

최 종  
연구보고서

유용 국산수종의 음향적 특성평가 및  
개량을 통한 고부가가치적  
이용기술 개발

Technological Development for Highly  
Value-added Utilization of Useful Domestic  
Lumber by Acoustical Characterization &  
Improvement

연구기관  
전남대학교

농 립 부

## 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “유용 국산수종의 음향적 특성평가 및 개량을 통한  
교부가가치적 이용기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005년 11월 14일

주관연구기관명 : 전남대학교  
총괄연구책임자 : 정 우 양  
세부연구책임자 : 정 우 양  
연구원(책임급) : 이 용 훈  
연 구 원 : 김 창 곤  
협동연구기관명 : 전북대학교  
협동연구책임자 : 이 남 호  
협동연구기관명 : 서울대학교  
협동연구책임자 : 김 현 중

# 요 약 문

## I. 제 목

유용 국산수종의 음향적 특성평가 및 개량을 통한 고부가가치적 이용기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구는 일반적으로 경급이 낮고 물성이 열악하다는 이유로 기껏해야 일부 가구용 집성 부재나 공예품 등의 제작에 사용되는 경우를 제외하면 그동안 대부분 죽장목이나 갭목 따위로 사용됨으로써 그 효용이 열악한 상황에 있는 국산재의 이용가치를 높이기 위해 새로운 재료과학적 및 제품공학적 접근방식에 의한 국산재 이용의 고부가가치화를 목표로 기획되었다. 즉 국산재의 진동역학적 거동 및 음향적 특성을 규명하고 이를 응용하여 고부가가치성 악기제품(국악기 위주)을 개발함으로써 현재 거의 모든 소재를 외국으로부터 수입하면서도 부가가치가 낮은 중저급품 수준 제품의 대량 생산체제에 안주하고 있는 국내악기 제조업체로 하여금 대체재 개발을 통한 원가절감의 경영동기를 부여하고 소재 및 완성품에 대한 무비판적인 수입으로 인한 무역역조의 고질적 구도를 개선함으로써 樂器제조업을 21세기의 우리나라의 경쟁력을 지닌 대표적 고부가가치형 목재 가공산업으로 육성시키기 위한 기술적 근거를 제공하고자 하였다.

## III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 목재의 음향적 특성을 주요 인자로 하는 목재 국악기 중에서 대표적인 현악기인 가야금과 통악기류 악기인 장고(타악기) 및 竹材 大笏(관악기)에 대한 음향적 설계를 하여 국산재의 고부가가치적 이용을 위한 제품화 기술을 개발하고자 설계되었다. 따라서 유용국산재의 물성 및 음향적 특성에 대한 전반적인 분석과 건조특성 그리고 각종 합성수지류(접착제 및 도료)의 음향관련 물성 DB를 근거로 흡음 등 음향특성을 필요로 하는 각종 목제품의 제조기술을

정립하고 고증자료 및 제작기술을 참고하여 각종 악기제작과 관련되는 기술을 근거로 자재준비에서부터 완제품에 이르기까지의 전 제조공정에 걸친 기술을 표준화하고자 하였다.

또한 국내주요수종의 방향별 동적특성과 건조방법, 즉 천연건조, 인공건조, 고주파건조, 마이크로파 건조방법 및 그 이력에 따른 음향특성의 차이를 구명하고자 하였다.

장고나 대금과 같이 筒모양 초갈이재의 경우 적절한 처리에 의해서 筒의 내피층과 외피층 간에 상당한 크기의 증기압 차를 건조종료시까지 유지하는 것이 가능할 것으로 판단하고, 이는 건조속도의 증진은 물론 재면할렬과 외주할 예방에도 매우 효과적일 것이라는 가설하에 증기 dam 처리한 筒樂器用材의 건조중 筒皮層내 수증기압 분포를 관측하여 수증기압의 생성 메커니즘을 밝히고, 그것이 수분유동 및 수분분포에 미치는 영향을 구명하고 그 결과에 근거하여 실대개 크기의 통악기용재를 대상으로 건조결합 예방과 건조속도 증진을 꾀할 수 있는 구체적 건조기법을 개발하고자 하였다.

또한 건조중 발생하는 미세할렬과 찌그러짐(collapse) 및 열열화가 목재의 음향성 저하와 밀접한 관련이 있는 것으로 조사된 바, 이와 같은 건조손상을 최소화할 수 있는 음향기능성 인공건조법 개발하고자 하였다.

한편 악기에 이용되는 폴리우레탄계 도료와 UV경화형 도료를 악기용 재료에 적용하고 경화시킨 후 점탄성 측정 장치인 dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA) 및 sound-level meter를 이용하여 저장탄성을  $E'$ , 손실탄성을  $E''$  및  $\tan\delta$ 와 impact noise level을 측정하고 이 측정값을 기준으로 가장 적절한 음향용 도료의 도장시스템을 개발하는 것을 목표로 하여, 점탄성 측정 및 음향적 성질을 평가함으로써 적절한 도료 선정 후, 음향용 재료 수종 및 도막두께에 따른 음향적 성질 평가하고 최종적으로 음향 실험기를 이용해 실제 도막이 형성된 상기 3종의 국악기 제품의 음향적 성능 및 도막두께별 성능 평가하고자 하였다.

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구는 국산재 이용의 고부가가치화를 실현하기 위한 사업화를 전제로 관련기술개발을 통해 정규품질의 시제품을 생산하고 이들을 대상으로 국산재로 만들어진 주요 악기별 완제품에 대한 음향적 특성에 대한 성능평가기술을 개발, 보급함으로써 국내악기 산업계의 품질향상 및 연구기관의 연구력 제고에 기여하고자 3년간 수행되었으며 그 핵심 연구개발 결과는 다음과 같다.

- 횡 진동법에 의한 국악기용 주요 국산재의 재질 평가기술 개발
- 판재 진동에 의한 주요 국산재의 음향특성 분석
- 현악기(가야금) 품질개량 기술 개발
- 국산재를 이용한 국악기 시작용 제조기술 개발
- 타악기(장고)용 부재의 송풍 오-븐 건조기술 표준화
- 관악기 용재(筒竹)의 송풍 오-븐 및 진공 오-븐 건조기술 표준화
- 현악기(가야금) 용재의 천연건조 및 고주파진공건조기술 표준화
- 음향 기능성 도료의 종류에 따른 음향특성 분석
- 도막의 두께에 따른 음향기능성 도료의 분석
- 음향기능성 도료의 성능평가 기술 개발

한편 위와 같은 연구결과의 효율적 활용을 위하여 다음과 같이 건의하는 바이다.

- ① 국산재를 이용한 악기 生産기술지원센터 설립 지원
- ② 학-연-산 상호 기술교류를 위한 중점연구회 육성 지원
- ③ 국악기 제품의 설계기술 제조업체 이진을 위한 산학협동 지원
- ④ 국내 악기제조업체의 제품 품질기술 향상을 위한 산학협동 지원
- ⑤ 국악기 제조분야 벤처산업 육성을 위한 특허개발 및 사업화 지원
- ⑥ 국악기의 세계시장 진출을 위한 교류사업 및 시장개척 지원
- ⑦ 핵심 연구결과의 국제수준 도달을 위한 핵심 장비구축 및 추가 연구 지원

## SUMMARY

This study was conducted to explore how to produce the high value added products using domestic woods by new approach in view of material science and products engineering. The acoustical design method for the typical domestic musical instruments of Gayageum, Jang-go and Daegeum was developed. This might help to produce the high value added products using domestic woods. For some domestic wood, the physical and acoustical properties, drying characteristics and the effects of coatings was investigated. Based on the results, the manufacture techniques related to musical instruments could be standardized from material preparation to the manufacturing of end products.

In case of the tube type musical instruments such as Jang-go and Daegeum, considerable difference of water vapor pressure between inner and outer sides could be maintained by appropriate treatments. This resulted in the increase of drying rate and the decrease of surface check and radial check. The distribution of water vapor pressure within the tube was measured. The generation process of water vapor pressure during drying was investigated and so moisture transport mechanism and moisture distribution could be understood. The new drying technique was developed to minimize the drying defects and to maximize the drying rate for the real size of Jang-go and Daegeum.

The micro-crack, collapse and thermal degradation during drying have a great influence on the acoustical properties of wood. The new drying method was developed to minimize the drying defects.

The rheological properties of the common and UV curing types of polyurethane paints was measured using dynamic mechanical thermal analyzer(DMTA) and sound level meter. The suitable paints for the musical instrument was selected based on the test results of storage elastic modulus, loss elastic modulus, loss tangent and impact sound level. Finally, the effects of coating thickness on the acoustical properties of domestic musical instruments was investigated depending on wood species.

# CONTENTS

## **Chapter 1. Summary of Proposed Project**

- Section 1.1 Purpose and needs of project
- Section 1.2 Contents and range of project

## **Chapter 2. Technological Situation of Proposed Project**

- Section 2.1 Technological development in domestic and abroad fields
- Section 2.2 Technological performance and status of project

## **Chapter 3. Main Features and Results of Technological Development**

- Section 3.1 Design and engineering for valuable utilization of domestic lumber
- Section 3.2 Acoustical drying technology for main domestic lumber
- Section 3.3 Coating technology for wooden products with acoustical function

## **Chapter 4. Extent in Performances and Technological Contribution in Allied Fields**

- Section 4.1 Performances versus intended aims
- Section 4.2 Contribution in technological development in allied fields

## **Chapter 5. Plans for Utilization of Technological Development and Performances**

- Section 5.1 Utilization for technological cooperation and industrialization
- Section 5.2 Plans for global utilization and necessary research

## **Chapter 6. Scientific and Technological Information acquired from Oversea**

## **Chapter 7. References**

# 목 차

<b>제 1 장</b>	<b>연구개발과제의 개요</b>	(8)
제1절	연구개발의 목적 및 필요성	(8)
제2절	연구개발의 내용 및 범위	(12)
<b>제 2 장</b>	<b>국내외 기술개발 현황</b>	(16)
제1절	국내·외 관련분야에 대한 기술개발현황	(16)
제2절	연구개발결과의 국내·외 기술개발현황에서 차지하는 위치	(18)
<b>제 3 장</b>	<b>연구개발 수행 내용 및 결과</b>	(21)
제1절	국산재 이용의 고부가가치화를 위한 제품설계 및 제품공학기술개발	(21)
제2절	주요 국산재의 음향기능성 건조기술 개발	(72)
제3절	음향기능제품의 도장기술 개발 및 표준화	(120)
<b>제 4 장</b>	<b>목표달성도 및 관련분야에의 기여도</b>	(206)
제1절	연구개발목표의 달성도	(206)
제2절	관련분야의 기술발전예의 기여도	(221)
<b>제 5 장</b>	<b>연구개발결과의 활용계획</b>	(213)
제1절	타연구에의 응용	(213)
제2절	추가연구를 통한 국제화 분야 활용계획	(214)
<b>제 6 장</b>	<b>연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보</b>	(215)
<b>제 7 장</b>	<b>참고문헌</b>	(236)



# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 제1절 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발의 목적

목재의 음향적 특성을 주요 인자로 하는 목재 국악기 중에서 대표적인 현악기인 가야금과 통악기류 악기인 장고(타악기) 및 竹材 大笏(관악기)에 대한 음향적 설계를 하여 국산재의 고부가가치적 이용을 위한 제품화 기술을 개발하는데 그 목적이 있다. 아울러 국산재 및 악기제작에 쓰이는 각종 합성수지류(접착제 및 도료)의 음향관련 물성 DB를 근거로 흡음 등 음향특성을 필요로 하는 각종 목제품의 제조기술을 정립하고 고증자료 및 제작기술을 참고하여 각종 악기제작과 관련되는 기술을 근거로 자재준비에서부터 완제품에 이르기까지의 전 제조공정에 걸친 기술을 표준화하고자 하였다. 그리고 국산재 이용의 고부가가치화를 실현하기 위한 사업화를 전제로 시제품을 생산하고 정규품질을 지니는 시제품을 대상으로 국산재로 만들어진 주요 악기별 완제품에 대한 음향적 특성에 대한 성능평가기술을 개발, 보급함으로써 국내악기 산업계의 품질향상 및 연구기관의 연구력 제고에 기여하고자 하였다.

장고나 대금과 같이 筒모양 초갈이재의 경우 적절한 처리에 의해서 筒의 내피층과 외피층간에 상당한 크기의 증기압 차를 건조종료시까지 유지하는 것이 가능할 것으로 판단하고, 이는 건조속도의 증진은 물론 재면할렬과 외주할 예방에도 매우 효과적일 것이라는 가설을 설립한 후, dam 처리한 筒樂器用材의 건조중 筒皮層내 수증기압 분포를 관측하여 수증기압의 생성메카니즘을 밝히고, 그것이 수분유동 및 수분분포에 미치는 영향을 구명하는 것을 1차적 목표로 설정하였다. 또한 이의 결과에 근거하여 실대재 크기의 통악기용재를 대상으로 건조결함 예방과 건조속도 증진을 꾀할 수 있는 구체적 건조기법을 개발하여 제시하고자 하였다. 또한 건조중 발생하는 미세할렬과 찌그러짐(collapse) 및 열열화가 목재의 음향성 저하와 밀접한 관련이 있는 것으로 조사된 바, 이와 같은 건조손상을 최소화할 수 있는 음향기능성 인공건조법 개발에 초점을 맞추고자 하였다.

한편 악기에 이용되는 폴리우레탄계 도료와 UV경화형 도료를 악기용 재료에 적용하고 경화시킨 후 점탄성 측정 장치인 dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA; 서울대 농생대 농업과학공동기기센터 소재) 및 sound-level meter를 이용하여 저장탄성율 E', 손실탄성율 E'' 및 tan $\delta$ 와 impact noise level을 측정하고 이 측정값을 기준으로 가장 적절한 음향용 도료의 도장시스템을 개발하는 것을 목표로 삼고 점탄성 측정 및 음향적 성질을 평가함으로써 적절한 도료 선정하고, 음향용 재료 수종 및 도막두께에 따른 음향적 성질 평가, 최종적으로 음향 실험기를 이용해 실제 도막이 형성된 상기 3종의 국악기 제품의 음향적 성능 및 도막두께별 성능 평가하고자 하였다.

## 2. 연구개발의 필요성

### 가. 기술적 측면

본 연구는 일반적으로 등급이 낮고 물성이 열악하다는 이유로 기껏해야 일부 가구용 집성부재나 공예품 등의 제작에 사용되는 경우를 제외하면 그동안 대부분 즉장목이나 갭목 따위로 사용됨으로써 그 효용이 열악한 상황에 있는 국산재의 이용가치를 높이기 위해 새로운 재료과학적 및 제품공학적인 접근방식에 의한 국산재 이용의 고부가가치화를 목표로 기획되었다. 즉 국산재의 진동역학적 거동 및 음향적 특성을 규명하고 이를 응용하여 고부가가치성 악기제품(국악기 위주)을 개발함으로써 현재 거의 모든 소재를 외국으로부터 수입하면서도 부가가치가 낮은 중저급품 수준 제품의 대량 생산체제에 안주하고 있는 국내악기 제조업체로 하여금 대체재 개발을 통한 원가절감의 경영동기를 부여하고 소재 및 완성품에 대한 무비판적인 수입으로 인한 무역역조의 고질적 구도를 개선함으로써 樂器제조업을 21세기의 우리나라의 경쟁력을 지닌 대표적 고부가가치형 목재 가공산업으로 육성시키기 위한 기술적 근거를 제공하고자 하였다.

이와 같은 국산재의 고부가가치적 활용을 위해서는 음향 특성치, 즉 동적 탄성상수(elastic constants) 9가지와 댐핑상수 6가지의 파악이 필수적이다. 따라서 주요 국산수종에 대해 이들 음향특성치를 조사할 필요가 있으며, 또 이들 특성치의 수분의존도를 부수적으로 분석하여야 다양한 사용조건에 대한 예측을 할 수 있다. 아울러 이들 자료를 다른 연구자들에게 제공하여 폭 넓고 부가가치 있는 목재의 이용을 확대할 수 있다. 음향용재는 주로 판재의 형태로 사용되지만, 목재의 섬유방향과 횡방향에 대한 물리적 성질의 조사는 별도로 이루어져 왔다. 따라서 음향용 판재의 성능평가에 문제점이 많으므로 2차원인 판재의 물리기계적 성질을 단일 시험으

로 조사할 수 있는 방안의 개발이 시급하다. 또한 이를 바탕으로 주어진 수종이 동적 응답특성을 목적에 부응하도록 물리적 및 화학적 처리하는 방안을 강구할 필요가 있다. 그러나 목재는 대부분 단일부재로 사용되는 경우보다 약기 등과 같이 구조체로 사용되는 경우, 정적 구조체(static structures)와는 달리 단일부재의 동적특성치만으로는 제품의 특성을 예측할 수가 없다. 그러므로 구조체의 동적응답특성을 예측하고 목적에 맞게 설계 및 제조할 수 있는 기술개발이 매우 절실한 상황으로 판단하였다.

또한 약기용 도료는 약기에 아름다움을 줄 뿐만 아니라 재료의 보호, 음향적 성질 등에 큰 영향을 주므로 약기용 도료의 선택은 약기제조에 큰 비중을 차지하고 있다고 볼 수 있다. 그러나 현재 국내 연구현황을 보면 약기용 도료의 도막성능에 대한 체계적인 평가뿐만 아니라 음향적 성질에 대한 평가가 이루어지지 않고 있어 체계적인 자료 구축이 필요한 실정이다. 또한 도막의 음향적 성능 평가 방법이 마련되어있지 않아 도막의 음향적 성능 평가와 개선에 방법 마련에 큰 어려움을 겪고 있다. 따라서 도막의 음향적 성능 평가방법 및 약기용 도료의 도장 시스템 구축에 대한 연구가 절실히 요구되고 있는 상황이다.

#### **나. 경제·산업적 측면**

날로 치열해지는 글로벌 경쟁 시대에서 생존하기 위한 방편의 일환으로 국내의 목재가공업의 부가가치를 제고하기 위해서는 수종별 고유의 음향특성을 이용하여 대표적 문화상품인 약기 등 소비자의 수요에 적응할 수 있는 다양하고 용도를 개발할 필요가 있다. 아울러 약기제조업의 경쟁력을 제고시키기 위해서는 임금상승으로 인한 채산성 악화를 개선하고 수출을 활성화시키기 위해서는 대체재 개발 및 제조기술 향상을 통한 원가의 절감 및 제품 품질보증 등 가격대비 품질 고급화를 통한 경쟁력 제고가 절실한 상황이다.

따라서 본 연구과제는 취약한 국내 약기제조산업 분야의 연구기반 조성 및 제조 및 품질 관련 기술력 강화를 통한 경쟁력 향상을 도모할 수 있다는 점에서 그 중요성이 크다고 판단되었다.

#### **다. 사회·문화적 측면**

최근 들어 국민소득이 증가함에 따라 약기 등 문화적 수요가 고급화되고 있으므로 이와 같은 사회·문화적 흐름을 산업기술적으로 뒷받침하기 위한 목재과학적 기반구축이 필수적이라 할 수 있을 것이다. 즉, 경제적으로 생활수준이 향상되고 의식주에 대한 부담이 줄어들면서 소비자들의 관심이 예술과 고급주거문화 등으로 집중되고 있다. 이와 같은 결과, 약기를 연주하

고자 하는 소비자들의 욕구가 악기판매량 증가로 이어지고 있는 추세이며 미관이 수려한 흡음성 내장재의 사용 등 주거공간의 고급화 경향이 지속되고 있는 추세이다.

따라서 국내 악기생산업체에서도 이러한 소비자들의 욕구에 따라 고품격, 음향적 고성능을 가진 악기를 제작하기 위해 노력하고 있지만 IMF 이후, 기업기반의 영세성 등으로 인한 R&D 투자의 부진으로 체계적인 연구체계 및 방법, 자료 등이 구축되어 있지 않아 많은 어려움에 처해있는 실정으로 생각된다. 특히 앞서 언급한 음향기능성 제품의 생산에 쓰일 국산재의 음향특성 및 그 영향인자 등에 관한 기술자료는 전무한 상황이며 악기 등 음향기능성 제품용 도료에 대한 도막의 성능 평가 및 음향적 성능, 도장시스템에 대한 체계적 연구 또한 부족한 실정이다. 특히 악기 제품의 외관적, 음향적 특성에 큰 영향을 주는 도료의 도막의 점탄성적 성질을 통한 음향적 성질의 예측과 음향측정 장치를 이용한 실제적인 음향성능 평가 및 최종 제품용으로 적정한 도장시스템의 개발은 외국제품을 선호하는 국내의 이용자들의 취향을 국내제품으로 돌림으로써 국산 악기산업 분야의 수익성 제고에 크게 이바지함으로써 사회적, 문화적으로 중요한 계기를 제공할 것으로 본다.

## 제2절 연구개발의 내용 및 범위

### 1. 연구개발의 내용

#### 가. 국산재 이용의 고부가가치화를 위한 제품설계 및 제품공학적 기술개발(제1세부)

- 1) 음향학적 특성을 고려한 제품 디자인 및 국산재 재질 조사
  - 가) 목재 약기의 분류 및 발음 메카니즘 분석
  - 나) 가야금과 장고, 대금의 음향적특성 및 진동특성 구명
  - 다) 가야금, 장고, 대금의 품질특성 규정 및 설계
  - 라) 주요 국내수종(소나무, 잣나무, 참오동나무, 밤나무)의 3방향별 동적특성 조사
    - (1) 방향별 영계수 측정( $E_L$ ,  $E_R$ ,  $E_T$ )
    - (2) 방향별 전단탄성계수 측정
    - (3) 방향별 댐핑계수 측정
    - (4) 수분 비평형상태에서 동적 탄성상수 변화
    - (5) 함수율 변동에 따른 동적탄성상수 변화
    - (6) 1차원 막대부재의 충격에 의한 동적응답 및 소리 시뮬레이션 방법 개발
- 2) 국산재의 재질 분석 및 음향기능제품의 제조기술 표준화
  - 가) 건조방법별 동적탄성상수 비교
  - 나) 건조방법별 함수율 변동에 따른 동적 탄성 상수 변화 조사
  - 다) 시편두께별 동적탄성상수 비교
  - 라) 2차원 판재의 충격에 의한 동적응답 및 소리 시뮬레이션 방법개발
- 3) 완제품 性能評價 기술개발(시제품 생산)
  - 가) 국산재 이용 현악기 시제품 생산 및 음향적 성능평가 기술 표준화
  - 나) 국산재로 만들어진 타악기 시제품 생산 및 음질 성능평가 기술표준화
  - 다) 국산재로 만들어진 관악기 시제품 생산 및 음질 성능평가 기술표준화

나. 주요 국산재의 음향기능성 건조기술 개발(제1협동과제)

1) 筒樂器用材의 증기담처리 기술개발 및 현악기용재의 천연건조

가) 주요 筒樂器用材(장고 및 대금)의 증기담 처리 기술개발

- (1) 증기담 처리기법 제시
- (2) 증기압 형성메카니즘 구명
- (3) 통피층내 증기압분포 구명
- (4) 재면할렬 및 외주할 발생 경과 조사

나) 가야금용재의 천연건조(건조기간 1~3년)

- (1) 천연건조곡선 조사
- (2) 년중 기후치평형함수율 조사
- (3) 건조결함 발생정도 조사

2) 筒樂器用 실대재의 음향기능성 건조 기술 개발 및 현악기 용재의 천연건조

가) 주요 筒樂器用(장고 및 대금) 實對材의 음향기능성 건조기술개발

- (1) 증기담 처리에 의한 건조성 개선효과 구명
- (2) 진공건조 기술 개발
- (3) 열기건조 기술 개발
- (4) 예비천연건조 기술 개발

나) 가야금용재의 천연건조(2-3년)

- (1) 천연건조곡선 조사
- (2) 년중 기후치평형함수율 조사
- (3) 건조결함 발생정도 조사

3) 현악기용재의 음향기능성 건조기술 개발

- 가) 고주파 진공건조 기술 개발
- 나) 예비 천연건조 기술 개발
- 다) 천연건조 기술 개발

**다. 음향기능제품의 도장기술 개발 및 표준화(제2협동과제)**

1) 최적의 기능성 음향 도료 선정

- 가) 악기용 도료의 선정 및 음향적 성능 평가
- 나) 점탄성적 성질에 의한 최적도료 선정(장탄성율 E', 손실탄성율 E'' 및  $\tan\delta$  측정)
- 다) 음향 도료 도막의 음향적 성능 평가(sound-level meter 이용)

2) 기능성 음향도료의 최적 도막두께 및 적합 수종선정

- 가) 악기용 재료 수종 및 도막두께에 따른 음향적 성질 평가
- 나) 도막의 점탄성적 성질 평가를 통한 악기용재의 선정(장탄성율 E', 손실탄성율 E'',  $\tan\delta$  측정 및 sound-level meter 이용)
- 다) 도막의 두께에 따른 음향적 성질 평가

3) 음향기능제품의 도장시스템 표준화

- 가) 국악기의 음향적 성능 및 도막두께별 성능 평가
- 나) 실제 제품에 적용한 도료 도막의 점탄성적 성질 및 음향적 성능을 평가
- 다) 국악기용 적정 도장시스템의 구축 및 자료구축

**2. 연구개발의 범위**

본 연구의 개발범위는 국산재의 음향관련 물성분석, 건조기술 개발, 국악기 제품의 설계 및 제조기술 표준화 그리고 목재 음향제품용 적정 도료의 선정 및 도장 시스템 개발등 주로 기술 개발에 관한 내용이며 이 기술개발 결과를 활용하여 시제품 개발, 기업지원 설계기술 및 엔지니어링, 악기류 품질분석 및 음향 평가시스템 구축을 통한 사업화에 이르기 까지 그 적용범위가 이를 수 있을 것으로 판단한다.

다음 표는 본 연구의 범위를 추진단계별로 체계화하여 나타낸 것이다.

Table 1. 2. 1 추진단계별 연구의 범주.

단 계 별 (년차별) 세부과제별	기술 도입 단계 ( 1 년차 )	기술 정립 단계 ( 2 년차 )	기술이전 단계 <사업화> ( 3 년차 )
1. 제1세부과제 : 국산재 이용의 고부가가치화를 위한 제품설계 및 제품공학적 기술개발	* 주요악기(부재)의 동적 거동 분석	* 부재별 시뮬레이션 및 적정 수종 선정	* 악기별 음질 분석 및 표준 원음 재현기술 (S/Engine 개발)
	* 주요 수종의 방향별 동적특성 조사	* 관상재의 음향 특성 변화 분석	* 목재의 음향특성 물리적 개선에 대한 연구
2. 제1협동과제 : 주요 국산재의 음향 기능성 건조기술 개발	* 筒악기용재의 증기땀 처리 기술 개발	* 筒악기용재의 음향기능성 건조기술 개발	* 현악기용재의 음향기능성 건조기술 개발
3. 제2협동과제 : 음향기능제품의 도장 기술 개발 및 표준화	* 최적 음향 도료의 선정	* 최적도막두께 및 수종선정	* 최적 도료의 도장시스템 개발



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제1절 국내·외 관련분야에 대한 기술개발현황

#### 1. 국내·외 기술개발 현황

연구의 필요성에서 언급한 바와 같이 국내의 악기관련 연구는 경우 소재분야와 음향학 분야로 구분되어 추진되어 왔으나 본연구서 추진하고자 하는 소재, 설계, 공정 및 표준화 그리고 음질분석까지 체계적으로 수행된 연구는 전무한 상황이다.

한편, 일본의 경우 1940년대부터 목재의 음향적 특성에 대한 연구가 시작되어 많은 연구결과가 발표된 바 있다. 이에 대해 岡野(1991)는 그간의 연구결과에 대해 정리한 바 있는데, 목재의 동역학 정수를 간편하고 재현성이 좋으며 목적에 따라 정확하게 측정할 수 있는 진동시험법이 확립과 악기의 평가에 근간한 음향특성에 대한 규명 및 동역학 정수를 조절방안에 대한 연구가 필요하다고 역설하고 있다. 그러나 기존의 열처리 및 화학적 처리는 재색의 변화나 밀도의 증가로 인해 음향임피던스의 증가와 음향방사의 감소의 문제를 가지고 있다.

목재는 노화(aging)에 의해 셀룰로오스는 그다지 변화되지 않지만 리그닌과 헤미셀룰로오스는 각각 산화와 가수분해에 의해 감소하게 된다(Pishik 등, 1971). 그리고 노화에 따라 결정화 지수도 증가되었으며 동적 및 정적 섬유방향 탄성계수가 증가되어 200년 정도에서 최대를 나타내었는데, 그 이유는 셀룰로오스 체인의 재배열에 기인한다고 하였다(Bucur, 1975; Fukada 등, 1956). 또한 섬유방향에 대해 인장응력 작용시 분자배열의 직진성, 결정영역의 재배열과 비결정 영역의 재배열에 의해 세포막의 결정화도가 증가될 수 있으며(Murphey, 1963). 따라서 물성변화를 일으키는 노화의 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 내부응력의 크기와 이력도 그 중 큰 요인이 될 수 있음을 알 수 있다. 최근의 연구 결과에 따르면 목재내 천연 cellulose의 결정은 두 가지 형태가 있는 것으로 알려져 있다 (Atalla 와 Venderhart, 1984). 이러한 두 가지 결정 형태는 단지 수소결합의 형태에서만 다른 것으로 이들 간에 상호 전환 (inter-conversion) 이 일어나는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 결정형태의 정성적인 변화와 정량적인 변화가 목재의 음향적 성질에 어떻게 미치는지는 연구되지 않고 있다. 아울러 목재의

음향적 성질을 향상시키기 위하여 목재의 천연 cellulose 결정화도를 변화 또는 조절하려는 시도는 제한적이다.

따라서 흡탈착 속도를 이용해 목재내 내부응력을 인위적으로 유발시키고, 흡탈착 반복에 의해 리그닌과 헤미셀룰로오스의 함량이나 조성을 변화시킴으로서 주어진 목재의 음향적 성질을 조절하고자 한다.

서양의 경우 현악기인 바이올린에 대한 주요 연구논문 181편을 Hutchins(1975, 1976, 1997)이 편집 및 정리한 바 있어, 현악기를 연구하는데 매우 귀중한 자료가 되고 있다. 그러나 바이올린의 품질과 사용목재의 물리적 특성간의 명확한 관련이 밝혀지지 못해 바이올린을 평가하는 가장 좋은 방법은 명연주자가 직접 연주하는 것이라고 말하고 있다(Hutchins, 1992). 우리가 듣거나 측정하는 소리의 방향성, 연주자의 연주특성(playability) 및 악기특성이 결합된 결과로 매우 복잡한 현상에 기인된다고 생각된다. 그러나 근래 Jansson (1997)은 바이올린 25개 명품에 대해 연주특성을 배제하기 위해 바이올린에 대해 충격을 가한 후 응답특성을 조사한 결과, 기존의 연구와 유사한 결과를 얻었다는 것은 비록 본 연구진이 수행하고자 하는 국악기는 아니더라도 향후 악기 연구에 매우 고무적일 것으로 판단한다.

## 2. 기술도입의 타당성

전술한 바와 같이 현재까지 국악기를 비롯하여 목재의 악기제조분야에 있어 음향특성을 광범위하게 정량적으로 파악한 예는 매우 찾아보기 힘들며 소재상태에서 음향특성을 조절할 수 있는 기술은 매우 드물다. 따라서 국외 등으로부터 본 연구와 직접적으로 관련된 기술을 도입하는 것은 곤란하다.

다만 프랑스, 일본, 중국 등지의 목재의 음향전문가와와의 자문 및 기술교류를 통해 필요한 기술정보를 공유해 나가고자 하며, 목재의 수분변화에 따른 재질변화와 관련하여 세계적인 연구력을 확보하고 있는 New Zealand 캔터베리 대학의 Pang교수의 연구실을 방문하여 기술정보를 교환하고 본 연구의 수행을 위한 공동협력 가능성을 모색함으로써 본 기술개발의 완성도를 높이고자 하였다.

## 제2절 연구개발결과의 국내·외 기술개발 현황에서 차지하는 위치

### 1. 연구개발의 핵심 내용

- 가. 음향학적 특성을 고려한 제품 디자인 기술
- 나. 목재 음향제품의 표준 제조기술
- 다. 악기의 性能評價 기술
- 라. 국내 주요수종의 동적 특성 데이터베이스
- 마. 충격에 의한 목재의 동적 응답특성 데이터베이스
- 바. 증기dam 처리에 의한 筒악기용재의 건조 기술
- 사. 筒악기용재의 재면할렬과 외주할 예방 건조기술
- 아. 음향기능성 인공건조기술
- 자. 악기용재의 잔류응력 완화기술
- 차. 악기용 도료 선정 기술
- 타. 악기용 재료 선정 및 적정 도막두께 결정 기술
- 카. 악기용 표준 시스템 설계 및 도장기술

위에 나타난 바와 같이, 국산재와 구조체의 동적특성 및 응답특성에 대한 데이터베이스와 개선기술을 개발함으로써 악기(2000년, 수출 \$2400만) 제조분야에 대한 국산재의 이용범위를 확대하고, 동적응답 설계기술을 적용함으로써 목재음향 제품의 부가가치 증대에 큰 기여를 할 수 있다.

특히 악기의 품질관리 효율성과 품질의 안정성 및 생산성 증대를 도모할 수 있다. 따라서 국산재의 고부가가치 용도를 개발과 동적특성에 맞는 육종기술의 개발에 도움이 될 수 있어 국내임업의 활로에 기여할 수 있다. 국악기 등 일반 국민에게 친숙한 악기제품에의 국산재의 이용확대로 국내 산림과 임업의 중요성을 제고시킬 수 있을 것으로 판단한다. 아울러 사용목재의 동적특성과 형태에 따른 소리를 예측할 수 있는 기술개발의 기반을 구축할 수 있게 됨에 따라 국제수준에 도달할 수 있는 한 단계 진보된 악기 제조기술을 확립할 수 있다.

한편 악기제품의 마감처리에 이용되는 도료를 해당재료에 적용하고 경화시킨 후 점탄성 측정과 음향 측정장치를 이용하여 저장탄성을 E', 손실탄성을 E"과  $\tan\delta$  및 impact noise level을 측정하고 이 측정값을 기준으로 가장 적절한 음향기능제품용 도료의 도장시스템을 개발, 해당 제품용 재료와 도막의 음향적 성질과의 관계 구명, 도막두께에 따른 음향적 성질 평가 및 음향 실험기를 이용해 실제 도막이 형성된 완제품의 음향적 성능, 도막두께별 성능을 평가하고 발수제 등 기타 다양한 도장처리에 따른 음향적 성능변화 양상을 평가 할 예정이다.

이를 통해 뛰어난 음향적 성능을 지닌 음향기능제품(장고, 대금 및 가야금 등 전통 국악기)에 대한 도장 시스템을 구축하므로 외국제품과 경쟁력이 있는 국내 제품을 개발, 생산함으로써 국내 악기산업에 기술적 경쟁력 확보와 자료 구축을 통해 국제경쟁력을 갖춘 제품을 생산할 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. 개발기술의 기대효과 및 활용방안

### 가. 기대효과

#### 1) 기술적 측면

본 연구과제는 소득향상에 다른 삶의 질 향상에 부합하고자 최고의 부가가치를 지니는 목제품 중 우리 민족의 정서를 담고 있는 국악기의 대표주자인 가야금, 장고, 대금의 제조공정중 핵심 기술요소인 胴體 설계 및 생산기술 엔지니어링 그리고 완제품의 음질을 객관적으로 평가하고자하는 기술로서 지금까지의 다소 경험의존적인 국내의 악기설계 및 제조기술과 주관적 관능에 의해 감각적으로 행해지던 악기제품의 음질평가법을 체계화 및 객관화(수치화)시킴으로써 국내산 현악기 제품의 품질의 향상 및 안정화를 도모하고 나아가 국제적으로도 그 상품가치를 인정받을 수 있는 고품격 악기 제작을 위한 핵심 기반기술이다. 특히 본 기술개발의 주요 사항인 동체설계분야는 비파괴 소재성능평가 및 부품의 음향특성에 관한 事前분석을 근거로 하여야 하며, 주파수 분석(FFT) 및 진동 모드해석에 의한 목재 악기부품 및 완제품의 동적거동 예측 및 SDM modification에 의한 시뮬레이션 구조해석 그리고 최종음질 평가분야 또한 FEM, Modelling & Animation등 유관 인접과학을 활용한 응용해석을 필요로 하는 핵심기술로 판단된다. 본 기술개발의 핵심기술로써 제안하는 소재의 주파수 분석에 의한 비파괴 성능분석 및 구조물의 부품 및 완제품에 대한 진동모드 해석기술은 현재 각종 기계설비분야, 자동차, 선박 및 항공기 분야, 토목 및 건축 구조분

야, 가전제품 제조분야 그리고 樂器産業 등 騒音 및 振動과 관련된 산업분야에서 다양한 목적으로 사용되고 있는 기반기술로서의 과학기술적 효용이 클 것으로 기대된다.

## 2) 경제 · 산업적 측면

전술한 바와 같이 국내에서의 악기에 대한 연구개발은 주로 제조업체에 의해 기존의 시장규모를 유지하는 수준에서 방어적으로 이루어져 왔기 때문에 민간차원의 R&D 투자현황은 규모조차 파악되지 않는 실정이다. 물론 아직까지 음방사분석, 소음 및 진동 해석기술 및 연구인력의 質的,量的 측면에서 미국 등 선발국과 엄연한 수준차이가 존재하지만, 대망의 21세기를 맞아 새로운 국가경쟁력 확보차원에서 유망한 지식산업중 하나인 고부가가치형 樂器제조업을 육성하기 위해 본연구팀이 제안한 핵심기술개발이 이루어지고 아울러 센서관련분야 및 음향심리학 주변학문과의 共助가 이루어진다면 향후 5년안에 선진 악기제조국가들을 능가하는 악기 제조기술 및 음질평가 기술을 확보할 수 있을 것으로 판단한다. 경제.산업적 측면에서 기대되는 구체적 성과를 열거하면 다음과 같다.

- 가) 국내 국악기 제조업체의 디자인 개발이론 정립 및 품질향상 의식 고취
- 나) 미이용 국산재의 고부가가치적 사용을 위한 전기 마련
- 다) 국내 국악기 제조기술의 공인 및 세계시장 진출계기 제공
- 라) 국악기 부품 및 자재의 표준화로 원가절감 및 생산성 향상
- 마) 국악기 제조공정의 표준화로 품질 향상 및 안정화
- 바) 국악기 등 음향기능제품의 음질평가기술의 확립으로 품질보증 시스템 구축

## 나. 활용방안

- 1) 국산재를 이용한 악기 生産 기술이전 및 사업화 추진
- 2) 대학과 산업체와의 기술교류를 위한 데이터로서의 활용
- 3) 국악기 제품의 설계기술 제조업체 이전
- 4) 국내 영립업자(산림소유자)의 소득증대를 위한 임업경영 및 산림개발 자료로의 활용
- 5) 국악기 생산업체의 품질관리를 위한 기술표준으로서의 활용
- 6) 벤처산업 육성을 위한 특허개발 및 생산기술자료로서의 활용
- 7) 음향기능제품을 생산하고 사용하는 현장에서의 음질평가시스템 기술이전.

## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제1절 국산재 이용의 고부가가치화를 위한 제품설계 및 제품공학적 기술개발

#### 1. 국산재의 고부가가치화를 위한 용도 설계

##### 가. 악기의 분류 및 발음메카니즘 분석

악학궤범 등 문헌조사를 통해 국악기를 재료 및 연주기법에 따라 분류하고 각 악기별로 발음기구(sound generating mechanism)를 구명하였다.

##### 나. 주요 악기별 주요부재의 음향적 특성 및 진동특성 분석

모달해석 및 가진실험 등 음향기기분석을 통해 현악기, 관악기 및 타악기의 주요부재별 음향학적 기능 및 진동특성을 분석하였다. 관악기의 경우는 단소를 모델로 하여 통대의 물성 및 진동 특성을 측정, 분석하였다.

또한 기성 국악기 가야금 제품(A, B)에 대한 예비실험을 통해 음향분석 기법을 개발하여 향후 본 연구팀에서 개발할 국산재 사용 국악기의 품질평가를 위한 기초 자료를 확보하였다.

