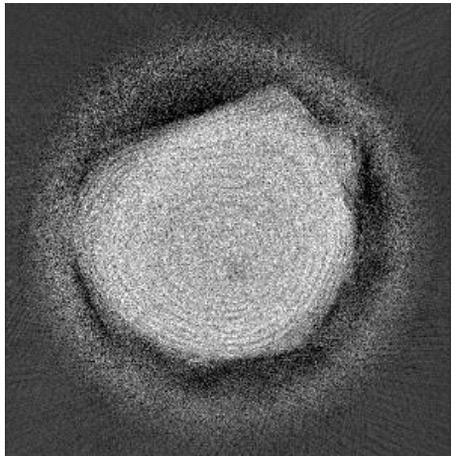
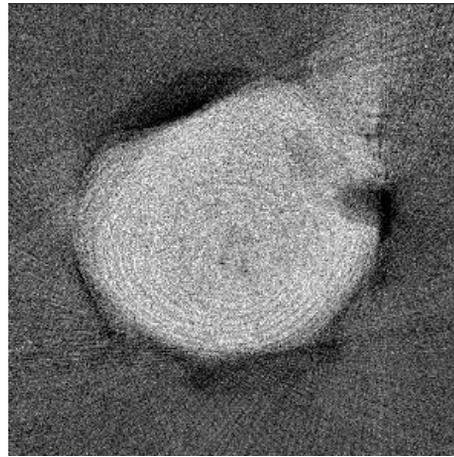


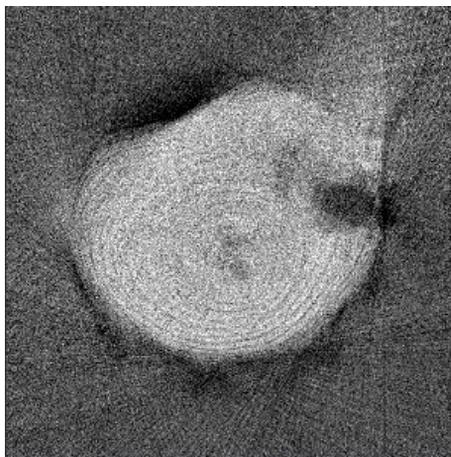
그림 3-5-4. 측면에서 본 안양사 참나무 내 부후 모습



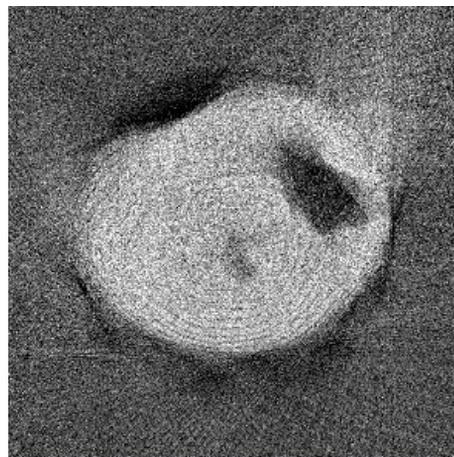
(a)



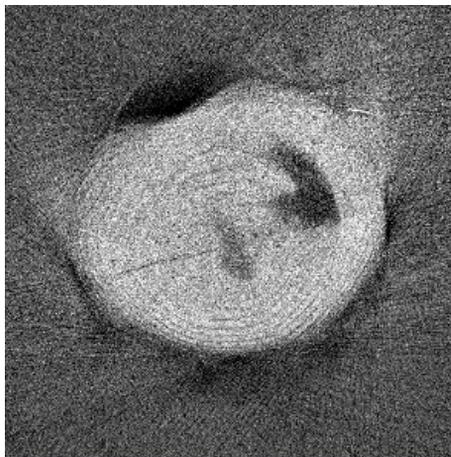
(b)



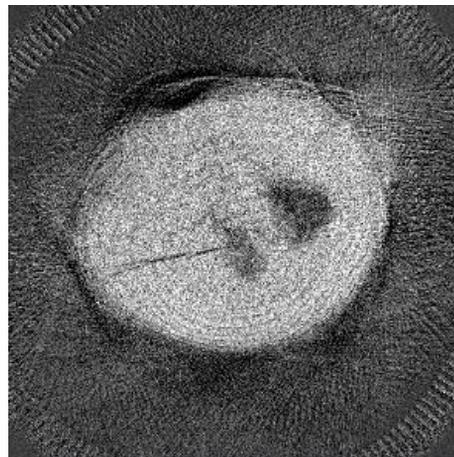
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 3-5-5. 관악수목원 내 참나무 내부 부후

(a) 가장 높은 부분의 CT 이미지 (f) 가장 낮은 부분의 CT 이미지

그림 3-5-4e에 대하여 이진 영상 처리를 한 결과가 그림 3-5-6에 제시되어 있다. 경계값은 참나무 기건 밀도의 80%인 0.67g/cm^3 로 설정하여 영상 처리를 진행하였다. 이진 영상 처리 결과 동공뿐만 아니라 참나무의 수 부분에서도 역시 밀도가 낮아지는 부분을 확인할 수 있었다. 그러나 수와 동공 사이에는 밀도가 감소되는 부분을 확인할 수 없었기 때문에, 수에서 발생한 심재부후는 뿌리에서부터 침투된 미생물에 의해서 발생된 것으로 확인된다. 실제로 그림 3-5-5를 살펴보았을 때, 지면으로 갈수록 수 부근 부후의 크기가 점차 커지는 것을 확인할 수 있었다.

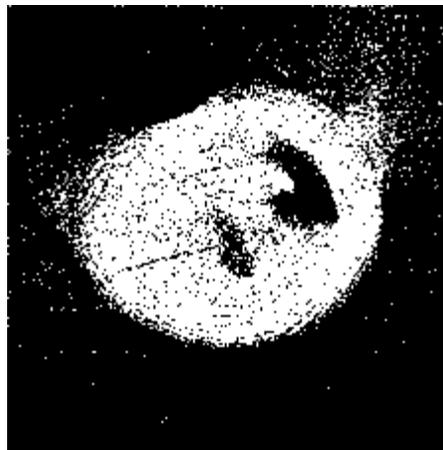


그림 3-5-6. 이진 영상 처리된 참나무 부후목 CT 이미지

그림 3-5-7에 실제 단면과 참나무의 CT 이미지 결과가 제시되어 있다. ImageJ(NIH, USA)를 이용하여 실제 단면 사진과 CT 이미지 내의 부후 크기를 측정하였다. 실제 단면 사진에서 측정된 부후의 크기는 24.23cm^2 이었으며, CT 이미지 내의 그것의 크기는 25.42cm^2 이었다.

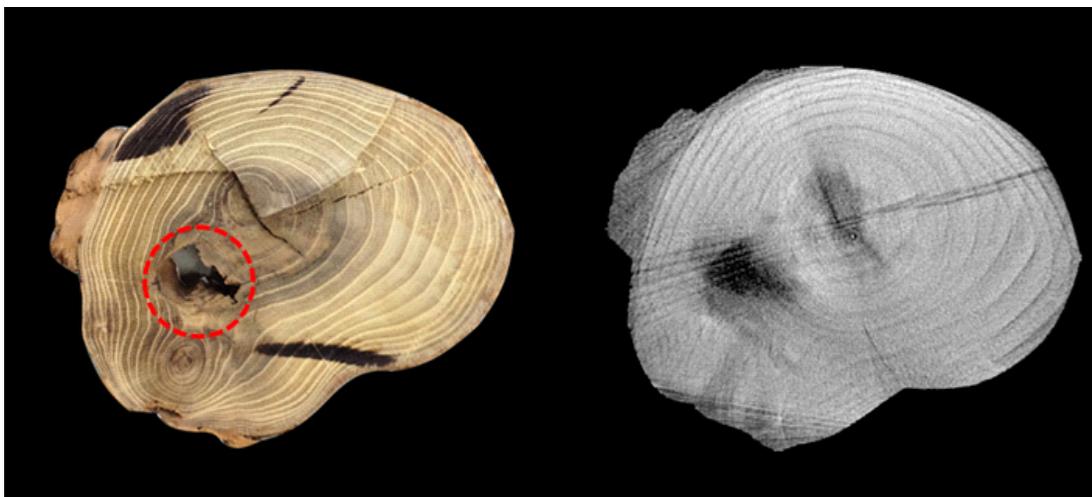


그림 3-5-7. 실제 단면과 해당 단면의 CT 이미지 (점선 원: 측정된 부후 위치)

나. 운두령 참나무 심재부후목 1

강원도 홍천군 내면에 위치한 운두령특수활엽수림연구지원센터의 도움을 받아 그 주변에 있는 참나무에 대하여 내부 상태를 조사하고자 실험을 진행하였다. 안양사에서 X선 CT 기술을 적용했을 때와 달리, 당시는 비가 오는 장마철이었다. 그로 인하여 참나무 내부의 함수율이 높아 비슷한 직경을 가지는 참나무임에도 불구하고, 더 강한 X선을 이용하여 CT 이미지를 구성하였다. 사용된 X선 강도는 관전압 70kV, 관전류 1.5mA이었으며, 조사되는 X선에 5초간 디지털 디텍터를 노출시켜 방사선 사진을 획득하였다.

그림 3-5-8은 운두령특수활엽수림연구지원센터 주변에서 실험 대상으로 삼은 참나무와 X선 장비가 설치된 모습을 보여주고 있다. 실험 위치에서 죽은 가지가 관찰되어 안양사와 마찬가지로 가지를 통해서 부후균이 침투되었을 것으로 사료되었으나 육안으로 관찰하였을 때에는 부후가 얼마나 진행되었는지 확인할 수 없었다.



(a)



(b)

그림 3-5-8. 운두령 내 실험 모습

그림 3-5-9에 안양사 참나무와 운두령 참나무의 외관 사진이 제시되어 있다. 안양사에서 실험한 참나무는 육안으로 확인하였을 때 동공이 크게 나있어 부후의 정도가 클 것으로 예상되었지만 운두령 참나무의 경우 동공이 발생되지 않아 참나무 내부로는 부후가 많이 진행되지 않았을 것이라고 예상하였다.



(a)



(b)

그림 3-5-9. 안양사 참나무와 운두령 참나무 외관 비교

그러나 그림 3-5-10에 제시된 방사방향으로 재구성된 3차원 CT 이미지 결과를 보았을 때 이미 내부로 상당 부분 부후가 진행된 것을 확인할 수 있었다. 특히 수피와 건전부로 인하여 외관으로 보이지 않는 부분에서 심재 방향으로 부후가 진행되고 있었다.

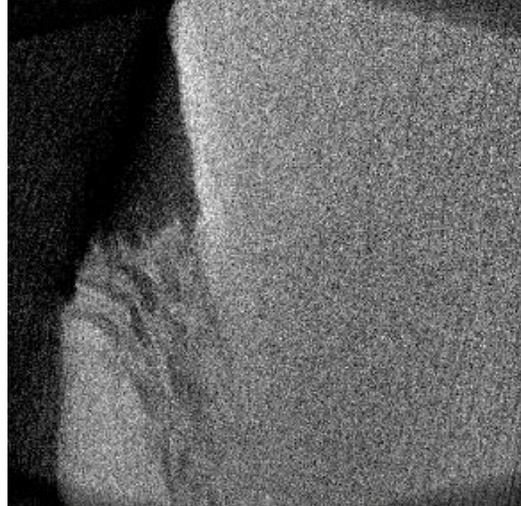


그림 3-5-10. 측면에서 본 운두령 참나무 내 부후 모습

그림 3-5-11과 그림 3-5-12에 운두령 참나무에서 CT 이미지를 재구성한 위치와 그 결과가 제시되어 있다. 그림 3-5-10에서 살펴본 바와 같이 가지에서 시작된 부후가 심재까지 진행된 것을 확인할 수 있다. 3차원 CT 이미지를 이용하여 외관에서 보이지 않은 부분까지 진행된 부후와 더불어 심재 부후의 위치까지 확인할 수 있었다.

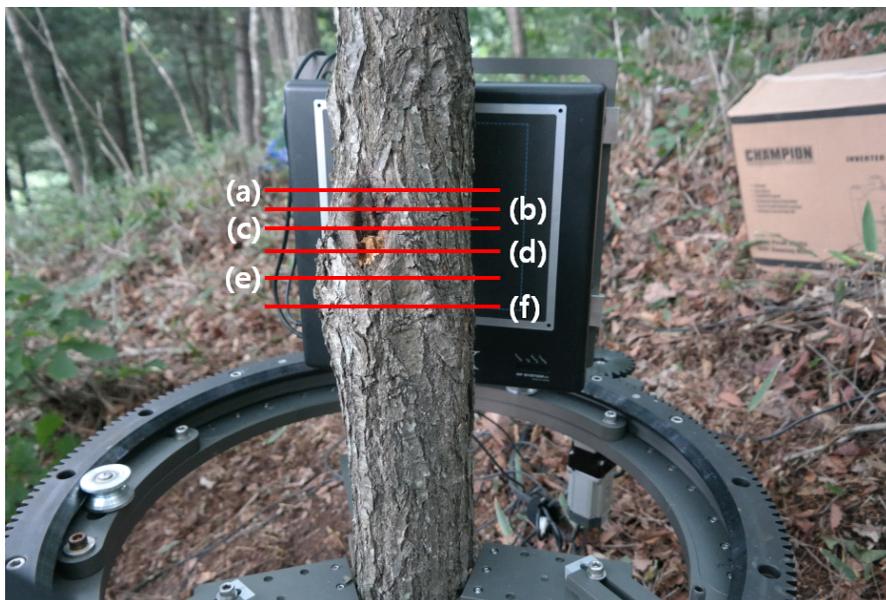
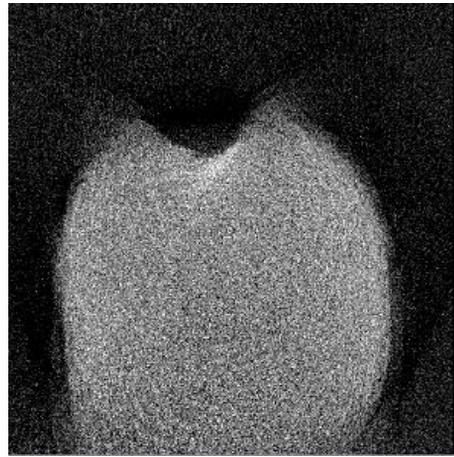


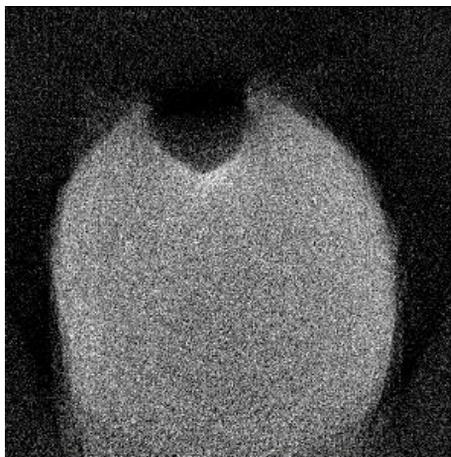
그림 3-5-11. 운두령 참나무 CT 이미지 구성 위치



(a)



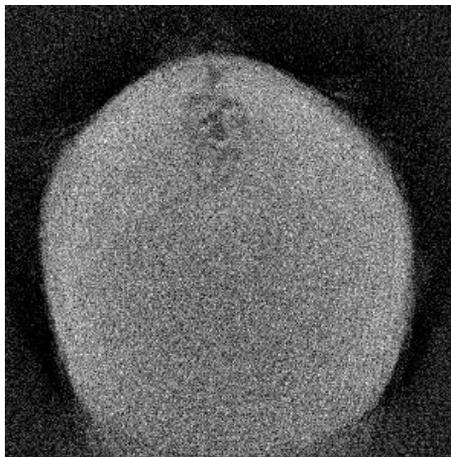
(b)



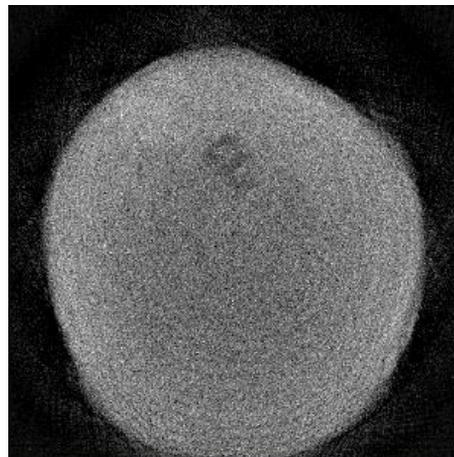
(c)



(d)



(e)



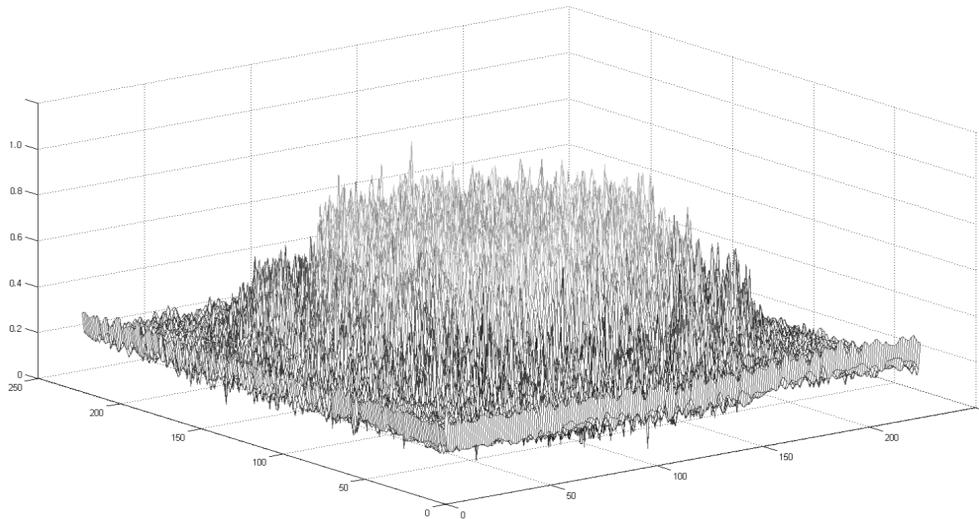
(f)

그림 3-5-12. 운두령 내 참나무 내부 부후

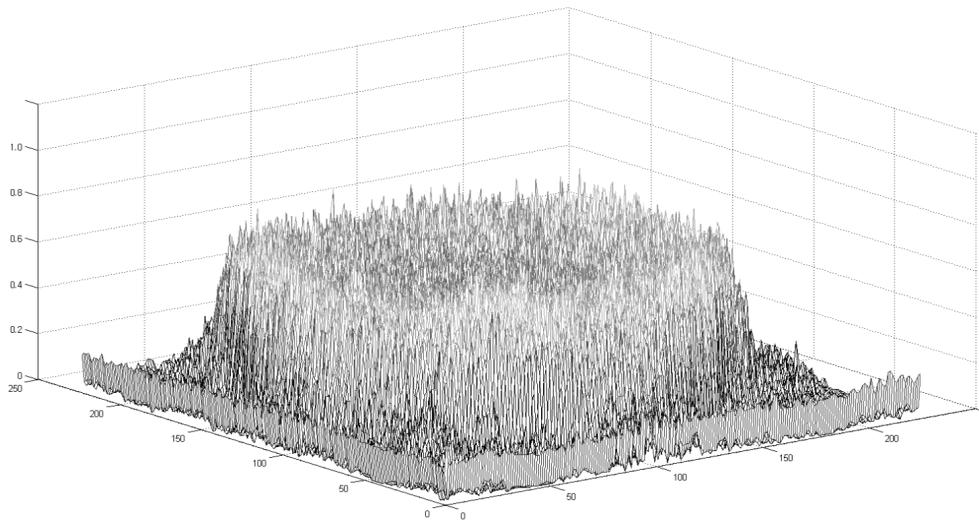
(a) 가장 높은 부분의 CT 이미지 (f) 가장 낮은 부분의 CT 이미지

그림 3-5-13에 안양사 참나무(그림 3-5-5a)와 운두령 참나무(그림 3-5-12f)의 밀도 profile이 제시되어 있다. 참나무의 전건 밀도 정보를 알 수 없어 정확한 함수율 분포를 알 수는 없으나 운두령 내 참나무의 변재 부분이 안양사 참나무의 변재보다 값이 큰 것을 알 수 있다. 이는 실험을 진행한 시기와 관련이 있는데, 앞서 언급한 바와 같이 운두령에서 X선 CT 기술을 적용할 때는 비가 많이 오는 시기였기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료된다.

Shigometer를 이용하여 입목 내 활력을 평가하는 방법은 계절별 전기저항의 차이를 이용하여 평가하는 것이다. 활력이 높은 입목의 경우, 흡수된 많은 양의 수분과 이온을 형성층으로 이동시켜 생장에 사용하기 때문에 전기저항이 낮다. 따라서 형성층 내 수분의 변화를 탐지할 수 있다면 입목 내 활력을 평가할 수 있는 지표로 사용할 수 있다. 계절에 따른 함수율 변화를 본 기술을 이용하여 평가할 수 있듯이, 본 기술을 통한 입목 내 함수율 평가를 통하여 입목의 활력을 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 평가지표를 위해서는 추후 많은 데이터의 축적이 필요하다.



(a)



(b)

그림 3-5-13. 안양사 참나무와 운두령 참나무 밀도 profile

(a) 안양사 참나무, (b) 운두령 참나무

다. 운두령 참나무 심재부후목 2

그림 3-5-14에 나와 있는 것과 같이 외관상 아무런 문제가 없어 보이는 참나무에 대해서 X선 CT 실험을 진행하였다. 사용된 X선은 관전압 75kV, 관전류 1.5mA 조건에서 조사되었으며, 조사된 X선에 5초간 디지털 디텍터를 노출시켜 방사선 사진을 얻었다. X선 CT 이미지를 재구성하기 위하여 사용된 방사선 사진의 수는 180개였다.



(a)



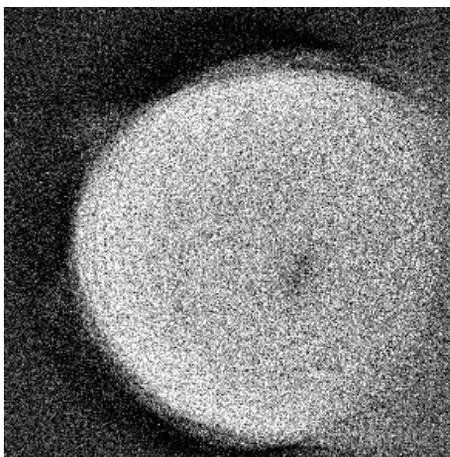
(b)

그림 3-5-14. 외관상 문제가 없어 보이는 운두령 참나무 2

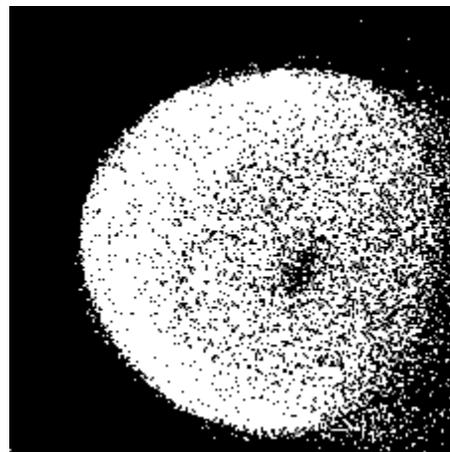
그림 3-5-15에서 나와 있는 위치에서 X선 CT 이미지를 구성하였을 때, 그림 3-5-16와 같이 부후가 탐지되었다.



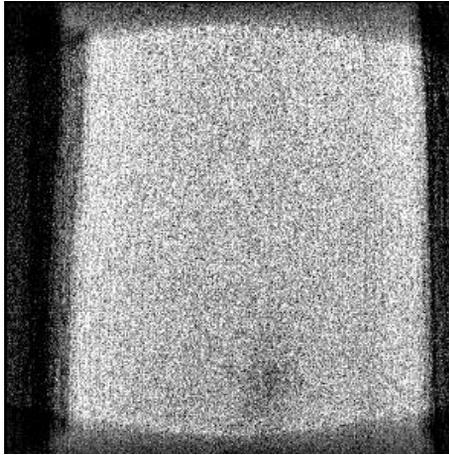
그림 3-5-15. 운두령 참나무 2의 CT 이미지 재구성 위치



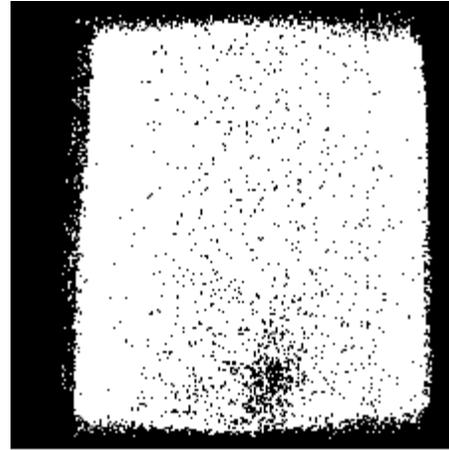
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-5-16. 운두령 참나무 2의 CT 이미지

(a) CT 이미지, (b) 이진 영상 처리된 CT 이미지,

(c) 3차원 측면 CT 이미지, (d) 이진 영상 처리된 측면 CT 이미지

CT 이미지 재구성된 위치에 해당하는 참나무의 실제 단면을 확인하였을 때, 참나무 중앙에서 부후가 발견되었다(그림 3-5-17). 다른 경우에 비하여 CT 이미지 내에서 부후가 명확하게 표시되지 않는 것은 해당 위치의 부후가 초기 단계이었기 때문이라고 판단되었다. Limited FOV 조건이기 때문에 참나무와 공기층 사이의 경계가 명확하지 않으나, 0.67g/cm^3 으로 경계값을 설정하였을 때, 방사방향의 CT 이미지에서 특히 열화가 탐지되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 단면 CT 이미지에서는 열화 탐지가 정확하게 탐지되지 않았는데, 이는 limit FOV 상황에서 얻어진 CT 이미지의 해상도가 운두령 참나무 2에서 발생한 초기 열화를 탐지하기에는 다소 부족했기 때문이라고 사료된다.



그림 3-5-17. 운두령 참나무 2의 내부 상태

라. Teak 심재부후목

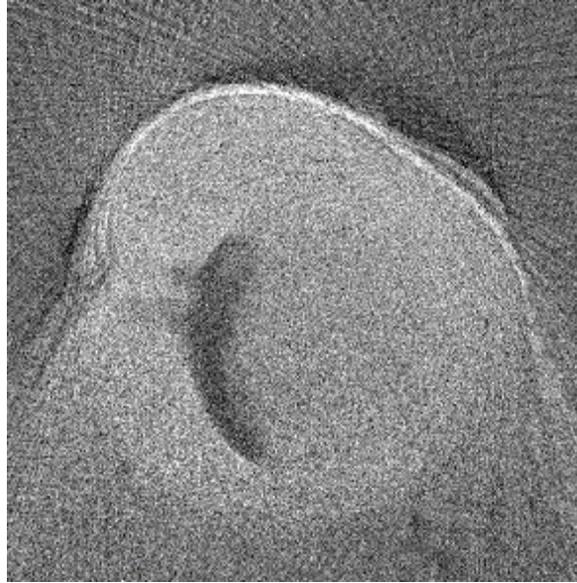
동남아에 주로 분포하고 있는 티크는 일반적으로 가구 재료로 사용되는 재질이 단단한 활엽수이다(정, 2005). 미얀마에서는 지난 수년간, 천연 티크 숲을 개발하고 있으나, 티크 내에 발생하는 심재부후로 인하여 상품 가치가 떨어져 사회적으로 문제점이 발생하고 있다(Win, 2014). 본 실험에서는 미얀마에서 가지고 온 티크 디스크에 대하여 X선 CT 실험을 진행하여 외래 수종에 대해서도 본 기술의 적용이 유효한지 살펴보았다.

그림 3-5-18에 본 실험에서 사용된 티크 모습이 제시되어 있다. 방사선 사진을 얻기 위하여 조사된 X선 강도는 60kV, 1.5mA이었으며, 3초간 디지털 디텍터에 X선을 노출시켰다. 총 120장의 방사선 사진을 이용하여 CT 이미지를 구성하였다. 티크는 재질이 단단함에 비해 그림 3-5-18을 통해서도 알 수 있듯이, 티크 내에서 발생하는 심재부후는 주로 동공 형태로 생성되어 적은 수의 방사선 사진을 이용하여도 탐지 가능하다고 판단하였기 때문이다.