1) 기성 가야금(A, B)에 대한 예비실험 결과

가) 가야금의 Peak frequency

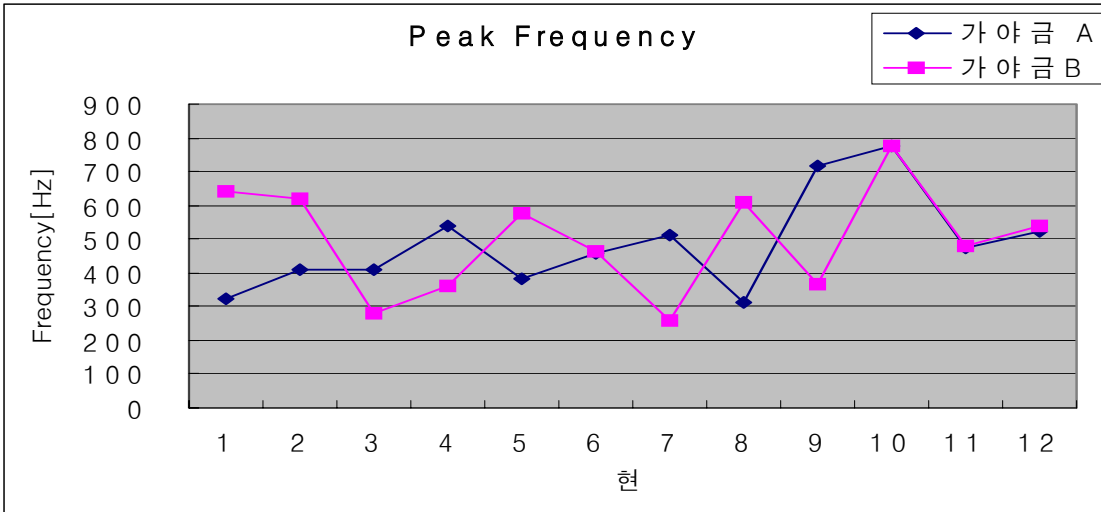


Figure 3. 1. 1. 가야금의 Peak frequency 측정 결과

나) 가야금의 Peak Amplitude

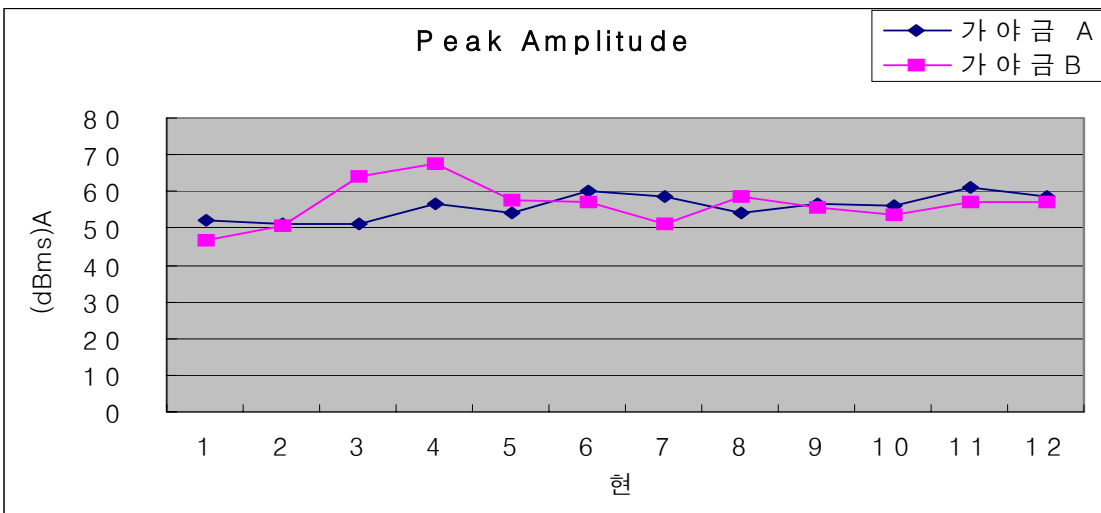


Figure 3. 1. 2. 가야금의 Peak Amplitude 측정 결과

다) 가야금의 Total Power

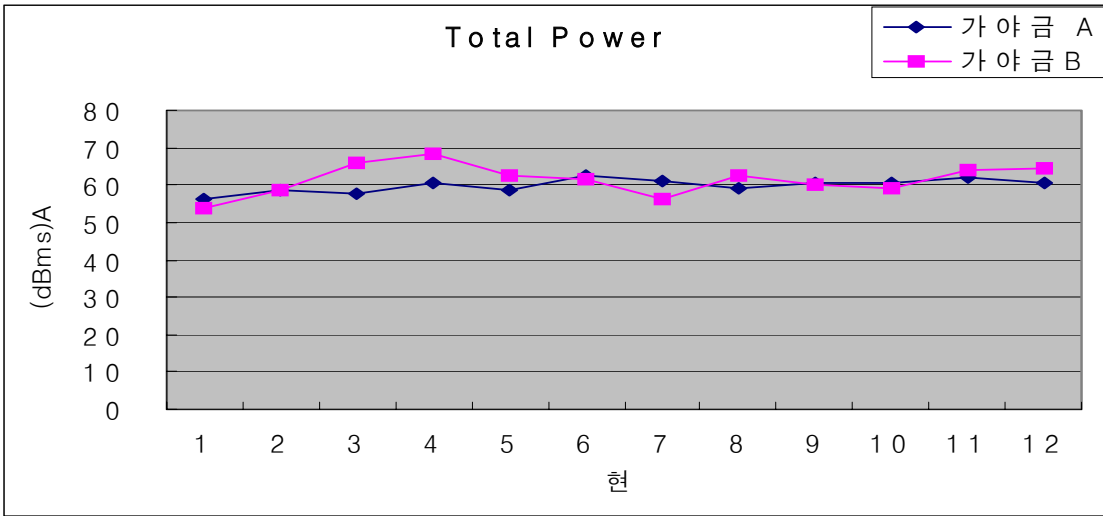


Figure 3. 1. 3. 가야금의 Total Power 측정 결과

라) 가야금의 Total Harmonic Distortion

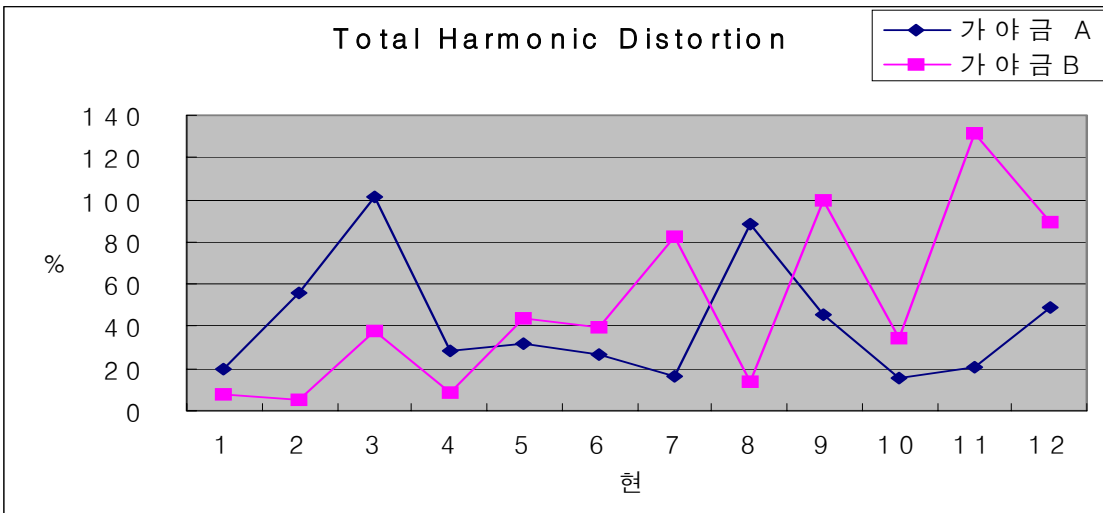


Figure 3. 1. 4. 가야금의 Total Harmonic Distortion 측정 결과



마) 가야금의 T.H.D + Noise

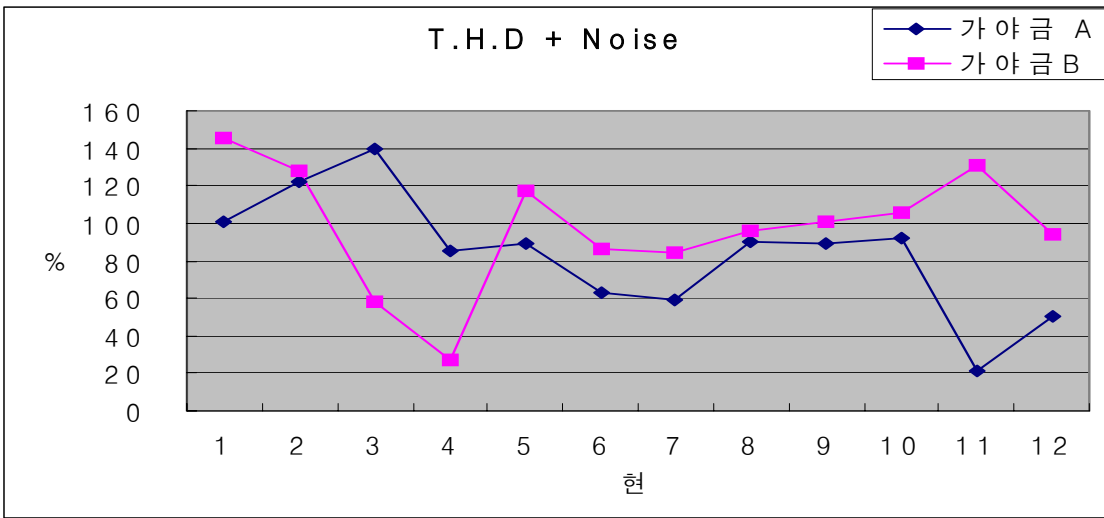


Figure 3. 1. 5. 가야금의 T.H.D + Noise 측정 결과

2) 가야금 현 연주음에 대한 spectrum 측정 (Spectra Plus)

가) A 가야금 11번 현의 spectrum

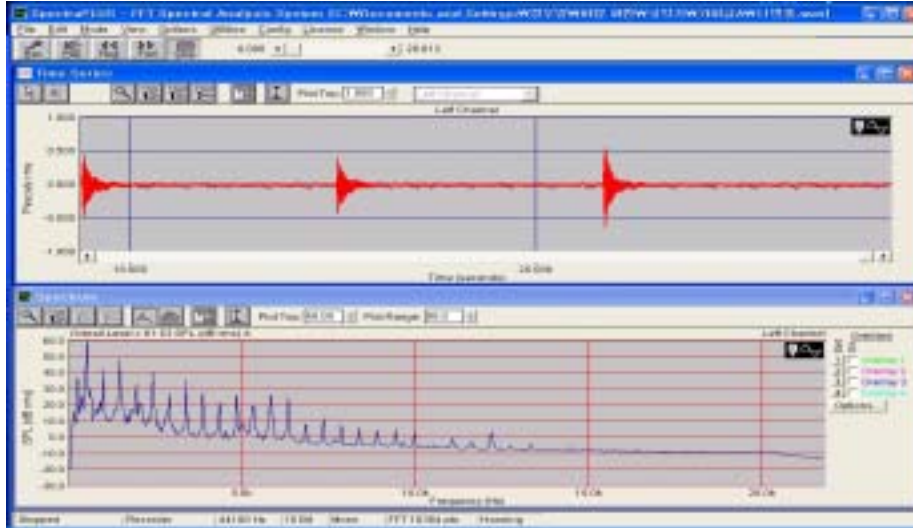


Figure 3. 1. 6. A 가야금 11번 현의 spectrum 실험

나) B 가야금 12번 현의 spectrum

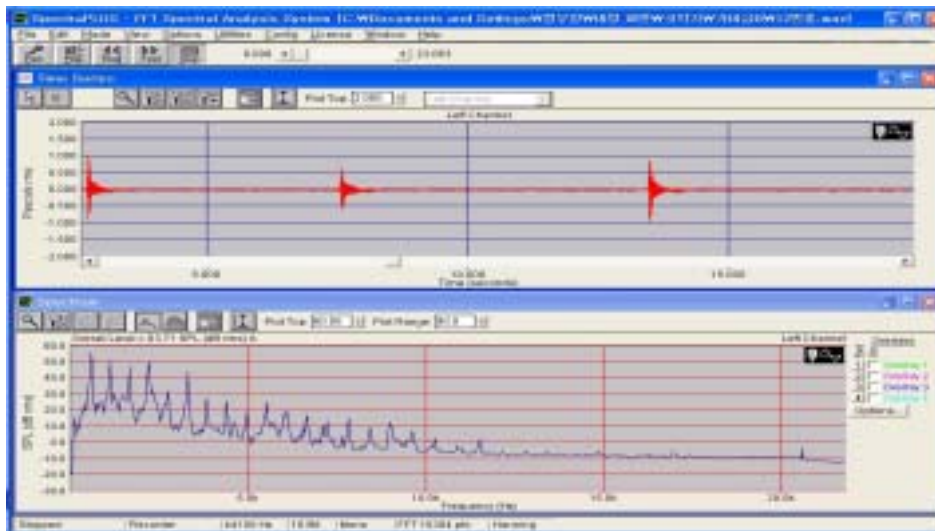


Figure 3. 1. 7. B 가야금 12번 현의 spectrum 실험

3) 단소의 모달실험

Table 3. 1. 1. 단소의 각 모드별 주파수, 댐핑, 댐핑율.

Sample NO.	Mode NO.	Freq(Hz)	Damp(Hz)	Damp(%)	Sample NO.	Freq(Hz)	Damp(Hz)	Damp(%)
1	1	616.52	3.32130	0.53871	8	608.04	4.79181	0.78805
	2	1582.01	9.52915	0.60233		1578.31	10.81110	0.68496
	3	2868.08	38.51041	1.34261		2918.66	16.90466	0.57918
	4	4151.63	50.78637	1.22319		4265.03	35.21721	0.82569
2	1	557.22	6.57998	1.18078	9	658.37	4.49840	0.68325
	2	1503.68	11.74896	0.78132		1645.66	13.47467	0.81878
	3	2735.95	26.39000	0.96435		3028.79	49.06249	1.61966
	4	4139.68	40.02327	0.96677		4220.90	53.97056	1.27854
3	1	557.95	4.65173	0.83369	10	581.20	4.35526	0.74933
	2	1476.07	10.96817	0.74304		1506.58	9.91426	0.65805
	3	2757.60	27.82009	1.00880		2748.74	37.95816	1.38080
	4	4057.03	48.96866	1.20692		4023.95	43.53886	1.08193
4	1	582.23	4.12760	0.70892	11	558.30	3.86113	0.69158
	2	1514.84	8.70505	0.57464		1476.29	8.15264	0.55222
	3	2801.20	42.25904	1.50843		2708.62	19.38180	0.71554
	4	4182.03	50.92775	1.21769		4166.35	52.30500	1.35130
5	1	613.99	5.21348	0.84908	12	598.88	5.64341	0.94229
	2	1584.49	20.28721	1.28026		1563.79	13.19064	0.84347
	3	2893.93	32.50286	1.12307		2844.06	34.80483	1.22368
	4	4247.60	41.20926	0.97013		4208.52	52.67366	1.25150
6	1	618.16	3.53750	0.57225	13	599.13	2.76027	0.46071
	2	1576.68	8.38986	0.53212		1566.24	8.32513	0.53153
	3	2879.54	22.05071	0.76576		2890.97	32.11563	1.11083
	4	4372.43	82.84230	1.89431		4199.93	53.44527	1.27242
7	1	589.79	5.16845	0.87629	14	637.59	4.00527	0.62817
	2	1549.09	12.86841	0.83068		1662.41	9.78575	0.58863
	3	2834.93	21.87593	0.77163		3040.48	59.32256	1.95072
	4	4200.62	42.96457	1.02276		4377.33	53.34031	1.21847

#### 다. 주요 악기부재의 품질특성 규정 및 설계

국악기 제작 현장을 직접 방문하여 주요 국악기의 소재 특성, 가공특성 및 조립특성에 대한 고찰 및 분석을 거쳐, 설계도면을 작성하는 등 국악기 완제품(시제품) 제작과 관련된 사전 기술정보를 취득하였다.

### 2. 주요 국내 4수종의 3방향별 함수율 변화에 따른 동적특성 조사

#### 가. 1차원 동적음향특성 모델링

충돌에 의한 보의 횡진동 거동을 예측하기 위한 방법은 적분법(integral equation method), 에너지법, 유한차분법, 유한요소법 등이 있다. 보의 공진주파수와 모드형태가 알려진 경우에는 적분법과 에너지법을 적용하여 해석적 해를 구할 수 있지만, 댐핑을 고려하거나 보의 단면이 불균일한 경우에는 유한차분법이나 유한요소법을 적용하여야 한다.

Chaigne(1997)은 전단(응력)효과를 고려하지 않은 Euler 보의 충돌에 의한 음향특성을 유한차분법을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였으나 전단응력과 전단댐핑을 고려하지 않았다. 따라서 힘의 평형의 원리를 이용해 지배방정식을 구하고, 또한 해밀톤 운동보존원리(Hamilton's principle for the conservative motion)와 변분법을 이용해 지배방정식을 유도한 후 유한차분법으로 해를 구하고자 한다.

##### 1) 지배방정식 유도

힘으로 인한 보의 중심선의 경사각 ( $dw/dx$ )은 휨변형  $\psi(x)$ 과 전단변형  $\beta(x)$ 으로 구성된다.

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \psi(x) + \beta(x) \quad (3. 1. 1)$$

따라서, 축방향 변형율( $\epsilon_{xx}$ )과 전단변형율( $\epsilon_{xz}$ )은

$$\epsilon_{xx} = -z \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3. 1. 2)$$

$$\epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \beta(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \quad (3. 1. 3)$$

스토크 법칙을 점탄성체에 적용하면 보의 내부 점성댐핑을 고려할 수 있다(Johnston and Barr 1969). 응력과 변형을 및 변형률 속도가 선형관계 가정하면라 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Newman 1959).

$$\sigma_{xx} = E\varepsilon_{xx} + \eta_b \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t} \quad (3. 1. 4)$$

$$\tau_{zx} = 2G_{xz}\varepsilon_{xz} + 2\eta_s \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial t} \quad (3. 1. 5)$$

여기서  $\eta_b$  과  $\eta_s$  는 연직응력과 전단응력에 대한 점성계수(coefficient of viscosity)이다. 따라서 상기 두 식을 정리하면,

$$\sigma_{xx} = \left( E + \eta_b \frac{\partial}{\partial t} \right) \varepsilon_{xx} \quad (3. 1. 6)$$

$$\tau_{zx} = 2 \left( G_{xz} + \eta_s \frac{\partial}{\partial t} \right) \varepsilon_{xz} \quad (3. 1. 7)$$

한 단면에서 휨 모멘트와 전단력은 식 (3. 1. 8)과 식 (3. 1. 9)와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} z b dz = -EI \left( 1 + \frac{\eta_b}{E} \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3. 1. 8)$$

$$V = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} b dz = kGA \left( 1 + \frac{\eta_s}{G} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \quad (3. 1. 9)$$

수직방향에서 힘의 합은

$$\frac{\partial V}{\partial x} + P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + q(x, t) - \gamma_B \frac{\partial w}{\partial t} - \gamma_F w = \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3. 1. 10)$$

여기서  $\gamma_B$  는 유체 댐핑계수(fluid damping coefficient),  $\gamma_F$  는 실제 경계조건을 반영하기 위한 계수이다.

수직방향의 모멘트의 합은,

$$-\frac{\partial M}{\partial x} + V = \rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3. 1. 11)$$

따라서 식 (3. 1. 8)과 식 (3. 1. 9)를 식 (3. 1. 10)과 식 (3. 1. 11)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같은 연립 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \kappa G \frac{\partial}{\partial x} \left[ A \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \right] + \kappa \eta_s \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ A \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \right] \right\} + P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + q(x, t) - \gamma_B \frac{\partial w}{\partial t} \\ - \gamma_F w = \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3. 1. 12)$$

$$\kappa A G \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) + E \frac{\partial}{\partial x} \left( I \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \eta_b \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( I \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \kappa A \eta_s \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \right] = \rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3. 1. 13)$$

그러므로 단면이 균일한 보의 지배방정식은

$$\begin{aligned} \kappa G A \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \kappa \eta_s A \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + q(x, t) - \gamma_B \frac{\partial w}{\partial t} \\ - \gamma_F w = \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3. 1. 14)$$

$$\kappa A G \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) + EI \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \eta_b I \frac{\partial^3 \psi}{\partial t \partial x^2} + \kappa A \eta_s \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) = \rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3. 1. 15)$$

보의 운동에너지(kinetic energy)는

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-b/2}^{b/2} \int_0^L \rho \left[ z^2 \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dx dy dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \left[ \rho I \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 + \rho A \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dx \end{aligned}$$

힘에너지, 재하에너지(energy of loading) 및 탄성기초의 변형에너지(energy of deformation of the elastic foundation)로 이루어지는 위치에너지(potential energy)는

$$V_1 = \int_0^L \left[ \frac{EI}{2} \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \frac{kGA}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right)^2 + \frac{\gamma_F}{2} w^2 - qw - \frac{P}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dx$$

내부와 외부 댐핑에 의해 발산되거나 흡수되는 에너지는

$$V_2 = \frac{1}{2} \int_0^L \left[ \eta_b I \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial t \partial x} \right) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \gamma_B \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dx$$

따라서 운동보존에 대한 해밀톤 원리를 적용하면,

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V_1) dt = 0$$

그러므로,

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \frac{1}{2} \left\{ \left[ \rho I \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 + \rho A \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] - \left[ \frac{EI}{2} \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \frac{kGA}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right)^2 + \frac{\gamma_F}{2} w^2 \right] - qw - \frac{P}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} dx dt = 0$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \left\{ \rho I \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \delta \psi}{\partial t} + \rho A \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial \delta w}{\partial t} - EI \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \delta \psi}{\partial x} - kGA \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \frac{\partial \delta w}{\partial x} - kGA \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \delta \psi - \gamma_F w \delta w + q \delta w + P \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \delta w}{\partial x} \right\} dx dt = 0$$

시간과 공간에 대해 부분적분하면,

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \left\{ \rho I \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \delta \psi}{\partial t} + \rho A \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial \delta w}{\partial t} - EI \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \delta \psi}{\partial x} - kGA \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \frac{\partial \delta w}{\partial x} - kGA \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \delta \psi - \gamma_F w \delta w + q \delta w + p \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \delta w}{\partial x} \right\} dx dt = 0$$

$$\begin{aligned}
& \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \left\{ -\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho I \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) \delta \psi - \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho A \frac{\partial w}{\partial t} \right) \delta w + \frac{\partial}{\partial x} \left( EI \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \delta \psi + \frac{\partial}{\partial x} \left[ kGA \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \right] \delta w \right. \\
& \quad \left. - kGA \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \delta \psi - \gamma_F w \delta w + q \delta w + \frac{\partial}{\partial x} \left( p \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta w \right\} dx dt \\
& + \int_0^L \rho I \frac{\partial \psi}{\partial t} \delta \psi \Big|_{t_1}^{t_2} dx + \int_0^L \rho A \frac{\partial w}{\partial t} \delta w \Big|_{t_1}^{t_2} dx - \int_{t_1}^{t_2} EI \frac{\partial \psi}{\partial x} \delta \psi \Big|_{x_1}^{x_2} dt - \int_{t_1}^{t_2} kGA \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \delta w \Big|_{x_1}^{x_2} dt \\
& + \int_{t_1}^{t_2} P \frac{\partial w}{\partial x} \delta w \Big|_{x_1}^{x_2} dt = 0
\end{aligned}$$

상기 두 식을 정리하여 얻은 지배방정식은 힘의 평형의 원리로부터 구한 식 (3. 1. 14)와 식 (3. 1. 15)의 결과와 동일하다.

2) 유한차분법에 의한 해

충돌에 의한 보의 횡진동에 대한 지배방정식 식 (3. 1. 14)와 식 (3. 1. 15)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_s^2 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + n_s \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + F_a \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + F_b(x, t) - k_B \frac{\partial w}{\partial t} \\
- k_F w
\end{aligned} \tag{3. 1. 16}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{c_s^2}{r^2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) + c_0^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + n_b \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) + \frac{n_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \tag{3. 1. 17}$$

여기서  $c_0, c_s, r, k_1, k_2, k_3$  는 다음과 같다.

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad c_s = \sqrt{\frac{kG}{\rho}}, \quad r = \sqrt{\frac{I}{A}},$$

$$n_s = \frac{k\eta_s}{\rho}, \quad n_b = \frac{\eta_b}{\rho}, \quad F_a = \frac{P}{\rho A}, \quad F_b = \frac{q}{\rho A}, \quad k_B = \frac{\gamma_B}{\rho A}, \quad k_F = \frac{\gamma_F}{\rho A}$$



식 (3. 16)과 식 (3. 17)을 유한차분형태로 나타내면

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{k_B \Delta t}{2}\right) w_i^{n+1} &= (2 - k_F \Delta t^2) w_i^n - \left(1 - \frac{k_B \Delta t}{2}\right) w_i^{n-1} + c_s^2 \Delta t^2 \left[ (\delta_x^2 w)_i^n - (\delta_x^1 \psi)_i^n \right] \\ &+ n_s \Delta t \left[ (\delta_x^2 w)_i^n - (\delta_x^2 w)_i^{n-1} - (\delta_x^1 \psi)_i^n + (\delta_x^1 \psi)_i^{n-1} \right] + F_a \Delta t^2 (\delta_x^2 w)_i^n \\ &+ F_b(x, t) \Delta t^2 \end{aligned} \quad (3. 1. 18)$$

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{n_s \Delta t}{2r^2}\right) \psi_i^{n+1} &= \left(2 - \frac{c_s^2 \Delta t^2}{r^2}\right) \psi_i^n - \left(1 - \frac{n_s \Delta t}{2r^2}\right) \psi_i^{n-1} + \frac{c_s^2 \Delta t^2}{r^2} (\delta_x^1 w)_i^n + c_0^2 \Delta t^2 (\delta_x^2 \psi)_i^n \\ &+ n_b \Delta t \left[ (\delta_x^2 \psi)_i^n - (\delta_x^2 \psi)_i^{n-1} \right] + \frac{n_s \Delta t}{2r^2} \left[ (\delta_x^1 w)_i^{n+1} - (\delta_x^1 w)_i^{n-1} \right] \end{aligned} \quad (3. 1. 19)$$

상기 두 식에 적용된 중앙차분식은 다음과 같다.

$$(\delta_x w)_i^n = \frac{w_{i+1}^n - w_{i-1}^n}{2\Delta x} + O(\Delta x^2)$$

$$(\delta_x^2 w)_i^n = \frac{w_{i+1}^n - 2w_i^n + w_{i-1}^n}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2)$$

$$(\delta_t w)_i^n = \frac{w_i^{n+1} - w_i^{n-1}}{2\Delta t} + O(\Delta t^2)$$

$$(\delta_t^2 w)_i^n = \frac{w_i^{n+1} - 2w_i^n + w_i^{n-1}}{\Delta t^2} + O(\Delta t^2)$$

양단자유보의 경계조건은

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_{x=0, L} = 0, \quad (3. 1. 20)$$

$$\left. \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \right|_{x=0, L} = 0 \quad (3. 1. 21)$$

스텝 사이즈(step-size)는  $\Delta x = L/N$  이므로  $x_i = i\Delta x$ ,  $0 < i < N$ . 여기서  $x_0$  is at the 보의 좌단,  $x_n$  은 보의 우단이다. 경계조건을 반영시키기 위해 가상절점(fictitious nodes)  $x_{-1}$  and  $x_{n+1}$  을 포함시킬 필요가 있다.

좌단 경계조건을 차분형태로 나타내면,

$$\psi_{-1}^t = \psi_1^t,$$

$$w_{-1}^t = w_1^t - 2\Delta x \psi_0^t$$

그리고 우단형태는,

$$\psi_{N+1}^t = \psi_{N-1}^t,$$

$$w_{N+1}^t = w_{N-1}^t - 2\Delta x \psi_N^t$$

충돌력(impact force)은 헤르츠 접촉법칙(Hertz law of contact)으로 구할 수 있다.

If  $\zeta(t) < w(x_0, t)$

$$F(t) = K|\zeta(t) - w(x_0, t)|^{3/2} \quad (3. 1. 22)$$

otherwise

$$F(t) = 0 \quad (3. 1. 23)$$

여기서  $\zeta(t)$  은 임팩터(impactor)의 변위를 나타낸다. 강성계수(stiffness coefficient)  $K$  는 실험으로 구하거나 다음 식 (3. 1. 24)를 이용하여 추정할 수 있다.

$$K(N \cdot m^{-3/2}) = \frac{1}{DR} \quad (3. 1. 24)$$

여기서

$$D = \frac{3}{4} \left( \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} + \frac{1 - \nu_M^2}{E_M} \right) \quad (3. 1. 25)$$

$$R = \left( \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_M} \right) \quad (3. 1. 26)$$

임팩터의 운동은 뉴턴법칙을 이용해 계산할 수 있다.

$$m_e \frac{\partial^2 \zeta(t)}{\partial t^2} = -F(t) \quad \text{with} \quad \frac{\partial \zeta(0)}{\partial t} = v_0 \quad (3. 1. 27)$$

여기서  $m_e$  는 임팩터의 등가질량을 나타낸다. 실제적으로  $m_e$  는 임팩터의 손잡이 질량으로

인해 헤드 무게보다 약간 더 크다.  $v_0$ 는 보에 접촉할 때 충돌 초기속도이다.

유한차분식 식 (3. 1. 18)과 식 (3. 1. 19)를 구하는데 있어,  $t=0$ 과  $t=1$ 일 때 다음과 같은 조건을 적용한다.

i)  $t=0 (n=0)$ ,

$$w(i,0) = 0$$

$$\zeta(0) = 0$$

ii)  $t = \Delta t (n=1)$ ,

$$\zeta(1) = v_0 \Delta t$$

$$w(i,1) = \frac{w(i+1,0) + w(i-1,0)}{2}$$

$$F(1) = K |\zeta(1) - w(i_0,1)|^{3/2}$$

이상에서 기술한 사항을 프로그래밍하면 보의 충돌에 의한 시간에 따른 횡진동 거동을 예측할 수 있으며, 충돌음(impact sound)를 재현하기 위한 음향방사(sound radiation)는 다음 식을 이용해 예측할 수 있다(Akay 등, 1983).

$$p(r, \theta, \psi, t) = \left( \frac{\rho_0 S \mathcal{E}(x)}{4\pi r'} \right) \left[ \frac{1}{c} \frac{\partial^2 u(t - r'/c)}{\partial t^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial u(t - r'/c)}{\partial t} \right] \cos \theta$$

이상과 같은 사항을 프로그래밍하여 얻은 결과는 다음 그림들과 같다.

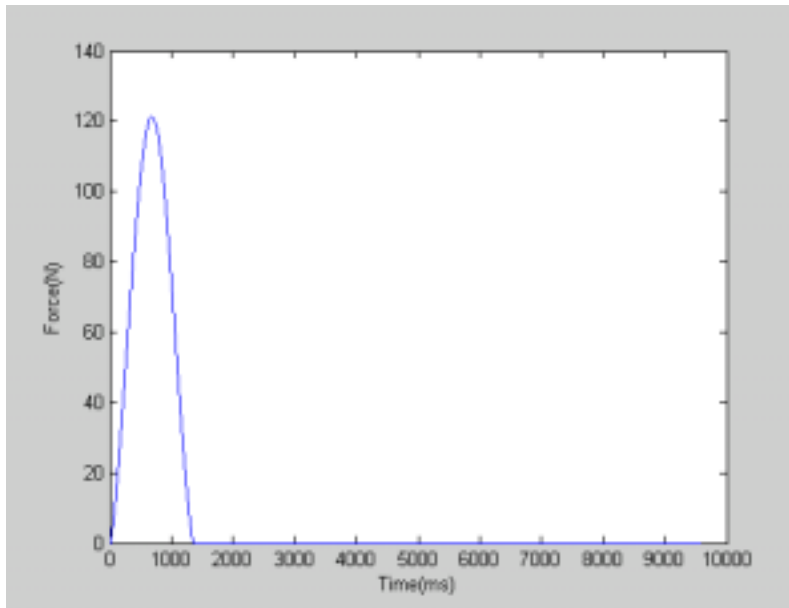


Figure 3. 1. 8. Impact force and duration time

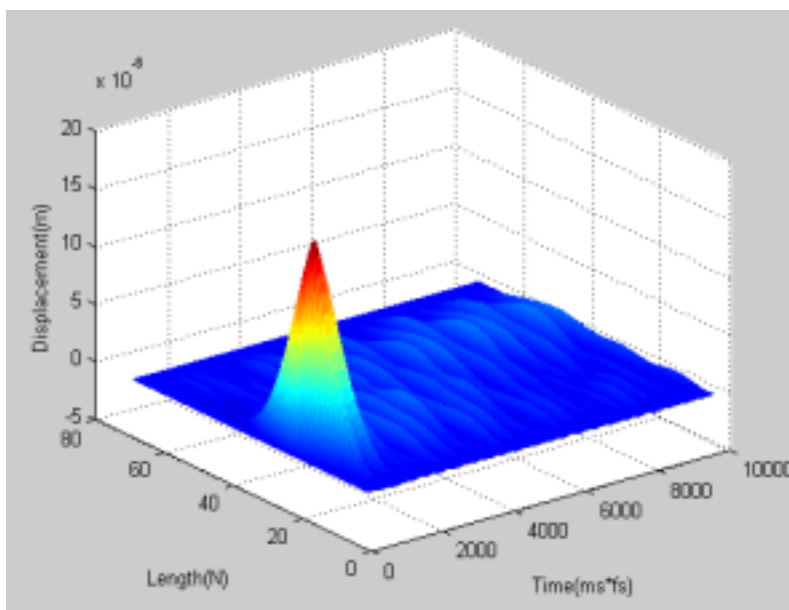


Figure 3. 1. 9. Displacement of beam with time by impact

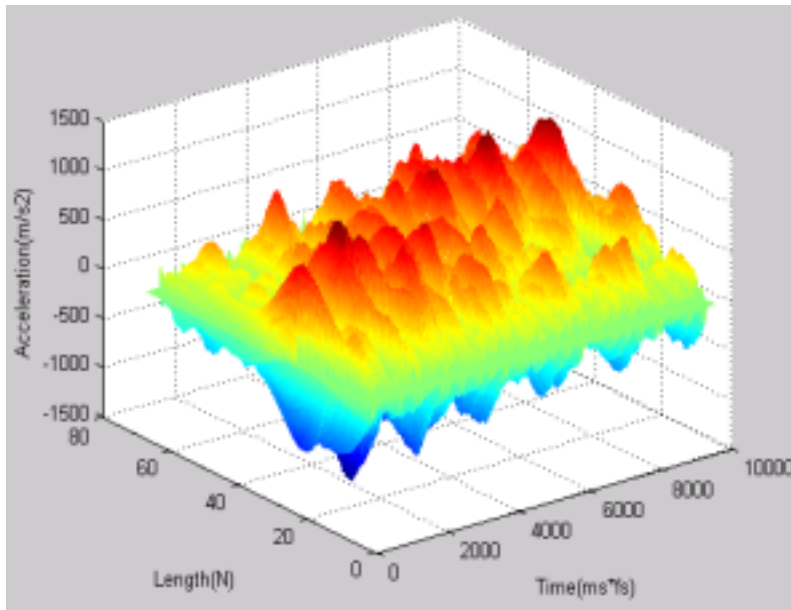


Figure 3. 1. 10. Velocity and acceleration of beam with time by impact

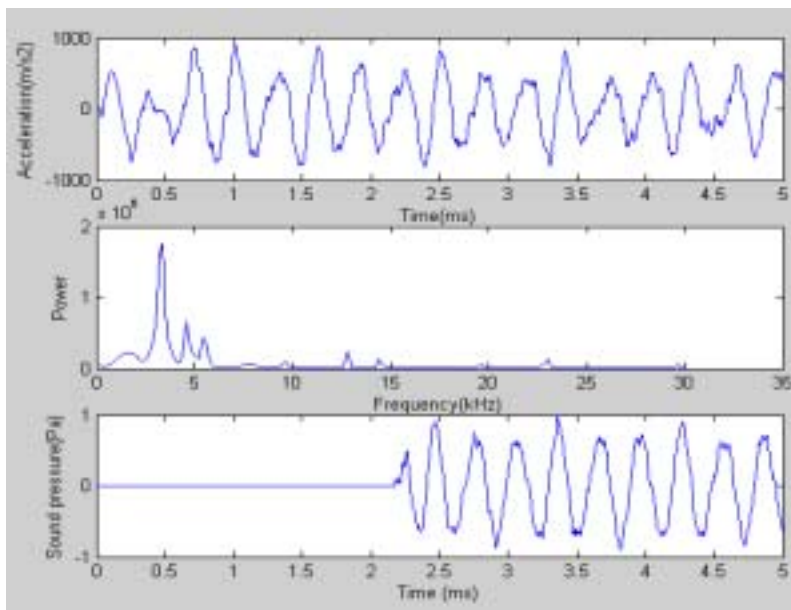


Figure 3. 1. 11. Signal analysis and sound simulation

```

%=====
% This program for EXPLICIT numerical simulations of Impacted viscoelastic
% Timoshenko beam
%-----
%
%-----
% Input Parameters for BAR No 5(G4 : 397Hz) - xylophone CONCORDE X 4001-Padouk
%-----
% Length L = 29.3/100 m
% Width b = 3.7/100 m
% Thickness h = 1.9/100 m
% Total Mass MB = 142.04/1000 kg
% Young's modulus E = 9.54 e9 N m-2 (Pa)
% Density rho = 796 kg m-3
% Viscoelastic constant eta = 9.16 e-8 sec
% Fluid damping coefficient GB = 12.44 s-1
%-----
% Elastic parameter of BAR - rosewood
%-----
% Young's modulus E = 2.13 e10 N m-2 (Pa)
% Density rho = 1015 kg m-3
% Viscoelastic constant eta = 2.35 e-7 sec
% Fluid damping coefficient GB = 51.58 s-1
%-----
% MALLETS
%-----
% Stiffness coefficient (rubber) K = 3.7 e7 N m-3/2
% Stiffness coefficient (boxwood) K = 1.31 e9 N m-3/2
% Equivalent mass (rubber) me = 23.6/1000 kg
% Equivalent mass (boxwood) me = 26.2/1000 kg
%-----
% PLAYER'S action
%-----
% Position of impact x0 = 15/100 to 20/100 m
% Position of observation (acceleration) x = 9.3/100 m
% Initial impact velocity v0 = [0.05; 1.5] m s-1
%-----
% SAMPLING
%-----
% Time sampling frequency fs = 192000 Hz
% Spatial step dx = 1.0/1000 to 3/1000 m
% Impact width delx = 2.0/1000 m
%=====
%
% Programmed by Kang Wook on May 25, 2003
%-----
% OpenGL neverselect
feature('UseGenericOpenGL',1);
clear all
clc
tic;
format long
%-----
% xylophone CONCORDE X 4001-Padouk
%-----
L = 29.3/100;
b = 3.7/100;

```

```

h = 1.0/100;
MB = 142.04/1000;
E = 9.54e9;
rho = 796;
eta = 9.16e-8;
GB = 12.44;
%-----
% MALLETS
%-----
K = 3.7e7;
me = 23.6/1000;
%-----
% PLAYER'S action
%-----
x0 = 10/100;
% Position of observation (acceleration) x = 9.3/100 m
v0 = 1.0;
%-----
% SAMPLING
%-----
fs = 1920000;
dx = 20/1000;
delx = 2/1000;
%=====
% Calculation needed for simulation
%-----
%-----
% S = cross sectional area (m2)
% I2 = inertia moment (m3)
% alpha = relative impact postion x0/L
%-----
S=b*h;
I2=b*h^3/12;
% soundtime (sec) = simulated sound duration
%-----
f1=4.73*2/(2*pi*L^2)*sqrt(E*I2/rho/S);
dt=1/fs;
N=L/dx;
N=3/4*sqrt(pi*fs/f1/(1+eta*fs))*5;
N=fix(N);
dx=L/N;
soundtime = 0.005;
time = fs*soundtime;
p=1.5;
alpha=x0/L;
i0=fix(N*alpha)+2;
%-----
% Explicit finite difference
%-----
% N=1,N+3 : fictitious nodes
% 2 < i < N+2

y=zeros(N+5,time);
ph=zeros(N+5,time);

for I=1:N+5,
    if I<(i0) | I>(i0)

```

```

        g(I,i0)=0;
    else
        g(I,i0)=1;
    end
    y(I,1)=0.0;
    ph(I,1)=0.0;
end

for n=1:time
    ph(1,n)=ph(3,n);
    y(1,n)=y(3,n)-2*dx*ph(2,n);
    ph(N+3,n)=ph(N+1,n);
    y(N+3,n)=y(N+1,n)-2*dx*ph(N+2,n);
end

xi(2)=v0*dt;

for I=3:N+1,
    y(I,2)=(y(I+1,1)+y(I-1,1))/2;
    FH(2)=K*abs(xi(2)-y(i0,2))^p;
end
%-----

Pa=10.0;
ts=0.85;
G=E/10;
etas=eta*3;

GB=GB*rho*S;KS=K/L;
c0=sqrt(E/rho);cs=sqrt(ts*G/rho);r=sqrt(I2/S);
ns=ts*etas/rho;nb=eta/rho;Fa=Pa/(rho*S);kb=GB/(rho*S);kf=KS/(rho*S);

for n=2:time,
    for I=2:N+2,
        y10=y(I+1,n)-y(I-1,n);y10=y10/(2*dx);
        y20=y(I+1,n)-2*y(I,n)+y(I-1,n);y20=y20/(dx^2);
        y101=y(I+1,n-1)-y(I-1,n-1);y101=y101/(2*dx);
        y201=y(I+1,n-1)-2*y(I,n-1)+y(I-1,n-1);y201=y201/dx^2;

        p10=ph(I+1,n)-ph(I-1,n);p10=p10/(2*dx);
        p20=ph(I+1,n)-2*ph(I,n)+ph(I-1,n);p20=p20/(dx^2);
        p101=ph(I+1,n-1)-ph(I-1,n-1);p101=p101/(2*dx);
        p201=ph(I+1,n-1)-2*ph(I,n-1)+ph(I-1,n-1);p201=p201/dx^2;

        rhe1=(2-kf*dt^2)*y(I,n)-(1-kb*dt/2)*y(I,n-1)+cs^2*dt^2*(y20-p10);
        rhe2=ns*dt*(y20-y201-p10+p101)+Fa*dt^2*y20+FH(n)*g(I,i0)*dt^2/rho/S/dx;
        y(I,n+1)=(rhe1+rhe2)/(1+kb*dt/2);
        rhe1=(2-cs^2*dt^2/r^2)*ph(I,n)-(1-ns*dt/2/r^2)*ph(I,n-1)+cs^2*dt^2/r^2*y10;
        rhe2=c0^2*dt^2*p20+nb*dt*(p20-p201)+ns*dt*(2*r^2)*(y10-y101);
        ph(I,n+1)=(rhe1+rhe2)/(1+ns*dt/2/r^2);
    end

    ph(1,n)=ph(3,n);
    y(1,n)=y(3,n)-2*dx*ph(2,n);
    ph(N+3,n)=ph(N+1,n);
    y(N+3,n)=y(N+1,n)-2*dx*ph(N+2,n);

```



```

    xi(n+1)=2*xi(n)-xi(n-1)-dt^2*FH(n)/me;

if xi(n+1)<y(i0,n+1),
    FH(n+1)=0;
else
    FH(n+1)=K*abs(xi(n+1)-y(i0,n+1))^p;
end
%if FH(n+1)==0,
%    ntime=n+1; break
% end
end

toc

plot(FH)
xlabel('Time(ms)');ylabel('Force(N)'); pause

mesh(y)
ylabel('Length(N)');xlabel('Time(ms*fs)');zlabel('Displacement(m)'); pause

%=====
% calculation of string velocity, acceleration, and its rate
%=====
for k=3:N+3
    for n=2:time-1
        vs(k,n)=(y(k,n+1)-y(k,n-1))/(2*dt);
    end
end

%mesh(vs)
%ylabel('Length(N)');xlabel('Time(ms*fs)');zlabel('Velocity(m/s)');pause

for k=3:N+3
    for n=2:time-2
        ddy(k,n)=(vs(k,n+1)-vs(k,n-1))/(2*dt);
    end
end

%mesh(ddy)
%ylabel('Length(N)');xlabel('Time(ms*fs)');zlabel('Acceleration(m/s^2)');pause

for k=3:N+3
    for n=2:time-3
        dddy(k,n)=(ddy(k,n+1)-ddy(k,n-1))/(2*dt);
    end
end
%mesh(dddy)
%ylabel('Length(N)');xlabel('Time(ms*fs)');zlabel('Rate of acceleration(m/s^2)');pause

pause

%for n=1:100:time
%    plot(y(3:N+1,n))
%    pause
%end

```

```

t=(1:time-2)/fs*1000;
dat=ddy(fix(N/2),:);
subplot(3,1,1),plot(t,dat)
xlabel('Time(ms)');ylabel('Acceleration(m/s^2)')
nt=length(t);
Y=fft(dat);
Y(1)=[];

%set(gca,'YTick',[],'XTick',[])

n=length(Y);
power=abs(Y);
freq=(1:n)*fs/n/1000;
subplot(3,1,2),plot(freq(1:150),power(1:150))
xlabel('Frequency(kHz)');ylabel('Power');pause
%-----
% Sound Pressure Calculation of Beam
%-----
r=0.8;
theta=pi/6;
c0=340;
rho_air=1.293;
dV=S*dx;

L1=r*cos(pi/2-theta);
num=L1/tan(theta);

for i=1:N+1
    den=dx*N/2-dx/2-(i-1)*dx+L1;
    rx(i)=sqrt(num^2+den^2);
    thx(i)=pi/2-atan(num/den);
end

pb=zeros(1,time-3);
ptemp=0;
for n=2:(time-3)
    for i=3:N+3
        pb(n)=pb(n)+ptemp;
        if n*dt>rx(i-2)/c0
            ptemp=3/(8*pi)*dV*rho_air*cos(thx(i-2))*(1/rx(i-2)^2*ddy(i,n)+1/(rx(i-2)*c0)*ddy(i,n));
        else
            ptemp=0;
        end
    end
end
end

%-----
% Sound Pressure Calculation of Resonator
%-----
% Sound speed in air c0 (m/s)
% Radius of resonator at (m)
% Length of resonator lt (m)
% Characteristic constants of damping evt
% Characteristic lengths of viscous and heat propagation effects lv, lh (m)
% Ratio of specific heat gamma = Cp/Cv
% Damping factor rt

```

```

%-----
at=2.0/100;
lv=4e-8;
lh=5.6e-8;
lt=0.2;
gamma=1.402;
w1=2*pi*f1;
evt=sqrt(lv)+(gamma-1)*sqrt(lh);
c=c0*(1-evt/(at*sqrt(2))*sqrt(c0/w1));
rt=evt*c/at*sqrt(2*w1/c0);

dz=dt*c;
NT=fix(lt/dz);

alpha1=0.7;
beta1=0.6133;
alpha2=0.21;

a1=alpha1/dt*(at/c0);
b1=beta1/dt*(at/c0);
a2=alpha2*(at/c0/dt)^2;
%-----
% Effects of beam on resonator
%-----
r=5/100;
theta=0.01;
rho_air=1.293;
dV=S*dx;

L1=r*cos(pi/2-theta);
num=L1/tan(theta);

for i=1:N+1
    den=dx*N/2-dx/2-(i-1)*dx+L1;
    rx(i)=sqrt(num^2+den^2);
    thx(i)=pi/2-atan(num/den);
end

pbr=zeros(1,time-3);
ptemp=0;
for n=2:(time-3)
    for i=3:N+3
        pbr(n)=pbr(n)+ptemp;
        if n*dt>rx(i-2)/c0
            ptemp=3/(8*pi)*dV*rho_air*cos(thx(i-2))*(1/rx(i-2)^2*ddy(i,n)+1/(rx(i-2)*c0)*ddy(i,n));
        else
            ptemp=0;
        end
    end
end
end

%-----
%-----

pt=zeros(NT,time+2);

for n=2:(time-4)

```

```

for z=2:NT-1
    p0t=(a1+3*a2)*pt(1,n)-a2*pt(1,n-1)+(b1+a2)*pt(2,n+1)-a2*pt(2,n)...
        +(1+a1+a2)*pbr(n+1)-(a1+2*a2)*pbr(n)+a2*pbr(n-1);
    pt(1,n+1)=p0t/(1+a1+b1+2*a2);

    pzt=2*pt(z,n)-(1-rt*dt/2)*pt(z,n-1)+c^2*(dt/dz)^2*(pt(z+1,n)-2*pt(z,n)+pt(z-1,n));
    pt(z,n+1)=pzt/(1+rt*dt/2);
end
pt(NT,n+1)=2*pt(NT-1,n)-pt(NT,n-1);
end

rt=0.85;
ST=pi*at^2/4;

for n=2:(time-3)
    if n*dt>rt/c0
        pr(n)=ST/(4*pi*rt)*(pt(2,n)-pt(1,n))/dz;
    else
        pr(n)=0;
    end
end

%-----
% Sound Play
%-----
cal=fs/19200;
fs1=fs/cal;
sp=(pb+pr)/max(pb);

kt=(2:time-2)/fs*1000;
subplot(3,1,3),plot(kt,sp)
xlabel('Time (ms)');ylabel('Sound pressure(Pa)')

for i=2:cal:time-3
    sp(i)=sp(i);
end

sound(sp,fs1)

```

나. 시편의 제재 및 넘버링, 제작

주요 국산재 각 수종별(잣, 오동, 밤나무, 소나무) 넘버링 표시는 원구 부분을 ‘원’, 말구 부분을: ‘말’ 로 표기 하였고 좌측 부분을 ‘L’, 우측 부분을 ‘R’, 중앙 부분을 ‘C’-수를 지나는 center가 아니라 절단 상의 중앙부분을 나타냄-로 표기 하였다. 그리고 수종별로 ‘잣’, ‘오’, ‘밤’, ‘소’ 로 표기하고 좌측과 우측에서 별도로 번호를 부여하여 표기 했다.