그림 3-5-18. 실험에 사용된 티크 디스크 모습

그림 3-5-19에서 알 수 있듯이, 적은 수의 방사선 사진을 이용하여 다소 불규칙하게 형성된 심재부후를 탐지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 수종에 따른 심재부후 형태를 알 수 있다면, 동공 형태로 나타나는 심재부후를 탐지할 때는 적은 수의 X선 사진을 이용하고 초기 부후와 같이 조직의 괴사만 발생하는 부후를 탐지할 때는 많은 수의 X선 사진을 이용하여 검사의 효율성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 3-5-19. 티크에 대한 CT 이미지 결과
(a) CT 이미지 (b) 이진 영상 처리 된 CT 이미지

2. 목재 내부 검사

천연 재료인 목재는 미생물이나 흰개미와 같은 충해에 의해 열화 된다. 일부 열화는 입목에서 발생하는 심재부후와 같이 목재 내부에서 시작되기 때문에 부후가 많이 진행된 후 발견될 수 있다. 이러한 열화가 목조 건축물에 발생된다면 안정성에 큰 문제가 발생할 수 있기 때문에 초기에 탐지하여 제거하여야 한다.

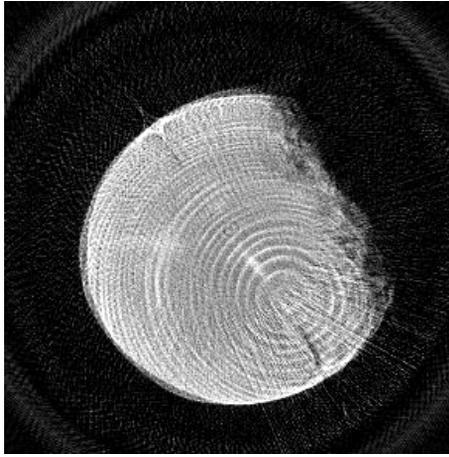
그러나 일부 문화재는 문화·종교적인 이유로 접근이 쉽지 않다. 특히 동산 문화재 중 불상의 경우, 불상 내부에 책이나 금은보화와 같은 복장을 지니고 있기 때문에 더욱 접근이 쉽지 않은 경우가 발생한다. 그렇지만 현장에서 적용 가능한 X선 CT 기술은 불상과 같은 문화재에 접촉하지 않고 내부를 검사할 수 있을 뿐만 아니라 그러한 문화재를 많이 이동하지 않고 불상 내부를 검사할 수 있기 때문에 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법이 될 수 있다.

제재목의 휨탄성계수 또는 휨강도는 주요 물성인자로 알려져 있다. 제재목에 존재하는 응력은 그러한 물성인자에 영향을 미치기 때문에 그에 대한 연구가 많이 진행되었다. 3차원 CT 이미지를 통하여 얻어진 정확한 응력의 크기나 위치 정보는 그러한 연구에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

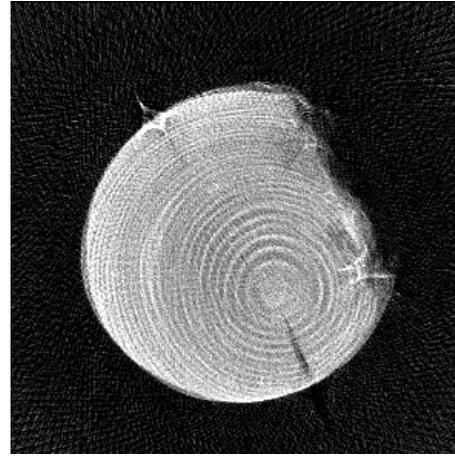
이와 같은 이유로 다음 목재에 대하여 본 기술을 적용해 보았다. X선 조사 조건 등은 생략하였으며, 결과 중심으로 내용이 정리되어 있다.

가. 서까래 해체 부재

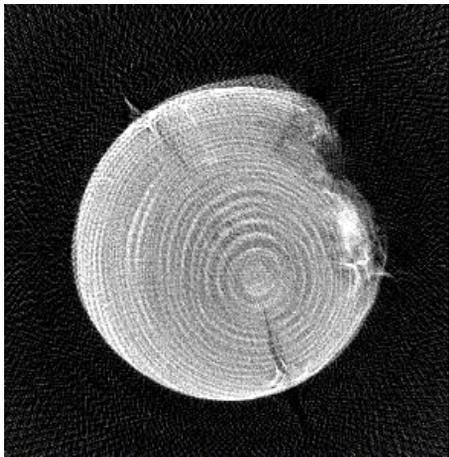
그림 3-5-20에 서까래 해체 부재에 대한 CT 이미지 결과가 제시되어 있다. 활엽수를 대상으로 한 CT 이미지 재구성 결과와 달리 연륜이 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 침엽수의 조·만재의 밀도 변화가 크기 때문이라고 사료된다. 수분에 의해 한쪽 면이 불규칙하게 부후되었음에도 불구하고 정확한 결과가 도출되었다. 이는 Full FOV 조건과 더불어 서까래 부재의 두께가 얇아 충분히 X선이 투과되었기 때문이라고 판단된다. 3차원 CT 이미지를 이용하여 활렬의 위치나 크기, 수의 위치변화 등의 정보를 획득할 수 있었다.



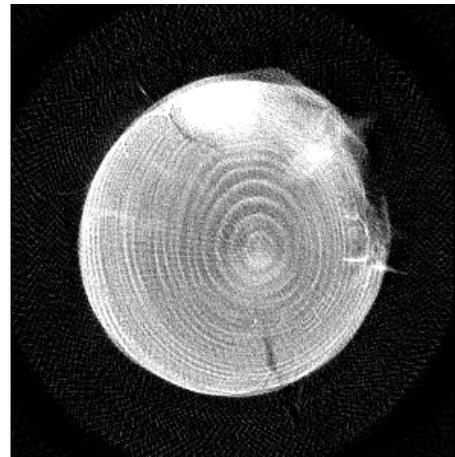
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-5-20. 서까래 해체 부재에 대한 CT 이미지 결과

또한, 경계값 $0.40\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 그림 3-5-20b에 대하여 이진 영상 처리를 진행하였을 때, 육안으로는 확인할 수 없었던 열화부위가 확인되었다(그림 3-5-21). 이처럼 밀도 CT 및 열화 탐지 알고리즘을 이용하여 입목에서 발생하는 초기 심재부후 뿐만 아니라 부후균이 침투된 열화의 초기 부분도 탐지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

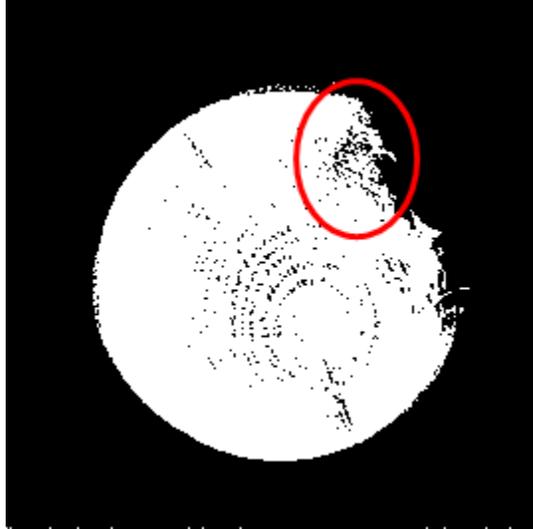


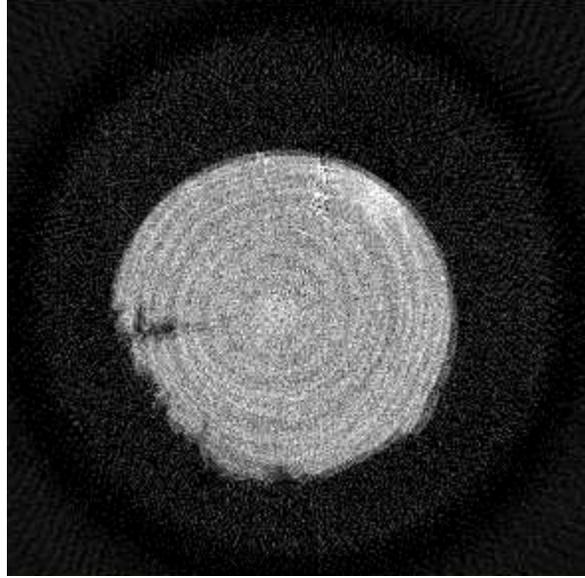
그림 3-5-21. 그림 3-5-19b에 대한 이진 영상 처리 후 CT 이미지

나. 흰개미 피해목

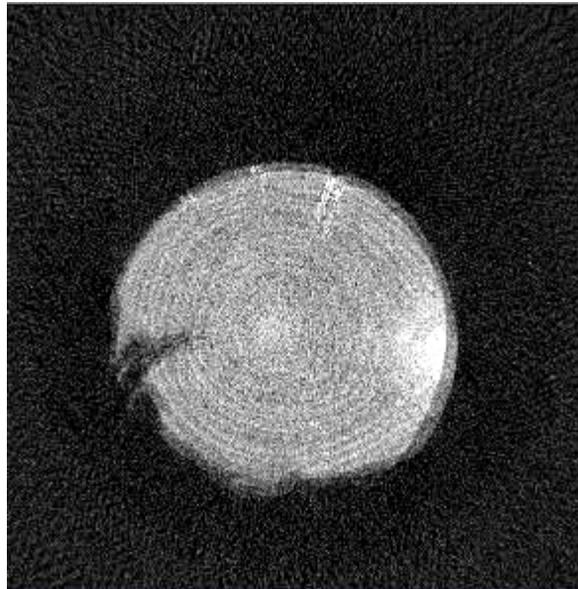
흰개미 피해는 초기에는 작은 동공으로 시작되어, 빠른 시간 내에 심각한 목재의 단면 손실을 발생시키기 때문에 조기 탐지가 중요하다. 그림 3-5-22에 흰개미 피해목(소나무)에 대한 CT 이미지 결과가 제시되어 있다. 외곽의 피해 형상은 다소 왜곡되어 있으나 흰개미의 피해를 입은 위치의 동공을 CT 이미지에서 확인할 수 있어 흰개미 피해 탐지 및 열화 정도를 본 기술을 이용하여 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

그림 3-5-22. 소나무 흰개미 피해목과 CT 이미지 결과
(a) 실제 단면, (b)와 (c) CT 이미지 결과

다. 외암마을 기둥부재

문화재에 심하지 않은 열화가 발생되면 보수를 진행하여 문화재를 보존하려고 한다. 특히 목조 건축문화재의 기둥 부재는 지면과 맞닿아 있는 경우가 있어, 그러한 경우에 기둥 부재로 수분이 침투되어 열화가 많이 발생된다. 열화가 발생된 기둥은 교체되거나 보수를 실시한다. 보수가 실시되었을 때, 그에 대한 적절한 평가가 필요한데 그러한 방법이 없는 것이 현실이다. 이에 현장에서 적용할 수 있는 X선 CT 기술을 이용하여 목조 건축물 기둥 부재가 적절하게 보수되어 있는지 확인해보았다.

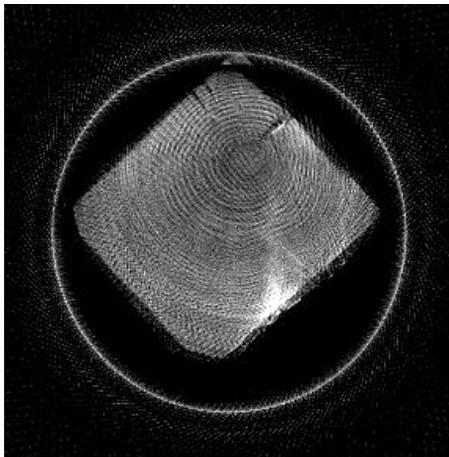
그림 3-5-23에 실험에 사용된 기둥 부재가 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 보수가 진행되었음에도 불구하고 여전히 기존의 부재와 새로운 부재 사이에 틈이 있었으며, 기둥 표면이 부후균에 의하여 오염되어 해체된 기둥 부재이었다.



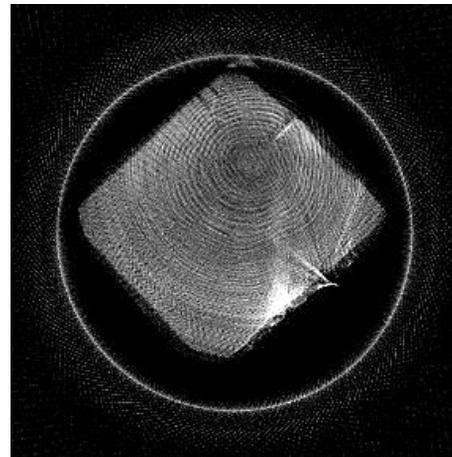
그림 3-5-23. 보수된 기둥 모습

그림 3-5-24에 기둥 부재에 대한 CT 이미지 결과가 제시되어 있다. 표면이 오염되어있음에도 불구하고 기둥 부재의 내부 상태는 양호한 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림으로 확인할 수 있었던 틈이 기둥 내부 전체에 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 간극은 미관상 좋지 않을 뿐만 아니라, 미생물이나 곤충이 간극을 통하여 목재 내부로 쉽게 접근할 수게 해주기 때문에 적절한 조치가 필요할 것으로 판단된다. 그림 3-5-24a와 그림 3-5-24b에서 철물 집합부가 있

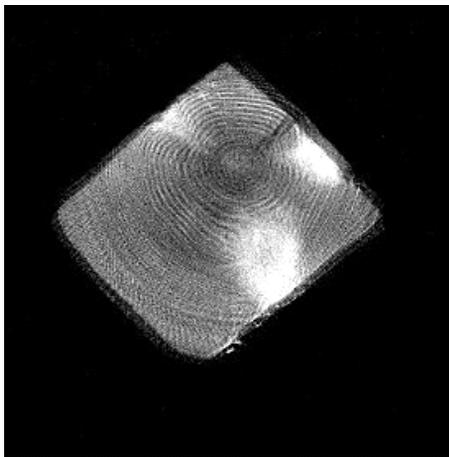
음을 확인할 수 있다. 의료용 CT 스캐너를 통하여 환자를 진찰할 때 환자의 몸에서 금속 물질은 모두 제거한 뒤 검사를 진행한다. 금속 물질로 인하여 CT 이미지가 왜곡될 수 있기 때문이다. 이러한 왜곡 현상을 metal artifact이라고 부른다. 그러나 목조 문화재나 건축물의 경우에는 목재 내에 철물 접합부를 제거할 수 없기 때문에 목조 건축물 등에 본 기술을 사용한다면 metal artifact을 제거할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.



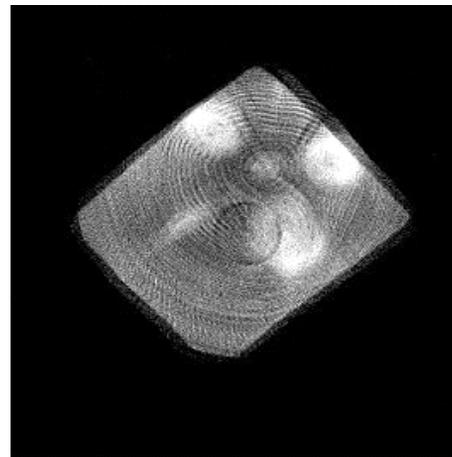
(a)



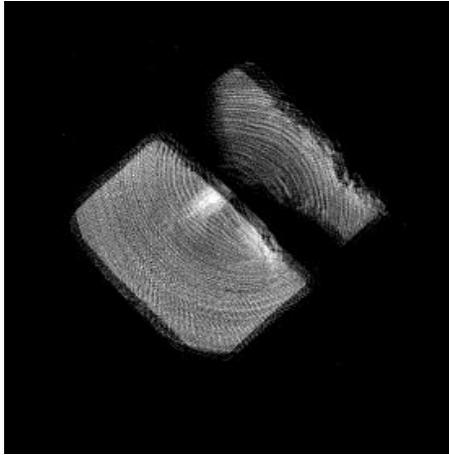
(b)



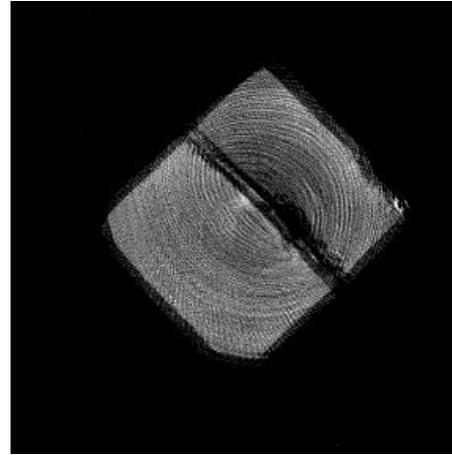
(c)



(d)



(e)

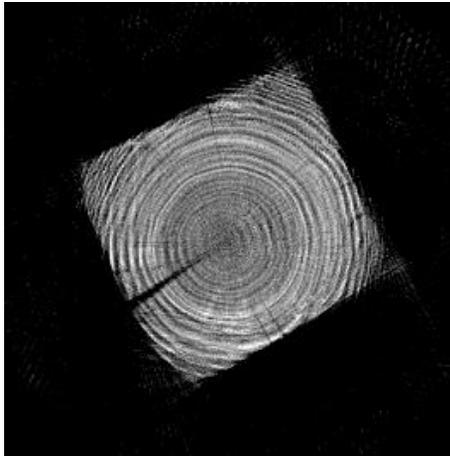


(f)

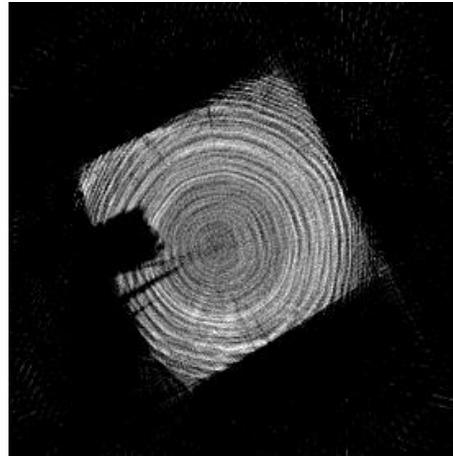
그림 3-5-24. 기둥 부재에 대한 CT 이미지

라. 나주 최석기 가옥 보 부재

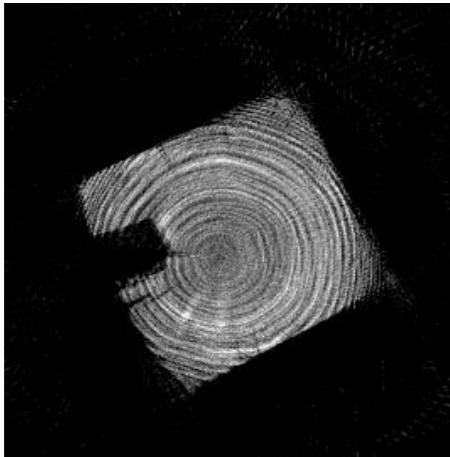
목조 문화재의 대표적인 구조부재인 보에 대해서 CT 이미지를 구성하였다(그림 3-5-25). 해체된 부재에 대해서 CT 기술을 적용한다면 부재의 재사용 유무를 판단할 수 있기 때문에 유용한 정보를 제공할 수 있다. 보 부재에 대하여 CT 이미지를 구성하였을 때 보 부재 내부에 열화는 확인할 수 없었다. 그러나 심재와 변재간의 밀도 차이로 인하여 단면 영상에서 심재가 뚜렷이 표시되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 보 부재의 이음을 위하여 파낸 부분 근처에서 할렬이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 보 부재 내 다른 곳에 비하여 많이 발생하는 것으로 미루어 보아 그 주변에서 수분의 접촉이 있거나 부재 간의 하중 이동 빈번하게 발생하고 있는 것으로 판단된다.



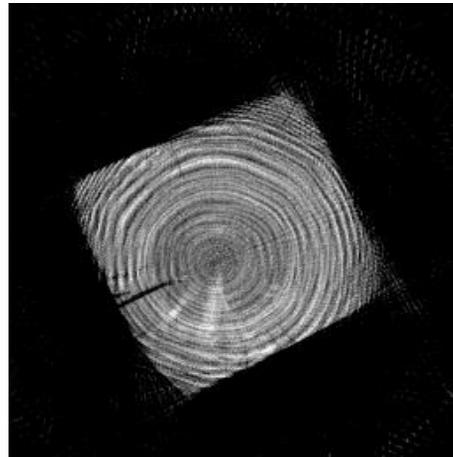
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-5-25. 보 부재에 대한 CT 이미지

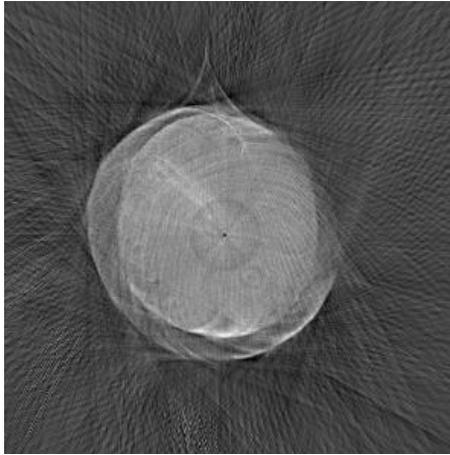
마. 영광 불갑사 나한상 머리

앞서 언급한 바와 같이, 불상과 같은 동산 문화재는 문화·종교적인 이유로 접근하기가 쉽지 않다. 그렇기 때문에 비접촉식 비파괴 측정 방법인 CT 기술은 불상과 같은 동산 문화재에 적용하기에 적절할 수 있다. 그림 3-5-26에 CT 기술을 적용한 영광 불갑사 나한상이 제시되어 있다.

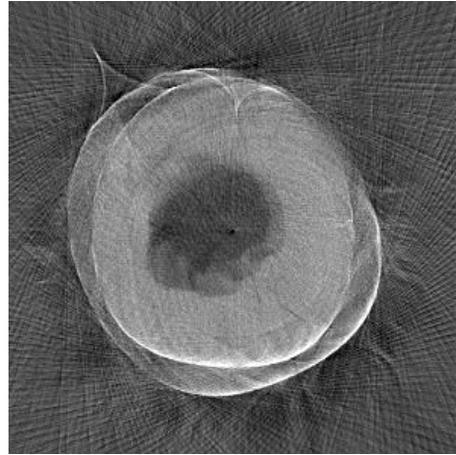


그림 3-5-26. 영광 불갑사 나한상

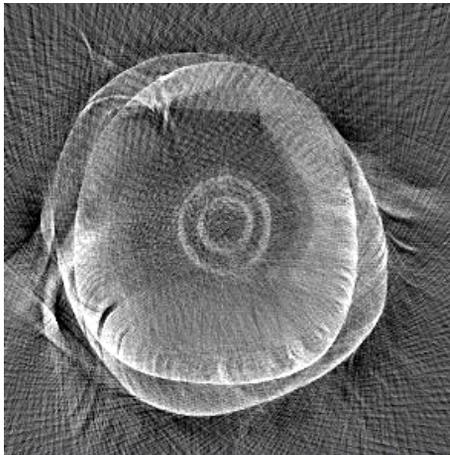
불상 내부에 있는 복장의 존재로 180개의 방사선 사진으로는 명확하게 불상 내부 모습을 이미지화 할 수 없었으나, 본 기술을 통하여 일부 의미 있는 결과를 얻었다. 그림 3-5-27에 제시되어 있는 것과 같이 불상 내부를 CT 이미지화 할 수 있었으며, 나한상 머리에 복장이 존재하고 있는 것을 확인할 수 있었다.



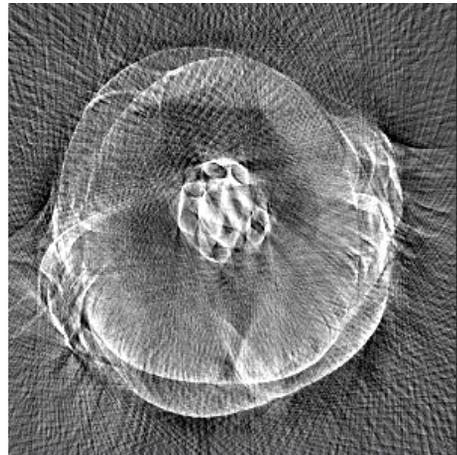
(a)



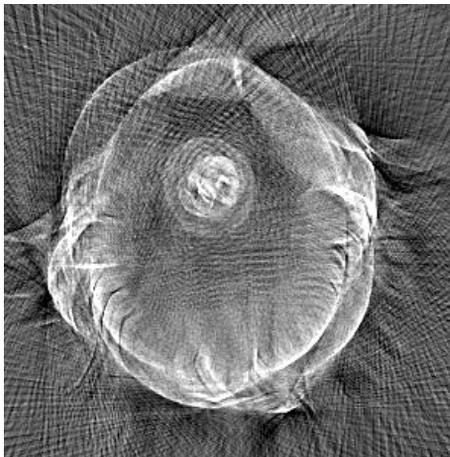
(b)



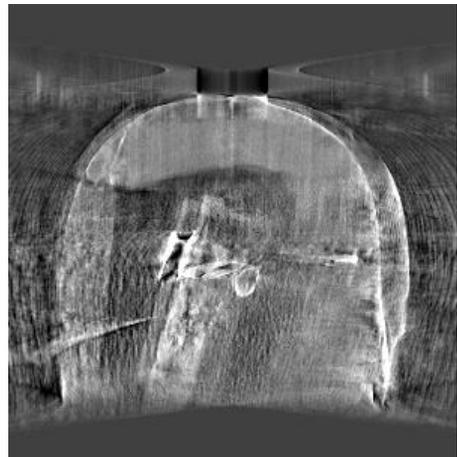
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 3-5-27. 나한상 머리 CT 이미지

그림 3-5-28은 그림 3-5-27b를 확대한 CT 이미지 결과이다. 그림 3-5-28을 통하여 나한상 머리를 확인하였을 때, 나한상 머리는 목재를 다른 재료로 둘러싸고 있는 방식으로 제작되어 있음을 확인할 수 있었으며, 복장을 위한 목재 내 공간도 확인할 수 있었다. 그러나 복장을 위한 목재 내 공간 주변으로 할렬이 다수 발생하고 있었다. 이는 공간과 목재 내 수분의 차이로 인하여 목재가 건조되어 발생한 것으로 사료된다.

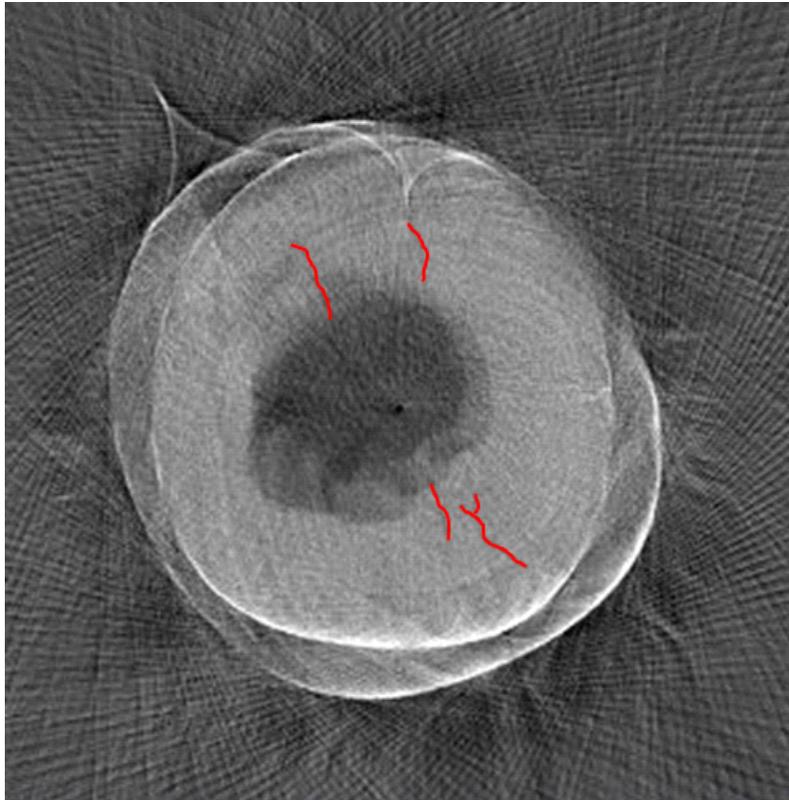


그림 3-5-28. 확대된 나한상 머리 CT 이미지

바. 2×6 제재목

오 등(2010)은 방사선 사진을 이용하여 용이와 목질부의 비를 계산하여 제재목의 휨강도를 예측하였다. 방사선 사진은 앞서 언급한 바와 같이 X선이 진행되는 방향의 정보가 중첩되어 나타나기 때문에 그러한 방법은 휨강도를 과소평가할 여지가 있다. 그러나 3차원 CT 이미지는 용이의 위치뿐만 아니라 형태까지 표현할 수 있기 때문에 방사선 사진을 이용한 방법보다 향상된 결과를 가질 수 있을 것으로 사료된다. 그림 3-5-29에 2×6 제재목에 대한 CT 결과가 제시되어 있다. CT 이미지에서 용이의 위치와 모양뿐만 아니라, 연륜의 모습, 수의 위치까지 파악할 수 있다.