원목 상태에서의 각 수종별 치수와 제재시편의 개수는 아래의 표와 같다.

Table 3. 1. 2. 각 수종별 주요 치수와 제재시편의 개수.

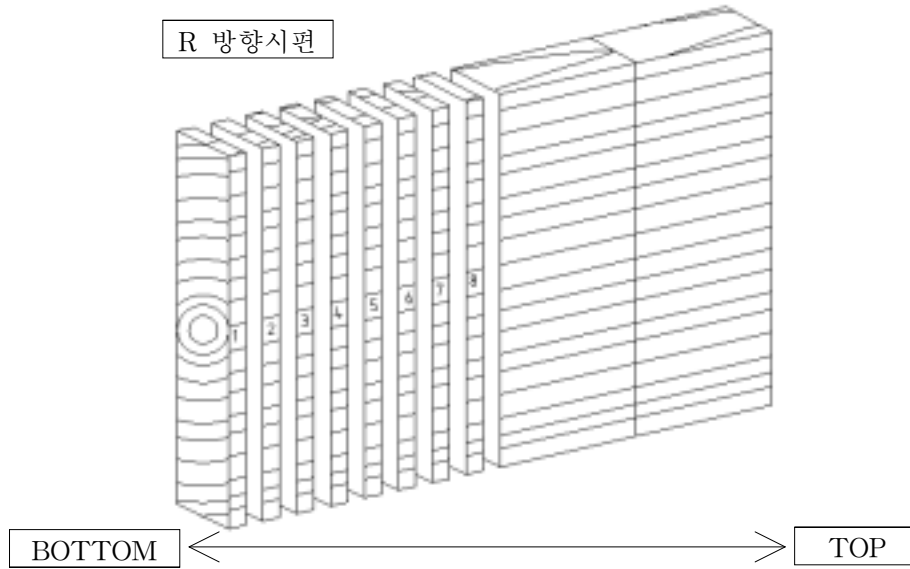
수종	치수	직경(cm)		연륜 수(ea)		원목길이 (cm)	제재시편 개수
		원구	말구	원구	말구		
잣나무		45	40	34	30	181	L-6, R-4, C (총11개)
밤나무		70	64	50	46	198	L-11, R-8, C (총 20개)
오동나무		42	39	24	26	180	L-4, R-5, C (총 10개)
소나무		80	70	70	65	185	L-11, R-10, C (총 22개)

※ 각 수종별 L과 R의 폭은 25mm 제재 함.

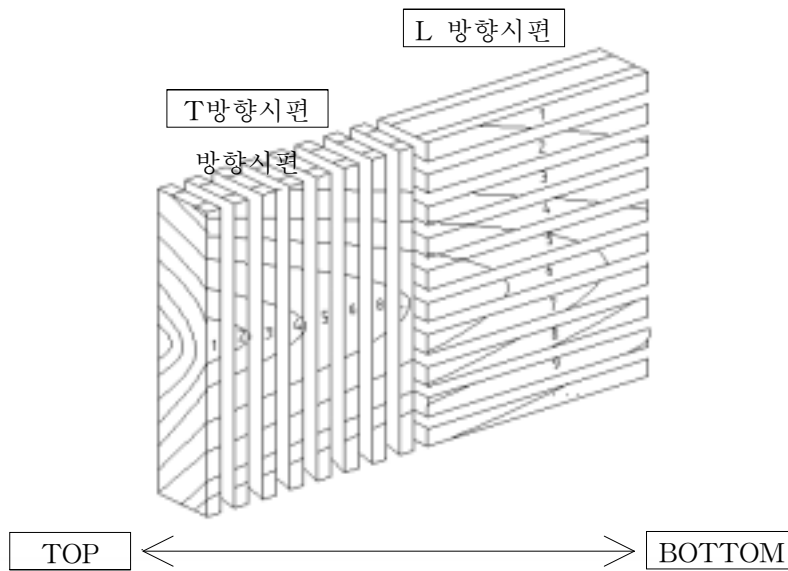
다. 시험편 제작 위치 및 수량

1) 방향별 시편 채취 위치

가) T, L 방향의 시편 채취



나) R 방향의 시편 채취



※ 'set'는 두께 5t, 10t, 15t 가 하나의 set로 구성.

## 2) 수종별 시편 채취 위치 및 수량

### 가) 방향별 시편 채취 위치

잣나무의 T, L 방향의 시편은 'L-5' 에서, R방향의 시편은 'C'에서 시편을 채취하였고, 밤나무의 T, L방향의 시편은 'L-9' 에서, R방향의 시편은 'C'에서 시편을 채취하였으며, 오동나무의 T, L방향의 시편은 'L-3' 에서, R방향의 시편은 'C'에서 시편을 채취하였다. 그리고 소나무의 T, L방향의 시편은 'L-2'에서 R방향의 시편은 'C(수를 지나는 center)'에서 시편을 채취하였다.

### 나) 수종별 시편 채취 수량

잣나무 57개, 밤나무 45개, 오동나무 54개, 소나무 54개로 총 210개의 시편을 제작하였다. 수종에 따른 방향별 시편의 개수는 아래의 표와 같다.

Table 3. 1. 3. 수종에 따른 방향별 시편의 개수.

수 종	L방향	T방향	R방향	총 수량
잣 나무	9set	5set	5set	57개
밤 나무	5set	5set	5set	45개
오동나무	6set	5set	7set	54개
소 나무	8set	5set	5set	54개

## 3. 휨진동법에 의한 국악기용 주요 국산재의 재질 평가

### 가. 서언

국산재의 이용가치를 높이기 위한 방안으로 국악기인 가야금과 장고에 사용되고 있는 소나무, 잣나무, 오동나무, 밤나무의 국산 4수종에 대하여 휨진동의 양단자유 강제진동법 등을 이용하여 물리적 특성을 조사하고 그들이 갖고 있는 음향특성과의 관계를 기존의 연구를 토대로 알아내어 양질의 국악기 부재 설계를 위한 소재(素材) 단계의 기초 자료를 확보하고자 하였다.

적합한 악기 부재를 설계하기 위해서는 우선 소재의 음향특성치 중 각 방향별 탄성계수와 전단탄성계수의 파악과 밀도와 관계, 댐핑의 조사가 필수적이라 할 수 있다. 그러나 목재의 섬유방향과 방사방향에 대한 물리적 성질의 조사는 별도로 이루어져 왔으며, 상대적으로 접선 방향에 대한 조사는 미흡한 현실이다. 즉 악기용 주요 국산재의 각 방향별 물성과 두께의 변화에 따른 물성을 진동역학적인 방법으로 규명한 후 실제 악기용 부재의 설계에 유용하게 적용함에 본 연구의 궁극적인 목적이 있다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 전통악기 중 현악기와 타악기에 사용되는 국산 4수종으로부터 방향과 두께가 각각 다른 시편들을 준비하여 각각의 시편의 밀도( $\rho$ )를 계산하고, 휨진동(flexural vibration)의 양단자유 강제진동방법을 실시하여 모드별 공명주파수( $f$ )와 댐핑( $\lambda$ )을 알아보고자 하였다. 동역학적 물성을 알아보기 위하여 Timoshenko 보 이론에 기초한 TGH 이론을 이용하여 방향별 탄성계수( $E$ )와 전단탄성계수( $G$ )의 재질의 물리적 성질을 알아보고,  $\lambda$ ,  $E/\rho$ ,  $E\rho$ ,  $E/G$ 의 값과 기존의 연구내용에 기초하여 국산 4수종의 음향 특성과의 관계를 알아보고자 하였다.

## 나. 재료 및 방법

### 1) 재료

#### 가) 공시수종

본 실험에 사용된 주요 국악기용 국산 4수종인 밤나무(*Castanea crenata*), 소나무(*Pinus densiflora*), 오동나무(*Paulownia coreana*), 잣나무(*Pinus koraiensis*)를 국산재를 취급하는 목재 상에서 흉고 직경과 수령을 고려하여 구입하였다. 공시수종의 길이와 직경 및 연륜 수는 다음의 Table 3. 1. 4와 같다.



Table 3. 1. 4. Diameter and Annual Rings of log bottom and top.

Species	Length (cm)	Diameter(cm)		Annual Rings(ea)	
		Bottom	Top	Bottom	Top
Red pine	185	80	70	70	65
White pine	180	45	40	34	30
TPaulownia	180	42	39	24	23
Chestnut	198	70	64	50	46

나) 시편제작

공시수종 4수종의 원목을 제재하여 얻어진 판재를 인공 건조하여 섬유방향(L), 방사방향(R), 접선방향(T)의 방향별로 두께(δ) 5mm, 10mm, 15mm를 1set로 하여 총 5set, 수종별로 45개씩의 시편을 제작하였고 제작된 시편을 20°C, 60%의 조건의 항온항습기에서 2개월 조습하여 시편을 준비하였다. 조습 후의 각 시편들의 치수를 측정하였다. 본 실험에서는 5mm, 10mm, 15mm의 두께로 제작된 시편들을 방향별로 섬유방향, 방사방향, 접선방향을 L, R, T로 명명하여, 두께별, 방향별로 구분하여 실험하였다.

## 2) 실험방법

### 가) 공명주파수 측정

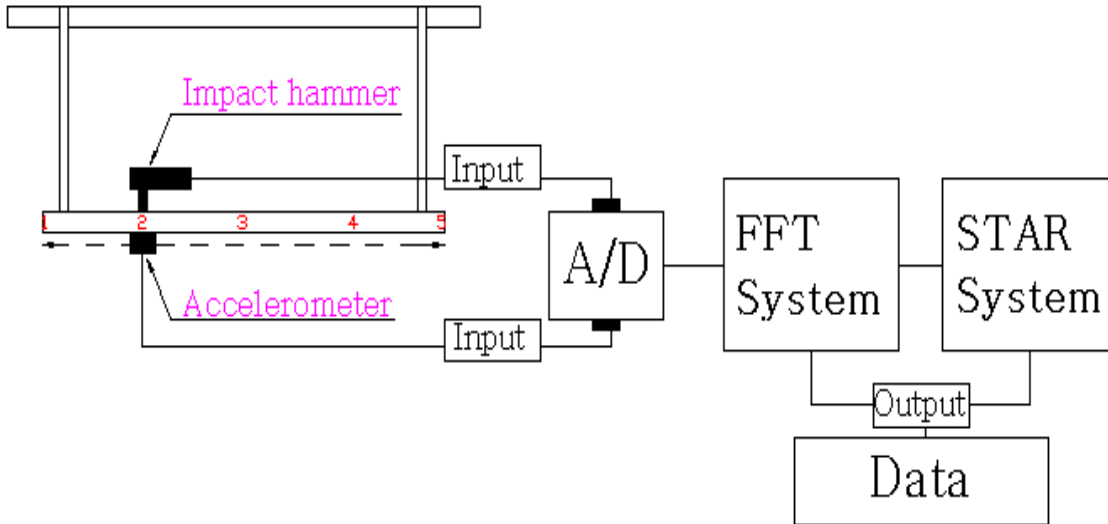


Figure 3. 1. 12. Schematic diagram of vibration of modal test

공시수종인 4수종 시편들의 각 모드(mode)별 공명주파수를 측정하기 위하여 DYTRAN사의 5.3mV/g의 감도를 갖는 가속도계(accelerometer)와 100mV/lbf의 감도를 갖는 충격 햄머(impact hammer)를 사용하여 측정하였다. 시편의 자유진동을 위해 공중에 매달았으며 자유진동에 영향을 최소화하기 위해 고무줄을 이용하여 지지대에 고정시켰다(Figure 3. 1. 12).

각각의 시편의 길이를 4등분하여 총 5점에서 진동 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 충격 햄머를 2번 점에 고정하여 타격 하였고 가속도계를 1번 점부터 5번 점까지 이동시켜가며 시편의 진동을 측정하여 FFT System을 통해 공명주파수를 측정하였다.

나) 댐핑 측정

댐핑 데이터를 받아들이기에 앞서 STAR System은 시편에 대한 모델링을 요구하는데 본 실험에서는 5개의 점을 지나는 선형모델을 취하였다. FFT System으로부터 데이터를 받아들이며 각 시편의 첫 측정 점 데이터의 band를 잡아 auto-fit시키면 각 시편의 모드의 거동이 동화상으로 표시되고 각각의 모드별 댐핑[Hz]을 측정하고 댐핑율(%)을 계산하였다.

다) 탄성계수와 전단탄성계수의 계산

보의 진동은 종진동(longitudinal vibration), 휨진동(flexural vibration), 비틀림진동(torsional vibration)으로 구분할 수 있으며 이에 대한 연구는 다수(Hearmon, 1966)가 있다. 고차진동에서는 전단응력과 회전관성을 고려한 Timoshenko 보 이론을 적용하여야 한다. 그러나 더욱 엄밀한 의미에서는 휨과 전단의 댐핑을 고려하여야만 한다.

탄성계수를 구하는 방법에는 Timoshenko beam 이론과 TGH 이론과 Mead-Joannides 이론 등이 있는데, 이 실험에서는 전단변형과 회전관성을 고려한 Timoshenko 보 이론을 근간으로 이루어진 TGH 이론으로, 횡진동 시험에 의해 방향별 동적탄성계수( $E_L, E_R, E_T$ )와 주 평면별 전단탄성계수( $G_{LR}, G_{RT}, G_{TR}$ )를 구하였다.

TGH 이론에는 아래와 같은 유도과정을 통하여 선형회귀식을 얻게 되는데, 그 식(3. 1. 36)을 이용하여 각 방향별 탄성계수와 전단탄성계수를 구했다.

- Timoshenko 이론 :

$$\frac{Ei^2}{\rho} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - i^2 \left( 1 + \frac{sE}{G} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho s i^2}{G} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (3. 1. 28)$$

여기에서,

$E$ 는 탄성계수,  $G$ 는 전단계수,  $\rho$ 는 밀도,  $y$ 는 측 변형(lateral deflection),  $x$ 는 길이,  $t$ 는 시간,  $s = 1.18$ 은 전단변형 계수이고,

$i$ 는 회전반경으로 다음과 같다.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{(bh^3/12)}{bh}} (m) \quad (3. 1. 29)$$

여기에서,  $I$ 는 관성모멘트,  $A$ 는 단면적을 나타낸다.

식 (3. 28)은 양단 자유 보에서 적용하게 되면 n번째 모드에서의 주파수  $f_n$ 은 다음과 같다.

$$f_n = \frac{ik_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3. 1. 30)$$

여기에서,  $l$  은 보의 길이이다.

- Goens 이론 :

$$\frac{m_n^4}{k_n^4} = 1 + \frac{i^2}{l^2} [m_n^2 F^2(m_n) + 6m_n F(m_n)] + \frac{i^2}{l^2} \frac{sF}{G} [m_n^2 F^2(m_n) - 2m_n F(m_n)] - \frac{4\pi\rho s i^2 f_n^4}{G} = T \quad (3. 1. 31)$$

여기서

$F(m_1) = 0.9825$ ,  $F(m_2) = 1.0008$ ,  $F(m_n) = 1 (n > 2)$  이다.

- Hearmon 이론 :

$$Y = \frac{E}{T} \left[ 1 + \frac{i^2}{l^2} \{m_n^2 F^2(m_n) + 6m_n F(m_n)\} - \frac{4\pi\rho s i^2 f_n^4}{G} \right] \quad (3. 1. 32)$$

$$X = \frac{E}{T} \frac{i^2}{l^2} [m_n^2 F^2(m_n) - 2m_n F(m_n)] \quad (3. 1. 33)$$

$$\alpha = S \frac{E}{G} \quad (3. 1. 34)$$

$$\beta = E \quad (3. 1. 35)$$

식. (3. 1. 32) ~ (3. 1. 35)로부터,

$$Y = \beta - \alpha X \quad (3. 1. 36)$$

위의 선형회귀식의  $X$ ,  $Y$  로부터  $E$ 와  $G$ 를 얻을 수 있다.

본 실험에서는 위의 과정으로부터 계산되어진 탄성계수( $E$ )와 전단탄성계수( $G$ )를 사용하였다.

#### 4. 국악기용 주요국산재 판재의 음향특성 분석

##### 가. 서론

본 연구는 국산주요수종인 소나무, 잣나무, 밤나무, 오동나무 4수종에 대해 판재시편의 위치와 함수율에 따른 음향특성을 보기 위해 실시한 것이다.

본실험에서는 국산재의 이용가치를 높이기 위한 방안으로 국악기인 가야금과 장고에 사용되고 있는 소나무, 잣나무, 밤나무, 오동나무의 국산 4수종에 대한 원목에서 켜내는 위치와 함수율 변화(25℃ 71%에서 35℃ 61%)에 따른 음향특성의 변화를 알아냄으로 악기 제작시 목재를 켜내는 부분을 달리하고 악기의 사용 및 보관 시 함수율 변화에 따른 주파수와 댐핑의 변화를 예측함으로써 더 좋은 악기를 제작할 수 있도록 하기위한 지식을 얻는 것이 이 실험의 목적이라 할 수 있다.

##### 나. 재료 및 실험방법

###### 1) 시편제작

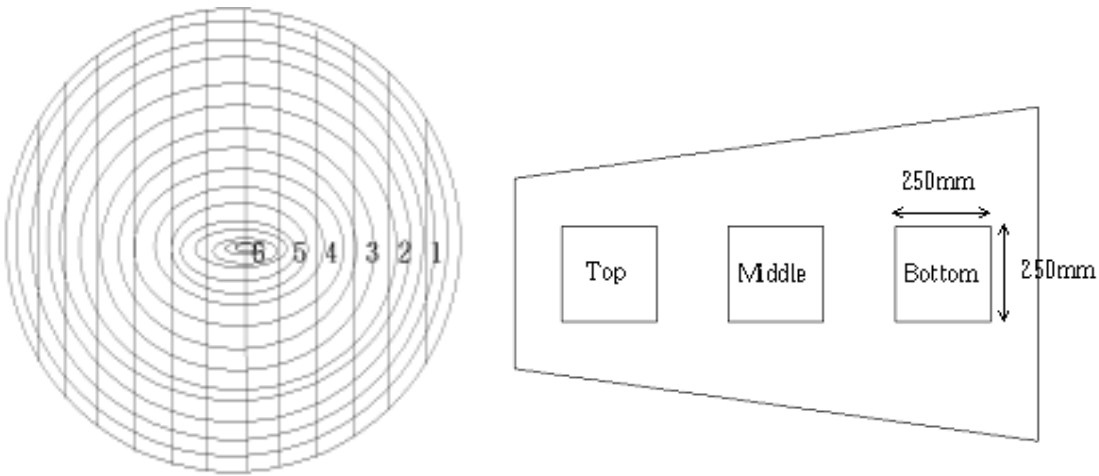


Figure 3. 1. 13. 각 시편채취 위치

Table 3. 1. 5. 수종별 위치에 따른 시편 채취량.

	위치별 시편 채취량			총계	비 고 수피 ~ 수방향
	Top	middle	bottom		
소나무	9	9	9	27	9
잣나무	3	4	5	12	5
밤나무	8	9	7	24	9
오동나무	5	5	5	15	5

본 실험은 수피에서 수 방향으로 이행, 수고별, 함수율에 따른 음향특성의 변화를 보기 위해 실시되었다. 이러한 특성을 보기위해 시편 채취 시 Figure 3. 1. 13과 같이 각 수종별로 수 피에서 수 방향으로, 수고별 Top, middle, bottom 으로 구분하여 부위별로 시편을 채취하였다.

2) 실험 방법

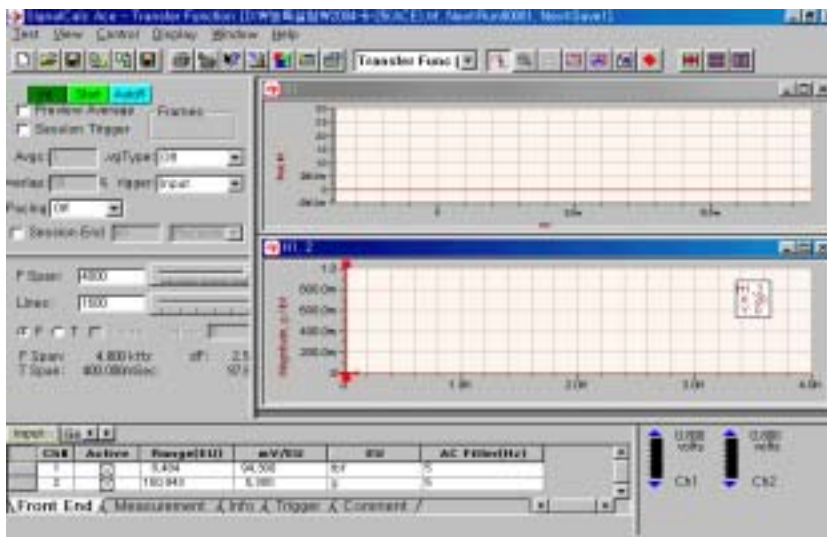
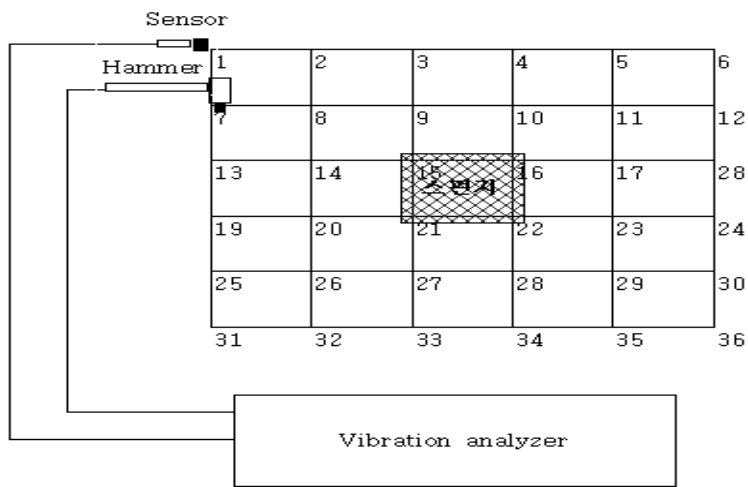


Figure 3. 1. 14. 시편의 진동분석 모식도 및 분석 장치

Figure 3. 1. 14는 실험 시편의 공진주파수를 측정하기 위해 Data Physics 회사의 FFT 분석기인 ACE, 모달 테스트장비인 STAR 시스템, Dytran사의 5.3mV/g의 감도를 갖는 가속도계, 94.3mV/g의 감도를 갖는 충격햄머를 사용하여 시험 시편에 50mm 간격으로 총 36Point 가진 점을 설정하고 Free-Free 상태를 유지하기위해 시편 중앙부분에 스펀지를 놓았으며 충격 햄머를 7번 Point에 고정하여 타격하고 가속도계는 1번부터 36번까지 이동하면서 측정하였다.

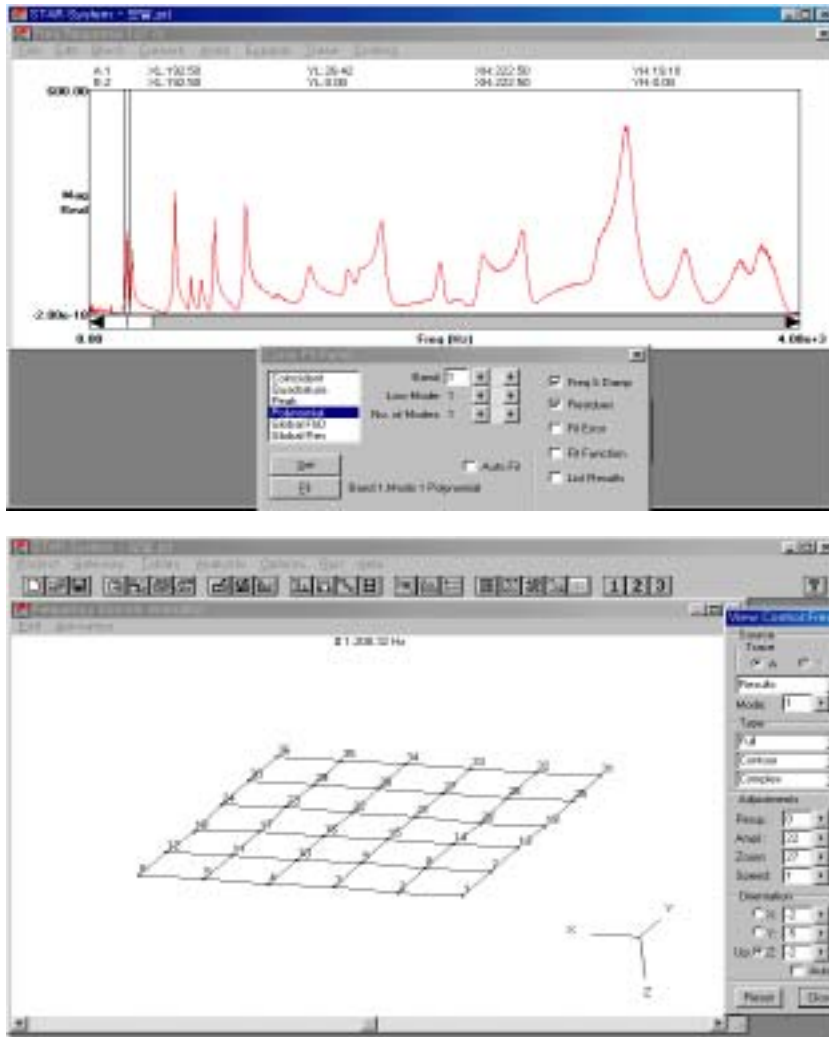


Figure 3. 1. 15. 주파수 분석을 통한 시뮬레이션

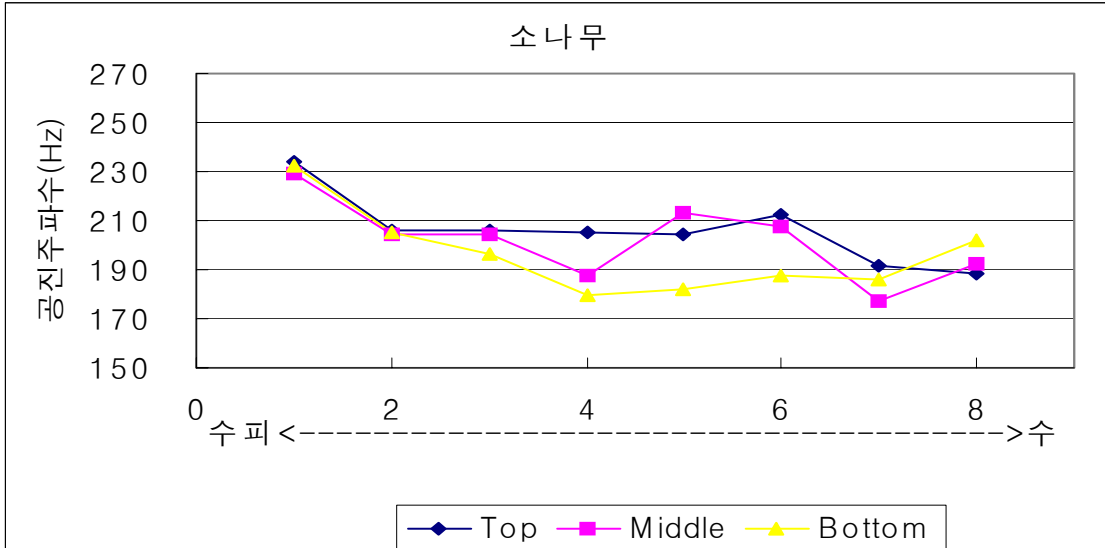
Figure 3. 1. 15는 시편에 대한 각 모드별 주파수를 지정하여 진동 애니메이션을 하기 위한 자료이다.



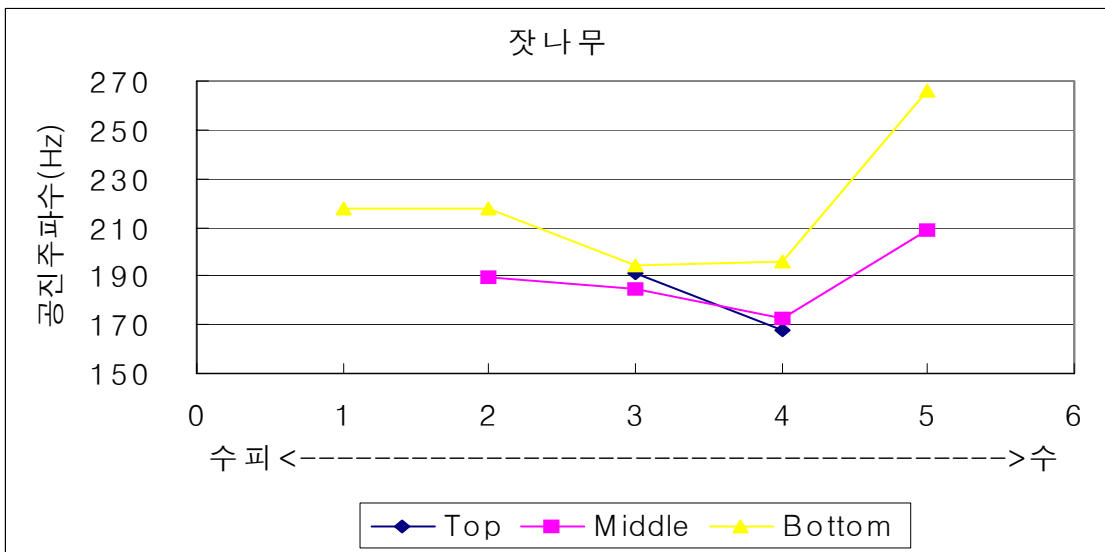
다. 결과 및 고찰

1) 수종별 공진주파수와 댐핑

가) 각 수종별 위치에 따른 공진주파수

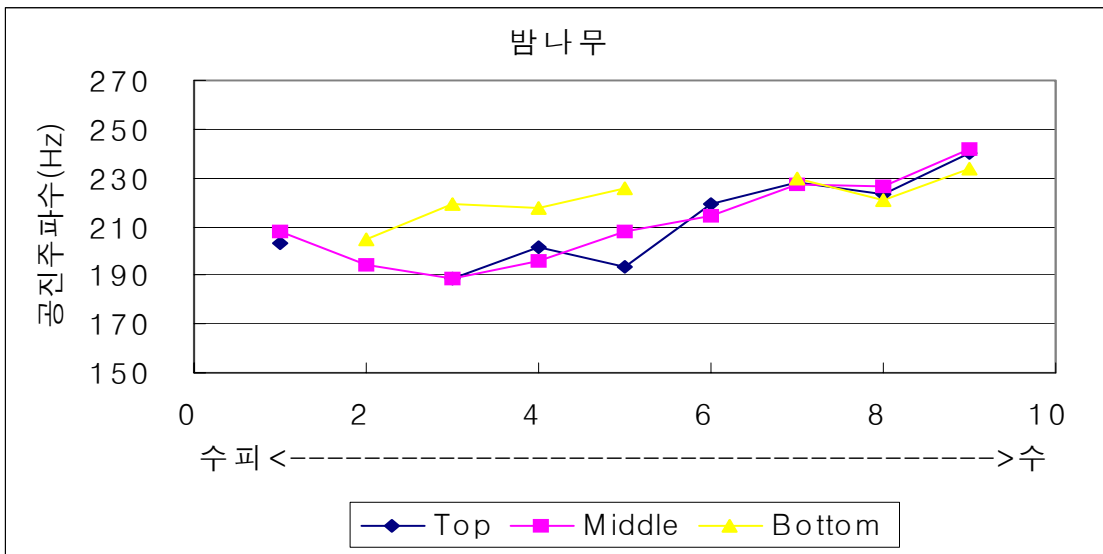


(a)

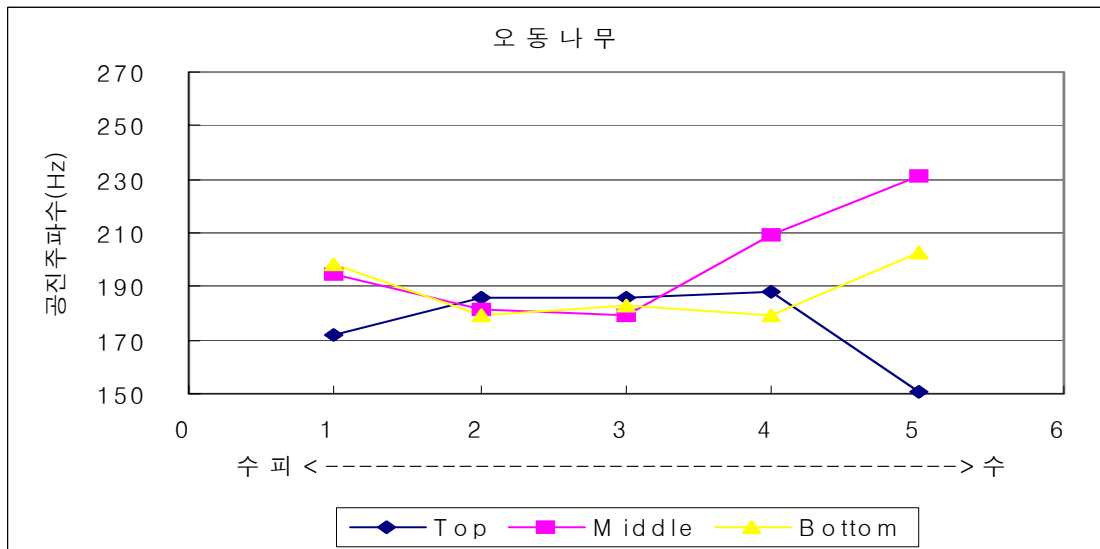


(b)

Figure 3. 1. 16. 각 수종별 시편채취위치에 따른 공진주파수



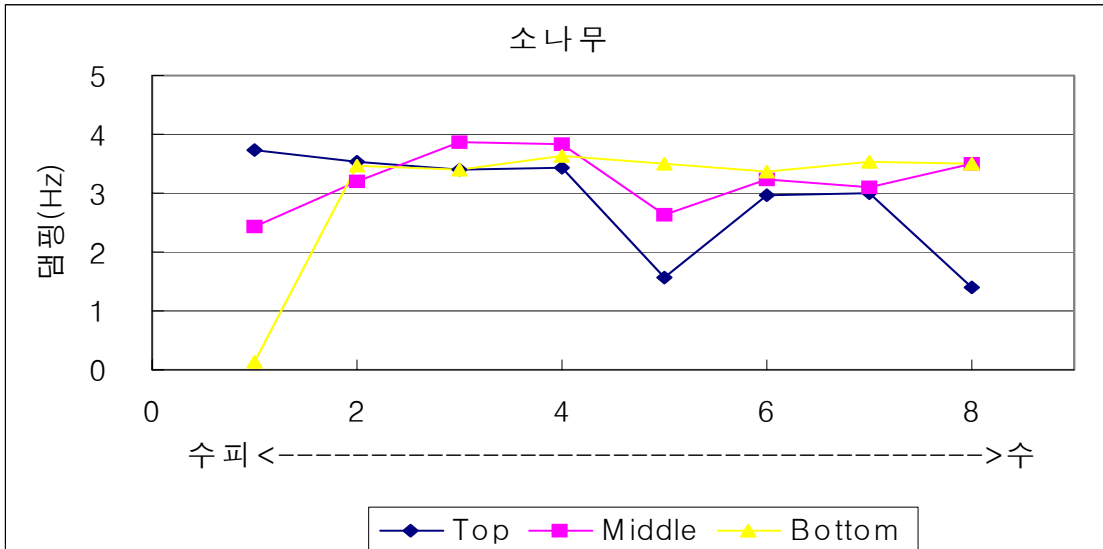
(c)



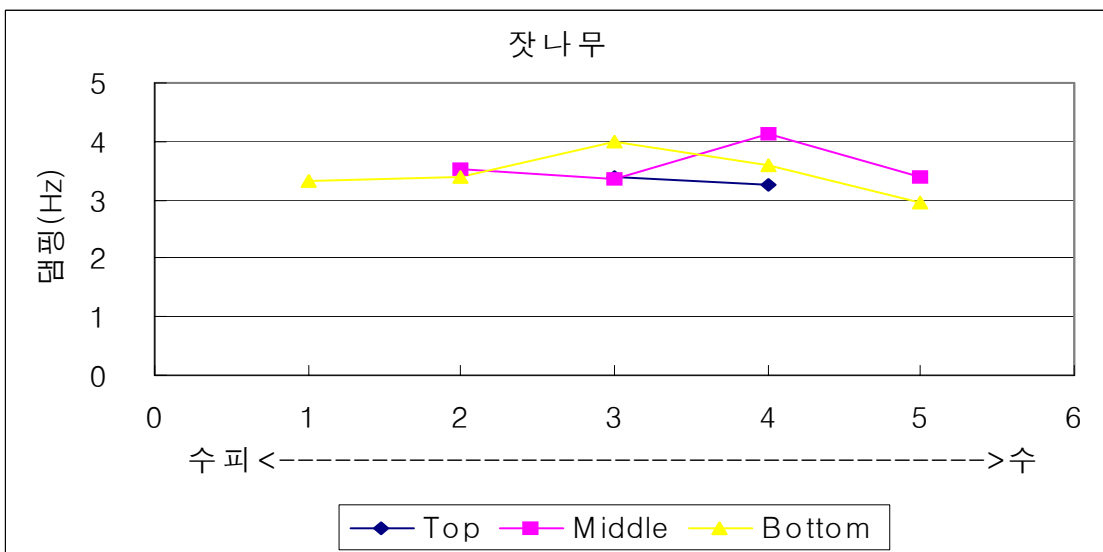
(d)

Figure 3. 1. 16. 각 수종별 시편채취위치에 따른 공진주파수

나) 수종별 댐핑

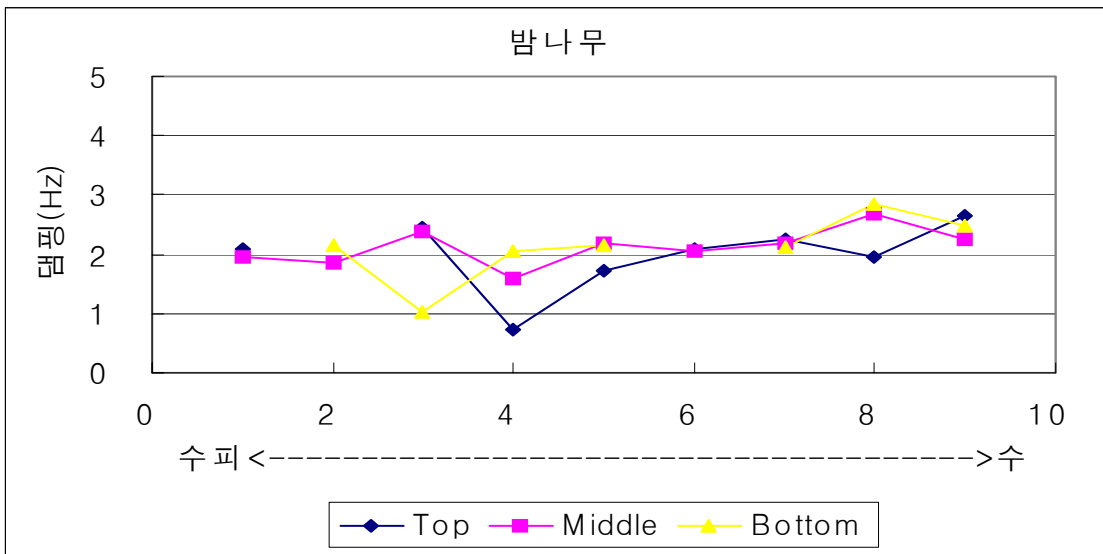


(a)

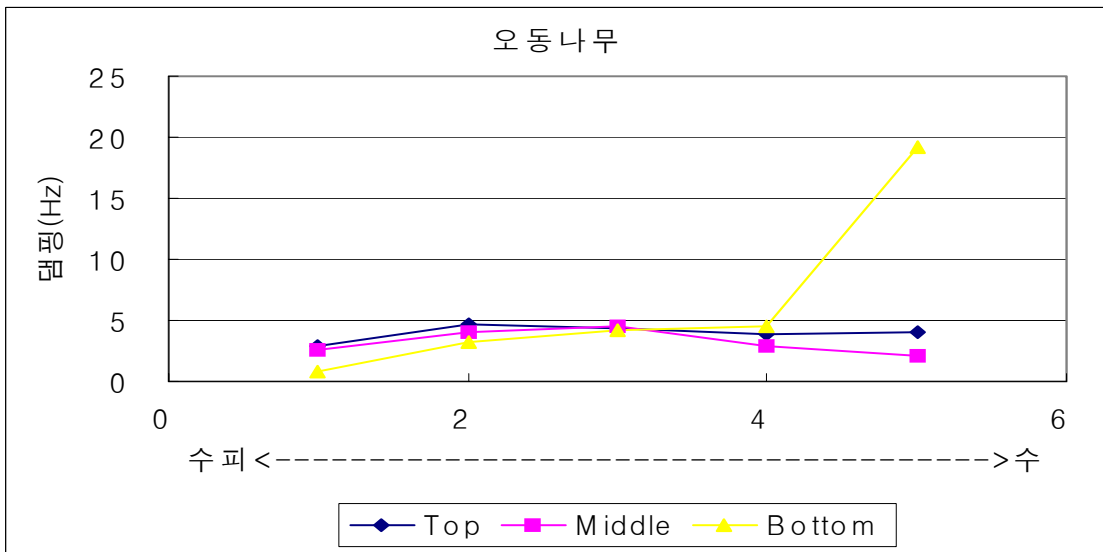


(b)

Figure 3. 1. 17. 각 수종별 시편채취위치에 따른 댐핑



(c)



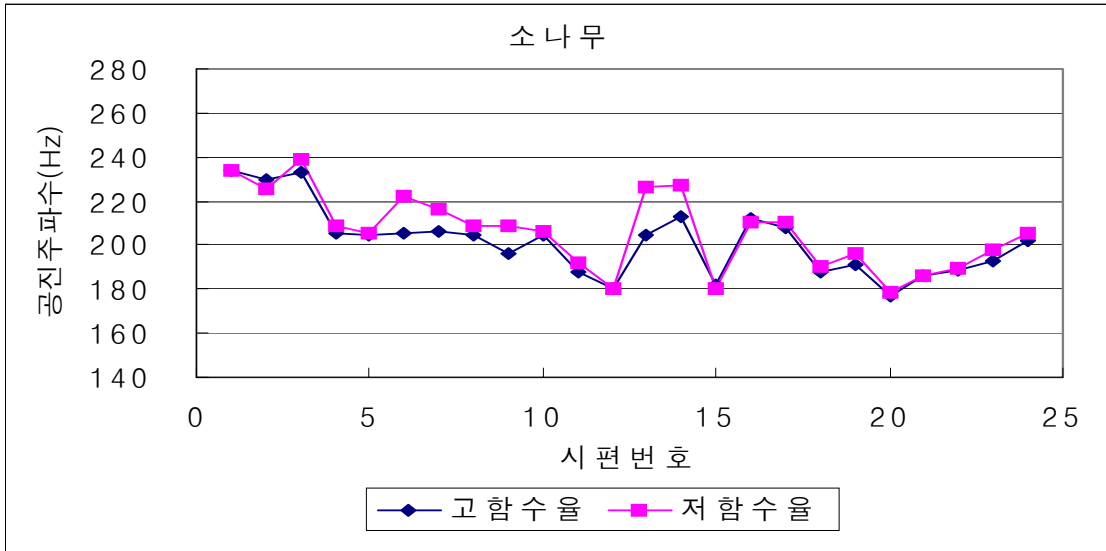
(d)

Figure 3. 1. 17. 각 수종별 시편채취위치에 따른 댐핑

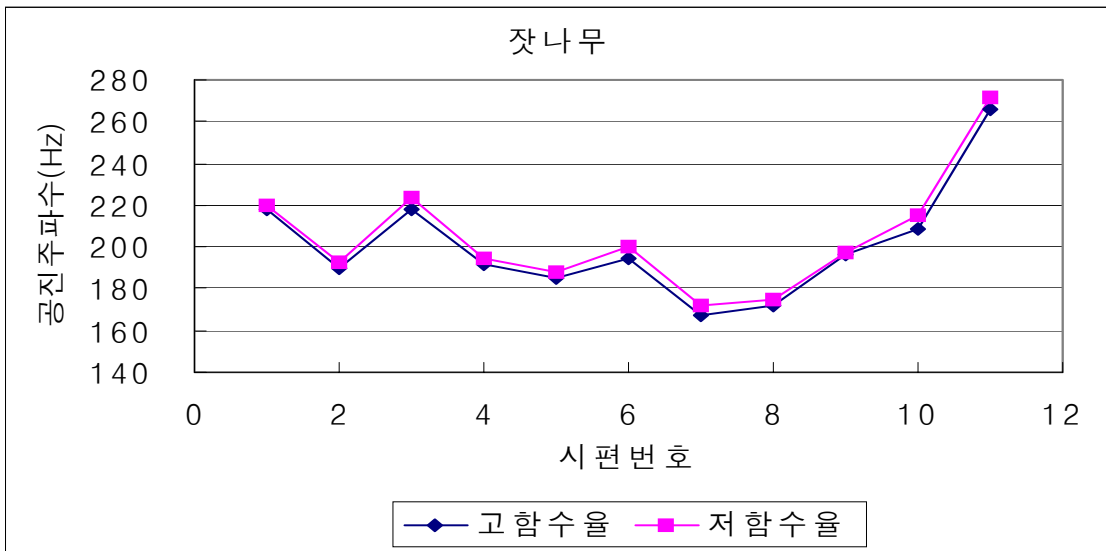
시편채취위치에 따른 주파수와 댐핑의 변화를 보면 소나무에서의 주파수 변화를 보면 수피에서 수로 이행 시 점점 낮아지는 반면 밤나무의 경우 점점 높아지는 경향을 보이고 있다. 하지만 잣나무와 밤나무의 경우 뚜렷한 경향을 찾아볼 수 없었다. 댐핑의 경우도 뚜렷한 경향이 나타나지 않고 있다. 이러한 이유는 시편제작 시 통직한 원목이 아니라 흰 부분들이 많이 있어 이러한 변이가 수고, 수피에서 수로의 이행 변이보다 커 정확한 데이터를 얻지 못했다고 생각이 든다.