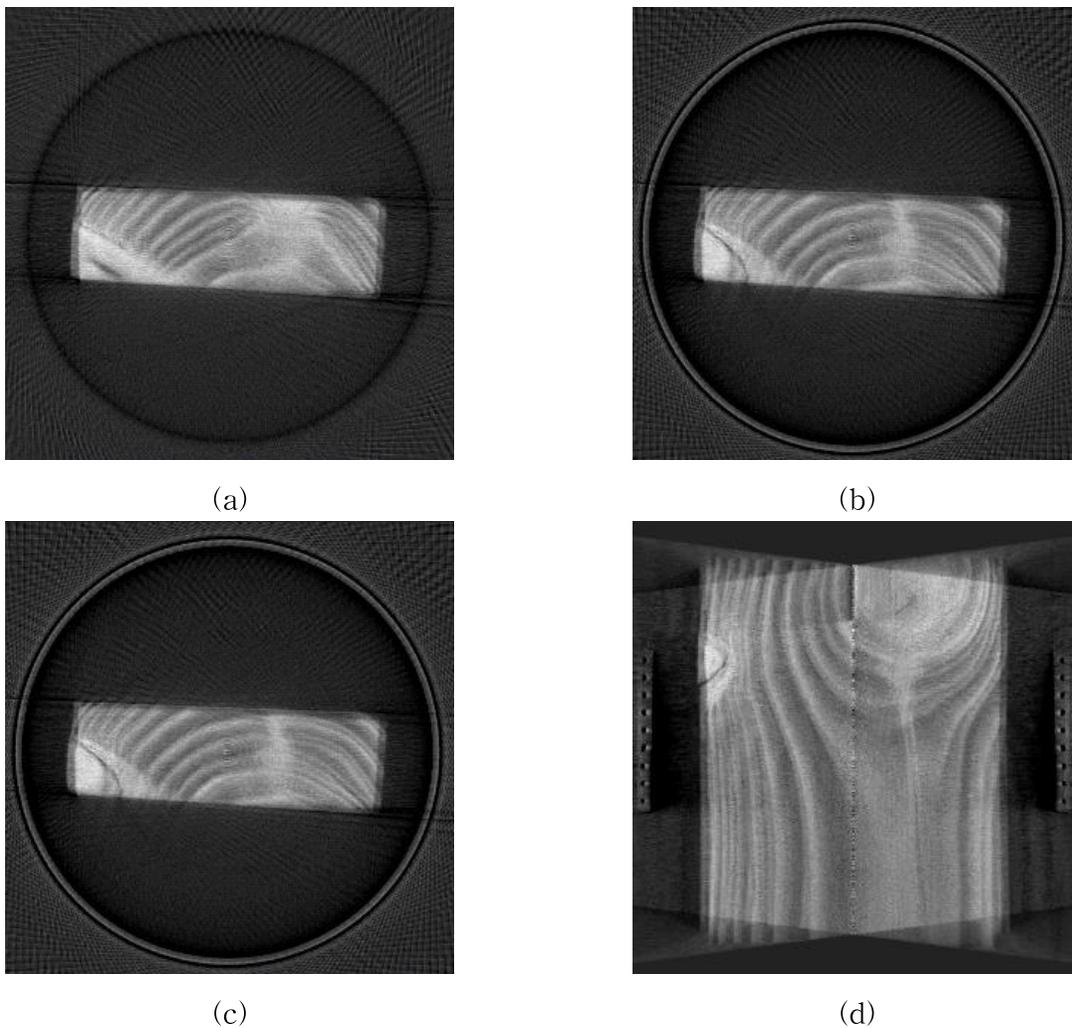


그림 3-5-29. 제재목 CT 이미지

APPENDIX 1. 일반 CT 이미지 재구성 알고리즘 (MATLAB)

1. 방사선 사진 디지털화

```
clear
clc

% <<===== 변수 및 상수 입력 시작 =====>>
% 변수입력 창
fprintf('=====\n')
fprintf('      CT 이미지 구성을 위한 입력 data 행렬 만들기\n')
fprintf('=====\n')

fprintf(' 1. 파일 호출\n')
m=input(' - dcm 파일 시작번호 : ');
n=input(' - dcm 파일 끝 번호 : ');

fprintf('-----\n')

fprintf(' 2. 사용할 행번호 결정\n')
rn=input(' - 프로젝션 기준 행 : '); % rn,row number of projection

fprintf('-----\n')

fprintf(' 3. 변환된 가로 pixel수 결정\n')
cw=input(' - 가로 pixel 수 : '); % cw, Covered Width

fprintf('=====\n')
fprintf('      입력 완료, 계산 중...\n')
fprintf('=====\n')

% 상수입력
```

```

np=n-m+1; % np,Number of Projection
ow=2540; % ow,Width of Original projection
rw=(ow-1)/(cw-1); % rw, Ratio of original to converted Width

% ===== 변수 및 상수 입력 끝 =====>>

% <<===== CT 입력 data 구성 시작 =====
% 변수선언
nsc=zeros(cw,1); % nsc,Number of Selected Column
avrg_cs=zeros(np,1); % avrg_cs,Average of Calibration Section
rt_avrg=zeros(np,1); % rt_avrg_cs,Ratio of Average
opt=zeros(np,cw); % opt,OutPuT (최종 결과)

% 변환 열번호행렬(nsc) 계산
for i=1:cw
    nsc(i)=round(rw*(i-1))+1;
end

% db 구성 및 보정
for i=1:np
    % data 구성
    k=m+i-1;
    odb=dicomread(sprintf('%d.dcm',k)); % 파일 호출
    ipt=odb(rn,:); % ipt,IntPuT (입력행렬)

    % format변환 및 값 보정
    for j=1:cw
        opt(i,j)=ipt(nsc(j)); % resizing
    end
end
end
opt=round(opt); % 명암값 정수 변환 및 전치행렬 변환

```

```

% <<===== CT 입력 data 구성 끝 =====

% <<===== 옵션 시작 =====
% 영상 반전
[c d]=size(opt);
inv_f(1:c,1:d)=2048; % inv_f,invesion factor
inv_opt=inv_f-opt; % inv_opt,inverted output
clear c d inv_f

% gray 스케일로 그림 표시
figure();
colormap(gray);
imagesc(inv_opt);
clear inv_opt
% ===== 옵션 끝 =====

% 변수삭제
clear m n np ow cw rw rn
clear nsc avrg_cs rt_avrg
clear i j k
clear odb ipt

% 프로그램 종료 알림
fprintf('----->> 입력 data 구성 완료!!!\n')

```

2. 거리에 따른 CT 좌표 설정

```

clear
clc

r=127; % detector 반지름
d=575; % X-ray tube와 detector 사이의 거리

```

```
rpx=250; % digitalized pixel 수의 반
```

```
n=180; %
```

```
dpx=d*rpx/r;
```

```
op(2*rpx*n,4)=zeros;
```

```
theta=2*pi()/n;
```

```
for i=1:rpx
```

```
    grd=-dpx/(rpx-(i-1));
```

```
    a=1+grd^2;
```

```
    b=(dpx-rpx)*grd;
```

```
    c=(dpx-rpx)^2-rpx^2;
```

```
    op(i,1)=(-b-sqrt(b^2-a*c))/a; % x1 좌표
```

```
    op(i,2)=grd*op(i,1)+dpx-rpx; % y1 좌표
```

```
    op(i,3)=(-b+sqrt(b^2-a*c))/a; % x2 좌표
```

```
    op(i,4)=grd*op(i,3)+dpx-rpx; % y2 좌표
```

```
    op(2*rpx-(i-1),1)=-op(i,1);
```

```
    op(2*rpx-(i-1),2)=op(i,2);
```

```
    op(2*rpx-(i-1),3)=-op(i,3);
```

```
    op(2*rpx-(i-1),4)=op(i,4);
```

```
for j=1:(n-1)
```

```
    op(j*2*rpx+i,1)=cos(theta*j)*op(i,1)-sin(theta*j)*op(i,2);
```

```
    op(j*2*rpx+i,2)=sin(theta*j)*op(i,1)+cos(theta*j)*op(i,2);
```

```
    op(j*2*rpx+i,3)=cos(theta*j)*op(i,3)-sin(theta*j)*op(i,4);
```

```
    op(j*2*rpx+i,4)=sin(theta*j)*op(i,3)+cos(theta*j)*op(i,4);
```

```
    op(j*2*rpx+2*rpx-(i-1),1)=cos(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),1)-sin(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),2);
```

```
    op(j*2*rpx+2*rpx-(i-1),2)=sin(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),1)+cos(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),2);
```

```
    op(j*2*rpx+2*rpx-(i-1),3)=cos(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),3)-sin(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),4);
```

```
op(j*2*rpx+2*rpx-(i-1),4)=sin(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),3)+cos(theta*j)*op(2*rpx-(i-1),4);
```

```
end
```

```
end
```

3. CT 이미지 구성

```
clear, clf
```

```
cc1=0; cc2=512;
```

```
nopr=180; % number of projection
```

```
nopx=500; % number of pixel
```

```
load coordinate.txt
```

```
load result.txt
```

```
fn=input('Filter? 1)RAM-LAK, 2) Shepp-Logan, 3) Lowpass cosine :');
```

```
if fn==1, % RAM-LAK filter
```

```
    afr(nopx,nopr)=0; % after filter result
```

```
    ift2(nopx)=0;
```

```
    for i=1:nopx
```

```
        ift(i)=1; % adjust the filtering result
```

```
    end
```

```
    for i=1:nopx
```

```
        for j=1:nopx
```

```
            if i==j, ift2(i)=ift2(i)+1/4*ift(j);
```

```
            elseif rem(i-j,2)~=0, ift2(i)=ift2(i)-ift(j)/((i-j)*pi)^2;
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    end
```

```
    for h=1:nopr
```

```

for i=1:nopx
    for j=1:nopx
        if i==j, afr(i,h)=afr(i,h)+1/4*result(j,h);
        elseif rem(i-j,2)~=0, afr(i,h)=afr(i,h)-result(j,h)/((i-j)*pi)^2;
        end
    end
end
end
end

```

```

for i=1:nopr
    afr2(:,i)=afr(:,i)./ift2';
end
result=afr2;
clear afr afr2 ift ift2

```

```

elseif fn==2, % Shepp-Lagan filter
afr(nopx,nopr)=0; % after filter result
ift2(nopx)=0;
for i=1:nopx
    ift(i)=1; % adjust the filtering result
end

```

```

for i=1:nopx
    for j=1:nopx
        ift2(i)=ift2(i)+(2/(pi^2*(1-4*(i-j)^2)))*ift(j);
    end
end
end

```

```

for h=1:nopr
    for i=1:nopx
        for j=1:nopx
            afr(i,h)=afr(i,h)+(2/(pi^2*(1-4*(i-j)^2)))*result(j,h);
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    for i=1:nopr
        afr2(:,i)=afr(:,i)/ift2';
    end
    result=afr2;
    clear afr afr2 ift ift2

elseif fn==3, % Lowpass Cosine
    afr(nopx,nopr)=0; % after filter result
    ift2(nopx)=0;
    for i=1:nopx
        ift(i)=1; % adjust the filtering result
    end

    for i=1:nopx
        for j=1:nopx
            if i==j, ift2(i)=ift2(i)+((pi^2-4)/(4*pi^2))*ift(j);
            elseif abs(i-j)==1, ift2(i)=ift2(i)+((pi^2-8)/(8*pi^2))*ift(j);
            elseif rem(i-j,2)==0, ift2(i)=ift2(i)-(((i-j)^2+1)/(((i-j)^2-1)^2*pi^2))*ift(j);
            else ift2(i)=ift2(i)-(1/((i-j)*pi)^2)*ift(j);
        end
    end

    end

    for h=1:nopr
        for i=1:nopx
            for j=1:nopx
                if i==j, afr(i,h)=afr(i,h)+((pi^2-4)/(4*pi^2))*result(j,h);
                elseif abs(i-j)==1, afr(i,h)=afr(i,h)+((pi^2-8)/(8*pi^2))*result(j,h);
                elseif
                    rem(i-j,2)==0,
afr(i,h)=afr(i,h)-(((i-j)^2+1)/(((i-j)^2-1)^2*pi^2))*result(j,h);

```

```

        else afr(i,h)=afr(i,h)-(1/((i-j)*pi)^2)*result(j,h);
        end
    end
end

for i=1:nopr
    afr2(:,i)=afr(:,i)/ift2';
end
result=afr2;
clear afr afr2 ift ift2
end

sxp=coordinate(:,1); % source X position
syp=coordinate(:,2); % source Y position
rxp=coordinate(:,3); % receiver X position
ryp=coordinate(:,4); % receiver Y position
for i=1:nopr
    sgr(nopx*(i-1)+1:nopx*i)=result(:,i); % results of specific gravity
end

sgr=sgr';
clear coordinate result

%-----
gd=input('grid distance:');
ttn=length(sgr); % total test number

xcn=ceil((max(rxp)-min(rxp))/gd); % cell number in x-axis
ycn=ceil((max(ryp)-min(ryp))/gd); % cell number in y-axis
tcn=xcn*ycn; % total cell number

gtl2(tcn)=0; mftcn=0; % calculation of total grid transit length

```

```

for i=1:ttn
    clear gtl
    gtl(tcn)=0; % calculation of grid transit length
    if sxp(i)==rxp(i), % case of two points are on the same y-axis
        if syp(i)>ryp(i), by=syp(i); sy=ryp(i);
        else by=ryp(i); sy=syp(i);
        end
        cn=(ceil(by/gd)-1)*xcn+ceil(sxp(i)/gd); % cell number
        gtl(cn)=by-(ceil(by/gd)-1)*gd;
        for j=1:(ceil(by/gd)-fix(sy/gd)-2)
            cn=cn-xcn; gtl(cn)=gd;
        end
        cn=cn-xcn;
        gtl(cn)=(fix(sy/gd)+1)*gd-sy;

    elseif syp(i)==ryp(i), % case of two points are on the same x-axis
        if sxp(i)>rxp(i), bx=sxp(i); sx=rxp(i);
        else bx=rxp(i); sx=sxp(i);
        end
        cn=(ceil(syp(i)/gd)-1)*xcn+ceil(bx/gd); % cell number
        gtl(cn)=bx-(ceil(bx/gd)-1)*gd;
        for j=1:(ceil(bx/gd)-fix(sx/gd)-2)
            cn=cn-1; gtl(cn)=gd;
        end
        cn=cn-1;
        gtl(cn)=(fix(sx/gd)+1)*gd-sx;

    else
        % case of general
        slope=(syp(i)-ryp(i))/(sxp(i)-rxp(i)); % slope between two point

        if slope>0,

```

```

if sxp(i)>rxp(i),
    bx=sxp(i); sx=rxp(i); by=syp(i); sy=ryp(i);
else bx=rxp(i); sx=sxp(i); by=ryp(i); sy=syp(i);
end
xx=0; yy=0;
while 1
    xx=fix(sx/gd)*gd+gd;
    yy=slope*(xx-bx)+by;
    if yy>(fix(sy/gd)*gd+gd),
        yy=fix(sy/gd)*gd+gd; xx=(yy-by)/slope+bx;
    end
    if xx >= bx, break end
    cn=fix(sy/gd)*xcn+fix(sx/gd)+1;
    gtl(cn)=sqrt((xx-sx)^2+(yy-sy)^2);
    sy=yy; sx=xx;
end

cn=fix(sy/gd)*xcn+fix(sx/gd)+1;
gtl(cn)=sqrt((bx-sx)^2+(by-sy)^2);
end

if slope<0,
    if sxp(i)>rxp(i),
        bx=sxp(i); sx=rxp(i); by=ryp(i); sy=syp(i);
    else bx=rxp(i); sx=sxp(i); by=syp(i); sy=ryp(i);
    end
    xx=0; yy=0;
    while 1
        xx=fix(sx/gd)*gd+gd;
        yy=slope*(xx-bx)+sy;
        if yy<((ceil(by/gd)-1)*gd),
            yy=(ceil(by/gd)-1)*gd; xx=(yy-sy)/slope+bx;
        end
    end
end

```

```

        if xx >= bx, break end
        cn=(ceil(by/gd)-1)*xcn+fix(sx/gd)+1;
        gtl(cn)=sqrt((xx-sx)^2+(yy-by)^2);
        by=yy; sx=xx;
    end

        cn=(ceil(by/gd)-1)*xcn+fix(sx/gd)+1;
        gtl(cn)=sqrt((bx-sx)^2+(by-sy)^2);
    end
end

gtl2=gtl2+gtl;
mf=mf+sgr(i)*gtl;
end

% image reconstruction
for i=1:tcn
    if gtl2(i)~=0, mf(i)=mf(i)/gtl2(i); end
end
clear gtl gtl2

% move image the correct position
for i=1:ycn
    sgim(i,:)=mf((i-1)*xcn+1:i*xcn);
end

% image reconstruction 2
lox=length(sgim(1,:));
loy=length(sgim(:,1));
for i=1:lox+3
    for j=1:loy+3
        x(i)=i*gd; y(j)=j*gd;
    end
end
end

```

```

for i=1:loy
    midgr(i,:)= [0,sgim(i,:),0,0];
end

```

```

for i=1:lox+3
    sgimage(:,i)= [0;midgr(:,i);0;0];
end

```

4. 시각화 부분

```

%pcolor(x,y,sgimage)
%shading flat
%caxis([cc1,cc2])
%colorbar

```

```

%-----

```

```

% post treatment of image (smooth)

```

```

for h=1:3

```

```

    clf, clear midgr

```

```

    for i=1:lox

```

```

        for j=1:loy

```

```

midgr(j+1,i+1)=(sgimage(j,i+1)+sgimage(j+1,i+1)+sgimage(j+2,i+1)+sgimage(j+1,i)+sgimage(j+1,i
+2))/5;

```

```

        end

```

```

    end

```

```

sgimage=midgr;

```

```

sgimage(loy+3,lox+3)=0;

```

```

for i=1:lox+3

```

```

    for j=1:loy+3

```

```
        x(i)=i*gd; y(j)=j*gd;
    end
end
end

pcolor(x,y,sgimage)
shading flat
caxis([cc1,cc2])
```


APPENDIX 2. 개선된 CT 이미지 재구성 알고리즘 (C++)

```
// fdk.cl

#define __OPENCL_C__
#include "clt.h"
#include "cl_types.h"

__kernel void minus_log(
    __global real* img,
    const real intensity0
)
{
    int i = get_global_id(0);
    int j = get_global_id(1);
    int idx = i + j * get_global_size(0);
    img += idx;
    real p = *img;
    real r = intensity0 / max(p, REAL_MIN);
    *img = log(max(r, (real)1));
}
```

1. Preprocessing: gray scale을 density scale로 바꾸기 위한 부분

```
__kernel void minus_log_airmap(
    __global real* img,
    __global const real* airmap
)
{
    int i = get_global_id(0);
    int j = get_global_id(1);
```

```

int idx = i + j * get_global_size(0);
img += idx;
airmap += idx;
real p = *img;
real r = *airmap / max(p, REAL_MIN);
*img = log(max(r, (real)1));
}

```

2. CT 이미지 재구성 알고리즘

```

__kernel void scale_proj(
    __global real* img,
    int2 proj_size,
    real2 proj_pitch,
    real2 proj_offset,
    real sdd
)
{
    int i = get_global_id(0);
    int j = get_global_id(1);
    int idx = i + j * get_global_size(0);
    img += idx;

    // proj point in global frame
    real2 q =
        (((real2)(i, j) + (real).5) - (real).5 * convert_real2(proj_size)) * proj_pitch +
        proj_offset;
    real3 p = (real3)(q.x, sdd, -q.y);

    // weighting
    real w = sdd / length(p);
    *img *= w;
}

```

```

void image_to_signal_without_extrapolation(
    __global real2* a,
    __global const real* img,
    const int img_size_x,
    const int img_size_y
)
{
    int i = get_global_id(0);
    int j = get_global_id(1);
    int idx = i + j * get_global_size(0);
    a[idx] = (i < img_size_x && j < img_size_y) ?
        (real2)(img[i + j * img_size_x], 0) :
        (real2)0;
}

```

```

void image_to_signal_with_extrapolation(
    __global real2* a,
    __global const real* img,
    const int img_size_x,
    const int img_size_y,
    const int extrapolation_depth
)
{
    int i = get_global_id(0);
    int j = get_global_id(1);
    int N = get_global_size(0);
    int idx = i + j * N;
    real2 val = 0; // padding value
    if (j < img_size_y)
    {
        if (i < img_size_x)
        {

```

```

        val = (real2)(img[i + j * img_size_x], 0);
    }
    else
    {
        int x = i - img_size_x;
        real v;
        real w;
        if (x < (N - img_size_x) / 2)
        {
            v = img[img_size_x - 1 + j * img_size_x];
        }
        else
        {
            v = img[j * img_size_x];
        }
        val = v;
    }
}
a[idx] = val;
}

```

```

__kernel void image_to_signal(
    __global real2* a,
    __global const real* img,
    const int img_size_x,
    const int img_size_y,
    const int extrapolation_depth
)
{
    if (extrapolation_depth > 0)
        image_to_signal_with_extrapolation(
            a, img, img_size_x, img_size_y, extrapolation_depth);
    else

```

```

        image_to_signal_without_extrapolation(
            a, img, img_size_x, img_size_y);
    }

```

```

__kernel void signal_to_image_flt(
    __global float* img,
    __global const real2* a,
    const int a_stride
)
{
    int i = get_global_id(0);
    int j = get_global_id(1);
    int idx = i + j * get_global_size(0);
    img[idx] = (float)a[i + j * a_stride].x;
}

```

```

__kernel void apply_filter(
    __global real2* a,
    __constant real* filt
)
{
    int i = get_global_id(0);
    int j = get_global_id(1);
    int idx = i + j * get_global_size(0);
    a[idx] *= filt[i];
}

```

```

__kernel void half_fan_weighting(
    __global float* img,
    real proj_pitch_x,
    real proj_offset_x
)
{

```

```

int i = get_global_id(0);
int j = get_global_id(1);
int proj_size_x = get_global_size(0);
int idx = i + j * proj_size_x;
img += idx;

real d2 = proj_size_x - 2 * fabs(proj_offset_x) / proj_pitch_x;
real w;
if (proj_offset_x > 0)
{
    real x = i + .5;
    w = (x < d2) ? (1 - cospi(x / d2)) : 2;
}
else
{
    real x = i + .5 - proj_size_x + d2;
    w = (x > 0) ? (1 + cospi(x / d2)) : 2;
}


```

```

__kernel void fill(
    __global real* a,
    const real f
)
{
    int x = get_global_id(0);
    int y = get_global_id(1);
    int z = get_global_id(2);
    int idx = x + (y + z * get_global_size(1)) * get_global_size(0);
    a += idx;
    *a = f;
}

```

```

__kernel void scale_volume(
    __global real* a,
    const int proj_count,
    const real w
)
{
    int x = get_global_id(0);
    int y = get_global_id(1);
    int z = get_global_id(2);
    int idx = x + (y + z * get_global_size(1)) * get_global_size(0);
    a += idx;
    const real k = REAL_PI * 2 / proj_count * w;
    const real v = *a;
    *a = isnormal(v) ? (k * v) : (real)0;
}

```

3. 시각화 부분

```

__constant sampler_t proj_sampler =
    CLK_NORMALIZED_COORDS_TRUE |
    CLK_ADDRESS_CLAMP |
    CLK_FILTER_LINEAR;

```

```

__kernel void sum_backprojection(
    __global real* vol,
    __read_only image2d_t proj,
    int3 vol_size,
    real3 vol_pitch,
    real3 vol_offset,
    int2 proj_size,
    real2 proj_pitch,
    real2 proj_offset,

```

```

real sdd,
real sod,
const real sin_theta,
const real cos_theta
)
{
int x = get_global_id(0);
int y = get_global_id(1);
int z = get_global_id(2);
int idx = x + (y + z * get_global_size(1)) * get_global_size(0);
vol += idx;

// volume point in global frame
real3 p =
    (((real3)(x, y, vol_size.z - z - 1) + (real).5) - (real).5 *
convert_real3(vol_size)) * vol_pitch +
    vol_offset;

// projection frame
real3 n = (real3)(-sin_theta, cos_theta, 0);
real3 i = (real3)(cos_theta, sin_theta, 0);
real3 j = (real3)(0, 0, -1);

// projected point in projection frame
real l_inv = 1. / (sod + dot(p, n));
real t = sdd * l_inv;
real2 q = t * (real2)(dot(p, i), dot(p, j));

// projected point in texture coordinate
real2 tex_coord =
    (q - proj_offset) / (proj_pitch * convert_real2(proj_size)) + (real).5;

// sample texture and accumulate to volume

```

```
real f = (real)read_imagef(proj, proj_sampler, convert_float2(tex_coord)).x;  
real w = sod * l_inv;
```

```
*vol += ((w * w) * f);
```

```
}
```


제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1절 연차별 연구목표 및 평가 착안점

| 구분 | 연도 | 세부연구개발 목표 | 가중치 | 평가의 착안점 및 기준 |
|----------|------|------------------------------|------|---|
| 1차 년도 | 2011 | ○ 입목에 적용하기 위한 X선 조건 탐색 | 50 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ X선 강도와 입목의 투과 깊이 관계 도출 ■ 입목 수종에 따른 X선 감소계수 도출 ■ 입목에 적용하기 위한 상용 X선 선원 및 디지털 디텍터의 정보 제공 |
| | | ○ 입목에 적용하기 위한 X선 CT 기술 조건 탐색 | 50 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ X선 방사 횟수에 따른 입목 내부 상태 조사 ■ X선 방사 횟수 조절에 따른 검사의 신속성과 정확성을 실험실 단계에서 검증 ■ 입목 적용 가능한 장비 설계 여부 |
| 2차 년도 | 2012 | ○ 입목 내부 상태 검사 | 50 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ 입목 내부 수분과 열화 탐지 및 검증 ■ 천연 결함(옹이, 할렬 등)과 내부 열화 구분을 위한 알고리즘 개발 여부 ■ 수간 내부 부후 탐지 여부 |
| | | ○ 입목에 적용하기 위한 CT 장치 개발 | 50 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ 상용 X선 선원 및 디지털 디텍터 적용 여부 ■ 입목에 적용 가능한 장비 설계 및 개발 ■ 검사 가능한 최대 높이 및 직경에 대한 조사 및 적용 |
| 3차 년도 | 2013 | ○ 연구 대상지 부후 및 수분 탐지 | 40 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ X선 CT 결과와 임분에서 표본 추출된 입목의 부후 발생 결과 비교 ■ 탐지의 정확도에 검증 |
| | | ○ 검사 체계 확립 | 50 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ 단계별 검사법 확립 ■ 부후 판단 기준 및 검사 시스템 확립을 통한 내부 검사의 정확도 검증 |
| | | ○ 전체 임분의 내부 열화 상태 추정 | 10 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ 항공 라이다 데이터 수집 및 표본 추출된 입목 내부 열화 검사 비교 ■ 임분 전체의 내부 열화 상태를 추정 |
| 최종 평가 | | ○ 입목 내부 피해목 탐지 | 30 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ 열화 탐지 시각화 |
| | | ○ 단계별 측정 방법 확립 | 40 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ 단계별 측정방법 최적화 |
| | | ○ 측정 적용성 개선 | 30 % | <ul style="list-style-type: none"> ■ 현장 적용 가능한 이동형 장비 및 측정 시간 단축 |

※ 항공 라이더는 거시적 관점에서 시험 대상지를 선정하기 위해 활용할 계획이었으나, 국내 라이더 DB가 충분히 축적되지 않고 그 점밀도가 낮아 연구목표를 충족할 수 없다고 판단되어 제외함(2차년도 중간평가). 이에 기술 개발에 초점을 맞춰 진행하되, 적용 예시를 넓히는 방향으로 연구를 진행하라는 심사위원의 권고를 받아드려, 전체 임분 열화상태 추정은 연구 목표에서 제외함.