2) 함수율 변화에 따른 공진주파수와 댐핑 변화

가) 공진주파수 변화

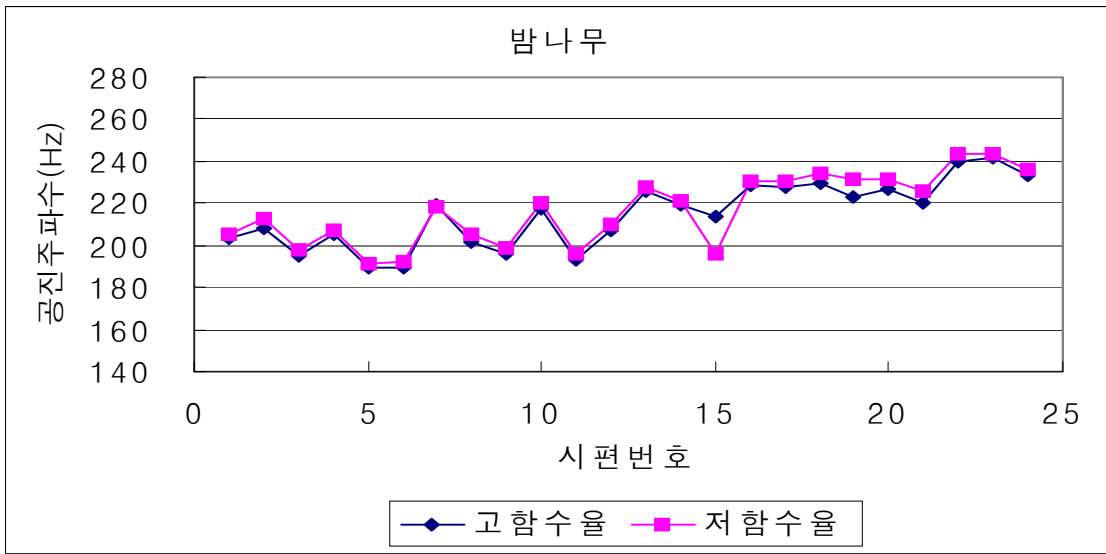


(a)

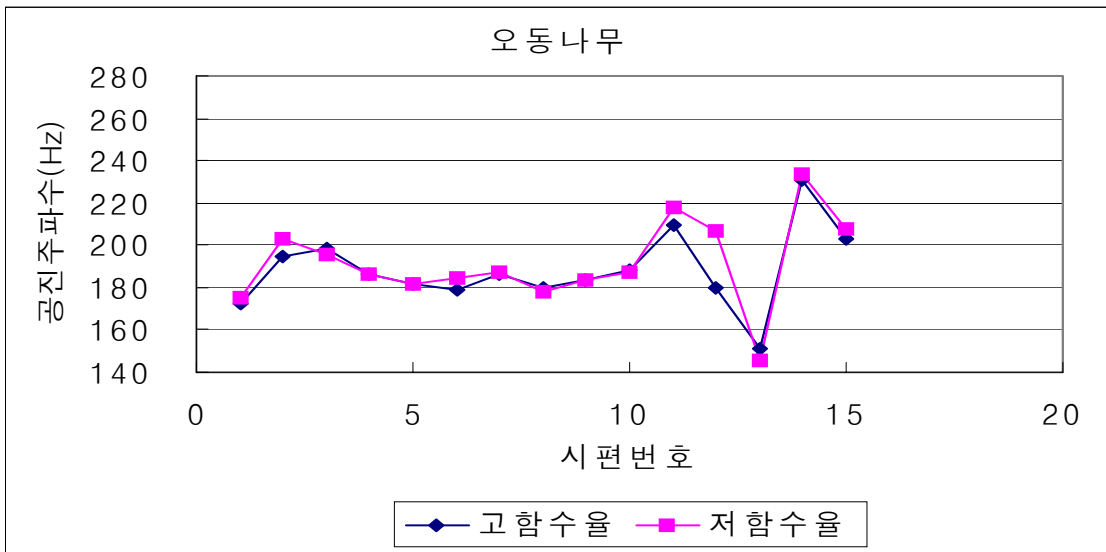


(b)

Figure 3. 1. 18. 함수율 변화에 따른 공진주파수



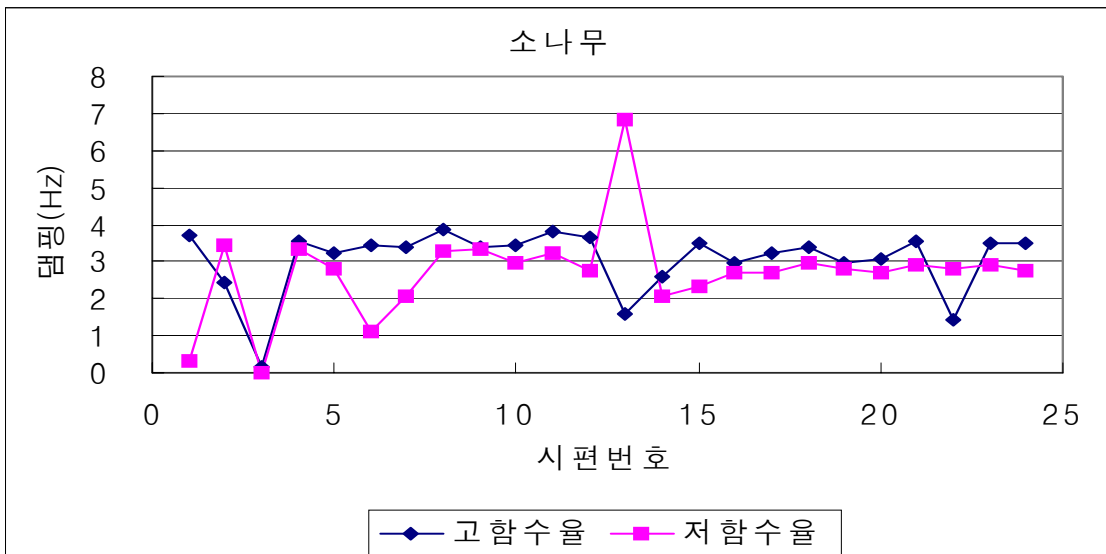
(c)



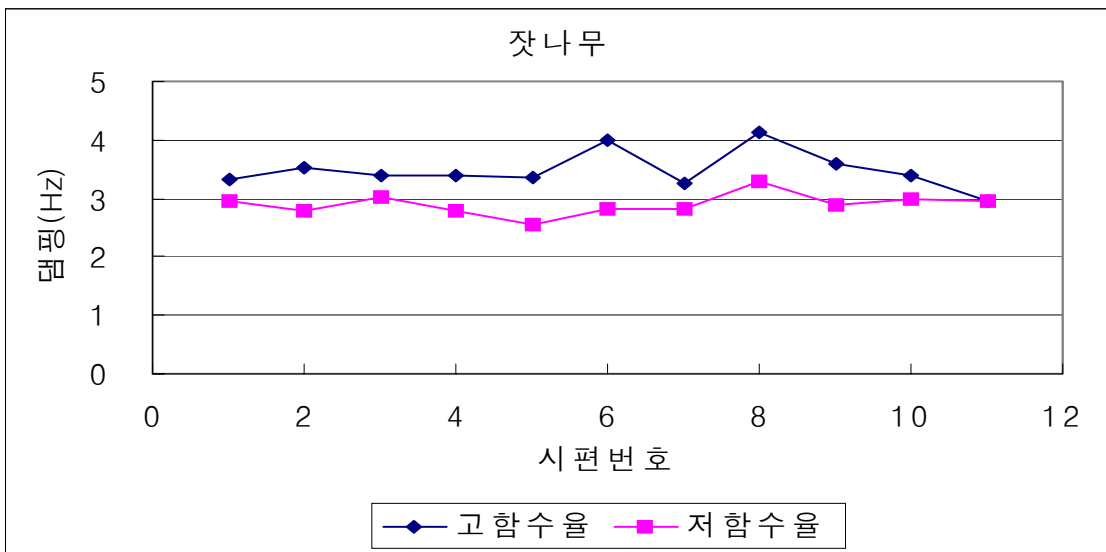
(d)

Figure 3. 1. 18. 함수율 변화에 따른 공진주파수

나) 댐핑 변화



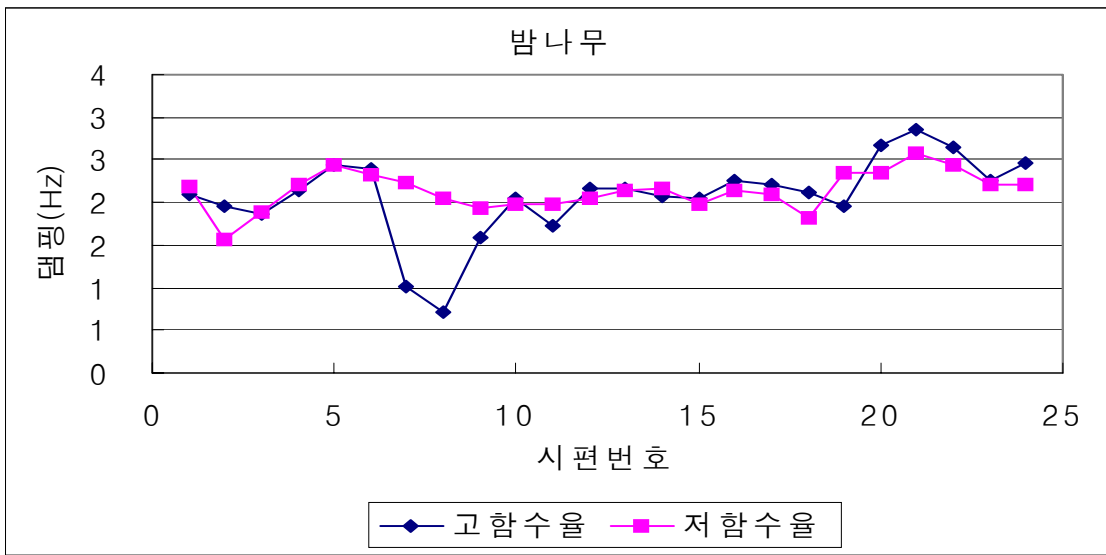
(a)



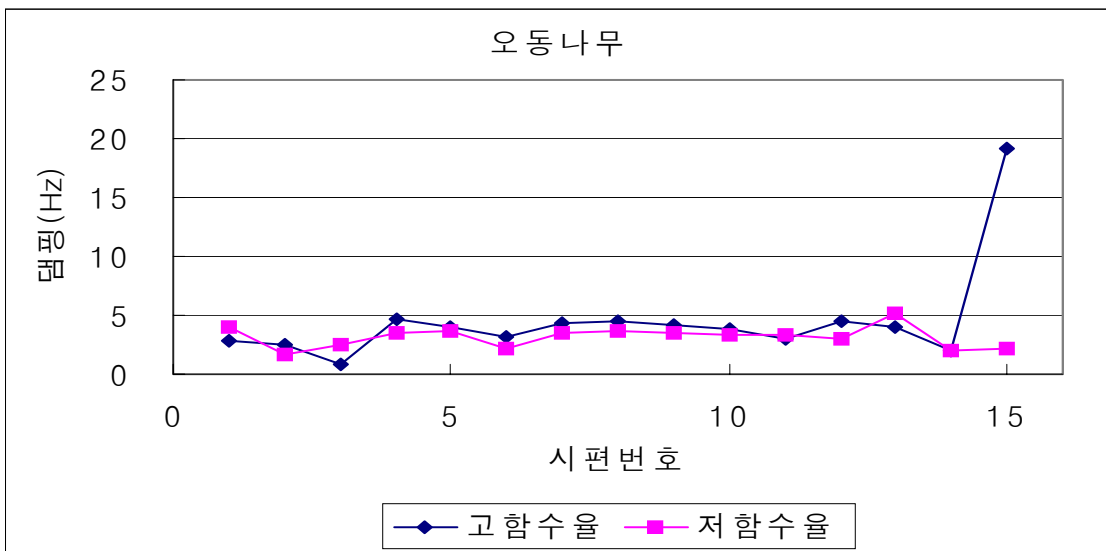
(b)

Figure 3. 1. 19. 함수율 변화에 따른 댐핑





(c)



(d)

Figure 3. 1. 19. 함수율 변화에 따른 댐핑

위 그래프들은 국산 4수종에 대해 25℃, 71%에서와 35℃, 61%에서의 음향특성을 비교한 결과이다. Figure 3. 1. 18의 공진주파수의 변화를 보면 25℃, 71%에서 보다 35℃, 61%에서 더 높은 공진주파수를 나타내었고 댐핑의 경우는 25℃, 71%에서 보다 35℃, 61%에서 더 낮아진 것을 알 수 있다. 이것은 함수율이 낮아지면서 밀도가 높아짐에 따라 공진주파수가 높아지고 댐핑 값은 낮아지는 것이라 생각된다.

## 라. 결론

본 실험은 국산 4수종에 대한 시편채취위치와 함수율 변화에 따른 음향특성을 분석한 것이다. 위치에 따른 공진주파수와 댐핑의 경우 정확한 데이터를 얻지 못하였지만 함수율 변화에 따른 공진주파수와 댐핑의 경우 고함수율에서 저함수율로 이행 시 공진주파수는 높아졌으며 댐핑의 경우에는 낮아지는 결과를 얻었다. 이러한 결론을 통해 함수율의 적정한계까지 떨어뜨림으로써 우리가 원하는 약기용재를 얻을 수 있을 거라 생각이 든다. 그리고 추후 함수율을 여러단계 변화시켜 공진주파수와 댐핑을 구하는 실험이 실시되어야 할 것이다.

## 5. 국산 주요 수종을 이용한 가야금 시작용 제작

### 가. 기술 개발의 배경 및 범위

#### 1) 기술개발 배경

전통적으로 오동나무 원목을 곡면제제한 후, 음지에서 약 4년간 건조하여 제작되던 산조(12현) 가야금의 제조방법에 대한 재료과학적 및 약기공학적인 접근을 통해 산조 가야금의 품질 및 생산성 향상을 도모한다.

기존 가야금의 문제점으로는 소재의 품질 저하로 약기 음질이 불균일하며 가격에 비해 짧은 약기 수명을 가지고 있다. 또한 연주 시 절대 음량의 부족하며 울림통 소재의 제약으로 약기 품질 개량과 음역의 제한으로 인한 대중성 확보에 한계를 가지고 있다.

#### 2) 기술개발 범위

가) 울림판용 소재의 인공건조 기술 도입

나) 울림판용 소재의 다양화를 위한 대체수종개발 가능성 모색

- 다) 인공건조한 오동나무 및 소나무, 잣나무 정목 집성판 제조 및 시작품 제작
- 라) 가야금의 음역 확대를 위한 개량 15현 가야금 제조기술을 개발

### 3) 기대 효과

고품질 국악기(현악기) 제조기술 개발을 통해 국산재 활용의 고부가가치화 및 국내 국악기 제조업의 기술향상에 기여하고자 한다.

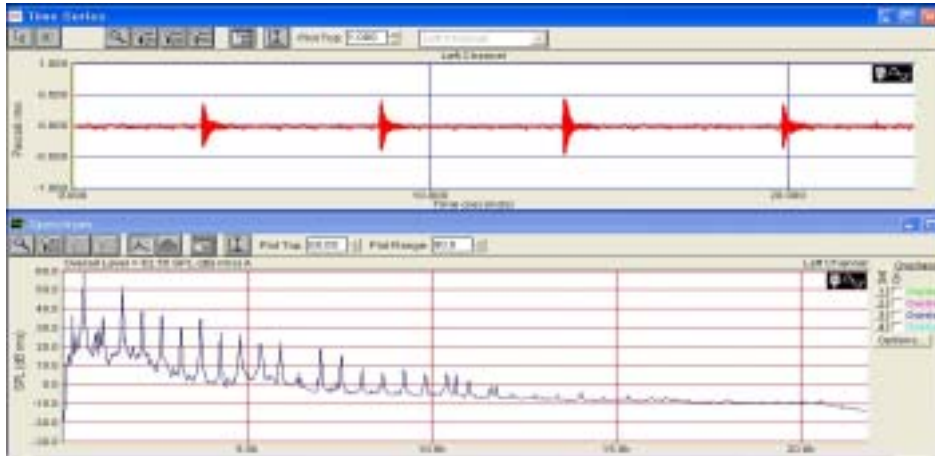
## 가. 기술 개발의 주요내용

### 1) 시험 재료 및 방법

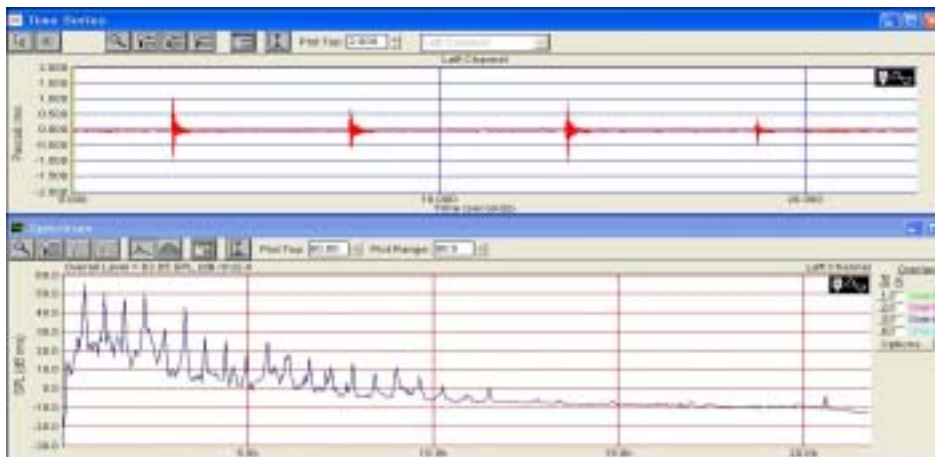
- 가) 천연건조 및 인공건조된 울림판의 음질 비교(by Spectra Plus)
- 나) 울림판용 악기재의 다양화를 위한 대체수종 분석
- 다) 오동나무, 소나무, 잣나무의 물성 및 진동특성 분석
- 라) 오동나무, 소나무, 잣나무 판재를 이용한 정목 집성판 제조
- 마) 대체수종을 이용한 가야금 시작품 제작
- 바) 음역확대를 위한 15현 가야금의 제조기술개발

### 2) 주요 기술개발 내용

- 가) 천연건조와 인공건조 가야금의 음질 분석

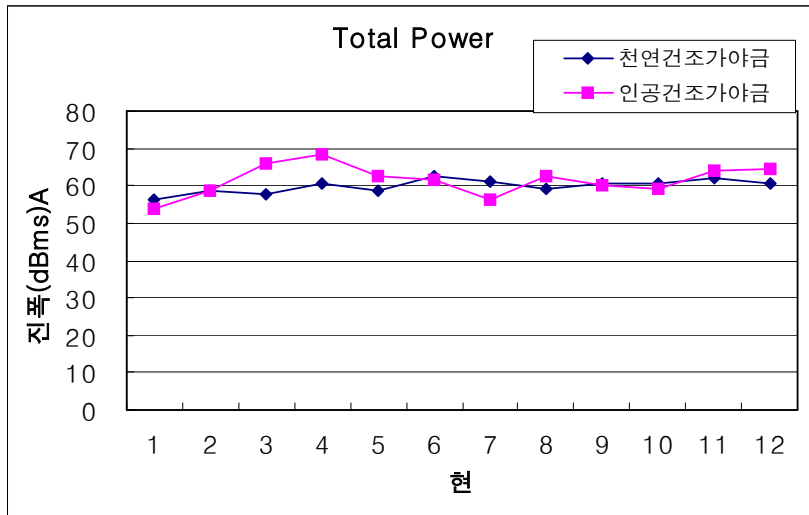


a) 천연건조 가야금

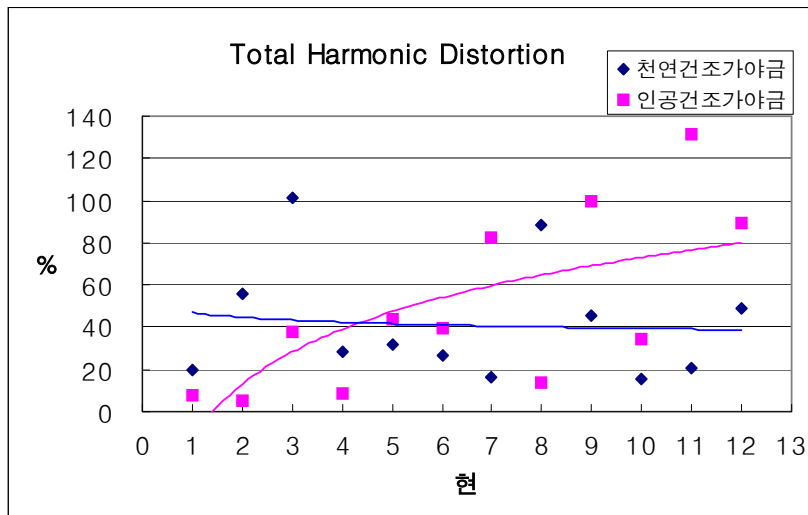


b) 인공건조 가야금

Figure 3. 1. 20. 천연건조 가야금과 인공건조 가야금의 음질분석



(a)



(b)

Figure 3. 1. 21. 주파수 분석을 통한 천연·인공건조 가야금의 비교

인공건조를 통하여 건조시간의 단축과 저음현에서의 큰 음량, 그리고 고음현에서의 풍부한 소리를 구현할 수 있었다.

나) 대체소재 개발을 위한 주요 국산재의 물성 및 진동특성 비교

각 수종별 밀도와 공진주파수를 보면 소나무의 경우 밀도와 공진주파수가 높은 반면 오동나무의 경우 밀도와 공진주파수, 음감쇠율(Damping)이 낮게 나왔다. 그리하여 같은 두께로 악기를 제작시에 소나무나 잣나무의 경우 매우 무거울 뿐만 아니라 소리에 있어서도 오동나무로 만든 가야금과 많은 차이가 발생할 것이라 예상하여 소나무와 잣나무의 경우 오동나무로 만든 가야금보다 두께가 얇은 판으로 제조하여 공진주파수를 떨어뜨렸다.

Table 3. 1. 6. 수종별 밀도와 공진주파수

수종	밀도(g/cm <sup>3</sup> )	Beam시편의 공진주파수(Hz)	Damping(mode4)
소나무	0.566	430.26	18.89
잣나무	0.549	349.31	17.78
오동나무	0.285	242.94	13.18

다) 인공건조 정목 집성판을 이용한 가야금 제작 과정



1. 건조제재목 보관



2. 집성용 정목 선별



3. 정목판재집성



4. 뒷판제작(밤나무)



5. 동체조립 및 압체



6. 세부형상제작



7. 장식 및 마무리



8. 앞판도장



9. 뒷판도장



완성(소나무)



완성(잣나무)



완성(오동나무)

Figure 3. 1. 22. 인공건조 정목 집성판을 이용한 가야금 제작 과정 및 완성품



## 제2절 주요 국산재의 음향기능성 건조기술 개발

### 1. 서 설

장고, 북, 대금 등은 우리나라 고유의 민속음악에서는 빼 놓을 수 없는 주요한 전통 악기류들이다. 장고와 북은 단면이 매우 큰 목재를 筒모양으로 초갈이(Green stocks)한 후 건조가공하여 얻고, 대금 또한 筒竹을 건조가공하여 얻는 특징을 지니고 있다.

이들 筒樂器용재의 경우 기본적으로 단면이 매우 커야하고, 동시에 음향성이 탁월한 형질과 물성을 지녀야하기 때문에 有用資源을 획득하는 것 자체가 어려워 원료구입비의 부담이 크다. 더구나 筒모양의 초갈이재는 건조중 재면할렬(Surface check) 또는 재면할렬이 마구리면에까지 연결하여 V형으로 터지는 외주할(V-shaped crack)이 매우 민감하게 발생한다. 특히 육안으로 관찰되지 않는 미세할렬이라 할지라도 音質에는 결정적인 영향을 미칠 뿐 아니라 장고나 북 등에서는 지속적으로 가해지는 외부 충격에 의해 미세할렬이 더욱 확장될 수 있기 때문에 筒악기용재는 더더욱 정교하고 세심한 건조기법에 의해서 생산되어야하지만 아직 이에 관한 과학적인 접근은 거의 전무한 실정이다.

장고나 대금과 같이 筒모양 초갈이재의 경우 적절한 처리에 의해서 筒의 내피층과 외피층간에 상당한 크기의 증기압 차를 건조종료시까지 유지하는 것이 가능할 것으로 판단하고, 이는 건조속도의 증진은 물론 재면할렬과 외주할 예방에도 매우 효과적일 것이라는 가설을 설립하였다.

筒狀으로 초갈이한 목재(장고나 북의 경우) 또는 筒竹(대금의 경우)의 양쪽 마구리면을 비닐이나 기타 적절한 방법으로 차폐처리한 후 건조할 경우, 筒皮의 內皮面에서 증발된 모든 수증기를 통 내부공간에 미리 備蓄해둠으로서 수분증발이 매우 미미한 건조말기까지도 상당한 크기의 수증기압 경사를 유지하는 것이 가능할 것이다. 큰 증기압 경사에 의해 내피층의 수분이 매우 빠른 속도로 외피층으로 밀려나기 때문에 외피층에 인장응력이 형성되는 것을 예방할 수 있고, 동시에 내피층에서 인장응력이 발생할 찰나에는 미리 비축해 둔 수증기가 민활하게 공급되므로써 내피층에서의 할렬발생 또한 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 예상된다.

본 과제에서는 수증기댐(Water vapor dam) 처리한 筒樂器用材의 건조중 筒皮層내 수증기압 분포를 관측하여 수증기압의 생성메카니즘을 밝히고, 그것이 수분유동 및 수분분포에 미치

는 영향을 구명하는 것을 1차적 목표로 설정하였다. 또한 이의 결과에 근거하여 실대재 크기의 통약기용재를 대상으로 건조결함 예방과 건조속도 증진을 꾀할 수 있는 구체적 건조기법을 개발하여 제시코저 하였다.

또한 가야금융재의 앞판 부재와 뒤판 부재에 대하여 고주파진공건조 및 천연건조를 실시하여 각각의 건조특성을 규명하여 제시하고, 아울러 각 건조부재별 음향적 특성을 비교조사할 자료를 얻고자 하였다.

또한 건조중 발생하는 미세할렬과 찌그러짐(collapse) 및 열열화가 목재의 음향성 저하와 밀접한 관련이 있는 것으로 조사된 바, 이와 같은 건조손상을 최소화할 수 있는 음향기능성 인공 건조법 개발에 초점을 맞추고자 한다. 이것은 기존 악기용 목재자원의 건조수율 증진과 품질향상은 물론 새로운 대체자원 개발에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 장고용 부재의 송풍오-븐 건조시험

### 가. 재료 및 방법

#### 1) 공시재종

장고용 부재로는 현재 널리 쓰이고 있는 오동나무를 선정하여 총길이 460 cm, 양 마구리면의 통피층 두께와 외경을 각각 32mm와 245mm되게 초갈이(Green stock) 한 후, 무처리(C-NC), 수증기뎀처리(V-NC), 엔드코팅처리(C-CO) 및 엔드코팅-수증기뎀처리(V-CO)로 구분하여 각각 1본씩을 준비하였으며, 각 처리재의 실제 형상은 Table 3. 2. 1, Figure 3. 2. 1. 같다.

Table 3. 2. 1. 송풍오-분건조시험용 장고 초갈이재의 生材상태 형상.

처리	초갈이 실제 형상												
	통피층 두께 <sup>1</sup> (mm)	부위별 길이 <sup>2</sup> (cm)						부위별 외경 <sup>2</sup> (mm)					
		A	B	C	D	E	총길이	a	b	c	d	e	f
C-NC	32	27	80	58	54	10	458	245.72	256.18	253	178.12	108.69	192.06
V-NC	32	22	82	61	56	9	460	245	254.95	255.2	182.9	107.1	193.65
C-CO	31	30	83	47	64	10	468	249.68	256.4	253.4	185.19	106.82	193.48
V-CO	31	30	78	54	60	10	464	244.9	250.65	248.93	181.69	109.5	193.62

주)<sup>1</sup>: Figure 3. 2. 1.의 a 부위의 두께임

<sup>2</sup>: 각 부위는 Figure 3. 2. 1.에 나타내었음

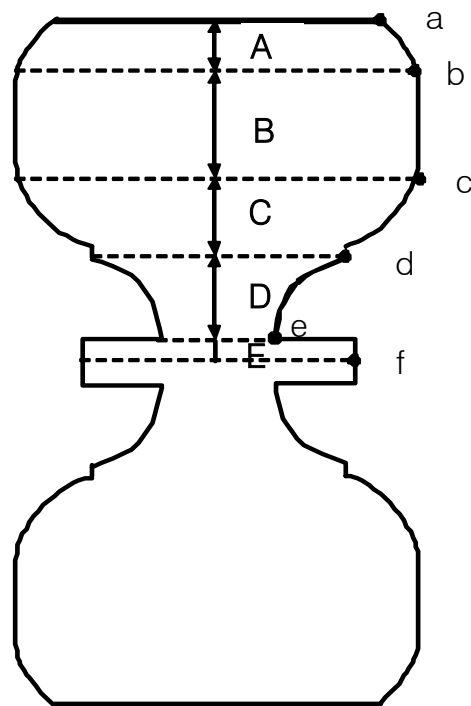


Figure 3. 2. 1. 송풍오-분건조시험용 장고 초갈이재의 외형

## 2) 전처리

### 가) 초갈이재의 수증기담 처리

초갈이재의 양쪽 마구리면 위에 두께 5mm x 외경 270 mm의 환형 실리콘 패드 1매를 올려 놓고, 다시 그 위에 두께 7 mm x 가로 300 mm x 세로 300 mm의 정방형 아크릴판 1매를 올려 놓은 다음 Figure 3. 2. 2와 같은 방법으로 양쪽 아크릴판을 인장스프링을 이용하여 견고하게 결체하므로써 내피면을 통해서 증발된 수분이 외기로 누출되지 않도록 조치하였다.

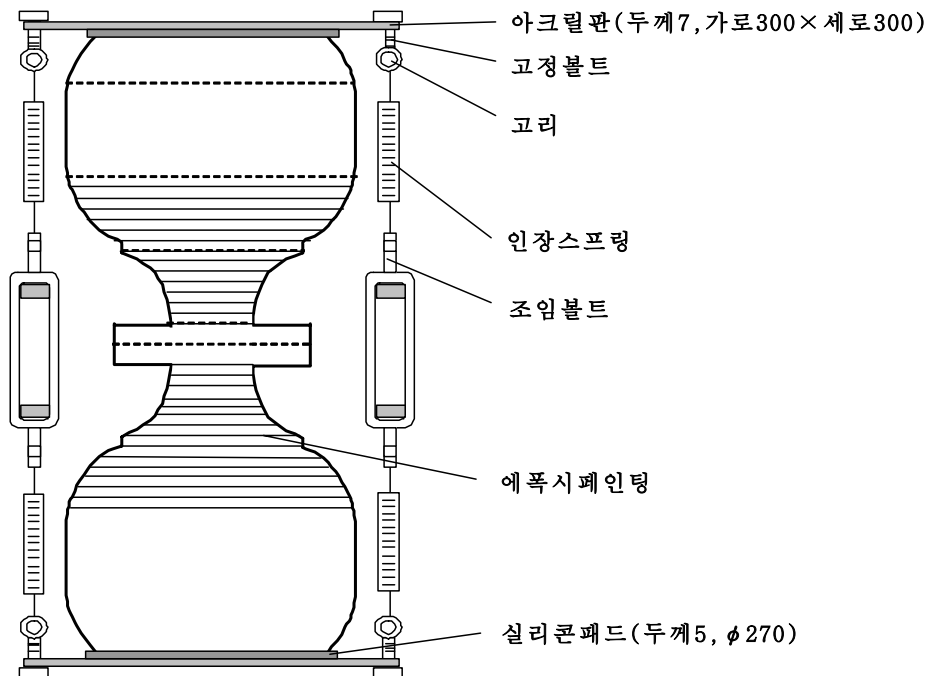


Figure 3. 2. 2. 초갈이재의 V-CO처리 모식도, 단위; mm.



Figure 3. 2. 3. 초갈이재의 C-NC 처리재(왼쪽)와 V-NC 처리재(오른쪽)의 실제 모습

#### 나) 초갈이재의 엔드-코팅처리

예비시험결과 장고용 초갈이재의 경우 채편과 궁편의 양 마구리면 뿐 아니라, 外皮面과 內皮面에도 상당한 영역에 걸쳐 마구리면이 존재하고, 건조중 이 부분을 통해서 수분이 매우 급속하게 증발하므로 인해서 건조초기에 모든 마구리면에 걸쳐 횡단면 할렬이 발생하는 것으로 확인되었다(Figure 3. 2. 4). 이로 말미암아 비록 수증기담처리를 실시한다 할지라도 내피면에서 증발된 수분이 筒空내에 축적되지 못하고 횡단면할렬 부위를 통해서 外氣로 누출되므로써 수증기담처리의 효과가 반감될 것으로 판단되어, 초갈이재의 모든 마구리면을 에폭시 방수페인트로 수회 도포하여 마구리면을 통한 수분증발을 차단하는 이른바 ‘엔드코팅(End-coating; CO) 처리’를 실시하여 非코팅처리재와 비교코저 하였다. Figure 3. 2. 5.



Figure 3. 2. 4. 초갈이 C-CO 처리재의 예비송풍오-분건조시험중 내피면(왼쪽)과 외피면(오른쪽)에 발생한 할렬과 윤활의 모습



Figure 3. 2. 5. 초갈이 엔드코팅처리재의 내피면(왼쪽)과 외피면(오른쪽)의 모습

### 3) 송풍오-븐건조 시험

#### 가) 건조조건

장고용 초갈이재의 송풍오-븐건조시험은 내부크기가 가로 60 x 세로 50 x 높이 50 cm 로서,  $\pm 1^\circ\text{C}$ 까지 조절이 가능하고, 풍속 1.5 m/s를 유지하는 송풍오-븐에서 실시하였으며, 송풍오-븐에는 각 처리시험편 1분씩만을 잔적하여 건조하였다. 건조시험중 건조조건은 송풍오-븐내 공기의 온도를 Table 3. 2. 2와 같은 조건으로 콘트롤하였다. 건조중 건조초기를 제외하고는 매 24시간 마다 송풍오-븐의 작동을 중지하고, 수증기압과 재온 계측시스템으로부터 시험편을 분리한 다음 시험편의 건조중 무게를 평량하였다. 단, 시험편 분리시 筒空이나 材内の 수증기가 外氣로 누출되지 않도록 잠금밸브를 잠근 다음 분리하였다.

Table 3. 2. 2. 장고 초갈이재의 송풍오-븐건조시험 조건.

건조시간(시간)	0 ~ 75	75 ~ 99	99 ~ 171	171 ~ 219
공기온도( $^\circ\text{C}$ )	60	70	75	80

#### 나) 수증기압과 재온 분포 계측

각 처리재의 송풍오-븐건조중 수증기압과 재온 분포를 조사하기 위하여 Figure 3. 2. 6.과 같이 시험편의 한쪽 마구리면으로부터 63 mm 떨어진 동일 외주선상에 압력 및 온도센서를 각각 삽입설치하여 외층(외피면으로 부터 8 mm 떨어진 지점), 내층(내피면으로 부터 5 mm 떨어진 지점) 및 筒空 지점의 수증기압과 재온을 데이터집적장치를 활용하여 매 30분 간격으로 수집하였다.

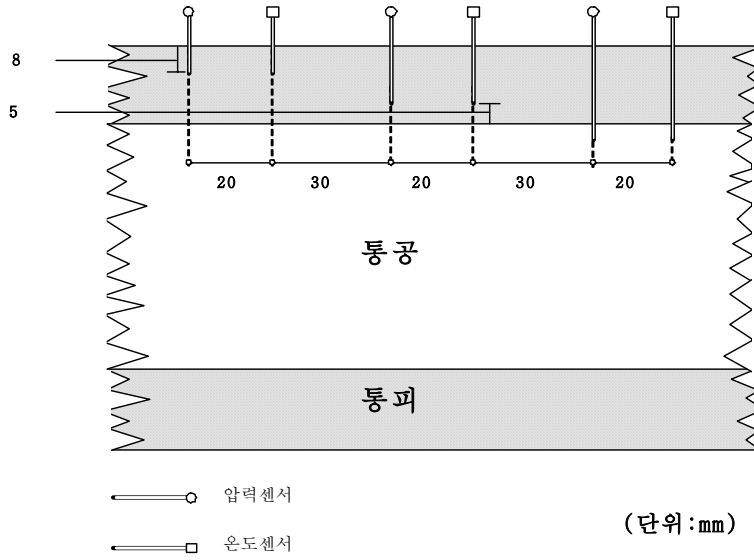


Figure 3. 2. 6. 시험편내에 압력 및 온도센서의 삽입 위치 모식도(왼쪽)와 실제 모습(오른쪽)

수증기압은 통피층에 직경 10 mm의 구멍을 뚫고, 이곳을 에폭시경화제를 충전한 다음, 에폭시경화제가 경화되고 나면, 이곳에 다시 직경 4 mm의 구멍을 뚫어 테프론 튜브를 삽입시키되 잠금밸브와 T조인트를 관통하도록 조치하였다 Figure 3. 2. 6. 테프론튜브를 압력센서앰프에



연결하여 건조중 전압의 변화값을 데이터집적장치로 수집하였으며, 수집된 전압값을 건조전 각 센서에 대해서 미리 조사해 둔 압력과 전압간의 회귀식 식 3. 1에 Table 3. 2. 3의 계수들을 대입하여 수증기압의 값으로 변환하였다.