제 2절 연구개발목표의 달성도

【1차년도】

| 구분 (연도) | 세부과제명 | 세부연구목표 | 달성도 (%) | 연구개발 수행내용 |
|--------------------|------------------------------|---------------------------|------------|---|
| 1차 년도 (2011) | [1세부과제] 입목 내부 평가 기술 개발 | ○ 연구 대상 선정 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 주요 수종의 직경 및 각 수종의 생재 고유 함수율 등의 기초 자료 확보 |
| | | ○ 내부 열화 탐지를 위한 X선 조건 탐색 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 현장 적용을 위한 X선 조사량 선정 ■ 입목 수종에 따른 생재 고유 함수율 및 전건밀도에 따른 X선 감소 계수 도출 |
| | | ○ 입목에 적용하기 위한 X선 CT 조건 탐색 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 최적 X선 촬영 횟수 확인 ■ X선 CT 보정 ■ 입목에 적용 가능한 장비 설계 |

【2차년도】

| 구분 (연도) | 세부과제명 | 세부연구목표 | 달성도 (%) | 연구개발 수행내용 |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|--|--|
| 2차 년도 (2012) | [1세부과제] 입목 내부 평가 기술 개발 | ○ 입목 내부 수분, 열화 탐지 및 시각화 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 수종, 전건밀도 및 함수율에 따른 X선 감쇠 계수 적용을 통한 입목 내부 밀도 분포 탐지 ■ 천연 결함 (옹이, 할렬)과 내부 열화 구분을 위한 알고리즘 개발 ■ 열화 판단 기준 정립 |
| | | ○ 입목에 적용하기 위한 X선 CT 장치 개발 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 상용 X선 선원 및 디지털 디텍터 적용을 위한 조건 고찰 ■ 입목에 적용 가능한 장비 설계 및 개발 |
| | ○ 기존의 입목 비파괴 검사법 적용 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 대상 입목 모니터링 (상세검사) | |
| | ○ 임분의 내부 열화 상태 검사 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 항공 사진 및 임상도 수집 ■ 표본 추출된 입목 내부 열화 검사 | |

【3차년도】

| 구분 (연도) | 세부과제명 | 세부연구목표 | 달성도 (%) | 연구개발 수행내용 |
|--------------------|------------------------------|-------------------------|------------|--|
| 3차 년도 (2013) | [1세부과제] 입목 내부 평가 기술 개발 | ○ 연구 대상지 부후 현황 조사 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 연구 대상지 선정 ■ 입목의 육안 평가 ■ 외부 상처 및 고사지 개수 조사 |
| | | ○ 부후 및 수분 탐지 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 임분에서 표본 추출된 입목의 부후 발생률 조사 ■ X선 CT 기술 적용을 통하여 입목의 입체 영상 구현 |
| | | ○ 입목 부후 발생환경 및 시기 추정 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 임분/입지에 따른 부후 발생 원인 추정 ■ 심재부후목과 건전목의 생장률 비교 |
| | | ○ 검사 체계 확립 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 단계별 검사법 확립 ■ 부후 판단 기준 및 검사 시스템 확립 |

제 3절 관련분야의 기술발전예의 기여도

1. 입목 내부 평가 기술 개발

기존의 입목 내부 평가 기술과 달리, 본 연구에서 개발한 입목 내부 평가 기술은 입목에 2차적인 피해를 입히지 않고 입목 내부 상태를 시각화 할 수 있다. 현장에서 개발된 기술을 적용하기 위하여, 우리나라 임지 상태를 고려한 장비 개발과 데이터 처리 프로그램을 개발하였다. 개발된 입목 내부 평가 기술을 이용하여 입목에 대한 이해나 생물학적·병리학적인 정보를 사용자에게 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 목재의 비파괴 평가 방법

목재에 적용되고 있는 비파괴 평가 방법은 점차 목재 내부를 시각화하는 방향으로 기술 개발이 이루어지고 있다. 그 중 X선을 활용하는 방법은 신뢰도가 높고 다수의 방사선 사진을 이용하여 단면 영상을 재구성할 수 있기 때문에 널리 사용되어져 왔다. 그러나 X선 CT 기술은 현장 적용성이 낮아, 문화재 보존 분야에서 쉽게 사용되지 못했다. 본 과제의 개발 결과는 이러한 문제점을 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

제 5장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

제 5장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

제 1절 실용화·산업화 계획

- 현장 적용이 가능한 X선 CT 기술
 - X선 CT 기술을 현장에서 적용하기 위한 장비 및 프로그램 개발 완료
 - 개발된 기술 적용 결과 데이터베이스화 및 다양한 분야에 적용
 - (재)연구성과실용화진흥원에서 실시한 미래창조과학부 연구성과 사업화 지원을 위한 기술 컨설팅 결과와 특허 및 홍보자료를 이용하여 자체사업화를 진행할 계획

제 2절 기술 확산 계획

- 홍보 계획
 - 문화재 분야에 본 기술을 홍보하기 위한 자료 소개집 작성

Sales Material Kit 연구성과실용화진흥원

유망기술 자료 소개집

기술 명 : 목재 내부 검사를 위한 이동 가능한 X선 단층촬영 기술

기술 보유기관 : 서울대학교

연구성과실용화진흥원

목재 내부 검사를 위한 X선 단층촬영 기술

기술개요
 목조 건조 문화재와 불상, 경판과 같은 이동이 제한된 목재 등상 문화재의 내부검사를 목적으로 하고 휴대, 분해, 조립이 가능한 목재 검사용 회전형 엑스레이 장치 및 단층촬영 기술

기존 기술의 문제점

- X-ray를 이용한 목재 검사시 경우, 목재와 일정한 간격을 유지한 상태에서 다양한 방향에서의 영상을 얻어야 하나, 종래에는 회전형 장치가 없어 목재의 정확한 상태 측정이 어려움
- 종래 X선 CT장비의 경우, 장비가 연구소 내에 고정 설치되어 있어 검사대상을 이동하여 측정해야 하나, 이동 중에도 쉽게 손상될 수 있는 문화재를 이동시키는 어려운 실정
- 목조 문화재의 기증, 업무과 같이 집단이 노출되지 않은 경우 촬영의 gantry 삽입이 불가능
- 목재와 수분을 구분하지 못하고 목재와 수분의 밀도가 모두 포함된 밀도를 측정.

차별성 및 효과

- **차별성**
 - 모든 장비가 분해, 이동, 현장 조립이 용이하여, 피시험체를 이동시키지 않으면서 자체시설을 설치하기 어려운 현장상황을 고려하여 방사선량이 낮은 X선을 사용함
- **기술적 효과**
 - 1) 사용자의 안전 보장, 높은 전력 불필요 ⇒ 배터리로 장비 작동 가능
 - 2) 장비의 이동 뿐만 아니라 분해가 가능하고, 현장에서 재조립이 가능한 gantry 개발로 피시험체의 내부 상태를 파악하는데 충분한 품질의 단층영상 획득 가능
 - 3) 순수 목재와 수분을 구분하는 기능, 피시험체의 순수 목재밀도 정보와 함수를 정보의 분리 획득
 - 4) 목재 문화재에 손상 없이, 문화재의 보존에 절대적으로 필요한 정보인 내부 상태 검사
 - 5) 본 기술의 적용을 통해 연료를 빨리 인식함으로써, 건축물의 붕괴 및 손상의 조기 탐지

현장 적용을 위한 X선 CT 기술 구성 장비
 a : X선 선원 b : X선 디텍터, c : Gantry type I, d : Gantry type II

- 미래기술마당(http://rnd.compa.re.kr)에 기술소개서 등록

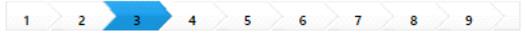


- 기술찾기
- 통합기술
 - 사업화유망기술
 - 연구성과사업화 대상기술
 - 기술예고제

연구성과사업화대상기술 연구성과사업화대상기술을 소개해 드립니다.



| | |
|--------|-------------------------------|
| 기술명 | 목재 내부 검사를 위한 이동가능한 X선 단층촬영 기술 |
| 연구자 | 이전제 (서울대학교) |
| 문의처 | 문의처정보 |
| 정보제공기관 | 연구성과실용화진흥원 |
| 기술완성도 | 기능 및 개념 검증 |



기술개요

- 대상기술은 이동이 제한된 피시험체(목조 건조 문화재와 불상, 경관과 같은 이동이 제한된 목재 등산 문화재)의 내부 검사를 목적으로 하고, 휴대, 분해, 조립이 가능한 gantry, X선 선원, 디텍터 그리고 데이터 처리 소프트웨어로 구성되어 있다.
- Gantry의 회전을 통해 일정 각도에서 얻어진 radiograph들을 데이터 연산을 통해 대상 물체의 단면영상 및 3차원 영상을 얻어 내는 기술이다.

기술의 우수성

- 장비의 높은 이동성
 가. Hounsfield에 의해 CT 기술이 선보인 이래로, CT 기술은 장비의 개발과 더불어 비약적으로 발전해왔으며, 의료용 산업용으로 활용되고 있다.
- 나. 특히 의료진단을 목적으로 복잡한 인체 내부를 조사하기 위하여 고해상도의 CT 이미지를 얻는 기술은 이미 일반화 되어 있다.
- 다. 이러한 의료용, 산업용 CT 기술은 검사자의 안전을 위하여 차폐시설이 완비된 공간에서만 사용되고 있으며, 물리적 회전이 요구되는 gantry는 안정된 기반 위에 고정되어 설치되어 활용되고 있다.

제 3절 특허·품종·논문 등 지식재산권 확보 계획

1. 지식재산권

- 특허: 목재 검사용 회전형 엑스레이 장치
(등록번호: 101284375, 등록일: 2013년 07월 03일)
- 특허: 현장 적용을 위한 엑스레이 간트리
(출원 중)
- 프로그램 등록: 목재 내부 씨티 이미지 재구성을 위한 프로그램
(등록 중)

2. 논문

- Density calculation of wood by portable X-ray tube with consideration of penetrating depth, *Journal of wood science*, 60(2), 105-110.
- X-ray computed tomography on larger diameter timber than digital detector, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 41(5), 385-391
- Development of stress wave indices for heart-rot detection in Teak tree, *Wood Science and Technology*, 심사 中
- Nondestructive evaluation of moisture content for wood with dual-energy X-ray absorptiometry, *Wood Science and Technology*, 심사 中
- Density prediction of irregular shaped wood with consideration of penetrating depth, *Journal of wood science*, 투고 예정
- Heart rot detection by portable CT installation with soft x-rays, *Journal of wood science*, 투고 예정

3. 학회 발표

- Accuracy of reconstructed CT image using portable soft x-ray apparatus, the 62nd annual meeting of Japan Wood Research Society, Hokkaido, Japan
- Soft X선 경계치 설정을 위한 목재 단면 형상의 비파괴적 측정, 2012년 한국목재공학회 정기 학술 대회, 대구, 대한민국
- Improvement of the CT Reconstruction Technique Using Portable Soft X-ray Apparatus, 2012 IUFRO conference division 5 forest products, Estoril, Portugal
- Improvement of the soft x-ray CT reconstruction technique using portable apparatus, the 63rd annual meeting of Japan Wood Research Society, Morioka, Japan
- 목재 문환재의 내부 열화 탐지를 위한 X선 CT 기술, 제 37회 (사)한국문화재보존과학회 춘계학술대회, 서울, 대한민국
- 목재의 질량감쇠계수에 Soft X선의 투과 거리가 미치는 영향, 2013년 한국목재공학회 정기 학술 대회, 대전, 대한민국
- Influence of Wood Thickness on Attenuation of Soft X-ray for Developing Portable X-ray CT, 18th international nondestructive testing and evaluation of wood symposium, Wisconsin, USA
- 휴대용 선원의 X선 투과 거리를 고려한 목재의 밀도 계산, 제 3회 목조건축 국제 심포지엄, 평창, 대한민국
- 목조불에 대한 휴대용 X선 CT 기술, 제 38회 (사)한국문화재보존과학회 추계학술대회, 대전, 대한민국
- 3-dimensional CT image reconstruction with portable CT apparatus for applying in-site, the 64th annual meeting of Japan Wood Research Society, Matsuyama, Japan
- Dual Energy Continuous X-ray Absorptionmetry를 이용한 제재목 내 함수율 예측, 014년 한국목재공학회 정기 학술 대회, 충주, 대한민국
- Improvement on Accuracy of Portable Computed Tomography by Soft X-ray, 57th SWST international Convension, Zvolen, Slovakia
- X-RAY CT TECHNIQUE FOR INVESTIGATING INNER DENSITY DISTRIBUTION OF HISTORIC WOODEN PROPERTIES, 2014 world conference on timber engineering, Quebec, Canada
- 이동 가능한 X선 CT 기술을 이용한 기둥 부재 내부 검사, 제 40회 (사)한국문화재보존과학회 추계학술대회, 전주, 대한민국

제 6장 연구시설·장비 현황

제 6장 연구시설·장비 현황

| 기자재 품목 | 시설 및 장비 정보 | 활용 분야 | 비고 |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|----|
| 함수율 측정기 | MC-460 (Exotek, Germany) | 입목 내 함수율 측정 | |
| X선 선원 | CP120 (ICM, Japan) | X선 조사 | |
| X선 선원 | K4 (Softex, Japan) | X선 조사 | |
| 디지털 디텍터 | NX 06 (RF system, Japan) | 방사선 사진 획득 | |
| 서베이미터 | RSM-100 (일진방사선엔지니어링, 한국) | 방사선 계측 | |
| 거리측정기 | DLE40 (BOSCH, Germany) | 선원과 피시험체 간 거리 측정 | |
| 목재 검사용 회전형 엑스레이 장치 | 한국/자체 제작 | 여러 각도의 방사선 사진을 얻기 위한 피시험체 회전 | |
| 현장 적용을 위한 엑스레이 간트리 | 한국/자체 제작 | 여러 각도의 방사선 사진을 얻기 위한 선원/디텍터 회전 | |
| 건조오븐 | HB-501M (한백과학, 한국) | 시편 밀도 및 함수율 측정 | |