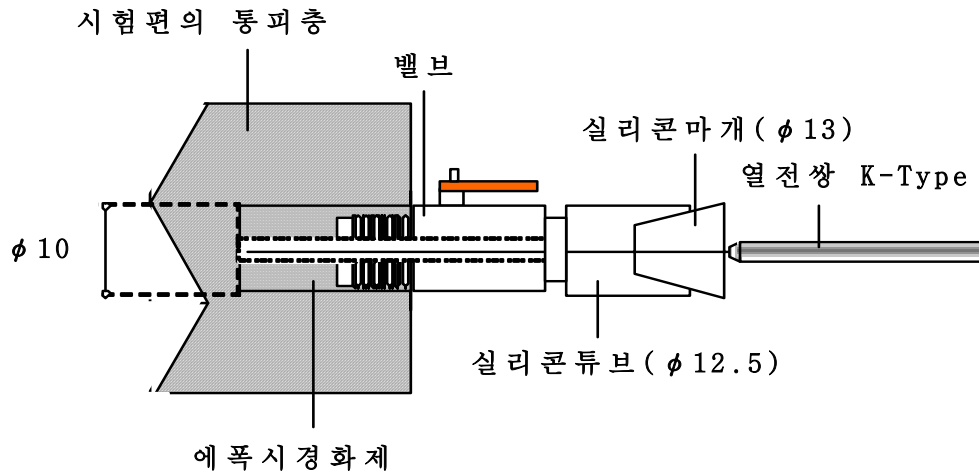
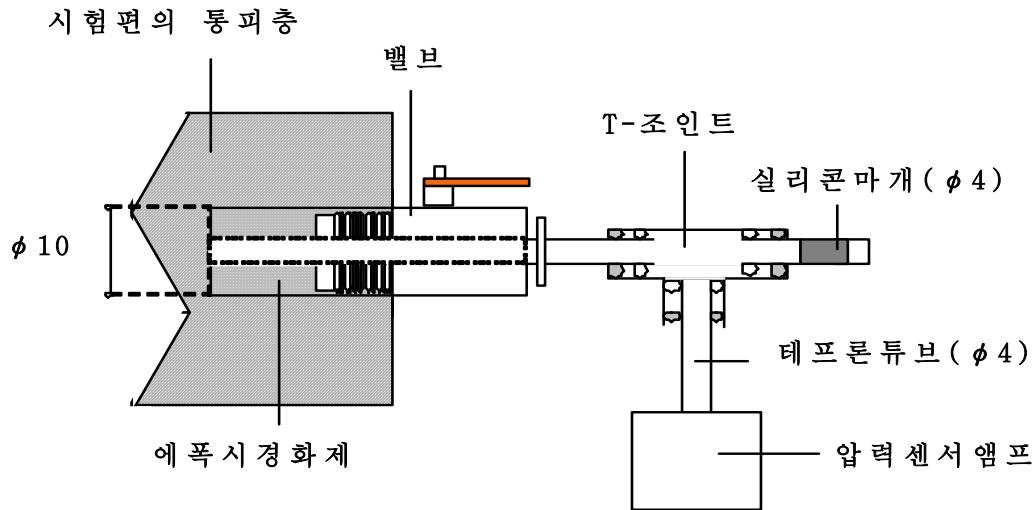


Figure 3. 2. 7. 시험편내 압력센서(위)와 온도센서(아래)의 삽입 단면도

건조중 통피층의 각 해당 지점의 재온은 수증기압 계측의 경우와 동일한 방법으로 구축한 에폭시경화층에 열전쌍 K 타입 온도센서를 삽입하고, 이것을 데이터집적장치에 연결하여 수집하였다.

$$P = aV + b \quad (3. 2. 1)$$

여기서 P; 절대수증기압 (kPa)

V; 전압(mV)

a, b; 상수

Table 3. 2. 3. 각 압력센서의 절대수증기압과 측정전압간의 회귀식의 상수와 상관계수

처리	측정위치	상수		R <sup>2</sup>
		a	b	
C-NC	외층	248.97	-248.72	0.99
	내층	251.90	-247.51	0.98
V-NC	외층	249.94	-246.04	0.99
	내층	250.37	-247.48	0.99
	통공	250.09	-246.10	0.98
C-CO	외층	261.01	-255.70	0.99
	내층	243.67	-238.67	0.98
V-CO	외층	251.23	-246.62	0.98
	내층	253.52	-248.35	0.99
	통공	256.01	-251.07	0.98



Figure 3. 2. 8. 장고 초갈이재의 송풍오-분건조시험중의 수증기압 및 온도분포 계측시스템

다) 수분증발량과 건조속도

건조중 측정된 건조중무게로부터 건조중 중량감소 경과, 누적중량감소량 및 단위시간당 중량감소량 등을 산출하였다. 향후 후속연구를 통해서 각 건조종료재로부터 최종함수율을 조사하여 건조중함수율과 건조속도를 산출할 예정이다.

라) 할렬 및 외주할

건조종료 후 각 시험편의 외피면과 내피면 및 양 마구리면에 발생한 할렬 또는 외주할의 발생정도를 육안으로 조사하였다.

마) 건조수축율

건조 전후에 Figure 3. 2. 1. 부위의 치수를 각각 측정하여 건조중 수축율을 조사하였다.

## 나. 결과 및 고찰

### 1) 건조중 중량감소

장고 초갈이 각 처리재의 송풍오-분건조시험중의 중량감소 경과, 누적중량감소량 및 단위시간당 중량감소량을 각각 Figure 3. 2. 9, Figure 3. 2. 10. 및 Figure 3. 2. 11.에 나타내었다.

건조개시 직후의 중량감소량은 C-NC, C-CO, V-NC, V-CO의 순으로 크게 나타났고, 특히 수증기담처리재의 중량감소량은 무처리재와 비교하여 非코팅처리재에서는 약 50%, 그리고 엔드코팅처리재에서는 약 40% 정도에 불과하였다. 이것은 수증기담처리에 의해서 내피면을 통한 수분증발이 효과적으로 억제되었거나 또는 內皮面을 통해서 증발된 수분이 筒空내에 효과적으로 축적되는 것을 시사하는 것으로 해석된다.

중량감소량 및 단위시간당 중량감소량은 건조시간 약 75시간을 기점으로 수증기담처리재가 무처리재 보다 오히려 약간 더 많은 양상으로 역전되어 건조종료시까지 지속되었다. 이것은 건조초기의 경우 건조속도가 내부수분의 유동속도 보다는 표면에서의 수분증발속도에 의해서 더 큰 지배를 받는 반면, 건조중기 이후에는 주로 확산현상에 의해서 수분이 유동하므로써 건조속도가 내부수분의 유동속도에 의해서 좌우되기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 수증기담처리재의 경우 내피면을 통해서 증발된 수분이 통공내에 축적되면서 내피면을 통한 수분증발을 지연시키므로써 통피층내에 존재하는 자유수가 일시에 고갈되지 않도록 작용한 것으로 추론된다.

건조중 누적중량감소량은 C-NC나 C-CO처리재와 같이 수증기담처리를 실시하지 않은 경우 건조개시 약 75시간 이후 거의 정체상태를 보인 반면에 V-NC나 V-CO처리재는 건조종료시까지 지속적인 증가를 보이고 있다. 이것은 건조실내 송풍오-분의 습도를 조절하지 않는다 할 지라도 수증기담처리에 의해서 건조속도를 조절해 갈 수 있는 자발력이 제공되고 있는 것으로 해석된다.

특히 V-NC처리재의 총누적중량감소량은 C-NC처리보다 약간 더 많게 나타났으나, V-CO처리재는 C-CO처리재의 경우보다 약 300g이나 적게 나타났다. 이것은 엔드코팅을 실시하여 횡단면을 통한 수분증발을 억제할 경우 수증기담처리의 효과가 극대화 될 수 있음을 의미한 것으로 해석된다.

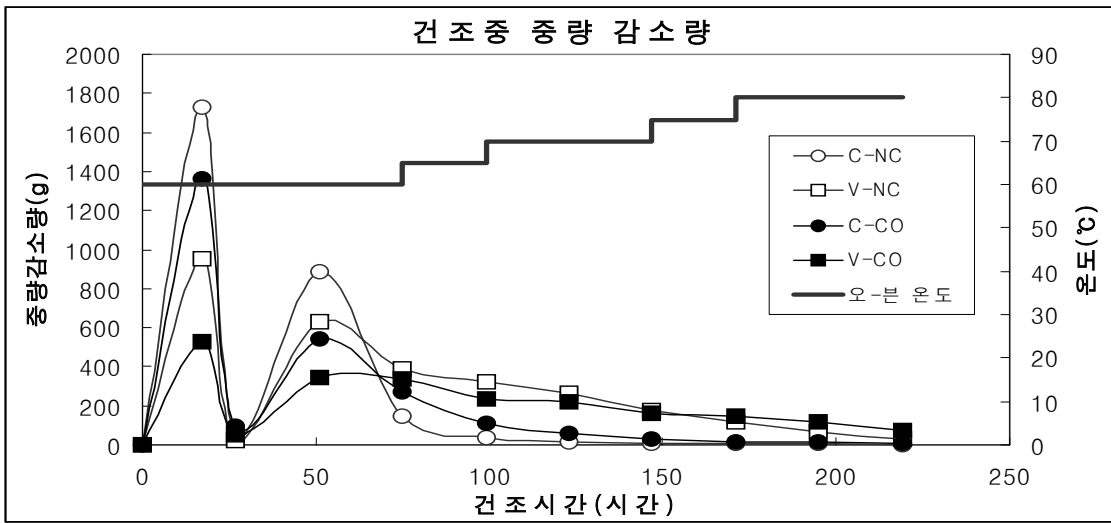


Figure 3. 2. 9. 장고 초갈이재의 송풍오-븐건조중 중량감소량의 경시변화

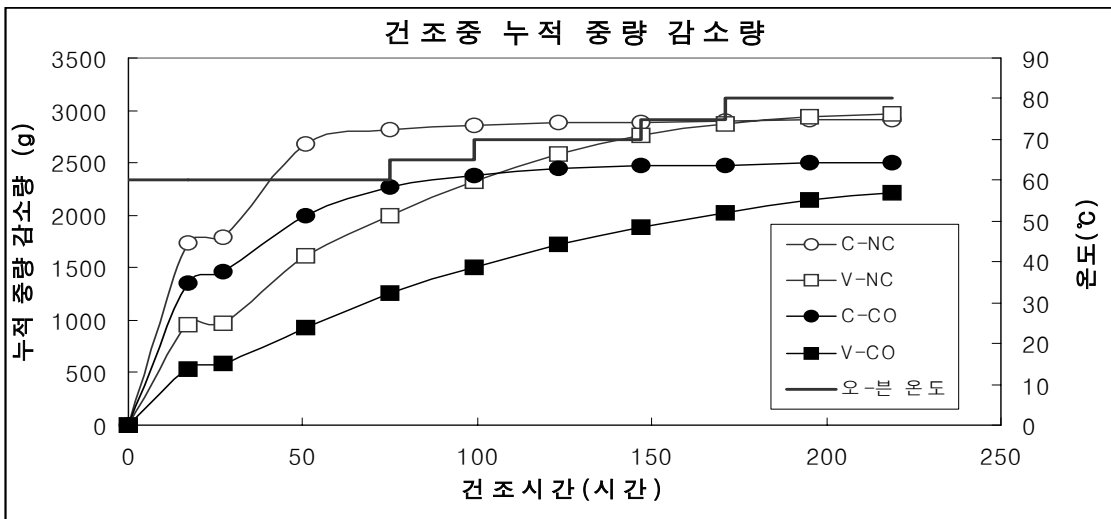


Figure 3. 2. 10. 장고 초갈이재의 송풍오-븐건조중 누적중량감소량의 경시변화

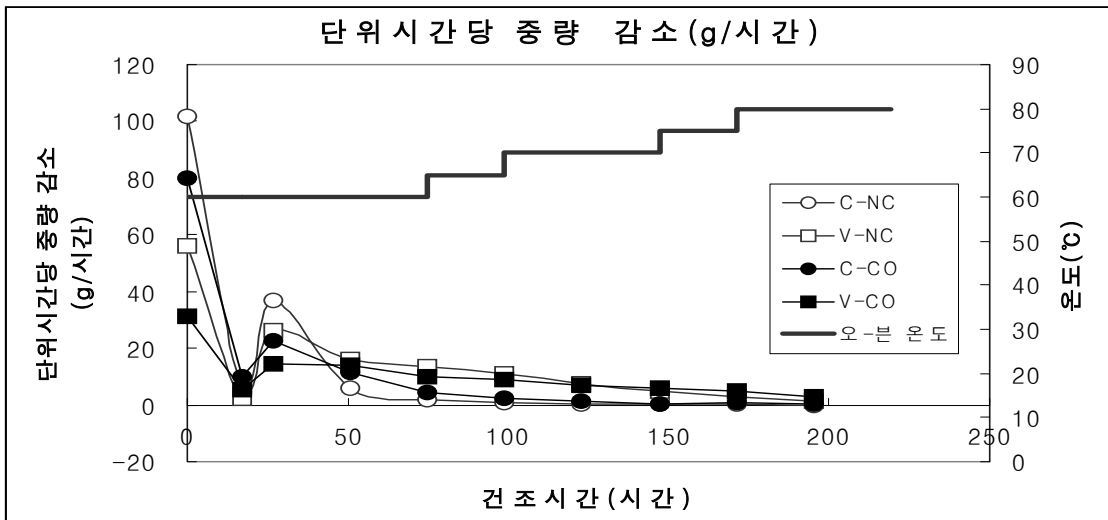


Figure 3. 2. 11. 장고 초갈이재의 송풍오-분건조중 단위시간당중량감소량의 경시변화

## 2) 건조중 재온분포

장고 초갈이 각 처리재의 송풍오-분건조시험중의 재온분포의 추이를 Figure 3. 2. 12. ~ Figure 3. 2. 13. 에 나타내었다.

V-NC처리재의 경우 건조시간에 걸쳐 통공, 내층, 외층의 순서로 材溫이 높게 나타났으며, V-CO처리재도 이와 유사한 재온분포를 보였으나 내층과 외층간에 온도경사가 거의 존재하지 않았다. 이것은 외피면은 건조실내 熱氣의 대류에 의해 가열되어지지만 통공이나 내피면은 수증기담처리에 의해 熱氣와의 직접접촉이 차단되므로써 오로지 외피면으로 부터의 전도에 의해서만 가열되어지므로써 열전달이 지연되기 때문인 것으로 생각된다. 이것은 건조시간이 경과할수록 온도경사가 점점 더 완만해지고 있는 점이나, V-NC처리재의 경우 수분증발이 매우 미미하였던 건조말기에도 여전히 약간의 온도경사가 존재하고 있는 점 등에서도 입증된다.

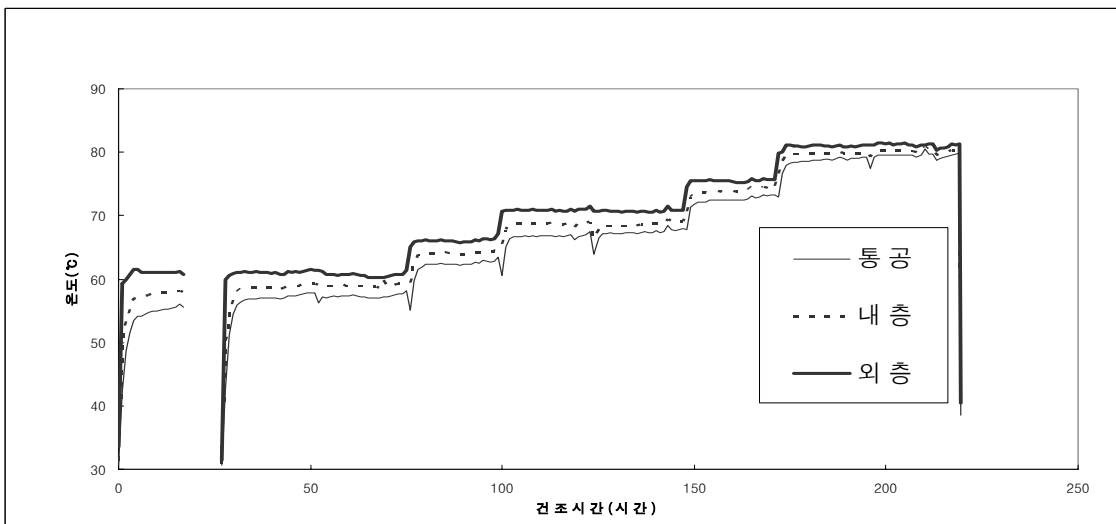
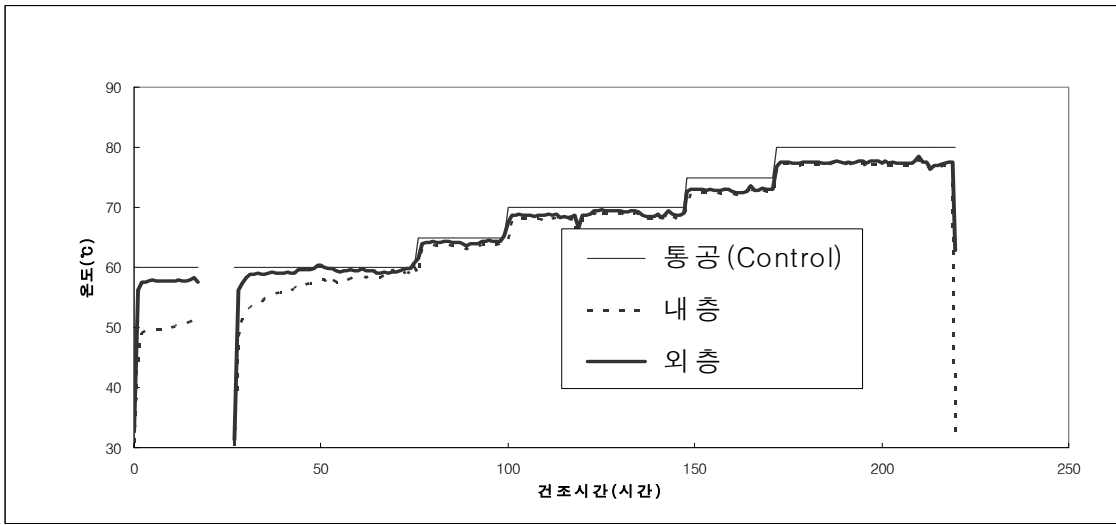


Figure 3. 2. 12. 장고 초갈이 C-NC처리재(위)와 V-NC처리재(아래)의 송풍오-븐건조시험중의 재온분포 추이

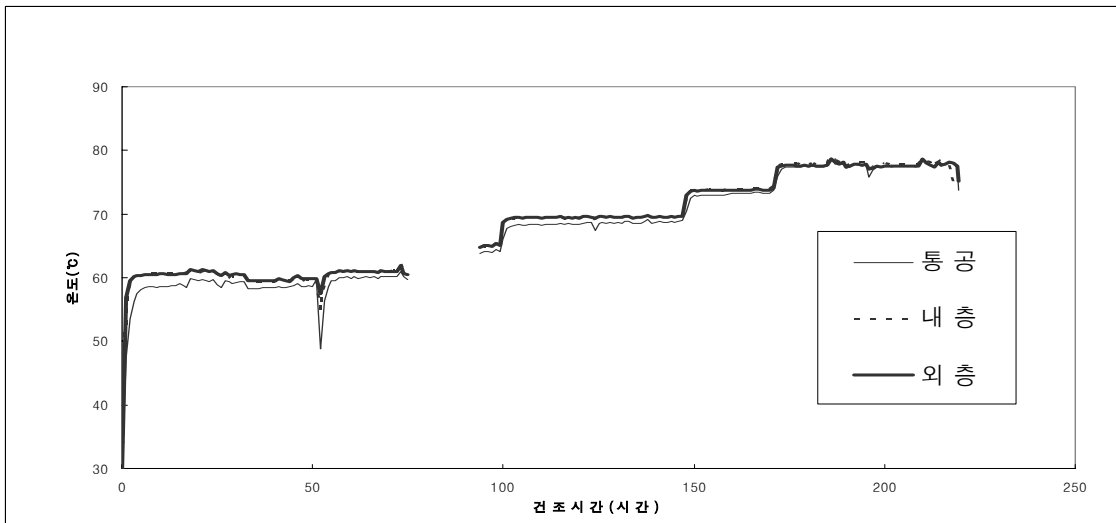
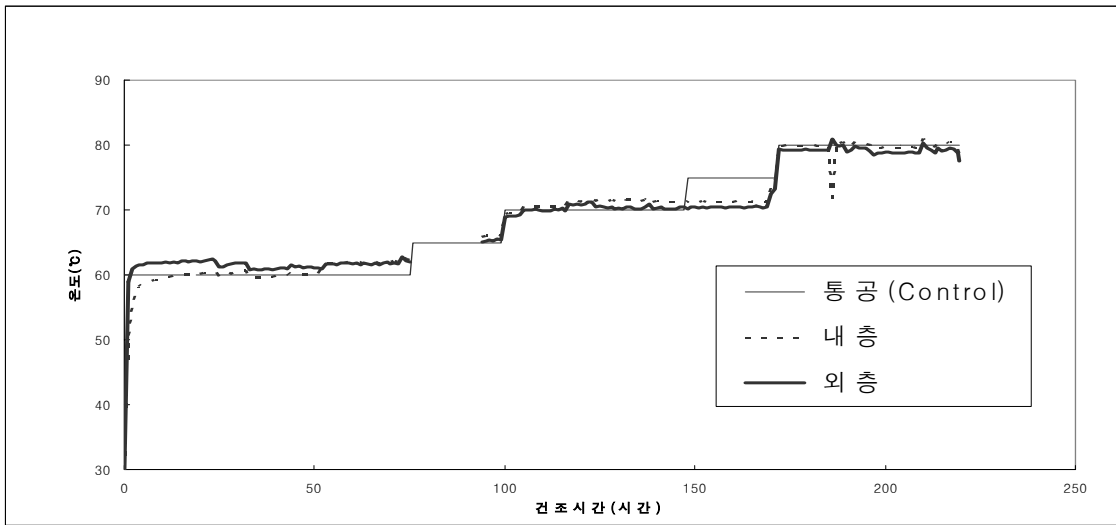


Figure 3. 2. 13. 장고 초갈이 C-CO처리재(위)와 V-CO처리재(아래)의 송풍오-분건조시험중의 재온분포 추이



C-CO처리재나 V-CO처리재는 각각 C-NC처리재나 V-NC처리재와 비교하여 건조기간에 걸쳐 더 완만한 온도경사를 보였다. 이것은 엔드코팅처리가 외피면과 내피면에 존재하는 傾斜管孔을 통한 수분증발을 억제하므로써 외층과 내층 및 통공의 온도가 수분증발과 관련된 열손실 또는 열축적 등의 영향을 적게 받기 때문인 것으로 생각된다.

C-NC처리재와 C-CO처리재의 경우 건조시간 약 75시간을 기점으로 외층과 내층간에 형성되었던 온도경사가 거의 소멸되었다. 이 시기는 건조중 수분증발이 급격하게 약화된 시점에서 수분증발과 관련된 열손실 또는 열축적이 이 시기 이후 모든 부위에서 거의 균일하였기 때문인 것으로 판단된다. C-NC처리재에서와 같은 건조초기의 심한 온도경사에 의하여 누적수분증발량이 상당한 영향을 받고, 이로 말미암아 급격한 수분경사가 유도되어 횡단면할렬이나 재면할렬 등이 발생할 가능성이 높다.

### 3) 건조중 수증기압분포

장고 초같이 각 처리재의 송풍오-본건조시험중의 수증기압 분포의 추이를 Figure 3. 2. 14. ~ Figure 3. 2. 15.에 나타내었다.

C-NC처리재의 경우 건조개시 직후를 제외하고는 건조기간동안 외층과 내층 모두 거의 대기압 수준의 수증기압 분포를 보인 반면에, V-NC처리재는 건조개시 약 150시간 무렵까지 외층은 대기압 수준, 그리고 내층은 이 보다 최고 약 10 kPa 정도 더 높은 수증기압 분포를 보였다. C-NC처리재의 경우 외층에서 증발된 수분은 외피면을 통해서, 그리고 내층에서 증발된 수분은 내피면을 통해서 용이하게 제거되지만, V-NC처리재는 내층에서 증발된 수분의 제거가 상대적으로 어려워 내층에 축적되기 때문인 것으로 판단된다. 이것은 V-NC처리 내층의 재온이 외층 보다 낮음에도 불구하고, 수증기압이 오히려 더 높게 나타나므로써 단순히 재온에 상응하여 형성된 포화수증기압이 아닌 증발된 수증기의 제거 또는 축적과 관련지어 해석해야 할 것으로 생각된다. 수분증발이 매우 미미하였던 건조시간 경과 약 150시간 이후에 외층과 내층간에 수증기압차가 거의 소멸된 점도 이러한 해석을 뒷받침한다.

C-NC처리의 경우 외층과 내층의 수증기압이, 그리고 V-NC처리의 경우는 내층의 수증기압이 매우 불안정한 모습을 보이고 있는데, 이것은 급속건조로 인하여 발생한 횡단면할렬 부위를 통해서 축적되었던 수증기가 급격하게 되었기 때문인 것으로 해석된다.

C-CO처리의 경우 C-NC처리와 비교하여 건조중기까지는 외층과 내층의 수증기압 모두가, 그리고 건조중기 이후에는 내층의 수증기압이 더 높게 나타났는데, 이것은 엔드코팅처리에 의해서 통피면상의 傾斜관공을 통한 수증기의 누출이 상당량 억제되므로써 증발된 수증기가 재

내에 축적되기 때문인 것으로 보인다.

C-CO처리의 경우 건조시간 약 120시간부터 외층의 수증기압이 거의 대기압 수준으로 급격하게 감소한 반면, 내층의 수증기압은 반대로 급격하게 증가하는 양상을 보였다. 이것은 이 시간 이후 수분증발의 거의 대부분이 내층 부위에서 발생한 것을 시사하는 것으로서, 바꾸어 말하면 외층과 내층간에 수분경사가 형성되어있는 것을 의미한다.

V-CO처리재의 경우 건조초기에는 V-NC처리와 유사한 분포를 보였으나, 건조초기 이후 통공, 외층, 내층의 순으로 절대수증기압이 큰 분포를 보이면서 V-NC처리와는 전혀 다른 분포모형이 관찰되었다. 이것은 건조시간이 경과할수록 내피면에서 증발된 수증기가 통공내에 축적되기 때문인 것으로 해석되며, 수증기뎀처리는 엔드코팅처리와 병행하여 적용할 때 처리효과가 극대화 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4) 건조수축율과 할렬발생

장고 초갈이 각 처리재의 송풍오-분 건조중 발생한 직경수축율과 통피의 두께수축율 및 할렬발생 여부를 Table 3. 2. 4.에 나타내었다.

직경수축은 처리재간에 큰 차이가 없었으나, 통피의 두께수축은 엔드코팅처리재가 적은 편이었다. 이것은 엔드코팅처리를 실시하지 않은 초갈이재의 경우 횡단면할렬이 다수 발생하여 겉보기 수축이 적게 나타난 것으로 판단된다.

재면할렬과 윤활은 모든 처리재에서 발생되지 않았으나 C-NC처리재와 V-NC처리재 등 엔드코팅을 실시하지 않은 초갈이에서는 건조초기에 횡단면할렬 들이 심하게 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 장고 초갈이재의 경우 양쪽 마구리면 뿐아니라 통피면에도 상당한 량의 傾斜管孔들이 만들어지도록 가공되기 때문에 이곳을 통해서 매우 급속한 속도로 수분이 증발되는데 기인한 것으로 판단된다. 즉 장고 초갈이의 경우 수증기뎀처리가 엔드코팅처리와 병행되어질 때 처리효과가 극대화 될 것으로 예측된다. 한편 오동나무의 경우 엔드코팅처리만으로도 횡단면할렬의 발생을 예방할 수 있었으나 상대적으로 건조곤란한 수종의 경우에는 추가연구를 통해서 확인할 필요가 있다.

Table 3. 2. 4 장고 초갈이 각 처리재의 송풍오-분건조중 발생한 직경수축율과 통피의 두께수축율 및 할렬발생 여부

처리	수축율(%)		할렬발생		
	직경	통피의 두께	횡단면할렬	재면할렬	윤할
C-NC	3.46	2.50	발생	없음	없음
V-NC	3.69	2.60	발생	없음	없음
C-CO	3.95	4.19	없음	없음	없음
V-CO	3.84	5.48	없음	없음	없음

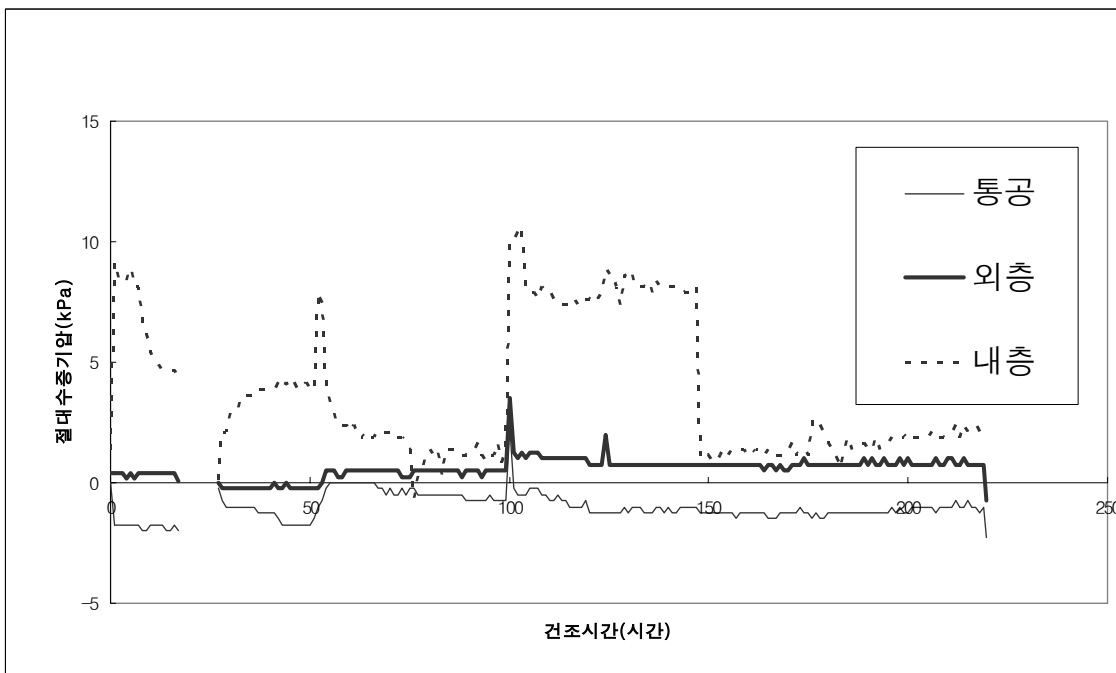
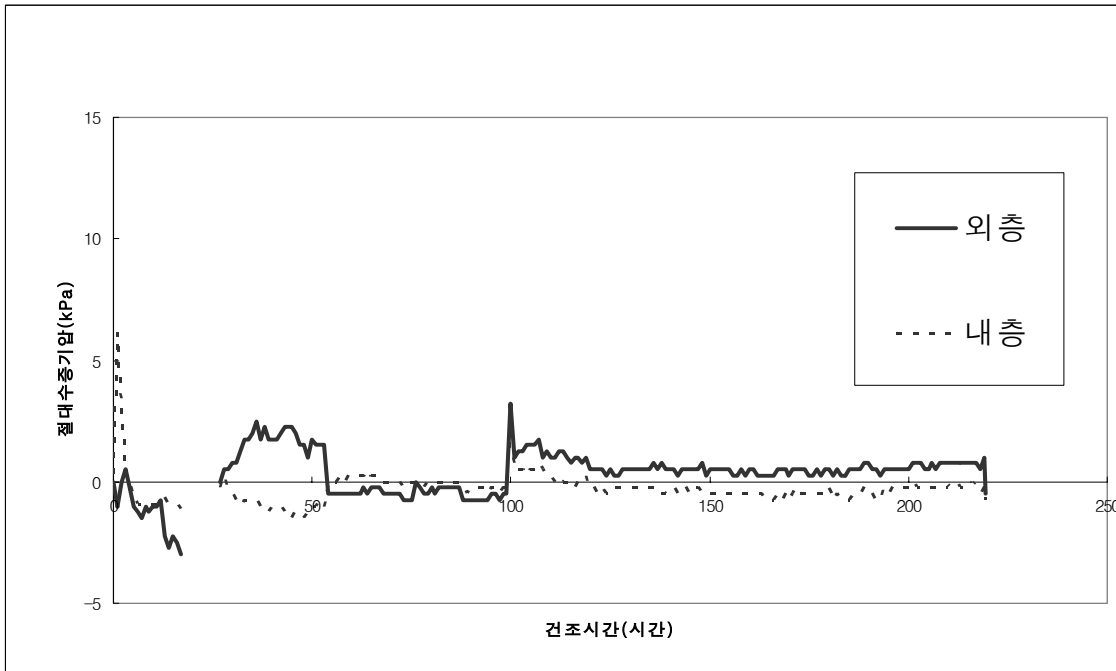


Figure 3. 2. 14. 장고 초갈이 C-NC처리재(위)와 V-NC처리재(아래)의 송풍오-븐건조시험중의 수증기압분포 추이

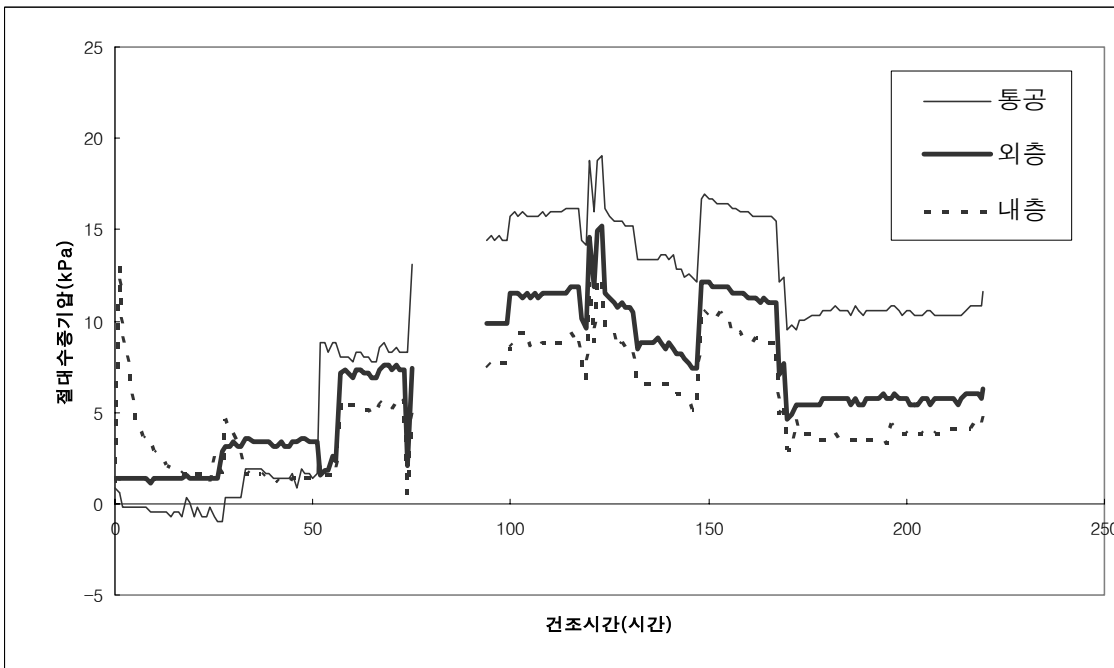
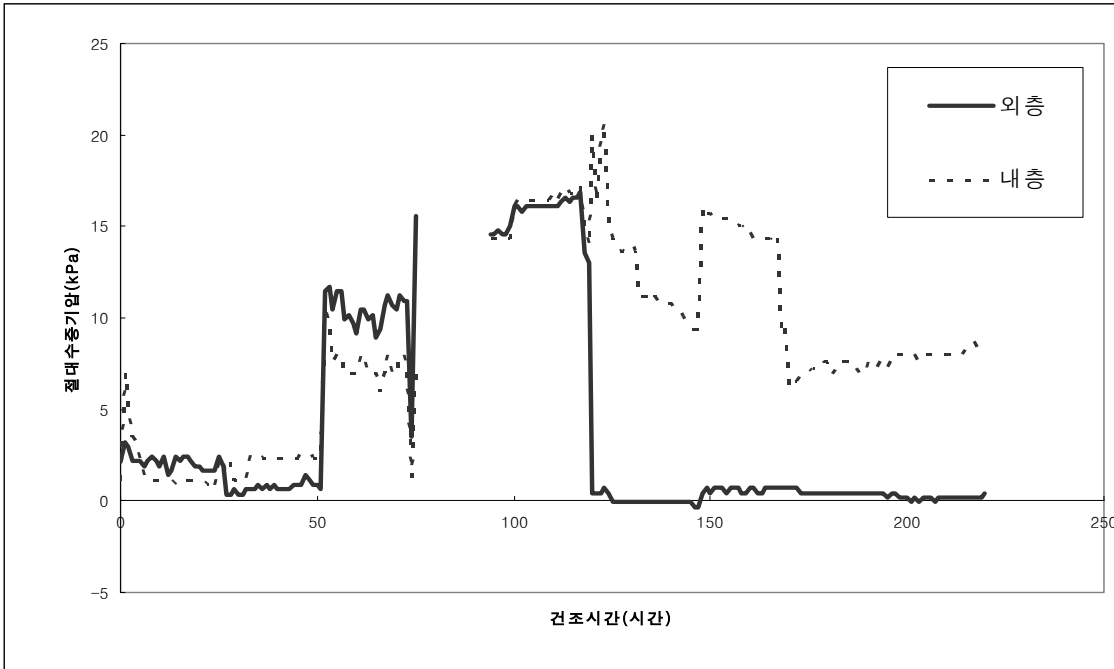


Figure 3. 2. 15. 장고 초갈이 C-CO처리재(위)와 V-CO처리재(아래)의 송풍오-븐건조시험중의 수증기압분포 추이

## 다. 결 론

수증기땀 처리 또는 횡단면코팅 처리 등이 오동나무 장고 초갈이의 송풍오-본 건조 특성에 미치는 영향은 다음과 같다.

첫째, 건조개시 직후의 중량감소량은 C-NC, C-CO, V-NC, V-CO의 순으로 크게 나타났고, 특히 수증기땀처리재의 중량감소량은 무처리재와 비교하여 非코팅처리재에서는 약 50%, 그리고 엔드코팅처리재에서는 약 40% 정도에 불과하였다.

둘째, 수증기땀처리재의 경우 내피면을 통해서 증발된 수분이 통공내에 축적되면서 내피면을 통한 수분증발을 지연시키므로써 통피층내에 존재하는 자유수가 일시에 고갈되지 않도록 작용한 것으로 추론되었다.

셋째, 수증기땀 처리의 경우 건조실내 송풍오-본의 습도를 조절하지 않는다 할지라도 건조속도를 조절해 갈 수 있는 자발력이 제공되고 있는 것으로 해석되었다.

넷째, V-NC처리재의 경우 건조조건에 걸쳐 통공, 내층, 외층의 순서로 材孪이 높게 나타났으며, V-CO처리재도 이와 유사한 재온분포를 보였으나 내층과 외층간에 온도경사가 거의 존재하지 않았다.

다섯째, C-CO처리재나 V-CO처리재는 각각 C-NC처리재나 V-NC처리재와 비교하여 건조조건에 걸쳐 더 완만한 온도경사를 보였다.

여섯째, C-NC처리재의 경우 건조개시 직후를 제외하고는 건조조건동안 외층과 내층 모두 거의 대기압 수준의 수증기압 분포를 보인 반면에, V-NC처리재는 건조개시 약 150시간 무렵까지 외층은 대기압 수준, 그리고 내층은 이 보다 최고 약 10 kPa 정도 더 높은 수증기압 분포를 보였다.

일곱째, C-CO처리재의 경우 C-NC처리재와 비교하여 건조중기까지는 외층과 내층의 수증기압 모두가, 그리고 건조중기 이후에는 내층의 수증기압이 더 높게 나타났다.

여덟째, V-CO처리재의 경우 건조초기에는 V-NC처리재와 유사한 분포를 보였으나, 건조초기 이후 통공, 외층, 내층의 순으로 절대수증기압이 큰 분포를 보이면서 V-NC처리재와는 전혀 다른 분포모형이 관찰되었다. 이것은 건조시간이 경과할수록 내피면에서 증발된 수증기가 통공내에 축적되기 때문인 것으로 해석되며, 수증기땀처리재는 엔드코팅처리재와 병행하여 적용할 때 처리효과가 극대화 될 수 있을 것으로 판단된다.

아홉째, 재면할렬과 윤활은 모든 처리재에서 발생되지 않았으나 C-NC처리재와 V-NC처리재 등 엔드코팅을 실시하지 않은 초갈이에서는 건조초기에 횡단면할렬 들이 심하게 발생한 것을 관찰할 수 있었다.

### 3. 筒竹의 송풍오-븐 및 진공오-븐건조시험

#### 가. 재료 및 방법

##### 1) 공시 죽종

대금용 부재로는 현재 쌍골죽과 민죽 등이 널리 쓰이고 있으나, 이것들의 경우 가격이 비싸기 때문에 상대적으로 구입이 용이하면서도 건조성이 좋지 않은 것으로 알려진 분죽과 왕대를 공시 죽종으로 선정하여, 송풍오-븐건조의 경우 왕대와 분죽을, 그리고 진공오-븐건조의 경우 분죽에 대하여 시험을 실시하였다.

각 통죽은 송풍오-븐건조에서는 완만건조스케줄용(AM)과 과격건조스케줄용(AS)으로 구분하여 각각 2본씩을 시험용으로 준비하였고, 진공오-븐건조에서는 단일 건조스케줄(V)에 대하여 2본의 시험편을 준비하였다. 각 처리별 시험용 통죽의 형상과 수량은 Table 3. 2. 5와 같다. 시험용 통죽의 총길이는 43.6 ~ 69.4 cm, 평균외경은 63.6 ~ 67.6 mm, 節(Node)은 3 ~ 4개로서 평균 절간길이는 16.6 ~ 30.9 이었으며, 생재함수율은 70.9 ~ 78.9% 범위이었다.

Table 3. 2. 5. 통죽 시험편의 형상과 송풍오-븐 및 진공오-븐 건조조건

건조 방식	죽종	스케줄 코드	시험 수량 (본)	생재형상					생재 함수율 (%)	건조조건 (°C)
				총길이 (cm)	평균 외경 (mm)	통피 두께 (mm)	節개수 (개)	평균 節間길이 (cm)		
송풍 오-븐	왕대	AS	2	69.0	64.3	8.17	4	21.9	78.9	60 ~ 80
		AM	2	65.4	67.5	9.31	3	30.9	75.3	60 ~ 70
	분죽	AS	2	54.2	66.2	7.71	4	16.6	70.9	60 ~ 80
		AM	2	55.9	63.6	8.40	4	17.6	72.9	60 ~ 70
진공 오-븐	분죽	V	2	43.6	67.6	7.28	3	19.7	74.9	50 ~ 60 (105±30 torr) <sup>a</sup>

주) a: 진공오-븐건조중의 진공도

2) 筒竹의 수증기덫처리

시험용 筒竹의 양 마구리면을 두께 0.5mm의 식품포장용 polyethylene vinyl랩 2매로 차폐한 뒤 비닐의 끝을 부재의 접선단면상에서 内熱형 고무밴드로 결체하여 내피면에서 증발하여 筒 내부공간으로 유입되는 수증기가 외부로 유출되지 않도록 기밀처리하였다. Figure 3. 2. 16.

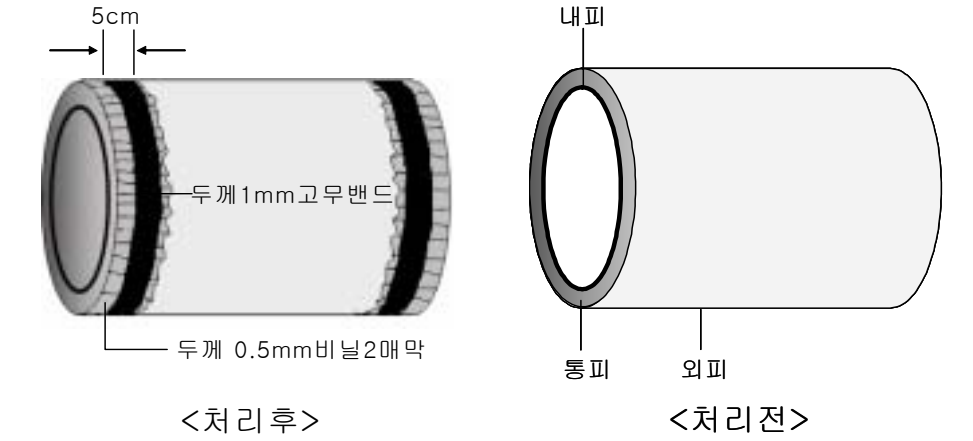


Figure 3. 2. 16. 통죽의 수증기덫 처리 모식도(위) 및 실제 처리 모습(아래)



### 3) 송풍 오-븐 건조시험

통죽의 송풍오-븐 건조시험은 내부크기가 가로 60 x 세로 50 x 높이 50 cm 로서,  $\pm 1^\circ\text{C}$  까지 조절이 가능하고, 풍속 1.5 m/s를 유지하는 송풍오-븐에서 실시하였으며, 송풍오-븐에는 각 처리별시험편을 동일로드에 층적하여 건조하였다. 건조시험중 건조조건은 송풍오-븐내 공기의 온도를 Table 3. 2. 5와 같은 조건으로 콘트롤하였다. 과격 건조스케줄 AS의 경우 건조초기 60  $^\circ\text{C}$ 로 시작하여 건조말기 최고 80  $^\circ\text{C}$ 까지 상승시켰고, 완만 건조스케줄 AM의 경우는 말기 온도를 최고 70  $^\circ\text{C}$ 까지만 상승시켰다. 건조중 약 24시간 마다 송풍오-븐의 작동을 중지하고 시험편의 건조중 무게를 평량하여 건조중합수율과 건조속도를 산출하였다.

### 4) 진공 오-븐 건조시험

통죽의 진공오-븐 건조시험은 내부크기가 가로 40 x 세로 40 x 높이 30 cm 로서,  $\pm 2^\circ\text{C}$  까지 조절이 가능한 오-븐내에서 실시하였다. 건조조건은 온도를 50  $^\circ\text{C}$ 에서 시작하여 건조말기 60  $^\circ\text{C}$ 까지 상승시켰고, 건조중 진공도는 105 $\pm$ 30 torr로 고정하였다.

### 5) 건조결합, 두께수축 및 횡단면적 수축을 조사

건조중 무게를 평량할 때마다 각 시험편의 외피면과 양 마구리면에 발생한 활렬 또는 외주할의 발생정도를 육안으로 조사하였으며, 건조 전후에 筒皮의 두께를 버니어캘리퍼스로, 그리고 양 마구리면의 모형을 종이에 본 뜬 후 葉면적측정기를 활용하여 마구리면의 면적을 측정하여 건조중 발생한 두께수축율과 횡단면적 수축율을 조사하였다.

## 나. 결과 및 고찰

### 1) 건조중 합수율과 건조속도

통죽의 송풍오-븐 건조 및 진공오-븐 건조중의 합수율 감소경과와 건조속도를 각각 Figure 3. 2. 17과 Figure 3. 2. 18에 나타내었다.

모든 죽종이 건조방법이나 건조조건에 관계없이 생재에서 합수율 약 9%이하까지 건조되는데 23일 정도 소요되었다. 이것은 수증기담치리에 의해 횡단면을 통한 수분증발이 완전히 차단되어 건조시간이 장기간 소요된 것으로 생각된다.

송풍오-븐 건조의 AS 건조스케줄의 건조초기 건조속도는 약 16%/일 (분죽)이나 약 12%/일

(왕대)로서 AM 건조조스케줄이나 진공오-븐건조의 초기 건조속도 보다 훨씬 빠른 것으로 나타났으나 건조초기 직후 급격하게 감소하여 유사하거나 오히려 더 느리게 나타났다. 이것은 수증기땀처리재의 경우 건조초기 온도가 건조속도나 건조시간 단축과 밀접한 관련이 있음을 의미하는 것으로 해석된다.

진공오-븐건조의 경우 송풍오-븐건조와 비교하여 50 ~ 60 ℃의 저온스케줄을 적용하였음에도 불구하고 유사한 건조속도를 나타내었을 뿐아니라, 저온의 조건으로 건조하므로써 미세할렬이나 세포벽의 찌그러짐 예방 등에도 유리하여 진공오-븐 건조가 통죽의 음향적 기능성 증진에 더 효과적일 것으로 기대된다.

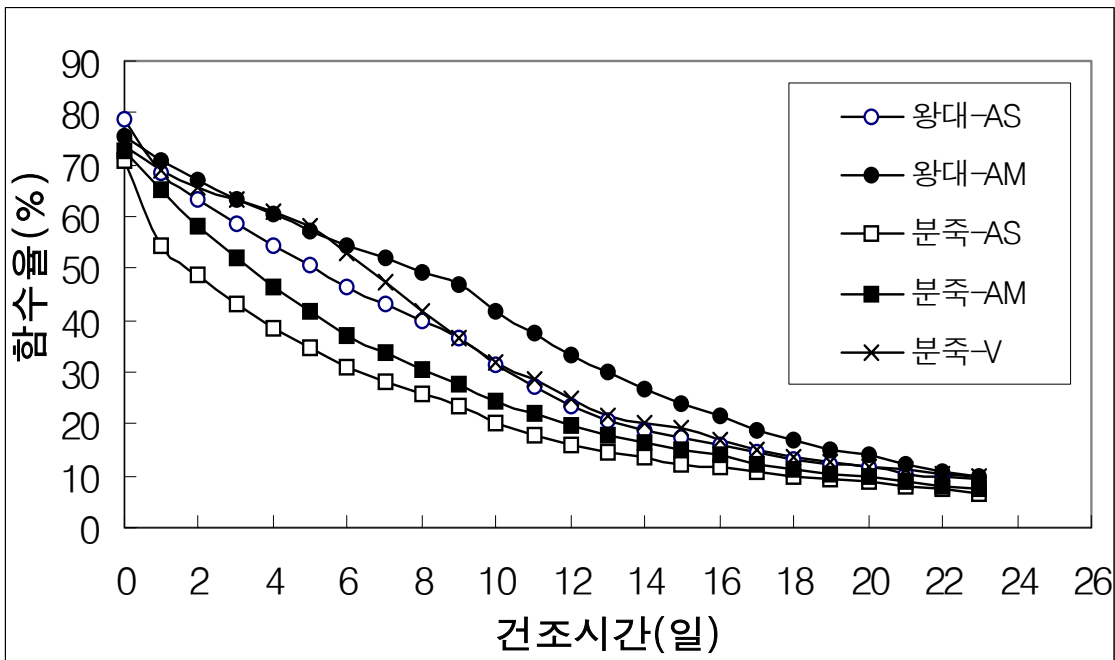


Figure 3. 2. 17. 통죽의 송풍오-븐 및 진공오-븐건조중의 함수율 감소경과 곡선

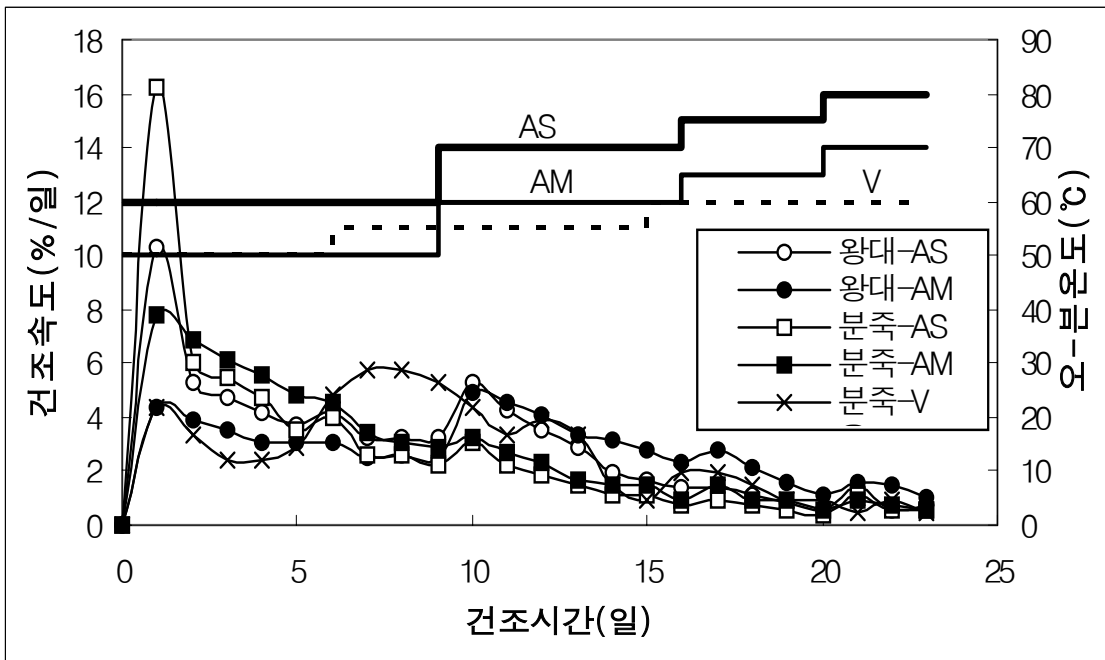


Figure 3. 2. 18. 통죽의 송풍오-븐 및 진공오-븐건조중의 함수율 감소경과 곡선 및 건조속도 곡선

## 2) 수축율과 외주할

Table 3. 2. 6은 송풍오-븐 건조 및 진공오-븐 건조한 통죽의 통피층 두께수축율과 횡단면적 수축율 및 외주할 발생분수를 나타낸 것이다.

진공오-븐건조재의 두께수축율과 횡단면적 수축율은 송풍오-븐건조의 수축율과 비교하여 훨씬 적었다. 이는 저온의 조건으로 건조하고, 또한 건조중 材内外간에 형성된 절대수증기압의 차이에 의해서 세포벽의 찌그러짐이 상대적으로 적었기 때문인 것으로 해석된다. 또한 이러한 결과로부터 진공오-븐건조가 통죽의 음향기능성 증진에 유리하게 작용할 것으로 예측된다.

외주할의 경우 죽종이나 건조스케줄 및 건조방법에 관계없이 모든 시험편에서 전혀 발생하지 않았다. 횡단면적 수축율이 무려 12.77 ~ 16.24%일 정도로 크게 나타났음에도 불구하고 외주할이 발생하지 않은 것은 내피면으로부터 증발된 수증기가 수증기담 처리에 의해서 筒空내에 축적되어 있다가 건조응력이 임계값에 이르면 내피면에 수분을 제공해 주므로써 응력을 완화시켜 주기 때문인 것으로 사료된다.

Table 3. 2. 6. 송풍오-븐 건조 및 진공오-븐 건조한 통죽의 통피층 두께수축율과 횡단면적 수축율

건조방식	죽종	스케줄 코드	통피층의 두께수축율 (%)	횡단면적 수축율 (%)	외주할 발생분수 (분)
송풍오-븐	왕대	AS	6.86	16.24	0
		AM	4.65	15.04	0
	분죽	AS	5.65	12.77	0
		AM	9.02	15.13	0
진공오-븐	분죽	V	3.58	10.89	0

#### 다. 결 론

수증기땀처리한 분죽과 왕대를 송풍오-븐건조 및 진공오-븐건조하여 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 모든 죽종이 건조방법이나 건조조건에 관계없이 생재에서 함수율 약 9%이하까지 건조되는데 23일 정도 소요되었다.

둘째, 송풍오-븐건조의 AS 건조스케줄의 건조초기 건조속도는 약 16%/일 (분죽)이나 약 12%/일 (왕대)로서 AM 건조스케줄이나 진공오-븐건조의 초기 건조속도 보다 훨씬 빠른 것으로 나타났으나 건조초기 직후 급격하게 감소하여 유사하거나 오히려 더 느리게 나타났다.

셋째, 진공오-븐건조의 경우 송풍오-븐건조와 비교하여 50 ~ 60 ℃의 저온스케줄을 적용하였음에도 불구하고 유사한 건조속도를 나타내었다.

넷째, 진공오-븐건조재의 두께수축율과 횡단면적 수축율은 송풍오-븐건조의 수축율과 비교하여 훨씬 적었다. 이는 저온의 조건으로 건조하고, 또한 건조중 材内外간에 형성된 절대수증기압의 차이에 의해서 세포벽의 찌그러짐이 상대적으로 적었기 때문인 것으로 해석된다.

다섯째, 외주할의 경우 죽종이나 건조스케줄 및 건조방법에 관계없이 모든 시험편에서 전혀 발생하지 않았다. 횡단면적 수축율이 무려 12.77 ~ 16.24%일 정도로 크게 나타났음에도 불구하고 외주할이 발생하지 않은 것은 내피면으로부터 증발된 수증기가 수증기 덤 처리에 의해서 筒空내에 축적되어 있다가 건조응력이 임계값에 이르면 내피면에 수분을 제공해 주므로써 응력을 완화시켜 주기 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 가야금용재의 천연건조 및 고주파진공건조 시험

##### 가. 재료 및 방법

###### 1) 공시 재종

###### 가) 천연건조 시험재

가야금의 앞판 부재로는 오동나무를, 그리고 뒤판 부재로는 밤나무를 공시수종으로 선정하였다. 앞판용 오동나무재의 경우 두께 20 mm의 곡판과 두께 14 mm의 평판을 건조시험재로 준비하였으며, 각 평판 시험재는 다시 정목, 추정목 및 판목으로 구분하여 준비하였다. 뒤판용 밤나무재의 경우는 두께 12 mm의 평판의 정목, 추정목 및 판목에 대해서 건조시험을 실시하였다. 단, 모든 시험재에 대해서 천연건조재와 고주파진공건조재를 엔드매치 또는 사이드 매치되게 채취하였다. 가야금용재의 천연건조 시험에 사용된 공시재종별 형상과 수량은 Table 3. 2. 7.과 같다.

###### 나) 고주파진공건조 시험재

천연건조시험의 경우와 동일한 요령으로 시험재를 준비하되, 고주파진공건조의 경우에는 재목의 길이가 건조특성에 미치는 영향이 크기 때문에 평판을 다시 길이 35 cm의 단재와 140cm의 장재로 구분하여 실시하였다. 가야금용재의 고주파진공건조 시험에 사용된 공시 재종별 형상과 수량은 Table 3. 2. 8.과 같다.

Table 3. 2. 7. 가야금용재의 천연건조 시험재의 재종별 형상과 수량

용도	수종	재종	시험재의 형상				시험재 수량 (본)	
			두께 (mm)	폭 (cm)	길이 (cm)	곡율높이 (mm)		
앞판 용재	오동나무	曲板	20	24	140	21.3	20	
		平板	정목	14	24	35	-	15
			추정목	14	24	35	-	15
			판목	14	24	35	-	15
뒤판 용재	밤나무	平板	정목	12	24	35	-	15
			추정목	12	24	35	-	15
			판목	12	24	35	-	15

Table 3. 2. 8. 가야금용재의 고주파진공건조 시험재의 재종별 형상과 수량

용도	수종	재종	시험재의 형상				시험재 수량 (본)		
			두께 (mm)	폭 (cm)	길이 (cm)	곡율높이 (mm)			
앞판 용재	오동나무	曲板	20	24	140	21.5	20		
		平板	短材	정목	14	24	35	-	5
				추정목	14	24	35	-	5
				판목	14	24	35	-	5
			長材	정목	14	24	140	-	5
				추정목	14	24	140	-	5
				판목	14	24	140	-	5
뒤판 용재	밤나무	平板	短材	정목	12	24	35	-	10
				추정목	12	24	35	-	10
				판목	12	24	35	-	10
			長材	정목	12	24	140	-	5
				추정목	12	24	140	-	5
				판목	12	24	140	-	5

## 2) 천연건조 시험

천연건조는 모든 공시재종을 1년 천연건조용, 2년 천연건조용 및 3년 천연건조용으로 구분하여 동일 장소의 동일한 로드에서 잔적하였으며, 잔적지붕을 설치하여 운용하였다. 천연건조장은 전라북도 전주시 전북대학교 구내에 설치하였고, 2002년 1월 30일에 건조를 개시하여 건조 초기에는 매 10일 마다, 그리고 그 이후에는 측정시기를 늘려 가며 건조중 무게를 평량하여 건조중합수율과 건조속도를 산출하는데 활용하였다. 또한 천연건조기간중의 전주시 평균기온과 상대습도 및 평형합수율을 조사하였다.

## 3) 고주파진공건조 시험

모든 재종을 동일 로드에서 잔적하였으며, 시험에 사용한 고주파진공건조기는 수용재적 약 3 m<sup>3</sup>, 고주파발전기의 주파수와 출력은 각각 약 13 Mhz와 25 kW이었다.

건조중 재온은 미세할렬이나 찌그러짐의 발생을 최소화하므로써 음향기능성에 손상이 없도록 하기 위하여 초기 40 °C에서 시작하여 건조말기에도 최고 45 °C까지만 상승시키는 저온스케줄을 적용하였고, 진공도는 약 80 torr를 유지하였다.

## 4) 두께와 폭 수축율 및 곡률높이 변화율

천연건조 및 고주파진공건조 중의 각 건조시험재의 건조 전후의 두께와 폭 방향의 치수를 버니어 캘리퍼스로 측정하여 각 방향의 건조수축율을 조사하였다.

또한 오동나무 곡판의 고주파진공건조시험의 경우 곡판 곡률의 건조 전후 값의 변화를 측정하여 곡률변화율을 조사하였다.

## 5) 재면할렬 및 횡단면할렬

모든 건조시험재에 대하여 건조 종료후 재면과 횡단면상에 발생한 할렬의 길이를 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

1) 천연건조

가) 기후치 평형함수율

Figure 3. 2. 18.은 천연건조기간 중의 전라북도 전주시의 평균 기온과 상대습도 및 기후치 평형함수율을 나타낸 것이다.

천연건조 제 1년차 기간동안의 평균온도와 평균 상대습도는 각각 11.5 ℃와 67.7%이었고, 제 2년차는 각각 13.8 ℃, 62.5%, 그리고 제 3년차는 10.7 ℃와 61.2%로서 비슷하였다.

평균온도와 평균상대습도로부터 계산된 기후치 평형함수율 또한 1년차 12.8%, 2년차 11.5%, 그리고 3년차 11.4%로 큰 차이가 없었으며, 천연건조만으로는 옥내용 악기용재의 이용함수율 수준까지 건조되기 어려울 것으로 전망된다.

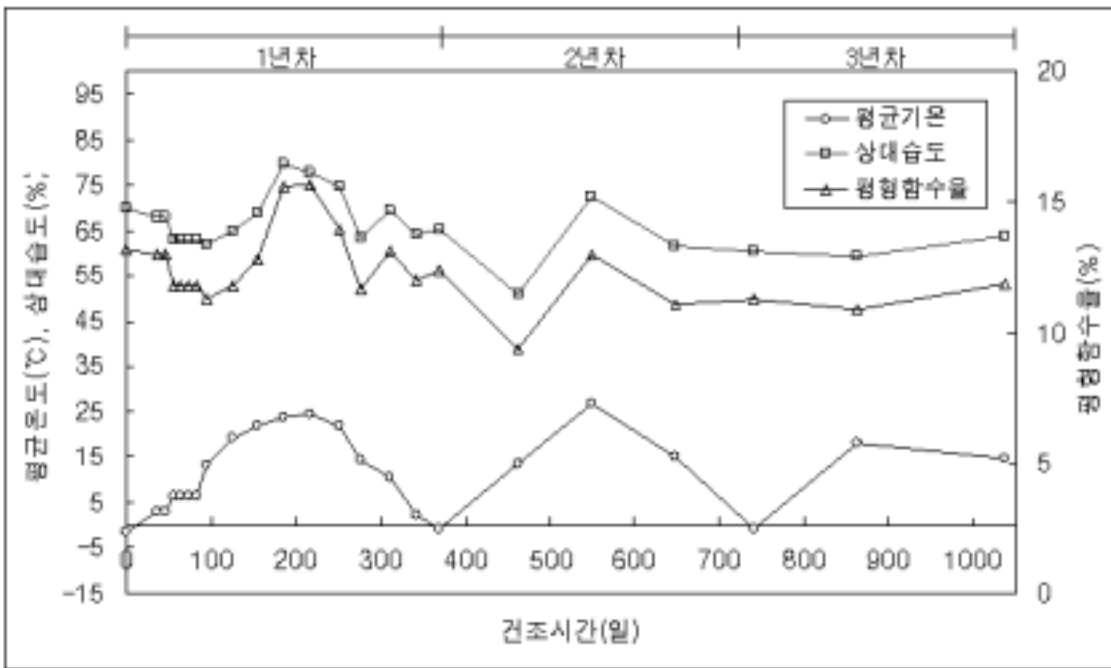


Figure 3. 2. 18. 천연건조기간중의 평균 기온과 상대습도 및 기후치 평형함수율 변이



#### 나) 건조곡선과 건조속도

가야금 앞판용 오동나무재 및 뒤판용 밤나무재의 천연건조중의 함수율 감소경과와 건조속도 변화를 각각 Figure 3. 2. 19.와 Figure 3. 2. 20.에 나타내었다.

가야금 앞판용 오동나무재의 경우 200% 이상의 생재함수율에서 건조가 개시된 이후 함수율이 지속적으로 감소하여 건조개시후 84일이 경과한 시점에서 약 11%정도의 값을 나타내었다. 그 이후 부터는 기후치 평형함수율의 변동에 연동하여 흡습과 방습을 되풀이 할 뿐 옥내의 이용함수율 수준인 6 ~ 8%까지의 함수율의 감소는 발견되지 않았다. 따라서 옥내용 약기용재로 사용할 부재에 대해서는 천연건조 이후 인공건조를 실시하여야 할 필요가 있는 것으로 확인되었다.

건조속도는 1년차의 봄철에 약 5 ~ 6%/일로 최고에 도달한 후 급격하게 감소하기 시작하여 약 84일 경과부터는 흡습과 방습을 반복하는 것으로 나타났다. 단순히 이용함수율의 측면에서는 봄철 천연건조의 경우 약 2개월 정도 건조한 후 인공건조를 실시하는 것이 하는 것이 바람직할 것으로 판단되지만 흡·방습의 반복이 음향적 성질에 어떻게 기여할지에 대해서는 별도의 조사·연구가 필요한 것으로 생각된다. 정목, 추정목 및 판목판재간의 건조속도 및 건조중 함수율 감소 경향에 있어서 특별한 차이가 발견되지 않았다.

가야금 뒤판용 밤나무재의 경우 전반적으로 오동나무재와 유사한 경향을 보였으나, 최고 건조속도가 제 1년차의 봄철에 약 2 ~ 4%/일 로서 오동나무재 보다 상당히 낮은 값을 나타내었다.

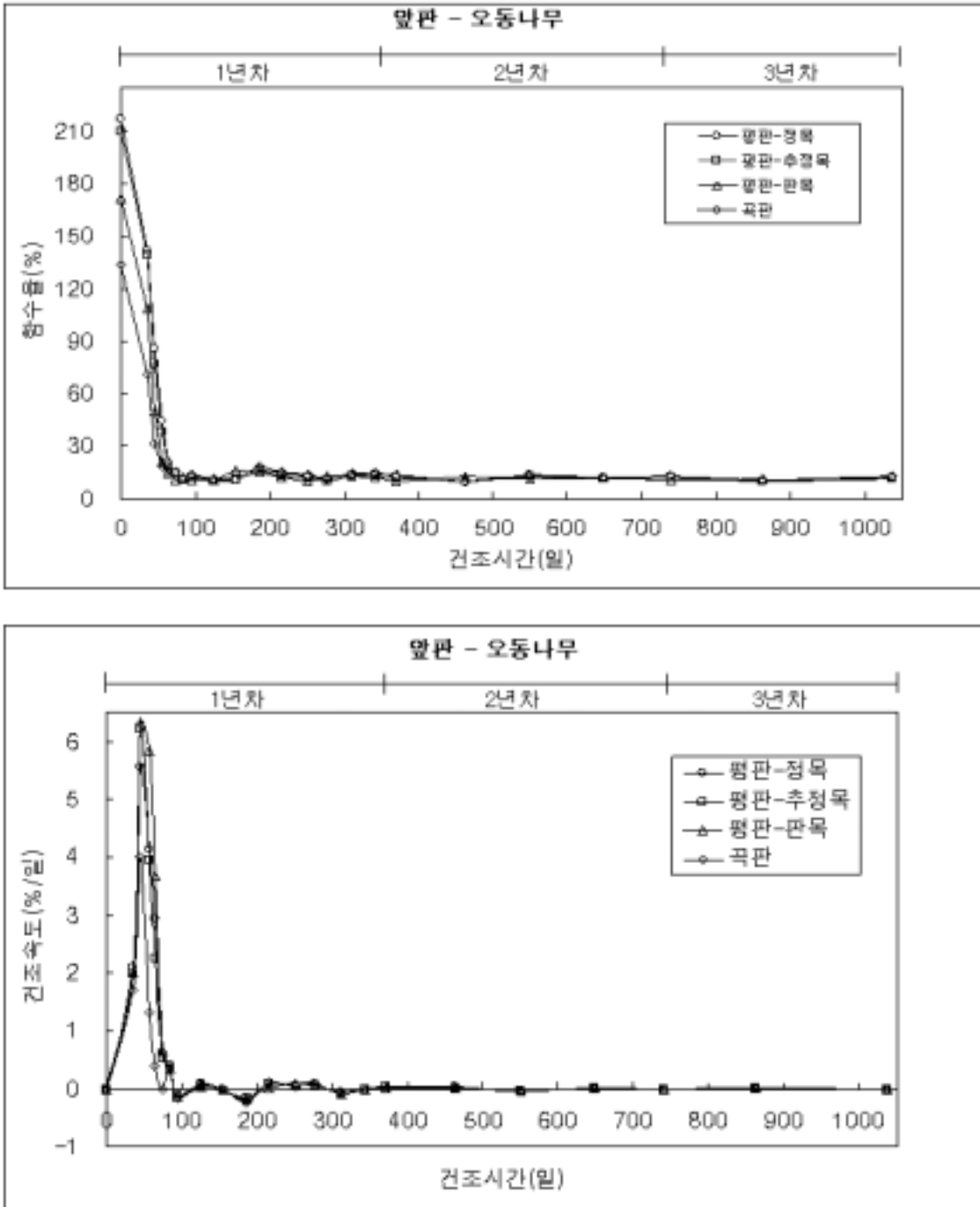


Figure 3. 2. 19. 가야금 앞판용 오동나무재의 천연건조중 함수율 감소경과 (위)와 건조속도 곡선 (아래)

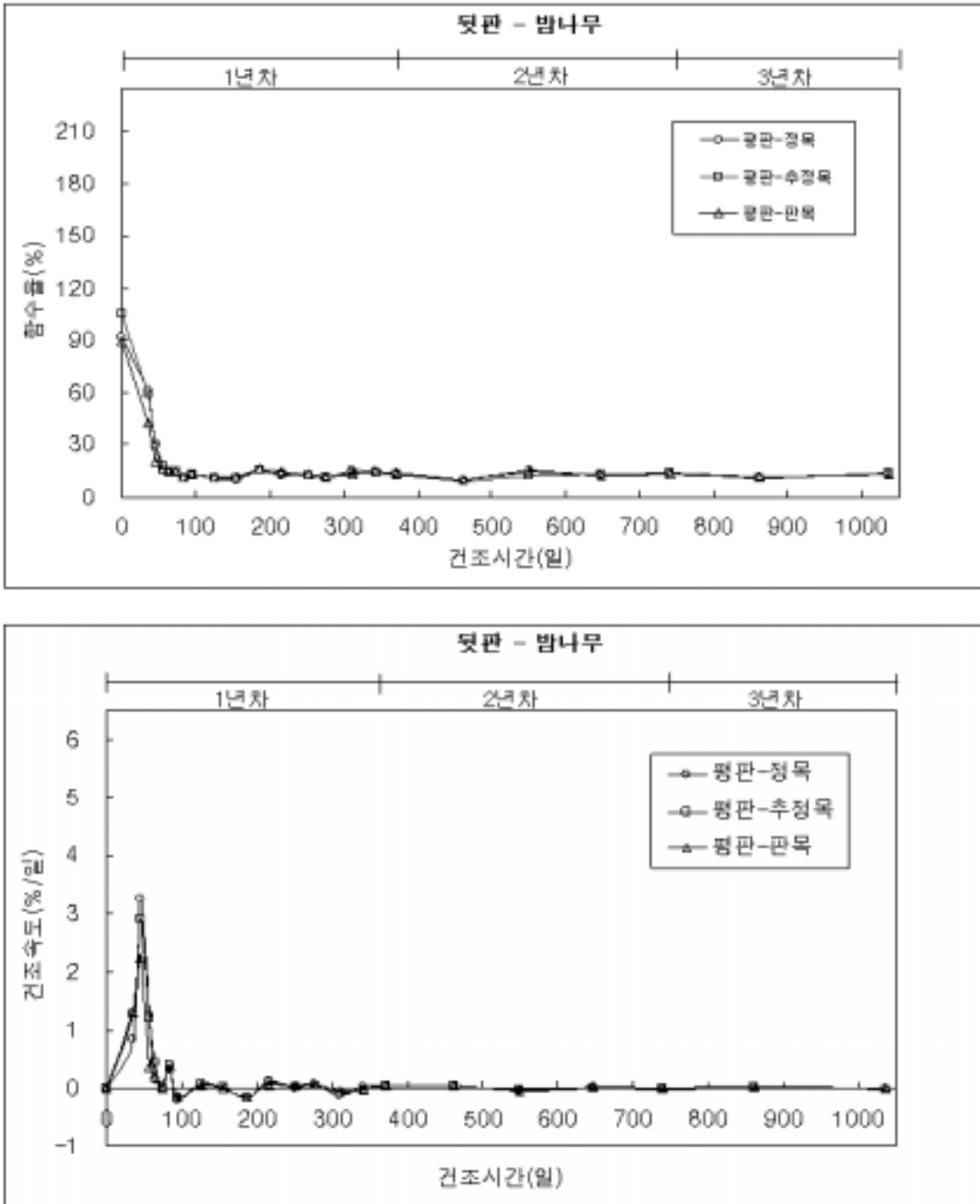


Figure 3. 2. 20. 가야금 뒷판용 밤나무재의 천연건조중 함수율 감소경과 (위)와 건조속도 곡선 (아래)

다) 두께와 폭 수축율

가야금 앞판 및 뒤판용 평판 천연건조재의 두께와 폭 수축율을 Table 3. 2. 9.에 나타내었다.

오동나무의 경우 정목판재나 판목판재라 할지라도 두께 수축율과 폭 수축율의 차이가 크지 않아 접선방향과 방사방향간의 수축이방성이 심하지 않는 것으로 조사되었다. 반면에 밤나무재의 경우 횡단방향 수축이방성이 오동나무재 보다 큰 것으로 조사되었고, 특히 횡단방향 수축율의 합이 오동나무와 비교하여 상당히 큰 것으로 조사되었다. 이러한 건조수축율 값에 관한 자료는 악기용 부재의 생재 치수를 결정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 3. 2. 9. 가야금 앞판 및 뒤판용 평판 천연건조재의 두께 및 폭 수축율

용도	수종	재종		건조 수축율(%)		
				두께	폭	합계
앞판 용재	오동나무	平板	정목	1.49	1.75	3.24
			추정목	2.84	1.38	4.22
			판목	1.27	1.49	2.76
뒤판 용재	밤나무	平板	정목	5.25	2.56	7.81
			추정목	3.22	3.68	6.89
			판목	2.06	2.77	4.83

라) 재면할렬과 횡단면할렬

가야금용재의 천연건조중에 발생한 재면할렬과 횡단면 할렬의 발생정도를 Table 3. 2. 10.에 나타내었다.

오동나무의 경우 곡판에서는 재면할렬과 횡단면 할렬이 전혀 발생하지 않았고, 평판의 경우에도 재면할렬만이 극히 경미하게 발생하였을 뿐, 횡단면 할렬은 전혀 발생하지 않았다.

오동나무재의 경우 비중이 적고, 대기 온도인 저온건조가 이루어지므로 인하여 수분경사가 완만하게 형성되었기 때문인 것으로 해석된다.

한편 밤나무재의 경우도 할렬의 발생이 경미한 편이었으나 오동나무재 보다는 발생정도가 심하였다. 이는 밤나무재의 경우 비중이 높고, 투과성이 불량하여 상대적으로 수분경사가 심하게 형성되었기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3. 2. 10. 가야금 앞판 및 뒤판용 천연건조재의 재면할렬과 횡단면할렬 발생 정도

용도	수종	재종	재면할렬		횡단면할렬		
			발생율 (%) <sup>1</sup>	평균 길이 (mm/분)	발생율 (%) <sup>1</sup>	평균 길이 (mm/분)	
앞판용재	오동나무	곡판	0	0	0	0	
		平板	정목	20	19.4	0	0
			추정목	20	8.3	0	0
			판목	0	0	0	0
뒤판용재	밤나무	정목	20	30.8	20	2.1	
		추정목	40	22.4	40	3.6	
		판목	0	0	0	0	

주) <sup>1</sup> (할렬 발생본수/총 시험재 수) x 100% 임.

## 2) 고주파진공건조

### 가) 가야금 앞판용 오동나무재의 건조중함수율과 건조속도

가야금 앞판용 오동나무 平板 장재의 고주파진공건조중의 건조중 함수율과 건조속도를 각각 Figure 3. 2. 21.과 Figure 3. 2. 22.에 각각 나타내었고, Figure 3. 2. 23.과 Figure 3. 2. 24.는 오동나무 평판 단재의 고주파진공건조중의 함수율 경과와 건조속도를 각각 나타 낸 것이다.

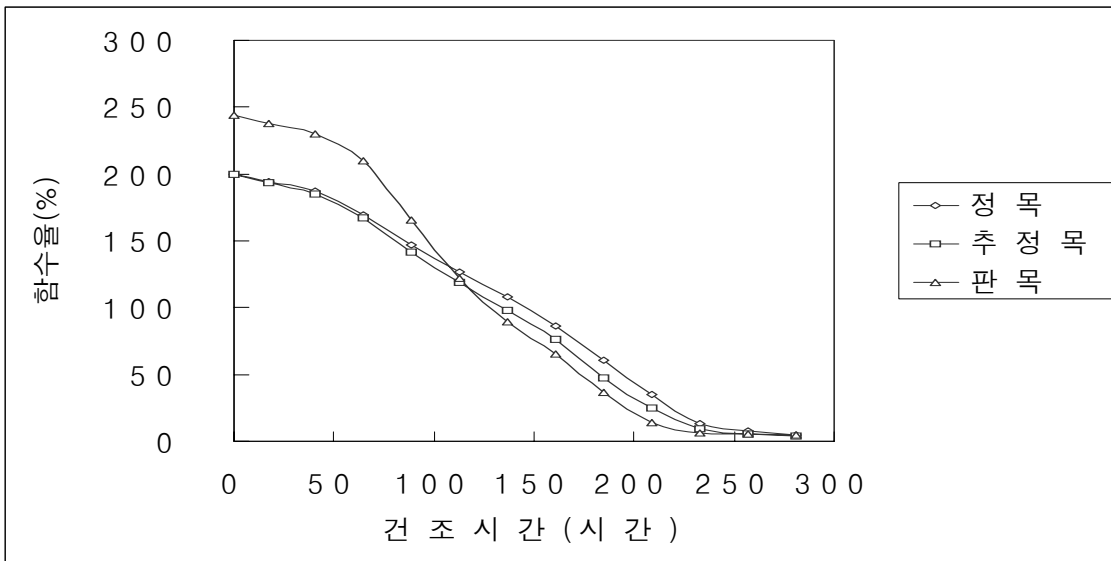


Figure 3. 2. 21. 가야금 앞판용 오동나무 평판 장재의 고주파진공건조 곡선

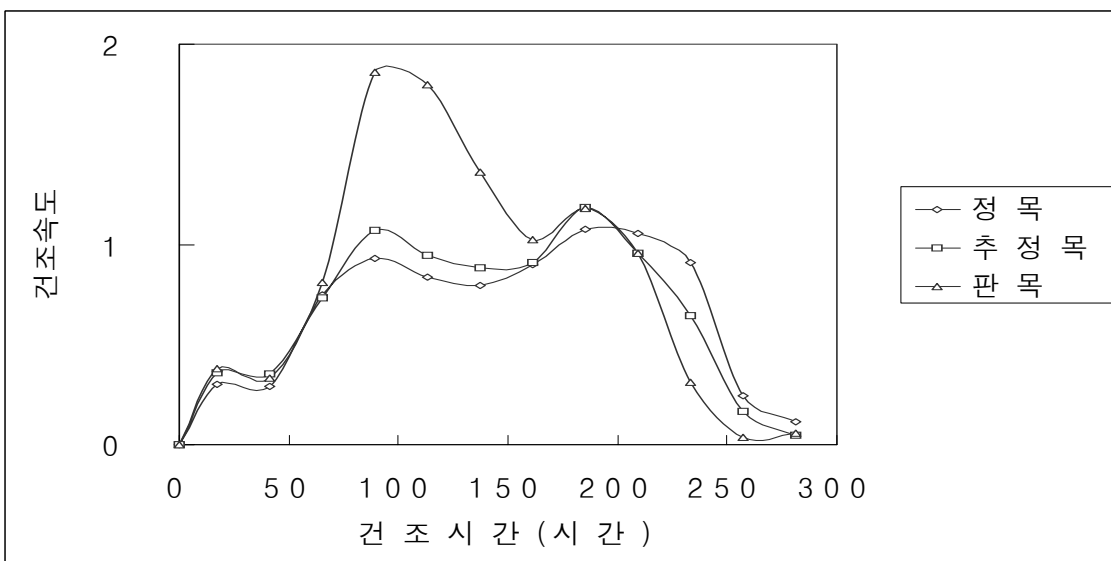


Figure 3. 2. 22. 가야금 앞판용 오동나무 평판 장재의 고주파진공건조중의 건조속도

앞판용 오동나무 평판 장재의 경우 생재에서 함수율 약 4 ~ 5%까지 건조되는데 281 시간이 소요되었고, 평판 단재의 경우 257시간 정도가 소요되었다. 재종에 관계없이 천연건조 시간보다 매우 짧은 시간이 소요되었을 뿐 아니라, 옥내용 약기의 이용함수율 이하로 건조하는 것이 가능하였다. 그러나 고주파진공건조인 점을 감안해 볼 때 다소 소요시간이 긴 편이었으나 이것은 음향기능성을 증진시키고자 45 °C이하의 저온으로 건조하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 단재의 경우 장재와 비교하여 건조소요 시간이 짧은 것은 고주파진공건조의 경우 건조속도가 투과성에 의하여 크게 좌우되어 섬유방향으로의 길이가 짧은 단재가 수분유통에 유리하기 때문인 것으로 생각된다.

건조속도의 경우 건조중 재온의 상승 또는 초기함수율에 따라 크게 좌우 되는 것으로 나타났다.

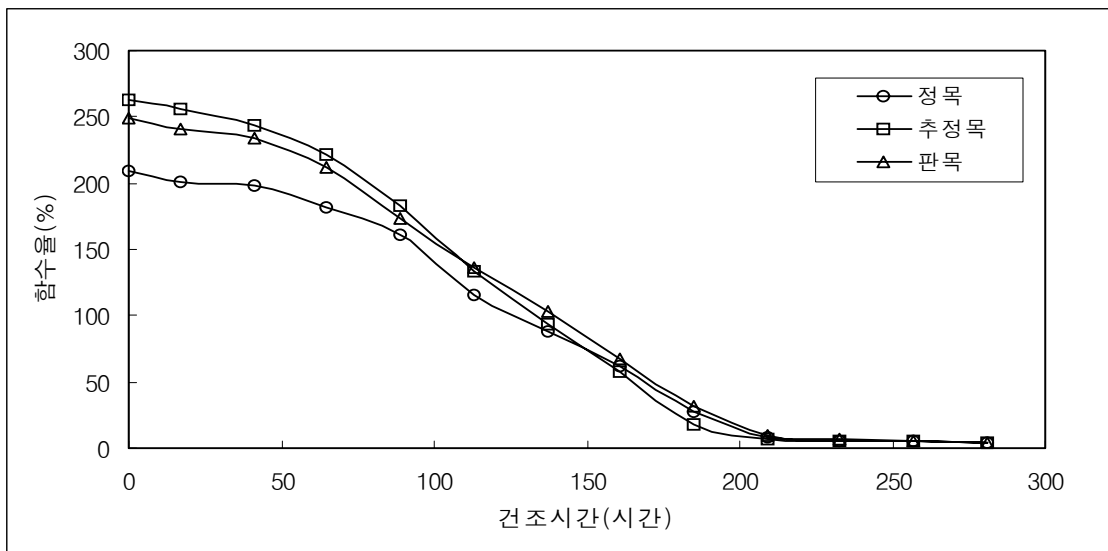


Figure 3. 2. 23. 가야금 앞판용 오동나무 평판 단재의 고주파진공건조 곡선

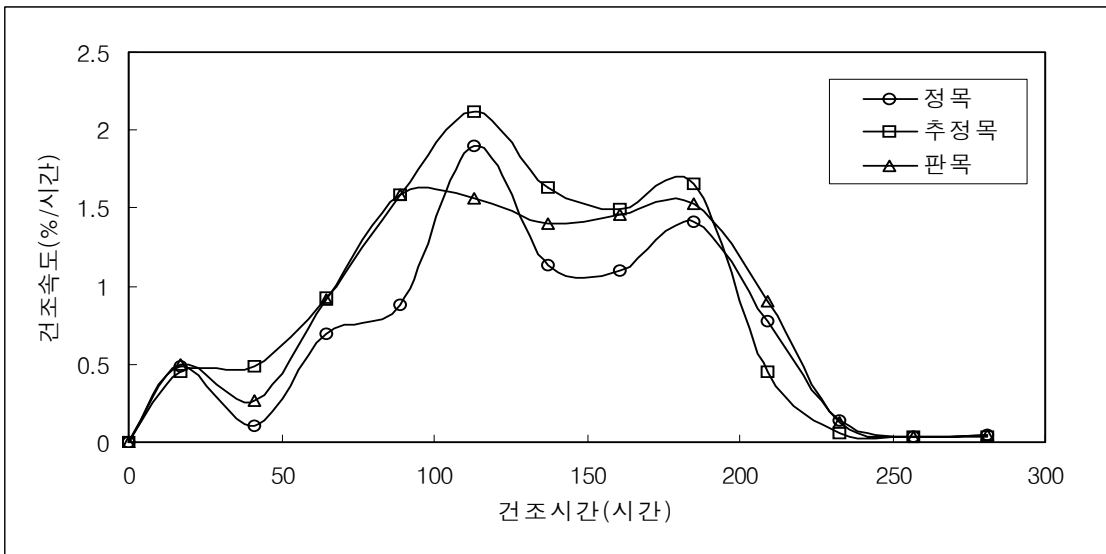


Figure 3. 2. 24. 가야금 앞판용 오동나무 평판 단재의 고주파진공건조중의 건조속도

다) 가야금 뒤판용 밤나무재의 건조중합수율과 건조속도

가야금 뒤판용 밤나무 平板 장재의 고주파진공건조중의 건조중 합수율과 건조속도를 각각 Figure 3. 2. 25와 Figure 3. 2. 26.에, 그리고 평판 단재의 건조중합수율과 건조속도를 Figure 3. 2. 27.과 Figure 3. 2. 28에 각각 나타내었다.