제 7장 참고문헌

제 7장 참고문헌

- [1] 가오유량(高玉亮), 차병진. (2008). 노거수 활력 측정 및 내부 부후 검출을 위한 비파괴검사법.
- [2] 강춘원, 강욱. (2008). 저진공주사현미경 (LV-SEM) 을 이용한 목재횡단면의 수축거동관찰. 목재공학, 36(3), 17-23.
- [3] 김광모, 이상준, 이진재. (2006). 현장 적용이 가능한 X 선 CT 시스템 개발 2-밀도분포를 이용한 목재의 CT 이미지 구성. 목재공학, 34(1), 23-31.
- [4] 김성철, 김영일, 김유현, 김정민, 나수경, 송재홍, 윤철호, 이경성, 이성길, 이종석, 지태정. (2004), 진단용 X선 장치와 QC, 신광.
- [5] 김준호, 박경주, 강해진, 이이형, 서정호. (2000). 폐 종괴의 CT 밀도 측정: 재구성 연산 방식의 영향. 대한방사선의학회지, 43, 455-461.
- [6] 김현중. (1996). 우리나라 낙엽송의 근주심재부후병.
- [7] 김현중. (1997). 사이고메타에 의한 낙엽송 심재부후 (心材腐朽) 의 진단. 수목보호, 3, 33-38.
- [8] 동부지방산림청, (2009) 환경친화적 조림기술과 지속가능한 산림관리 기술 개발 연구.
- [9] 대한방사선물리학연구회, 2005, 방사선물리학, 고문관.
- [10] 문화재청. (2002). 천연기념물 노거수 실태조사 연구 보고서. 문화재청.
- [11] 박현, 오득실, 가강현, 유성열, 박주생, 황재홍, 박준모. (2009). 꽃송이버섯에 의한 침엽수 심재부후 발생환경 및 낙엽송 피해목의 재질 특성. 한국임학회지 98(1): 16-25.
- [12] 염영하. (2001). 최신재료시험법. 동명사.
- [13] 이진재, 김광모, 배문성. (2003). 목재 내 초음파 전달 경로 구명. 목재공학, 31(2), 31-37.
- [14] 임경빈. (1992). 조림학본론. 향문사.
- [15] 산림청, (2011) 임업통계연보.
- [16] 신중훈. (2010). 강원도 평창 지역 낙엽송 조림지에서 입목의 심재부후 탐지 및 부후발생률 (석사학위논문, 서울대학교 대학원).
- [17] 전용진. 12월 연말 주요자재 동향. 대구인터넷 뉴스. 2009.12.14.
(<http://www.dgnews.co.kr/ArticleView.asp?intNum=16588&ASection=001009>)
- [18] 정희석. (1998). 목재이학. 서울대학교출판부.
- [19] 정희석. (2005). 목재용어사전. 서울대학교출판부.
- [20] 조혜경, 이영근, 배상원, 이광수, 이명보. (2008). 시업단계에 따른 활엽수류의 심재부후 실태. 한국임학회 정기학술발표논문집, 2008(단일호), 234-235.
- [21] 한국산업규격. (2005). KS B ISO 19232-2, 비파괴 검사 - 방사선 투과 시험 사진의 상질

- 제2부: 상질계(계단형/유공형)-상질값의 결정.

- [22] Bendz-Hellgren, M., Stenlid, J. (1995). Long-term reduction in the diameter growth of butt rot affected Norway spruce, *Picea abies*. *For. Ecol. Manage.* 74: 239 - 243.
- [23] Bendz-Hellgren, M., Stenlid, J. (1997). Decreased volume growth of *Picea abies* in response to *Heterobasidion annosum* infection. *Canadian journal of forest research*, 27(10), 1519-1524.
- [24] Boyce, J. S. (1938). *Forest pathology*.
- [25] Bucur, V. (2003). *Nondestructive characterization and imaging of wood*. Vol. 760. Springer.
- [26] Clark, J. R., Kjelgren, R., Hushagen, J., Fiore, J. (1992). Cambial electrical resistance does not assess vitality of individual sweetgum trees. *Journal of Arboriculture*, 18(1), 1.
- [27] Divos, F., Divos, P. (2005). Resolution of stress wave based acoustic tomography. In: 14th international symposium on nondestructive testing of wood, Shaker Verlag, Germany, pp. 307-314
- [28] Dyer, S.A, 2001, Wiley survey of Instrumentation and Measurement, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-39484-X
- [29] Funt, B. V., Bryant, E. C. (1987). Detection of internal log defects by automatic interpretation of computer tomography images. *Forest Products Journal*, 37(1), 56-62.
- [30] Habermehl A, Ridder H. W., g-ray tomography in forest and tree sciences.
- [31] Hailey, J. R., Morris, P. I. (1987). Application of scanning and imaging techniques to assess decay and wood quality in logs and standing trees. joint publication of Forestry Canada and the Alberta Forest service.
- [32] Hattori, Y., Kanagawa, Y. (1985). Non-destructive measurement of moisture distribution in wood with a medical X-ray CT scanner, 1: Accuracy and influencing factors. *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)*.
- [33] Hoag, M. L., & Krahmer, R. L. (1991). Polychromatic X-ray attenuation characteristics and wood densitometry applications. *Wood and Fiber Science*, 23(1), 23-31.
- [34] Hubbell, J. H., Seltzer, S. M. (2004). Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficient. <http://physics.nist.gov/xaamdi>. Accessed 15 June 2013
- [35] Hounsfield, G. N. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *The British journal of radiology*, 46(552), 1016-1022.

- [36] Hultnäs, M., Fernandez-Cano, V. (2012). Determination of the moisture content in wood chips of Scots pine and Norway spruce using Mantex Desktop Scanner based on dual energy X-ray absorptiometry, *J Wood Sci* 58:309–314.
- [37] Jackson, D. F., Hawkes, D. J. (1981). X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures. *Physics Reports*, 70(3), 169–233.
- [38] Kaelbel, E. F. (1967). *Handbook of X-rays*. McGraw-Hill
- [39] Kennedy, R. W., Warren, W. G. (1970). Within-tree variation in physical and chemical properties of Douglas fir. In *Second world consultation on forest tree breeding*, Washington, DC, USA, 7-16 August 1969. (Vol. 1, pp. 393–417). Rome, Italy, FAO.
- [40] Kim, C.K., Lee, S. J., Kim, K.M., Lee, J.-J. 2011. Visualization of internal state of wood with X-ray CT reconstruction technique throughout reduced number of X-ray radiography, *Proceeding of the 17th international NDT&E on wood*, Hungary, 2011.9.14 ~16.
- [41] Kim, K.-M., Lee S.J., Lee, J.-J. (2006). Development of portable X-ray X-ray CT system 1 - evaluation of wood density using X-ray X-ray radiography -, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 34(1):15–22.
- [42] Kim, K.-M., Lee S.J., Lee, J.-J. (2006) Development of portable X-ray X-ray CT system 2 - CT Image reconstruction of wood using density distribution -, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 34(1):23–31.
- [43] Korean society of physics for radiosurgery. (2005). *Radiation physics* (in Korean). Komoonsa.
- [44] Lee, S.J., Kim, K.-M., Lee, J.-J. (2006). Application of the X-ray CT technique for NDE of wood in field, *Key Engineering Materials* 321–323:1172–1176.
- [45] Leininger, T. D., Schmoltdt, D. L., Tainter, F. H. (2001). Using ultrasound to detect defects in trees: current knowledge and future needs. In *Proceedings, The First International Precision Forestry Cooperative Symposium* (pp. 99–107).
- [46] Liu, C. J., Olson, J. R., Tian, Y., Shen, Q. (1988). Theoretical wood densitometry: I mass attenuation equations and wood density models. *Wood and fiber science*, 20(1), 22–34.
- [47] Lindgren, O., Davis, J., Wells, P., Shadbolt, P. (1992). Non-destructive wood density distribution measurements using computed tomography. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(7–8), 295–299.
- [48] Lindgren, L. O. (1991). Medical CAT-scanning: X-ray absorption coefficients,

- CT-numbers and their relation to wood density. *Wood Science and Technology*, 25(5), 341–349.
- [49] Macedo, A., Vaz, C. M. P., Pereira, J. C. D., Naime, J. M., Cruvinel, P. E., Crestana, S. (2002). Wood density determination by X- and gamma-ray tomography. *Holzforschung*, 56(5), 535–540.
- [50] Mazess, R. B., Barden, H. S., Bisek, J. P., Hanson, J. (1990). Dual-energy x-ray absorptiometry for total-body and regional bone-mineral and soft-tissue composition. *The American journal of clinical nutrition*, 51(6), 1106–1112.
- [51] Moberg, L. (2000). Models of internal knot diameter for *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(2), 177–187.
- [52] National Research Institute of Cultural Heritage. (2012). Conservation of wooden objects. Pointtech, Daejeon, pp 8
- [53] Nakada, R., Fujisawa, Y., Hirakawa, Y. (1999). Soft X-ray observation of water distribution in the stem of *Cryptomeria japonica* D. Don I: General description of water distribution. *Journal of wood science*, 45(3), 188–193.
- [54] Nakada, R., Fujisawa, Y., Hirakawa, Y. (1999). Soft X-ray observation of water distribution in the stem of *Cryptomeria japonica* D. Don II: Types found in wet-area distribution patterns in transverse sections of the stem. *Journal of wood science*, 45(3), 194–199.
- [55] Nicolotti, G., Socco, L.V., Martinis, R., Godio, A., Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in tree. *J of Arboric* 29(2):66–78
- [56] Niemz, P., Mannes, D. (2012). Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *Journal of cultural heritage*, 13(3), S26–S34.
- [57] Nguyen, M., Foliente, G., Wang, X. M. (2004). State-of-the-Practice & Challenges in Non-Destructive Evaluation of Utility Poles in Service. *Key Engineering Materials*, 270, 1521–1528.
- [58] Oja, J., Temnerud, E. (1999). The appearance of resin pockets in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(5), 400–406.
- [59] Oja, J., Grundberg, S., Grönlund, A. (2000). Predicting the strength of sawn products by X-ray scanning of logs: A preliminary study. *Wood and fiber science*, 32(2), 203–208.
- [60] Oh, J. K., Shim, K., Kim, K. M., & Lee, J. J. (2009). Quantification of knots in

dimension lumber using a single-pass X-ray radiation. *Journal of wood science*, 55(4), 264-272.

- [61] Oh, J.-K., Kim, K.-M., Lee, J.-J. (2010). Use of Adjacent Knot Data in Predicting Bending Strength of Dimension Lumber by X-Ray, *Wood and fiber science* 42(1):10-20.
- [62] Oh, J.-K., Shim, K.-B., Yeo H., Lee, J.-J. (2010). Development of a Method to Predict the Bending Strength of Lumber Without Regard to Species Using X-RayX-ray Images, *Wood and fiber science* 42(1):21-29.
- [63] Oh, J.-K., Shim, K.-B, Kim, K.-M., Lee, J.-J. (2009). Quantification of knots in dimension lumber using a single-pass X-rayX-ray radiation, *Journal of wood science* 55(4):264-272.
- [64] Oh, J.-K., Kim, K.-M., Lee, J.-J. (2008). Development of Knot Quantification Method to Predict Bending Strength Using X-rayX-ray Scanner, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 36(5):33-41.
- [65] Olson, J.R., Liu, CJ, Tian, Y, Shen Q. (1988). Theoretical wood densitometry: II. Optimal X-ray energy for wood density measurement. *Wood Fiber Sci* 20(1):187-196
- [66] Panshin, A. J., Zeeuw, C. D. (1980). *Textbook of wood technology*. McGraw-Hill Book Co..
- [67] Parata S. (2004). C 기초 플러스 개정 4 판. 주) 피어슨에듀케이션코리아.
- [68] Pellerin, R. F., Ross, R. J. (2002). *Nondestructive evaluation of wood*. Forest Products Society.
- [69] Rasband, W. S. (1997). *ImageJ*, US National Institutes of Health. Bethesda, Maryland, USA, 2012.
- [70] Ross, R. J., Brashaw, B. K., Pellerin, R. F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, 48(1), 14-19.
- [71] Samuelsson, R., Burvall, J., Jirjis, R. (2006). Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 929-934.
- [72] Sartoris, D. J., Resnick, D. (1989). Dual-energy radiographic absorptiometry for bone densitometry: current status and perspective. *American Journal of Roentgenology*, 152(2), 241-246.
- [73] Schajer, G.S. (2001). Lumber strength grading using x-rayX-ray scanning, *Forest products journal*, 51(1).
- [74] Schmidt O. (2010). *Wood and fungi*. Springer, Heidelberg, pp 53-54.

- [75] Seeram, E. (2013). Computed tomography: physical principles, clinical applications, and quality control. Elsevier Health Sciences.
- [76] Szymani, R. McDonald, K. A. (1981). Defect detection in lumber: state of the art. *Forest Products Journal*, 31(11), 34-44.
- [77] Tanaka, T., Avramidis, S., Shida, S. (2009). Evaluation of moisture content distribution in wood by soft X-ray imaging. *Journal of wood science*, 55(1), 69-73.
- [78] Tanaka, T., Kawai, Y. (2013). A new method for nondestructive evaluation of solid wood moisture content based on dual-energy X-ray absorptiometry. *Wood Science and Technology*, 47(6), 1213-1229.
- [79] Tiitta, M., Olkkonen, H., Lappalainen, T., Kanko, T. (1993). Automated low energy photon absorption equipment for measuring internal moisture and density distributions of wood samples. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 51(6), 417-421.
- [80] Trendelenburg R. (1940). About the abbreviation of the duration of fungal tests on wood using the impact test. *Holz Roh-Werkst.* 3(12):397 - 407.
- [81] Tsuchikawa, S. (2007). A review of recent near infrared research for wood and paper. *Applied Spectroscopy Reviews*, 42(1), 43-71.
- [82] Vikberg, T., Oja, J., Antti, L. (2012). Moisture content measurement in scots pine by microwave and X-rays. *Wood and Fiber Science*, 44(3), 280-285.
- [83] Watanabe, K., Hart, F., Mansfield, S. D., Avramidis, S. (2010). Detection of wet-pockets on the surface of *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. by near infrared (NIR) spectroscopy. *Holzforschung*, 64(1), 55-60.
- [84] Watanabe, K., Saito, Y., Avramidis, S., Shida, S. (2008). Non-destructive measurement of moisture distribution in wood during drying using digital X-ray microscopy. *Drying technology*, 26(5), 590-595.
- [85] Ward, J. C., Pong, W. Y. (1980). Wetwood in trees: a timber resource problem.
- [86] Wei, Q., Leblon, B., La Rocque, A. (2011). On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review 1 This article is a contribution to the series The Role of Sensors in the New Forest Products Industry and Bioeconomy. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(11), 2120-2140.
- [87] Win K. K. (2014), detection of the presence of heart roots in Teak tree by stress wave methods (석사학위논문, 서울대학교 대학원).
- [88] Yasuda, T., Yokoi, S., Ohshita, H., Toriwaki, J. I. (1992). 3D visualization of an ancient Egyptian mummy. *IEEE computer graphics and applications*, 12(3), 13-17.