밤나무 평판의 경우 건조개시후 281시간만에 장재는 약 7%까지, 그리고 단재는 약 6%까지 건조가 가능하였다. 밤나무 역시 천연건조와 비교하여 고주파진공건조 시간이 매우 짧게 소요되었으며 옥내용 약기용재의 이용합수율 수준이하로 건조하는 것이 가능하였다. 그러나 평균 건조속도가 장재의 경우 0.29% ~ 0.37%/시간으로서 오동나무의 0.68 ~ 0.84 %/시간과 비교하여 매우 느린 편이었다. 이것은 초기합수율이 낮아 고주파진공건조 고유의 모세관유동을 촉진시키는 구동력이 발휘될 수 있는 구간이 상대적으로 짧았을 뿐 아니라, 투과성 또한 불량하기 때문인 것으로 판단된다. 정목, 추정목 및 판목 판재간의 차이는 초기합수율에 기인한 것으로 생각된다.



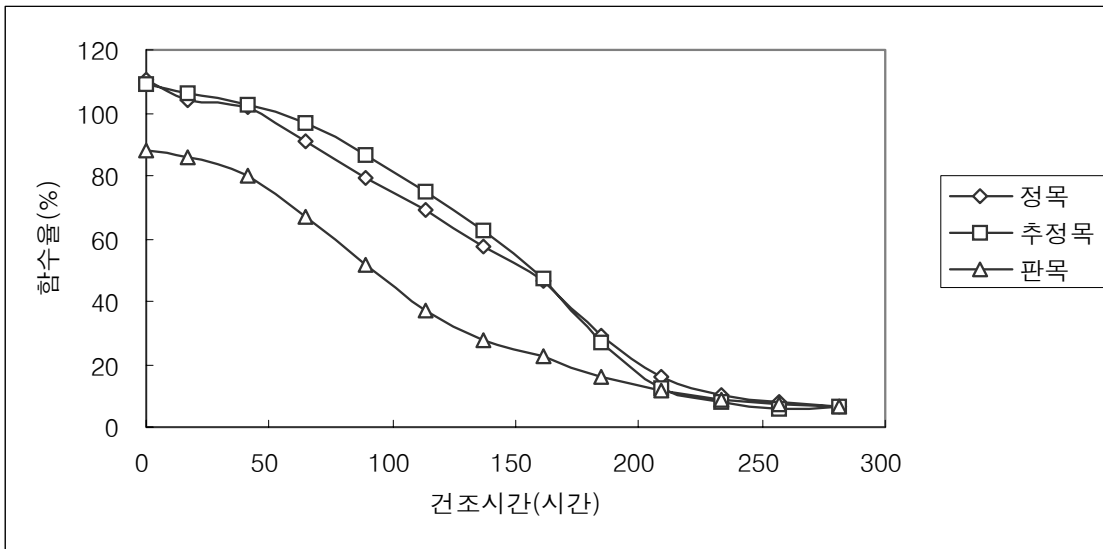


Figure 3. 25. 가야금 뒤펀용 밤나무 평판 장재의 고주파진공건조 곡선

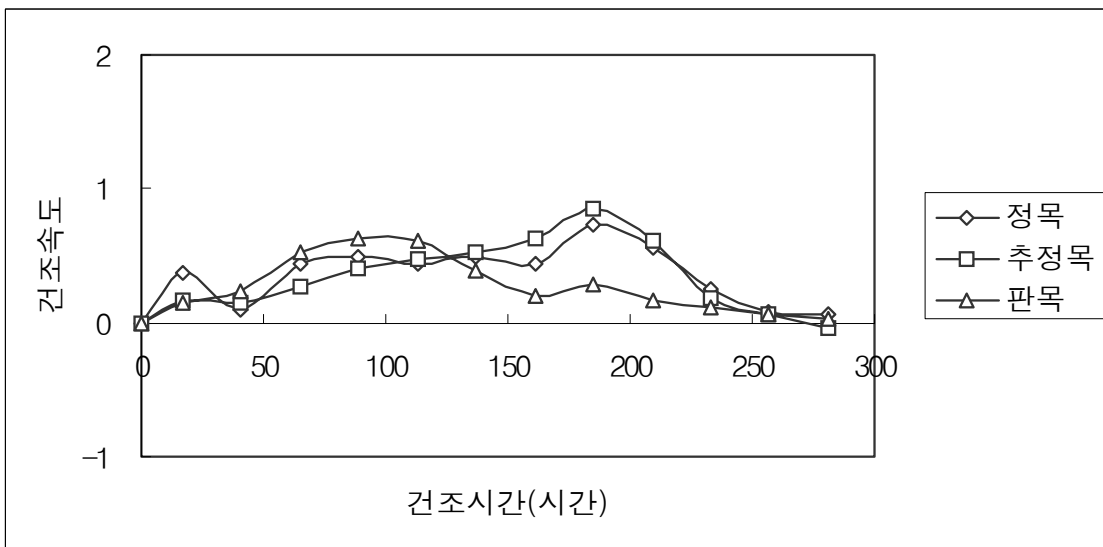


Figure 3. 26. 가야금 뒤펀용 밤나무 평판 장재의 고주파진공건조중의 건조속도

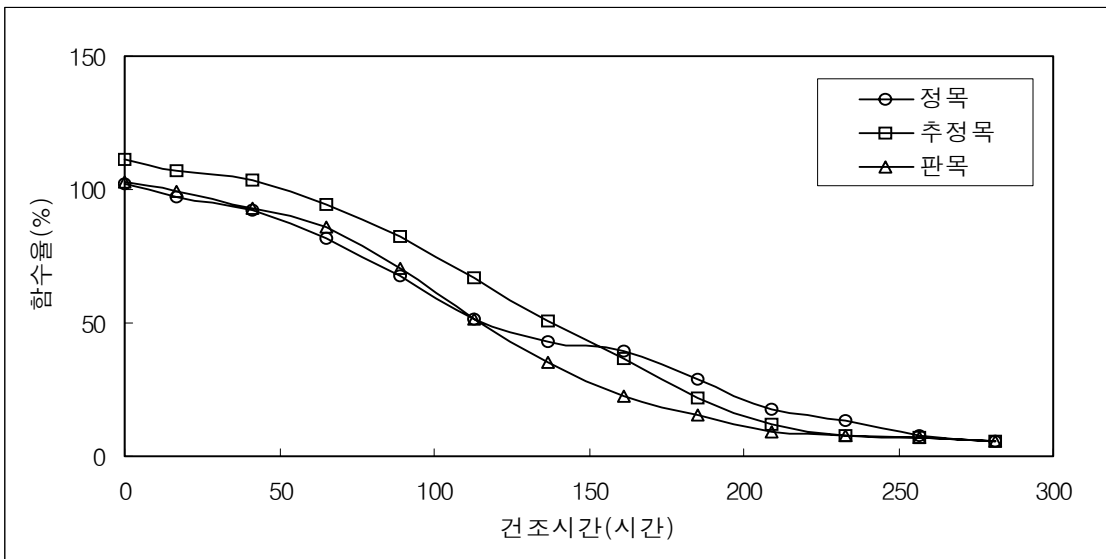


Figure 3. 2. 27. 가야금 뒤판용 밤나무 평판 단재의 고주파진공건조 곡선

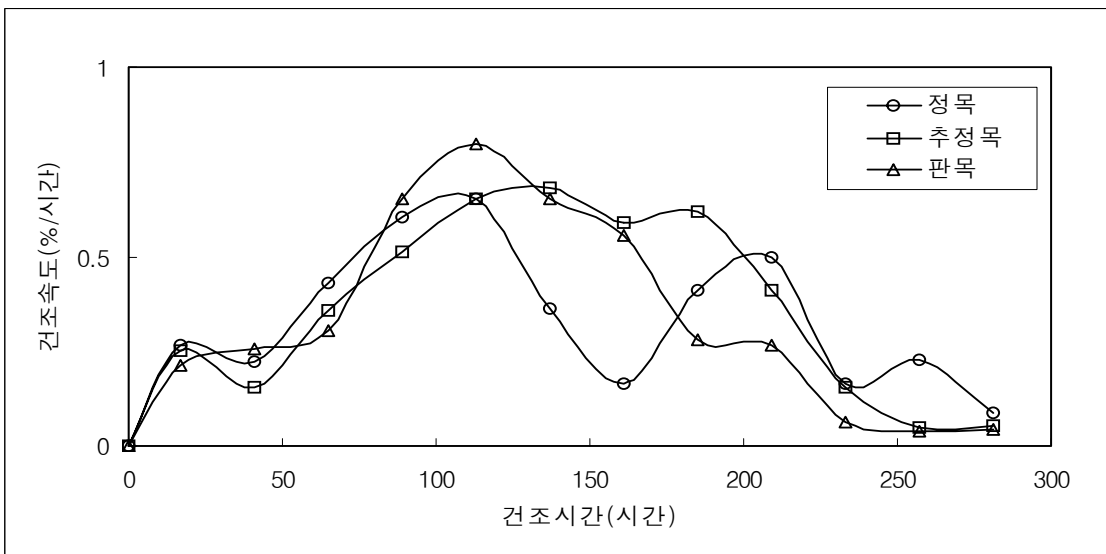


Figure 3. 2. 28. 가야금 뒤판용 밤나무 평판 단재의 고주파진공건조중의 건조속도

라) 두께와 폭 수축율 및 곡률높이 변화율

고주파진공건조재의 두께와 폭 수축율 및 오동나무 曲板의 곡률높이 변화율을 Table 3. 2. 11.에 나타내었다.

오동나무 곡판의 곡률높이 변화율은 14.68%이었으며, 이러한 자료는 생재상태에서 오동나무 曲板의 중앙부 시고값을 결정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

정목판재의 경우 두께 수축율이 폭 수축율 보다 훨씬 크게 나타난 반면, 판목판재의 경우 두 수축율간의 차이가 크지 않는 것으로 나타났는데, 이것은 고주파진공건조중 재면에 대하여 수직방향으로 약 10,000 kgf/m<sup>2</sup> 크기의 압체력이 가해지므로써 두께 수축은 촉진되는데 반하여 폭 방향 수축은 억제되었기 때문인 것으로 생각된다.

한편 밤나무재의 경우 오동나무재 보다 건조수축율이 좀 더 큰 경향을 보였다. 이것은 밤나무재의 비중이 큰 것에 기인한 것으로 판단된다.

Table 3. 2. 11. 가야금 앞판 및 뒤판용 평판 장재의 고주파진공건조중 두께 및 폭 수축율과 곡판의 곡률높이 변화율

구분	수종	재종		수축율(%)			곡률높이 변화율 (%)
				두께	폭	계	
앞판 용재	오동나무	曲板		4.03	3.05	7.08	14.68
		平板	정목	5.17	2.52	7.69	-
			추정목	3.69	3.28	6.97	-
			판목	2.98	3.34	6.32	-
뒤판 용재	밤나무	平板	정목	6.42	1.87	8.29	-
			추정목	7.80	3.40	11.20	-
			판목	5.79	3.56	9.35	-

마) 재면할렬과 횡단면할렬

가야금융재의 고주파진공건조중에 발생한 재면할렬과 횡단면 할렬의 발생정도를 Table 3. 2. 12.에 나타내었다.

Table 3. 2. 12. 고주파진공건조제의 재면할렬과 횡단면 할렬 발생 정도

용도	수종	재종	재면할렬		횡단면할렬		
			발생율 (%) <sup>1</sup>	평균 길이 (mm/본)	발생율(%) <sup>1</sup>	평균 길이 (mm/본)	
앞판 용재	오동나무	곡판	0	0	0	0	
		平板	정목	0	0	0	0
			추정목	0	0	0	0
			판목	0	0	0	0
뒤판 용재	밤나무	정목	0	0	0	0	
		추정목	0	0	0	0	
		판목	0	0	0	0	

주) <sup>1</sup> (할렬 발생분수/총 시험재 수) x 100% 임.

수종과 재종에 관계없이 재면할렬과 횡단면할렬 모두 전혀 발생하지 않아 천연건조와 비교하여 건조시간의 측면에서 뿐만아니라 건조수율의 측면에서도 유리한 것으로 평가되었다. 다만 음향적 기능성에 대해서는 별도의 시험을 통해서 비교·분석해 볼 필요가 있는 것으로 생각된다.

## 다. 결론

가야금융재의 천연건조 및 고주파진공건조 시험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 평균온도와 평균상대습도로부터 계산된 기후치 평형함수율 또한 1년차 12.8%, 2년차 11.5%, 그리고 3년차 11.4%로 큰 차이가 없었다.

- 둘째, 가야금 앞판용 오동나무재 천연건조의 경우 200% 이상의 생재함수율에서 건조가 개시된 이후 함수율이 지속적으로 감소하여 84일이 경과한 시점에서 약 11% 정도의 값을 나타내었고, 그 이후 부터는 기후치 평형함수율의 변동에 연동하여 흡습과 방습을 되풀이 할 뿐 옥내의 이용함수율 수준인 6 ~ 8%까지의 함수율의 감소는 발견되지 않았다.
- 셋째, 가야금 뒤판용 밤나무재 천연건조의 경우 전반적으로 오동나무재와 유사한 경향을 보였으나, 최고 건조속도가 제 1년차의 봄철에 약 2 ~ 4%/일 로서 오동나무재 보다 상당히 낮은 값을 나타내었다.
- 넷째, 오동나무 천연건조의 경우 곡판에서는 재면할렬과 횡단면 할렬이 전혀 발생하지 않았고, 평판의 경우에도 재면할렬만이 극히 경미하게 발생하였을 뿐, 횡단면 할렬은 전혀 발생하지 않았다. 또한 밤나무재의 경우도 할렬의 발생이 경미한 편이었으나 오동나무재 보다는 발생정도가 심하였다.
- 다섯째, 오동나무 평판 장재의 고주파진공건조의 경우 생재에서 함수율 약 4 ~ 5%까지 건조되는데 281 시간이, 그리고 평판 단재의 경우 257시간 정도가 소요되었으며, 재종에 관계없이 천연건조 시간보다 매우 짧은 시간이 소요되었을 뿐 아니라, 옥내용 약기의 이용함수율 이하로 건조하는 것이 가능하였다.
- 여섯째, 밤나무 평판의 경우 고주파진공건조 개시후 281시간만에 장재는 약 7%까지, 그리고 단재는 약 6%까지 건조가 가능하였으며, 오동나무재와 비교하여 건조속도가 상당히 느린 편이었다.
- 일곱째, 오동나무 곡판의 곡률높이 변화율은 14.68%이었고, 정목판재의 경우 두께 수축율이 폭 수축율 보다 훨씬 크게 나타난 반면, 판목판재의 경우 두 수축율간의 차이가 크지 않는 것으로 나타났는데, 이것은 고주파진공건조중 재면에 대하여 수직방향으로 약 10,000 kgf/m<sup>2</sup> 크기의 압체력이 가해지므로써 두께 수축은 촉진된데 반하여 폭 방향 수축은 억제되었기 때문인 것으로 생각된다.
- 여덟째, 고주파진공건조의 경우 수종과 재종에 관계없이 재면할렬과 횡단면할렬 모두 전혀 발생하지 않아 천연건조와 비교하여 건조시간의 측면에서 뿐 아니라 건조수율의 측면에서도 유리한 것으로 평가되었다.

## 5. 결 언

음향기능성 건조기술 개발의 대상 약기로 장고와 같은 筒악기와 대금 등과 같은 筒竹 악기, 그리고 가야금을 선정하였다. 筒악기의 경우 오동나무를 공시 수종으로 선정하여 수증기담처리 효과와 횡단면 코팅처리 효과를 중점적으로 검토하였고, 筒竹 악기의 경우 수증기담처리 효과 및 진공오-븐건조 효과를 검토하였다. 그리고 가야금재의 경우 오동나무와 밤나무재를 공시 수종으로 선정하여 천연건조와 고주파진공건조를 비교·분석하였다.

이상의 시험을 통하여 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

### 가. 장고용 부재의 송풍 오-븐 건조시험

첫째, 건조개시 직후의 중량감소량은 C-NC, C-CO, V-NC, V-CO의 순으로 크게 나타났고, 특히 수증기담처리재의 중량감소량은 무처리재와 비교하여 非코팅처리재에서는 약 50%, 그리고 엔드코팅처리재에서는 약 40% 정도에 불과하였다.

둘째, 수증기담처리재의 경우 내피면을 통해서 증발된 수분이 통공내에 축적되면서 내피면을 통한 수분증발을 지연시키므로써 통피층내에 존재하는 자유수가 일시에 고갈되지 않도록 작용한 것으로 추론되었다.

셋째, 수증기담 처리의 경우 건조실내 송풍 오-븐의 습도를 조절하지 않는다 할지라도 건조 속도를 조절해 갈 수 있는 자발력이 제공되고 있는 것으로 해석되었다.

넷째, V-CO처리재의 경우 건조초기에는 V-NC처리와 유사한 분포를 보였으나, 건조초기 이후 통공, 외층, 내층의 순으로 절대수증기압이 큰 분포를 보이면서 V-NC처리와는 전혀 다른 분포모형이 관찰되었다. 이것은 건조시간이 경과할수록 내피면에서 증발된 수증기가 통공내에 축적되기 때문인 것으로 해석되며, 수증기담처리는 엔드코팅처리와 병행하여 적용할 때 처리효과가 극대화 될 수 있을 것으로 판단된다.

다섯째, 재면할렬과 윤활은 모든 처리재에서 발생되지 않았으나 C-NC처리재와 V-NC처리재 등 엔드코팅을 실시하지 않은 초갈이에서는 건조초기에 횡단면할렬 들이 심하게 발생한 것을 관찰할 수 있었다.

#### 나. 筒竹의 송풍 오-븐 및 진공 오-븐 건조시험

첫째, 모든 죽종이 건조방법이나 건조조건에 관계없이 생재에서 함수율 약 9%이하까지 건조되는데 23일 정도 소요되었다.

둘째, 송풍오-븐건조의 AS 건조스케줄의 건조초기 건조속도는 약 16%/일 (분죽)이나 약 12%/일 (왕대)로서 AM 건조스케줄이나 진공오-븐건조의 초기 건조속도 보다 훨씬 빠른 것으로 나타났으나 건조초기 직후 급격하게 감소하여 유사하거나 오히려 더 느리게 나타났다.

셋째, 진공오-븐건조의 경우 송풍오-븐건조와 비교하여 50 ~ 60 ℃의 저온스케줄을 적용하였음에도 불구하고 유사한 건조속도를 나타내었다.

넷째, 진공오-븐건조재의 두께수축율과 횡단면적 수축율은 송풍오-븐건조의 수축율과 비교하여 훨씬 적었다. 이는 저온의 조건으로 건조하고, 또한 건조중 材内外간에 형성된 절대 수증기압의 차이에 의해서 세포벽의 찌그러짐이 상대적으로 적었기 때문인 것으로 해석된다.

다섯째, 외주할의 경우 죽종이나 건조스케줄 및 건조방법에 관계없이 모든 시험편에서 전혀 발생하지 않았다. 횡단면적 수축율이 무려 12.77 ~ 16.24%일 정도로 크게 나타났음에도 불구하고 외주할이 발생하지 않은 것은 내피면으로부터 증발된 수증기가 수증기담 처리에 의해서 筒空내에 축적되어 있다가 건조온력이 임계값에 이르면 내피면에 수분을 제공 해 줌으로써 응력을 완화시켜 주기 때문인 것으로 사료된다.

#### 다. 가야금용재의 천연건조 및 고주파진공건조 시험

첫째, 가야금 앞판용 오동나무재 천연건조의 경우 200% 이상의 생재함수율에서 건조가 개시된 이후 함수율이 지속적으로 감소하여 84일이 경과한 시점에서 약 11%정도의 값을 나타내었고, 그 이후 부터는 기후치 평형함수율의 변동에 연동하여 흡습과 방습을 되풀이 할 뿐 옥내의 이용함수율 수준인 6 ~ 8%까지의 함수율의 감소는 발견되지 않았다.

둘째, 가야금 뒤판용 밤나무재 천연건조의 경우 전반적으로 오동나무재와 유사한 경향을 보였으나, 최고 건조속도가 제 1년차의 봄철에 약 2 ~ 4%/일 로서 오동나무재 보다 상당히 낮은 값을 나타내었다.

셋째, 오동나무 천연건조의 경우 곡판에서는 재면할렬과 횡단면 할렬이 전혀 발생하지 않았고, 평판의 경우에도 재면할렬만이 극히 경미하게 발생하였을 뿐, 횡단면 할렬은 전혀 발

생하지 않았다. 또한 밤나무재의 경우도 할렬의 발생이 경미한 편이었으나 오동나무재 보다는 발생정도가 심하였다.

넷째, 오동나무 평판 장재의 고주파진공건조의 경우 생재에서 함수율 약 4 ~ 5%까지 건조되는데 281 시간이, 그리고 평판 단재의 경우 257시간 정도가 소요되었으며. 재종에 관계없이 천연건조 시간보다 매우 짧은 시간이 소요되었을 뿐 아니라, 옥내용 약기의 이용함수율을 이하로 건조하는 것이 가능하였다.

다섯째, 밤나무 평판의 경우 고주파진공건조 개시후 281시간만에 장재는 약 7%까지, 그리고 단재는 약 6%까지 건조가 가능하였으며, 오동나무재와 비교하여 건조속도가 상당히 느린 편이었다.

여섯째, 고주파진공건조의 경우 수종과 재종에 관계없이 재면할렬과 횡단면할렬 모두 전혀 발생하지 않아 천연건조와 비교하여 건조시간의 측면에서 뿐 아니라 건조수율의 측면에서도 유리한 것으로 평가되었다.



### 제3절 음향기능제품의 도장기술 개발 및 표준화

#### 1. 음향 기능성 도료의 종류에 따른 음향특성

##### 가. 서론

목재악기는 다른 악기들에 비해 쉽게 가공될 수 있는 목재를 통하여 만들어져 오랜 시간을 인류의 역사와 함께 발전되어 왔다. 목재악기는 대체적으로 전통적인 방식에 의존하고 있고, 체계적이고 과학적인 연구가 시작된 지는 오래되지 않았다. 또한, 목재악기에 대한 연구는 목재가 갖는 성질이 악기의 음향적 성능을 분석하는 방향으로 진행되어왔다.

악기용 소재로서의 목재가 가지는 점탄성적 성질을 비롯한 목재악기에 대한 연구는 주로 함수율과 주파수에 따른 연구가 주를 이루어져 왔으며, 이후 악기용 목재의 음향성능을 파악하기 위해 목재의 점탄성을 응용한 연구도 진행되었다. 국내에서도 바이올린의 소재부분에 대한 진동모드와 음향성능과의 상관관계 구명에 대한 연구가 진행되어 왔다.

목재 현악기의 음향성능은 주로 사용된 목재가 가진 성질에 의해 결정되고, 현악기의 외관과 내구성의 향상을 위해 목재의 표면에 도장처리를 해야만 한다. 내구성 향상을 위해 현악기용 목재 표면에 코팅된 도막은 현악기의 음향적인 성능에 여러 가지 영향을 미치게 되지만, 현재까지 이러한 도막에 대한 음향성능을 측정하고 이를 판단하는 기술은 대단히 미약하였다. 또한 현악기용 도료의 음향적 성질에 대한 자료 또한 극히 부족한 실정이다. 본 논문에서는 도료의 종류에 따라 형성된 도막이 현악기의 음향성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 FFT를 통하여 공명주파수와 댐핑값을 구하여 계산을 통해 얻어진 음향적 성능과 점탄성 측정장치인 DMTA를 이용한 점탄성적 성질 그리고 sound level tester를 통하여 얻어진 음향성능을 비교 분석하고 현악기용 도료에 대한 체계적인 자료구축을 위해 연구하였다.

## 나. 공시재료

본 실험에서는 European spruce (M.C. : 10.5%)를 사용하였다. 음향실험용 시편은 European spruce를 Figure 3. 3. 1.-(a)와 같은 크기로 재단을 하여 사용하였다. 점탄성실험용 시편은 Figure 3. 3. 1.-(b)와 같은 크기로 재단하여 사용하였다.

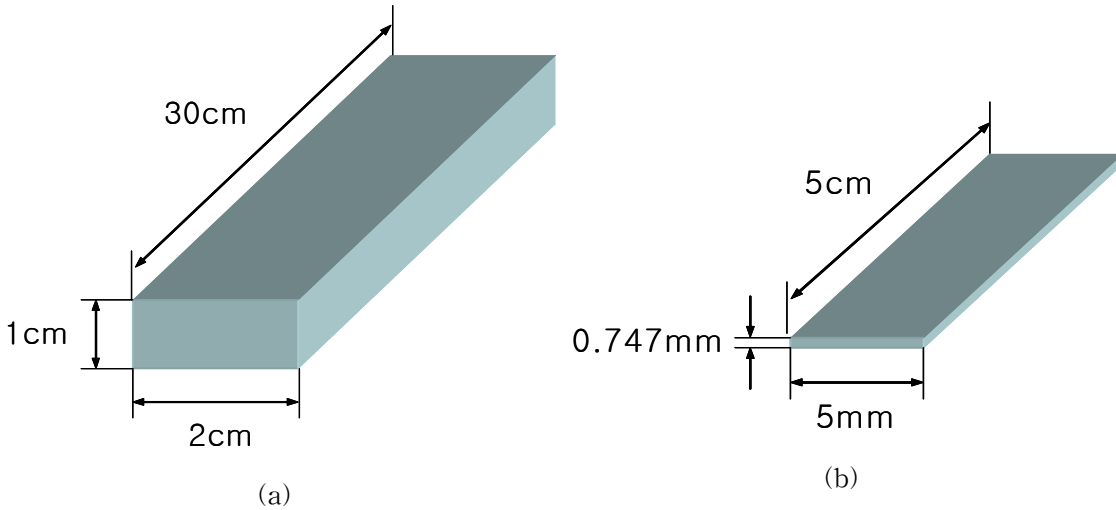


Figure 3. 3. 1. 실험용 목재 시편의 크기

또한 실험에 사용된 도료의 종류는 다음과 같다.

- 우레탄 락카도료
- 우레탄 상도용 도료
- 캐슈(cashew)
- UV 경화형 우레탄 도료
- 오일스테인계 도료

우레탄 락카도료와 오일 스테인계 도료, 우레탄 상도용 도료는 삼익약기(주)에서 분양받았으며, 캐슈는 현대페인트(주)에서 분양받아 사용하였다. UV 경화형 우레탄 도료는 실험실에서 제조하여 사용하였다.

## 다. 실험방법

### 1) 시편의 제작

준비된 가문비나무 시편은 샌드페이퍼(#320)를 이용하여 표면을 연마한 후 음향기능성 도료를 No. 22 바코터(bar coater)를 사용하여 균일하게 도포하였고, 이 경우 습도막의 두께  $50.3\mu\text{m}$ 로 나타났다. 도장된 각 도료의 경화조건은 분양업체인 A에서 제시한 경화조건에 따라 실시하였다. 우레탄 상도도료와 오일스테인 도료는 상온에서 24시간 건조하였고, UV 경화형 에폭시 도료는 Figure 3. 3. 2의 컨베이어 벨트형 UV 경화장치를 이용하여 경화시켰다. 이때의 사용된 램프는 고압수은램프이며 조사된 광량은  $1120\text{ mJ/cm}^2$ 이었다. 경화처리 후 도막의 두께는 약  $20\pm 2\mu\text{m}$ 으로 나타났다.



Figure 3. 3. 2. UV 경화장치

## 2) 음향성능 측정

미도장 시험편과 도장처리 목재시험의 공명주파수와 댐핑값(damping factor)을 측정하여, 음향기능성 도료에 따른 음향적 성능을 비교하였다. 사용된 기기는 DYTRAN사의 5.3 mv/g의 감도를 갖는 accelerometer와 94.3 mv/LBF의 감도를 갖는 impact hammer를 사용하여 측정하였다. 시험편의 자유진동을 위해 Figure 3. 3. 3.과 같이 공중에 매달았으며, nodal point를 고려하여 고무줄의 위치를 정하고 지지대에 고정시켰다. 측정된 진동을 FFT 시스템을 통하여 분석하여 공명주파수와 댐핑값을 얻었다.

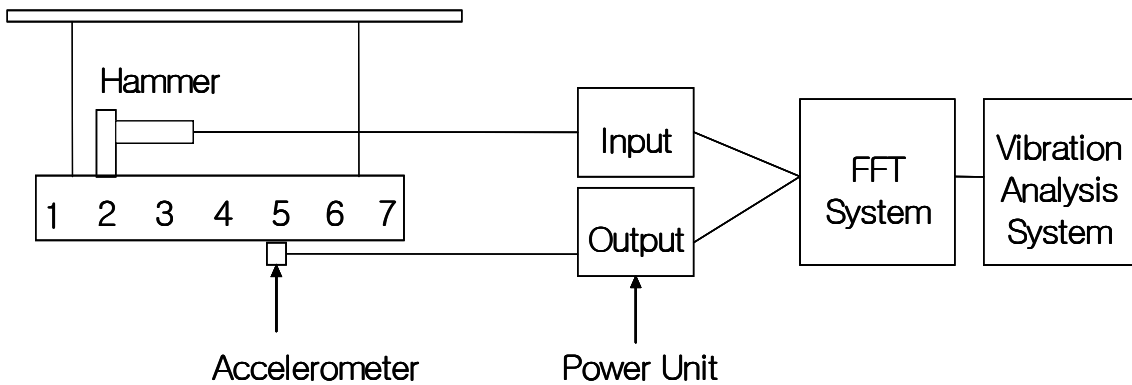


Figure 3. 3. 3. FFT analyzer의 모식도

Figure 3. 3. 4와 같이 얻어진 주파수의 값을 통하여 Mode 별로 구분을 하고, 얻어진 공명 주파수의 값을 확인하였다. 또한 이때 댐핑값도 함께 얻을 수가 있었다.

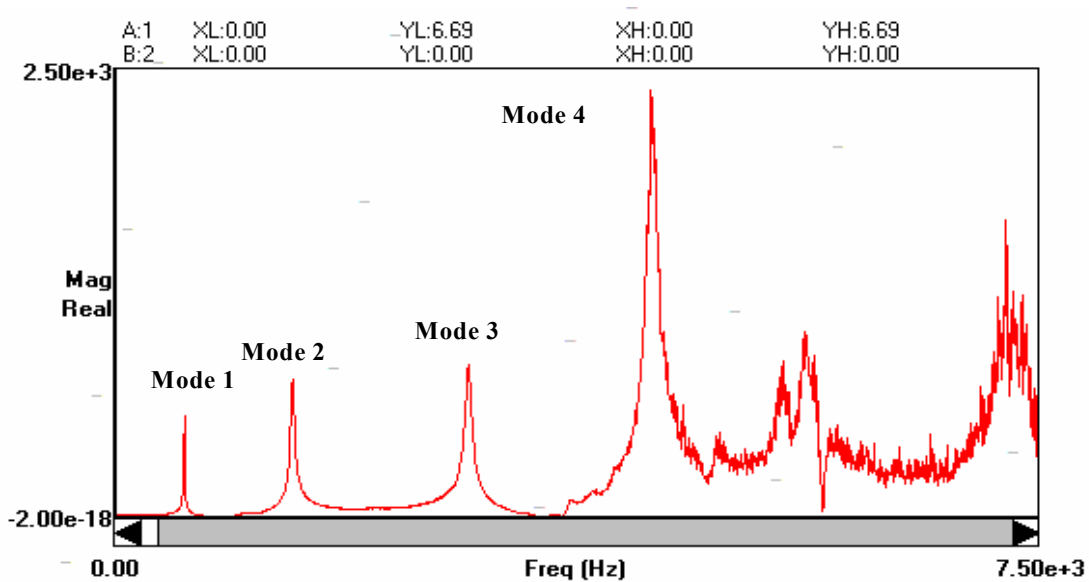


Figure 3. 3. 4. FFT를 통하여 얻어진 주파수의 값

측정된 공명주파수와 댐핑값을 Timoshenko beam 이론을 기초로 한 TGH (Timoshenko-Goens-Hearmon) 이론의 식 (3. 1. 28)~(3. 1. 36)을 이용하여 동적탄성계수(elastic modulus, E)와 전단탄성계수(shear modulus, G)를 얻을 수 있다.

식 (3. 1. 36)에서의 선형회귀식 X, Y로부터 인장저장탄성율(E)과 전단저장탄성율(G)을 얻는다. 음고(pitch)는 음악의 심리적인 특성을 나타내는 것으로 음계에 따른 주파수의 높고낮음을 통해 파악하는 것으로 공명주파수를 통하여 확인할 수 있다.

목재시편이 가지는 밀도( $\rho$ )와 E, G값의 관계를 통하여 음향기능성 도료 도막이 가지는 음향성능을 분석하였다. 악기에서 음의 평가는 음반응성을 나타내는데 시간축 평가와 소리의 울림, 깊이, 균형감 등의 음색을 나타내는 주파수축 평가로 나누어진다. 시간축 평가는  $E\rho$ 와 관

계있으며, 주파수축 평가 E/G와 관련이 있다.  $E\rho$ 의 값은 진동계의 임피던스(impedence)를 나타내는 것으로  $E\rho$ 가 크면 음의 높아짐이 둔하여 반응도(response)가 나쁘지만 유연도(flexibility)가 있으며 작은 경우 반대의 경향이 나타났다. 그리고 비탄성계수( $E/\rho$ )가 클수록 소리가 잘 난다는 것이다. 음의 깊이를 의미하는 E/G는 값이 클수록 소리가 깊고 목재음이 나며 반주부가 강하며, 작으면 소리가 얇고 금속음이 나며 melody부가 강하다.

### 3) 점탄성 측정

음향기능성 도료의 도막이 가지는 점탄성적 성질을 측정하기 위하여 Figure 3. 3. 5의 모습을 가진 Rheometric Scientific사의 DMTA (dynamic mechanic thermal analysis) Mark IV를 사용하였으며, Figure 3. 3. 6의 그림과 같은 약세사리를 이용하여 three point bending method을 통해 측정하였다. 실험조건은 frequency와 strain을 1 Hz와 0.1%로 고정하고, 30℃에서 150℃까지 2℃/min로 일정하게 승온시켜 저장탄성율(storage modulus,  $E'$ )와 손실탄성율(loss modulus,  $E''$ ) 그리고  $\tan \delta$  ( $=E''/E'$ ) 값을 측정하였다. 측정된  $E'$ 와  $E''$ ,  $\tan \delta$ 를 통하여 도막의 점탄성적 성질을 분석하였다.



Figure 3. 3. 5. DMTA Mark IV의 모습

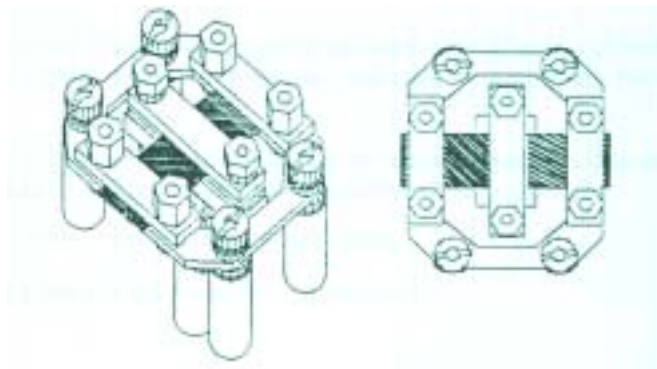
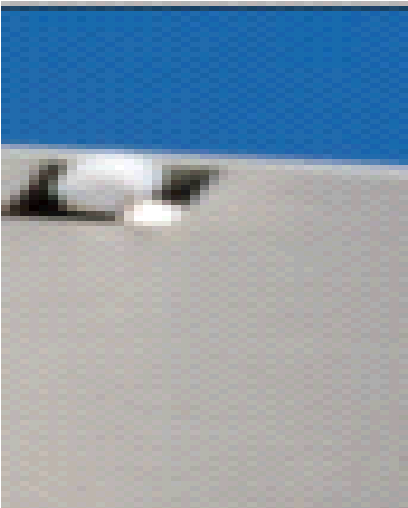


Figure 3. 3. 6. DMTA three point bending 악세사리

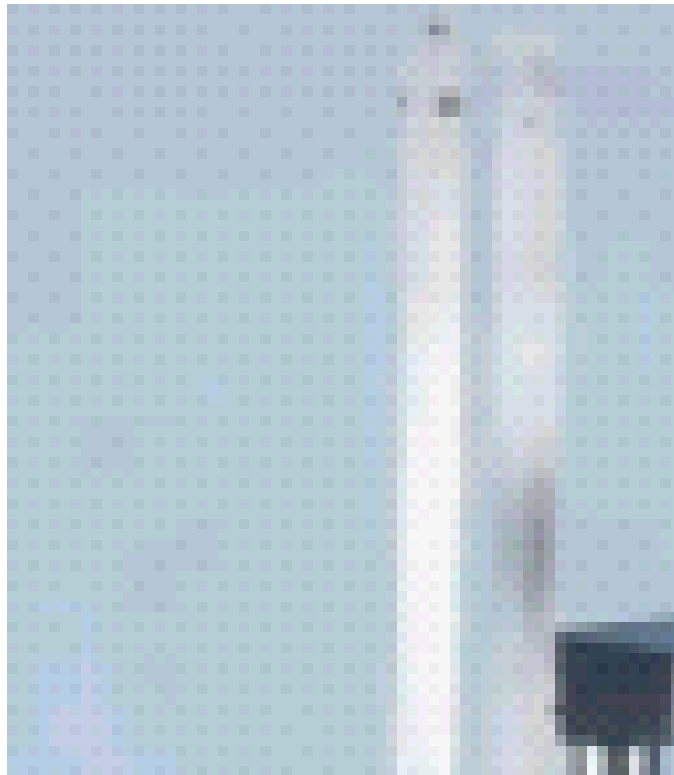


Figure 3. 3. 7. Pendulum Hardness 시험장치

#### 4) 도막의 경도 측정

도막 표면이 가지는 점탄성적인 성질 중 탄성적인 영역과 관련이 있는 경도에 대해 알아보기 위해 무도장처리 목재시편과 도장처리 후의 도막의 경도를 측정하여 보았다. 경도를 측정하기 위해 Figure 3. 3. 7의 형태를 가진 Sheen사의 pendulum hardness tester를 사용하였다. König pendulum을 사용하였으며 측정조건은  $22\pm 1^\circ\text{C}$ 와 상대습도  $50\pm 2\%$ 였으며 ASTM D 4366에 의거하여 실험하였다.

### 라. 결과 및 토의

#### 1) 음향성능

음향기능성 도료 도막의 음향성능을 측정하기 위해 도장 전후의 공명주파수와 댐핑값을 측정하여, 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하고 밀도와 동적탄성계수, 전단탄성계수 사이의 관계를 분석하였다. 도장 시편에 대한 선형 모델의 진동모드 형태은 목재 시편에 도장처리를 하기 전과 도장처리를 한 후의 헤머로 진동을 가했을 때 발생하는 진동모드를 선형모델에 따라 정리하면 다음 Figure 3. 3. 8.과 같은 양상으로 나타난다.

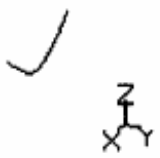
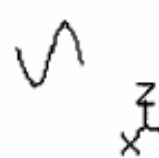
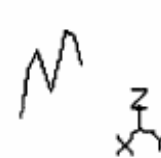
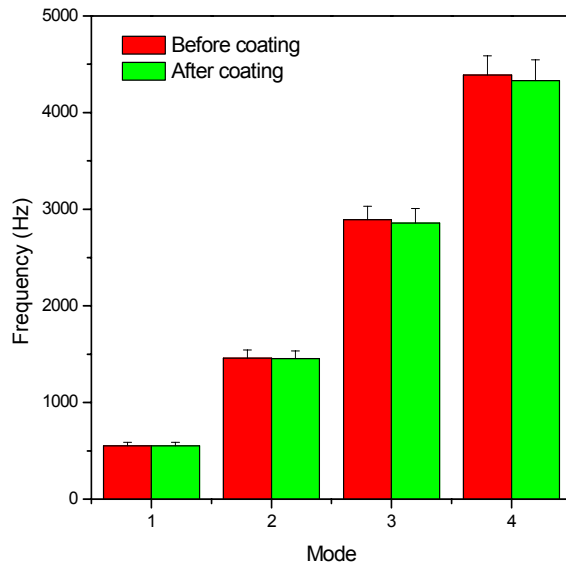
진동모드	Mode #1	Mode #2	Mode #3
양상			

Figure 3. 3. 8. 도장처리 전·후의 선형모델의 진동모드의 형태

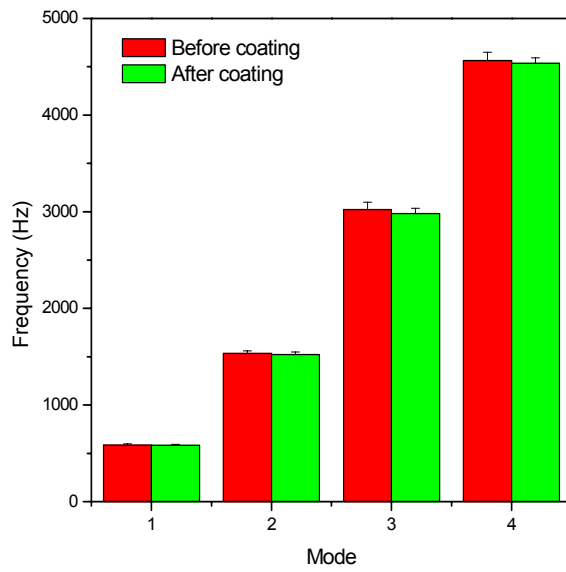
이러한 형태의 진동모드를 가지고 있는 음향기능성 도료의 도장처리 전과 후의 공명주파수를 비교하여 음향성능을 평가하였다. Figure 3. 3. 9.에서는 측정모드에 따른 도장처리 전후의 공명주파수를 나타내었다.



음고(pitch)는 음악의 심리적인 특성을 나타내는 것으로 음계에 따른 주파수의 높고 낮음을 통해 파악되는 것으로 공명주파수를 통하여 확인할 수 있다. Figure 3. 3. 9.에서는 도장 전과 후의 공명주파수의 측정값을 진동모드에 따라 보여주고 있다. 우레탄 상도 도료와 UV 경화형 에폭시 도료, 천연바니쉬, 캐슈도료의 경우 도장처리 전보다 도장처리 후의 측정된 1~4의 진동모드에서의 공명주파수가 줄어들었으나, 오일스테인은 반대로 증가하였다. 이러한 결과는 다른 도료를 도장하는 경우 음고가 낮아져 음역이 줄어들었으나, 오일스테인의 경우 음고가 증가하여 음역이 증가하는 것을 나타내었다.

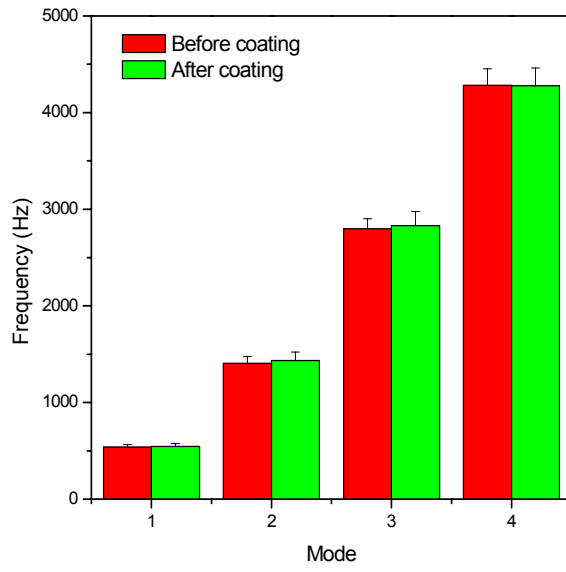


(a)

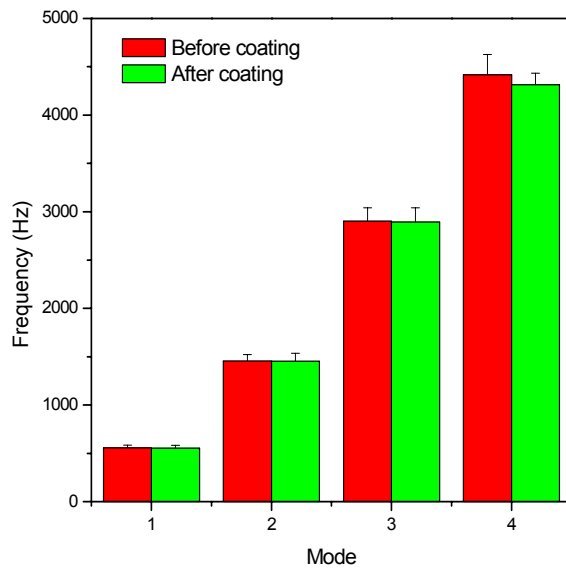


(b)

Figure 3. 3. 9. 도료의 종류와 진동모드별 공명주파수

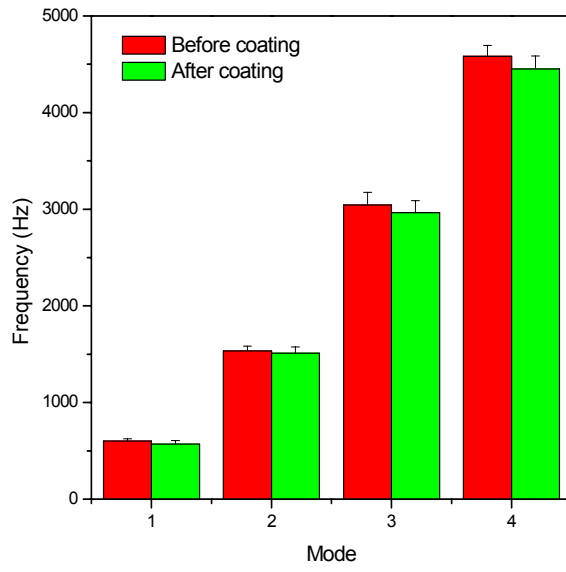


(c)



(d)

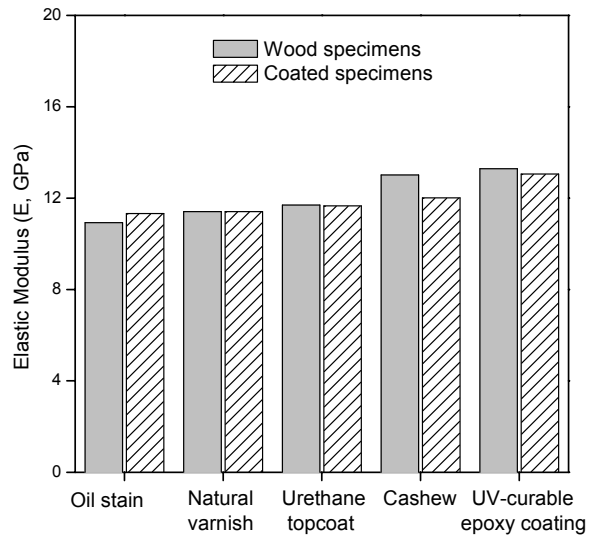
Figure 3. 3. 9. 도료의 종류와 진동모드별 공명주파수



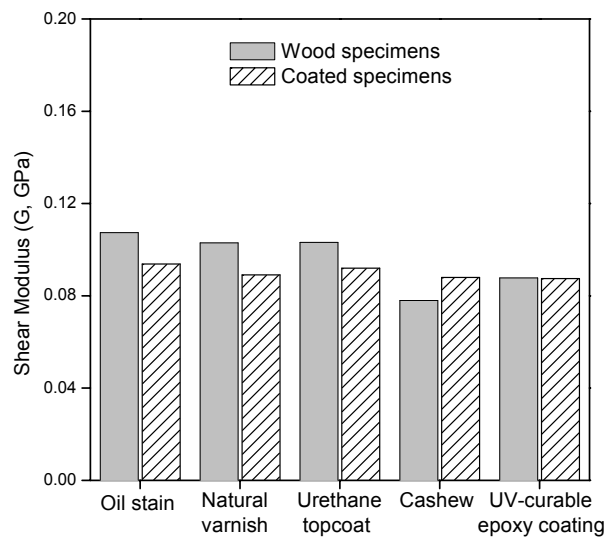
(e)

a: urethane coating, b: UV-curable epoxy acrylate coating, c: oil stain  
 d: natural varnish, e: cashew

Figure 3. 3. 9. 도료의 종류와 진동모드별 공명주파수



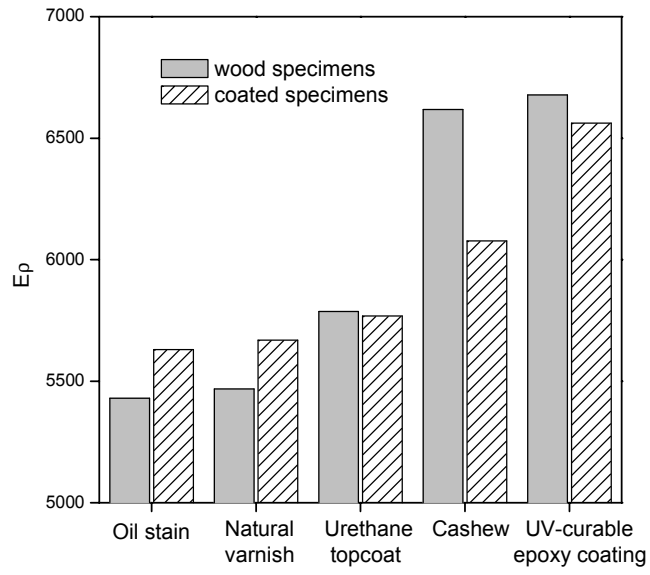
(a)



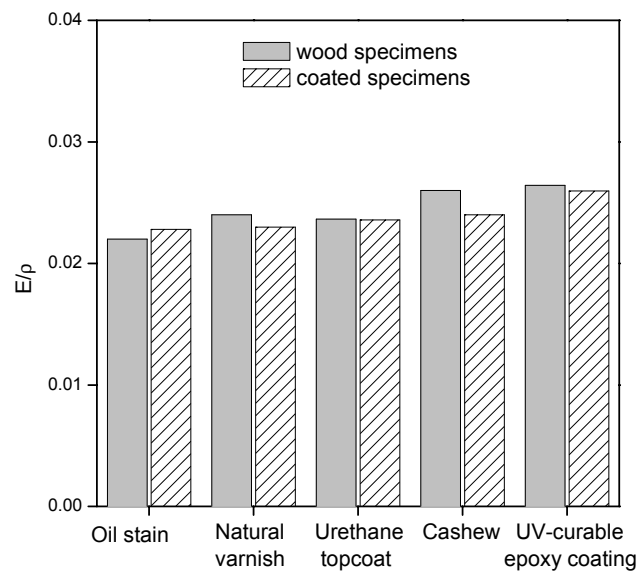
(b)

Figure 3. 3. 10. 도료의 종류에 따른 탄성계수(a)와 전단탄성계수(b)

측정 후의 공명주파수와 댐핑값을 통하여 식 (3. 1. 26)~(3. 1. 36)의 TGH 이론을 통해 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하였고, 그 결과 Figure 3. 3. 10.과 같이 나타났다. 도장처리 전에는 목재의 개체에 따른 각각의 값의 차이가 뚜렷하게 나타났으나, 도장처리 후에는 형성된 도막으로 인하여 동적탄성계수와 전단탄성계수는 도료의 종류에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다. 그러나 밀도와 관계로 통하여 음을 평가하여 보면 각 도막이 가지는 음의 반응성을 의미하는  $E\rho$ 는 Figure 3. 3. 11.에서와 같이 오일스테인과 천연바니쉬는 도장처리 후 음의 반응성이 향상된 것을 알 수 있으며, 우레탄 상도도막에서는 변화가 없었으나 UV 경화형 에폭시 도료와 캐슈도료에서는 음의 반응성이 감소하는 상반된 결과가 나타났다. 이는 도막이 가지는 경도와 탄성적인 성질이 큰 도막일수록 음의 반응도가 높아지고 유연도가 떨어져 음의 반응성이 낮아지는 것으로 생각된다.



(a)



(b)

Figure 3. 3. 11. 도료의 종류에 따른 탄성계수와 밀도와의 관계 (a:  $E_p$ , b:  $E/\rho$ )

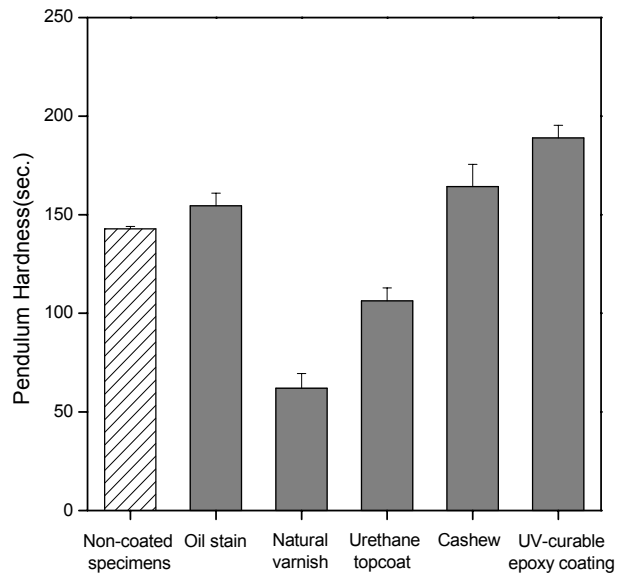


Figure 3. 3. 12. 도료의 종류에 따른 Pendulum hardness의 결과

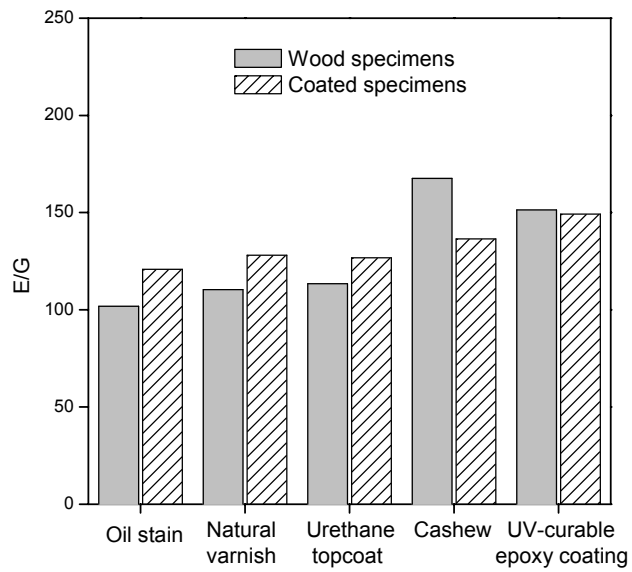


Figure 3. 3. 13. 도료의 종류에 따른 E/G의 결과

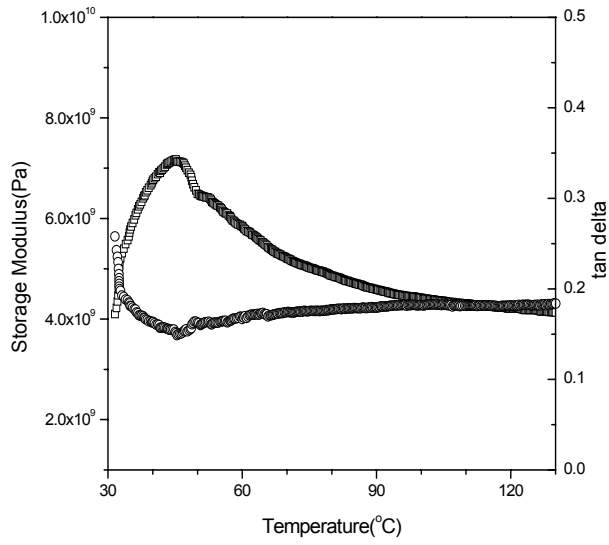


도막의 표면경도를 측정한 결과를 나타내는 Figure 3. 3. 12.을 통해 도장처리 후 UV 경화형 도료와 캐슈도료의 경도가 증가하였음을 알 수 있고 천연바니쉬와 우레탄계 상도도막은 감소된 것을 확인할 수 있었다. 그러나 오일스테인의 경우 경도가 증가하는 결과를 나타내었다. 비탄성계수( $E/\rho$ )가 가지는 물리적 의미는 동일한 힘이 가해졌을 때, 비탄성계수가 클수록 소리가 잘 발생하는 것이다. 도장처리 전과 후의 비탄성계수는 Figure 3. 3. 11.에서와 같이 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이는 도장처리과정으로 인한 소리의 감소가 크게 발생하지 않는다는 것을 의미한다.

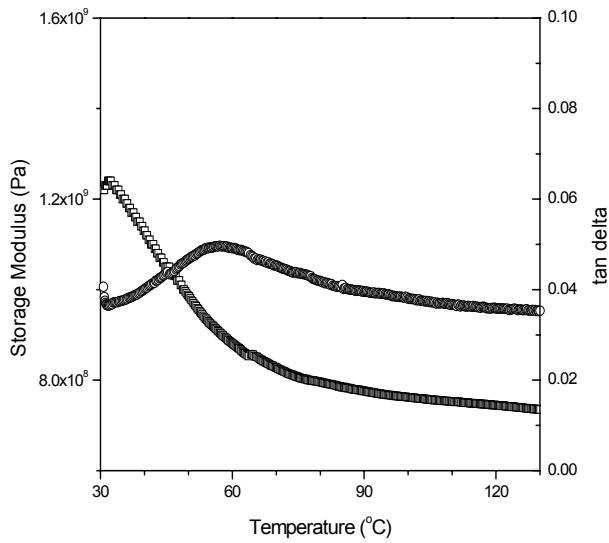
그러나 Figure 3. 3. 13. 에서 나타나는 E/G의 값은 음의 깊이를 의미하며 오일스테인과 천연바니쉬, 우레탄 상도도막은 도장 후, E/G의 값이 감소하여 도장처리 전보다 소리가 얇아져 melody부가 강한 것으로 나타났다. 캐슈도료는 E/G 값이 크게 증가하여 도장처리 전보다 소리가 깊어 반주부가 강해지며, UV 경화형 에폭시 도료는 값의 변화가 크게 나타나지 않아 음의 깊이에는 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

## 2) 점탄성적 성질

도료의 종류에 따른 점탄성적인 성질을 Figure 3. 3. 14. 는 무처리 시편과 목재시편에 우레탄 락카, 우레탄 상도 도료, 캐슈도료, UV경화형 우레탄 도료를 도장처리 한 후의 시편에 대한 점탄성적인 성질을 나타내고 있다.

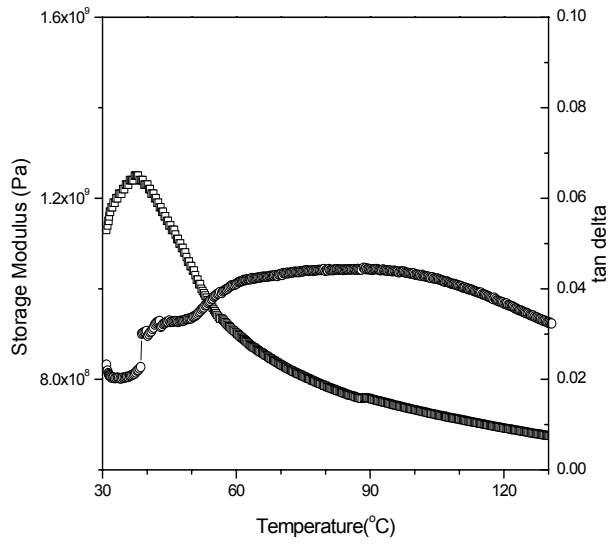


(a)

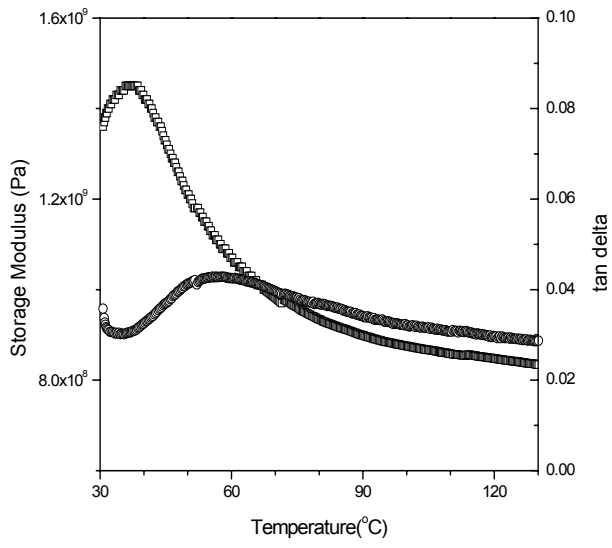


(b)

Figure 3. 3. 14. 무처리 시편과 도장처리 후 시편의 점탄성적인 성질

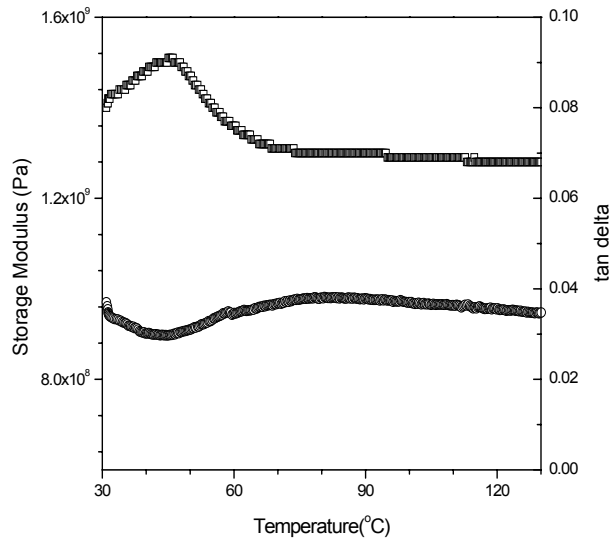


(c)



(d)

Figure 3. 3. 14. 무처리 시편과 도장처리 후 시편의 점탄성적인 성질



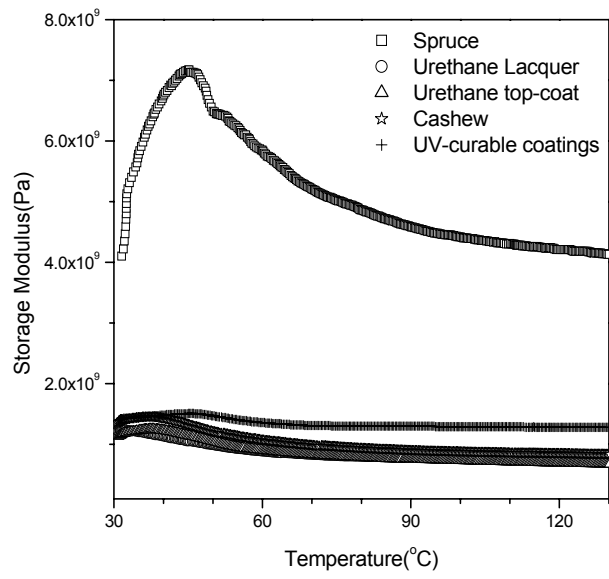
(e)

a: spruce, b: urethane lacquer, c: urethane topcoat  
 d: cashew, e: UV-curable epoxy acrylate coating

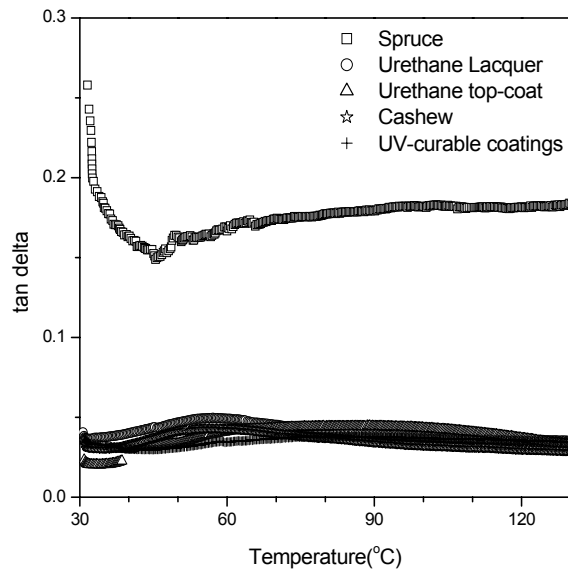
Figure 3. 3. 14. 무처리 시편과 도장처리 후 시편의 점탄성적인 성질

Figure 3. 3. 14.에서는 무처리 시편과 도장처리한 시편간의 저장탄성율과  $\tan \delta$ 를 비교하였다. 도장처리를 한 후의 저장탄성율과  $\tan \delta$ 의 값이 크게 감소하는 것을 보여주었으며, 도장처리를 한 후의 시편들 사이의 차이는 무처리 시편에 비해 큰 차이가 없음을 나타내고 있다.

Figure 3. 3. 15.에서는 도장처리한 시편간의 점탄성적인 성질을 비교하였다. 도장처리된 시편간의 약간의 차이를 발견할 수 있으나 점탄성적인 성질은 거의 비슷함을 알 수 있다. 이를 통해 UV 경화형 도료의 사용가능성을 확인할 수 있다.

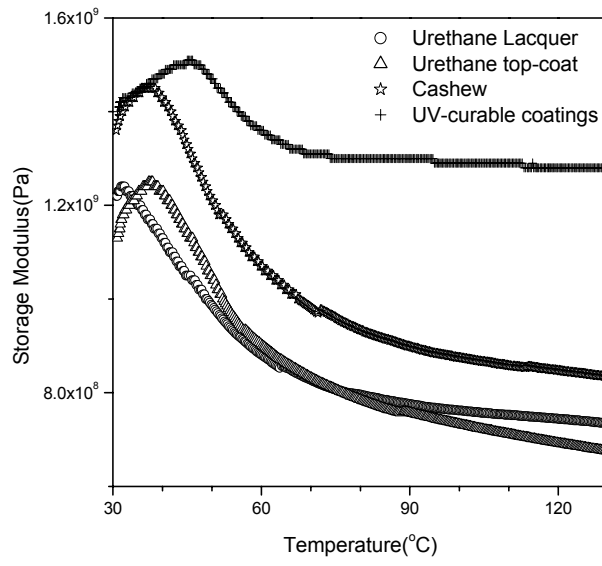


(a) 저장탄성율

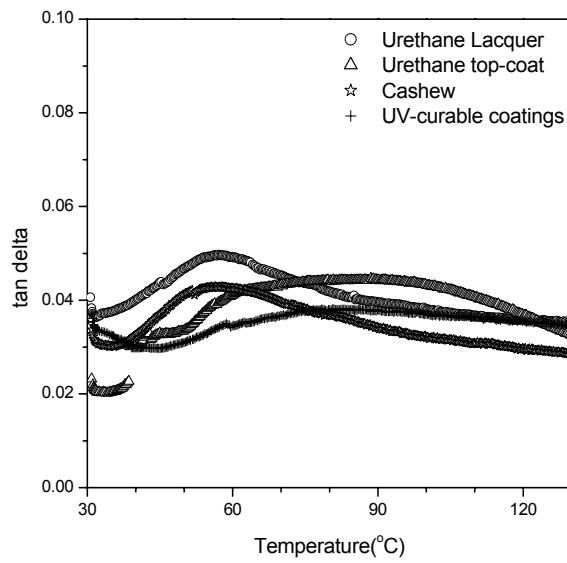


(b)  $\tan \delta$

Figure 3. 3. 15. 도장처리 전·후 시편의 점탄성적인 성질의 비교



(a) 저장탄성율



(b)  $\delta \tan \delta$

Figure 3. 3. 16. 각종 도장처리 후 시편의 점탄성적인 성질의 비교

음향기능성 도료 도막의 음향성능과 점탄성적 성질을 비교하기 위해 도막이 가지는 점탄성적 성질을 DMTA의 three point bending법을 이용하여 저장탄성율( $E'$ )과 손실탄성율( $E''$ ),  $\tan \delta$ 를 측정하였다. 저장탄성율과 손실탄성율,  $\tan \delta$ 는 주파수와 온도에 의해 영향을 받으며, 물질의 탄성적인 특성은 저장탄성율, 점성적인 특성은 손실탄성율에 의해 나타난다. 그리고  $\tan \delta$ 는 저장탄성율과 손실탄성율의 비로 나타나며 피크점에서 도막의 유리전이온도(glass transition temperature,  $T_g$ )를 나타내며,  $\tan \delta$ 는 도막의 댐핑특성(damping factor)을 나타내기 때문에 이를 통하여 도막의 여러 가지 점탄성적인 성질을 판단하며 음향적인 성질도 판단할 수 있다.

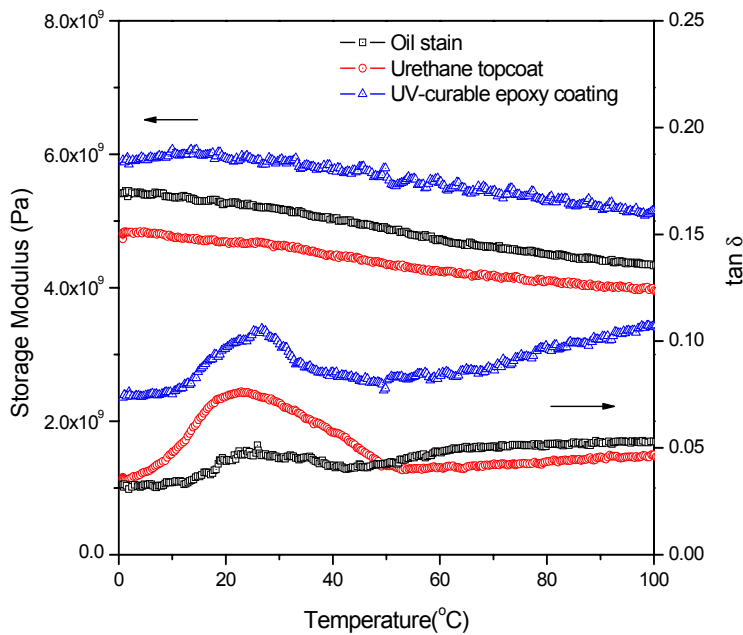


Figure 3. 3. 17. 도료에 따른 저장탄성율과  $\tan \delta$

Figure 3. 3. 17은 도료의 종류에 따른 도막의 저장탄성율과  $\tan \delta$ 을 나타내었다. 저장탄성율은 도막의 탄성적인 영역을 나타내며 경도와 상관관계가 있다. 저장탄성율을 통하여 나타나는 도막의 경도는 UV 경화형 에폭시 도료 > 오일스테인 > 우레탄계 상도도료의 순이었으며 Figure 3. 3. 2에서 나타나는 도막 표면의 경도값과 일치하는 것을 확인할 수 있다.  $\tan \delta$ 의 피크의 높이와 넓이를 통하여 도막의 음향적인 성질을 확인할 수 있으며, 그 값은 Figure 3. 3. 17에서 나타내었다.  $\tan \delta$ 의 peak의 높이와 넓이는 유사한 경향으로 나타났으며 이때의 피크 높이와 넓이의 크기는 우레탄 상도도료 > UV 경화형 도료 > 오일스테인의 순으로 나타났다.



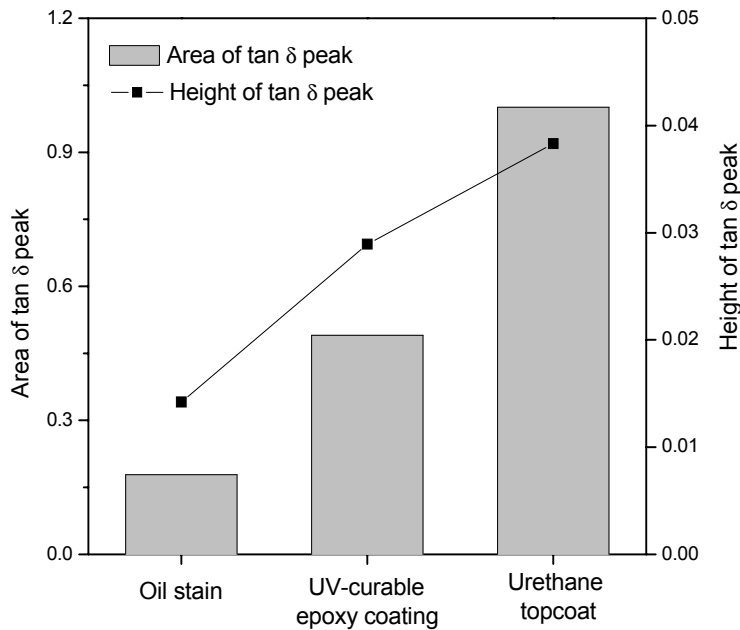


Figure 3. 3. 18. Areas and heights of tan  $\delta$  peaks

tan  $\delta$ 의 피크의 높이와 넓이가 클수록 도막의 댐핑특성이 커지기 때문에 도막의 표면에서 음을 흡수하는 성질이 증가하고 이는 목재악기의 표면에 도장처리 후 형성된 도막에서의 음의 흡수가 발생하여 악기의 음향적인 성능이 저하됨을 알 수 있다. 따라서 도막의 tan  $\delta$  피크의 높이와 넓이가 작을수록 목재악기가 가지고 있는 본래의 음을 발생하는데 유리하다.

#### 마. 결론

음향기능성 도료들의 도막이 가지는 음향성능과 점탄성적 성질을 측정하기 위해 FFT와 DMTA를 이용하여 여러 가지 음향특성과 점탄성적인 특성을 측정하였다. 도막의 음향성능은 도장처리 전후의 공명주파수와 댐핑값을 FFT 분석기를 이용하여 측정하였고, 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하고 밀도와 동적탄성계수, 전단탄성계수 사이의 관계를 검토하였다. 그리

고 측정된 값들과 계산된 값들을 통하여 도막이 가지는 음고, 음의 반응성, 가진력과 음의 깊이 등에 대한 분석을 하였다. 도막의 점탄성적 성질에 따른 음향성능의 고찰은 DMTA를 이용하여 저장탄성율과 손실탄성율,  $\tan \delta$ 를 측정하였다. 측정된  $\tan \delta$  피크의 높이와 넓이를 통하여 도막이 가지는 음향성능을 분석하였다. 그 결과, 음향기능성 도료 중 목재악기의 음향성능을 향상시킬 수 있는 도료로 스테인 계통의 오일스테인 도료가 가장 좋은 것으로 사료된다.

## 2. 도막의 두께에 따른 음향기능성 도료의 영향

### 가. 서론

이전의 연구결과에서 선정된 음향기능성 도료를 중심으로 몇 가지 가능성이 있는 도료(환경친화형 UV 경화형 도료)와 함께 악기용 목재에 적용하고 경화시킨 후 점탄성 측정 장치인 DMTA(서울대 농생대 농업과학공동기기센터 소재(NICEM)) 및 RPT(한국전자재시험연구원 소재)를 통하여 저장탄성율  $E'$ , 손실탄성율  $E''$  및 대수감쇠율  $\tan \delta$  등에 대한 도막의 점탄성적 성질과 도장처리 전과 도장처리 후의 공명주파수 및 댐핑값을 측정함으로써 음향적인 특성을 측정한다. 측정된 데이터를 기준으로 도막의 두께와 악기용 목재의 수종에 따른 도막의 점탄성적 성질과 음향적 성질을 평가하고 적정 두께와 적정 수종을 선정한다. 음향기능제품의 음향적인 성능은 목재를 그대로 사용할 때에 가장 좋은 음향적인 성능을 지니고 있으나, 목재만을 사용하여 만들어진 악기의 경우 보관이나 병충해에 의하여 악기의 수명이 짧아지기 때문에 도료를 사용하게 된다. 도료는 고분자물질로 구성되어 있는 복합재료이며, 도료를 사용하는 경우 형성된 도막이 악기의 음을 흡수하기 때문에 적절한 사용이 필요하다.

목재 악기의 음향성능은 소재로 사용된 목재에 대한 연구에 집중되었으나 도료의 종류에 따른 음향성능과 점탄성과의 상관관계에 대한 연구도 일부 진행되고 있다. 이러한 도료의 종류에 따른 목재악기의 음향성능에 대한 연구에 이어 형성된 도막의 두께가 목재악기의 음향성능에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 본 논문에서는 도료의 도막두께에 따라 도막이 현악기의 음향성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 FFT를 이용한 음향적 성능을 비교분석하고 현악기용 도료에 대한 체계적인 자료구축을 위해 연구를 진행하였다.

## 나. 공시재료

본 실험에서는 European spruce (M.C. : 10.5%)를 사용하였다. 음향실험용 시편은 European spruce를 Figure 3. 3. 1.-(a)와 같은 크기로 채단을 하여 사용하였다. 점탄성실험용 시편은 Figure 3. 3. 1.-(b)와 같은 크기로 채단하여 사용하였다. 사용된 음향기능성 도료는 이전의 연구(최 등, 2005)에서 사용되었던 도료 중 악기용 우레탄계 상도도료와 갈색의 오일스테인계 도료(상품명 SHENYUN)과 UV 경화형 에폭시도료를 선정하여 사용하였다.

## 다. 실험방법

### 1) 시편의 제작

준비된 가문비나무 시편은 샌드페이퍼(#320)를 이용하여 표면을 연마한 후 음향기능성 도료를 No. 22 바코터(bar coater)를 사용하여 균일하게 도포하였고, 이 경우 습도막의 두께  $50.3\mu\text{m}$ 로 나타났다. 도장된 각 도료의 경화조건은 분양업체인 A에서 제시한 경화조건에 따라 실시하였다. 우레탄 상도도료와 오일스테인 도료는 상온에서 24시간 건조하였고, UV 경화형 에폭시도료는  $1120\text{ mJ/cm}^2$ 의 광량으로 고온수은램프에 의해 경화하였다. 경화처리 후 도막의 두께는 약  $20\pm 2\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 도막의 두께는 No. 22 bar coater를 통하여 일정한 두께로 도장 후 경화시킨 것을 1회로 하는 도장 횟수로 결정하였다.

### 2) 음향성능 측정

미도장 시험편과 도장처리 목재시편의 공명주파수와 댐핑값(damping factor)을 측정하여, 음향기능성 도료에 따른 음향적 성능을 비교하였다. 사용된 기기는 DYTRAN사의  $5.3\text{ mv/g}$ 의 감도를 갖는 accelerometer와  $94.3\text{ mv/LBF}$ 의 감도를 갖는 impact hammer를 사용하여 측정하였다. 시편의 자유진동을 위해 Fig. 2과 같이 공중에 매달았으며, nodal point를 고려하여 고무줄의 위치를 정하고 지지대에 고정시켰다. 측정된 진동을 FFT 시스템을 통하여 분석하여 공명주파수와 댐핑값을 얻었다. 측정된 공명주파수와 댐핑값을 Timoshenko beam 이론을 기초로 한 TGH (Timoshenko-Goens-Hearmon) 이론의 식을 이용하여 동적탄성계수와 전단탄성계수를 얻을 수 있다. 구해진 동적탄성계수와 전단탄성계수를 이용하여 동적탄성계수와 밀도의 관계와 두 탄성계수 사이의 관계를 이용하여 음향성능을 비교분석하였다.

### 3) 점탄성 측정

음향기능성 도료의 도막이 가지는 점탄성적 성질을 측정하기 위하여 Figure 3. 3. 5의 모습을 가진 Rheometric Scientific사의 DMTA (dynamic mechanic thermal analysis) Mark IV 를 사용하였으며, Figure 3. 3. 6의 그림과 같은 약세사리를 이용하여 three point bending method을 통해 측정하였다. 실험조건은 frequency와 strain을 1 Hz와 0.1%로 고정하고, 30℃에서 150℃까지 2℃/min로 일정하게 승온시켜 저장탄성율(storage modulus, E')와 손실탄성율(loss modulus, E'') 그리고  $\tan \delta$  ( $=E''/E'$ ) 값을 측정하였다. 측정된 E'와 E'',  $\tan \delta$ 를 통하여 도막의 점탄성적 성질을 분석하였다.

음향기능성 도료를 바코터를 이용하여 스틸(steel)의 표면에 20, 40, 60 $\mu$ m 두께로 준비된 도료를 코팅하여 경화시킨다. 경화된 시편을 Figure 3. 3. 19의 Rigid-body pendulum type physical properties tester를 통하여 온도조건에 따른 도막의 log damping ratio를 측정하여 도막의 점탄성적인 성질을 파악하여 도막의 두께에 따른 점탄성적인 성질을 예측한다. 실험조건은 온도는 0~150℃로 5℃/min의 속도로 일정하게 승온시키면서 log damping ratio 값을 얻었다.

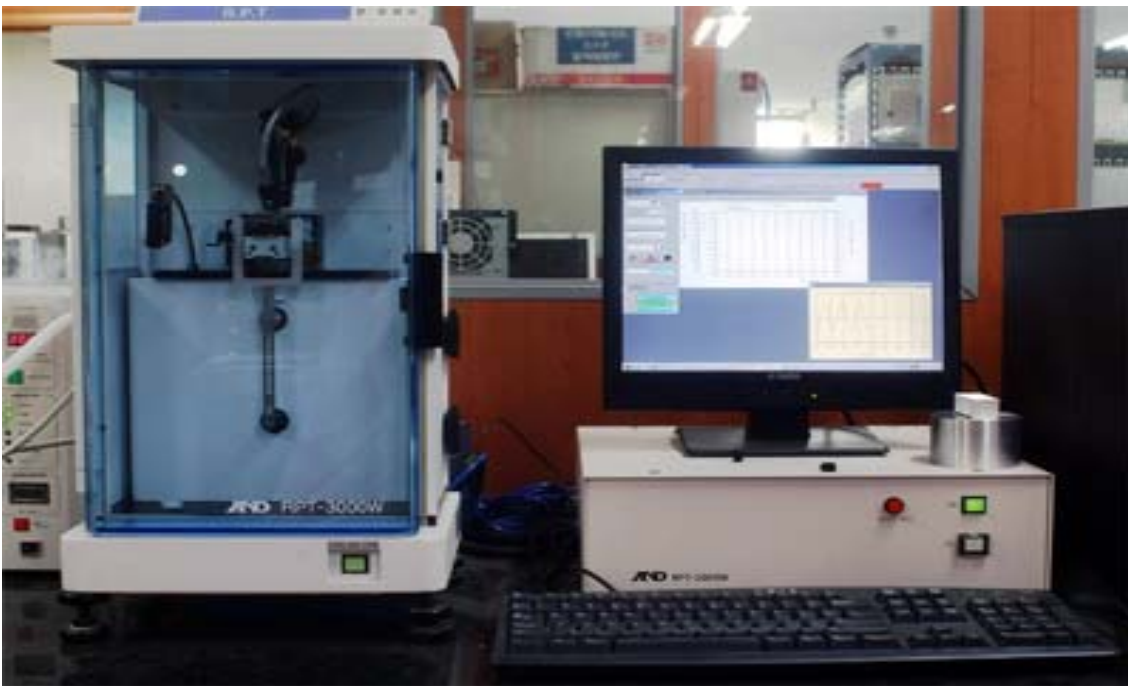


Figure 3. 3. 19. RPT(Rigid-body pendulum type physical properties tester)의 모습

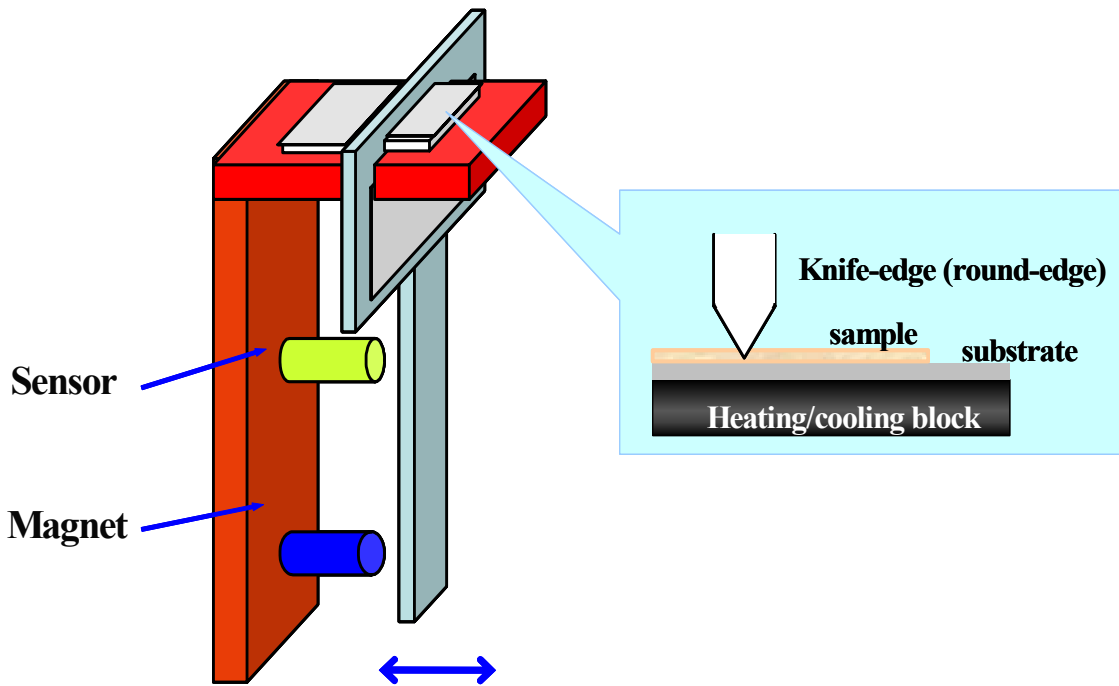


Figure 3. 3. 20. RPT의 모식도

이러한 RPT는 Figure 3. 3. 20.와 같은 형태로 구성되어 있으며, 시료의 표면 위에 시료의 종류나 특성에 따라 knife-edge나 round-edge 형태의 진자(pendulum)을 올려놓고 온도가 상승(하강)하거나 일정한 온도에서 시간이 경과됨에 따라 시료의 표면이 가지는 물성을 측정하는 기기이다. 온도의 변화에 따른 시료 표면에서의 진자의 움직임은 Figure 3. 3. 21-(a)과 같이 나타난다. 이러한 움직임은 RPT의 마그넷에서 발생하는 자기장으로 인해 시료표면에서 진자가 진자운동을 하면서 Figure 3. 3. 21-(a)의 감쇠하는 사인곡선을 만들어 내며 이 사인곡선은 시료의 표면이 가지는 물성에 의해 진폭, 주기 등의 값이 변하게 된다. 이러한 변화를 다음의 식을 통하여 계산하면,

$$T = T_{px_3} + T_{px_1}$$

$$T_{py_{av}} = (T_{py_1} + 2T_{py_2} + T_{py_3}) / 4$$

$$\text{damping ratio } \Delta = -\ln \left( \frac{(T_{py_3} - T_{py_{av}})}{(T_{py_1} - T_{py_{av}})} \right)$$

Figure 3. 3. 21-(b)의 그래프에서 나타나는 진자의 주기(period)와 점탄성적인 성질(log damping ratio)을 구할 수 있다. 이 때의 log damping ratio의 그래프의 형태와 peak의 위치, peak의 개수, peak의 높이, 평탄영역의 높이를 통해서 시료의 다양한 물성을 확인할 수 있다.

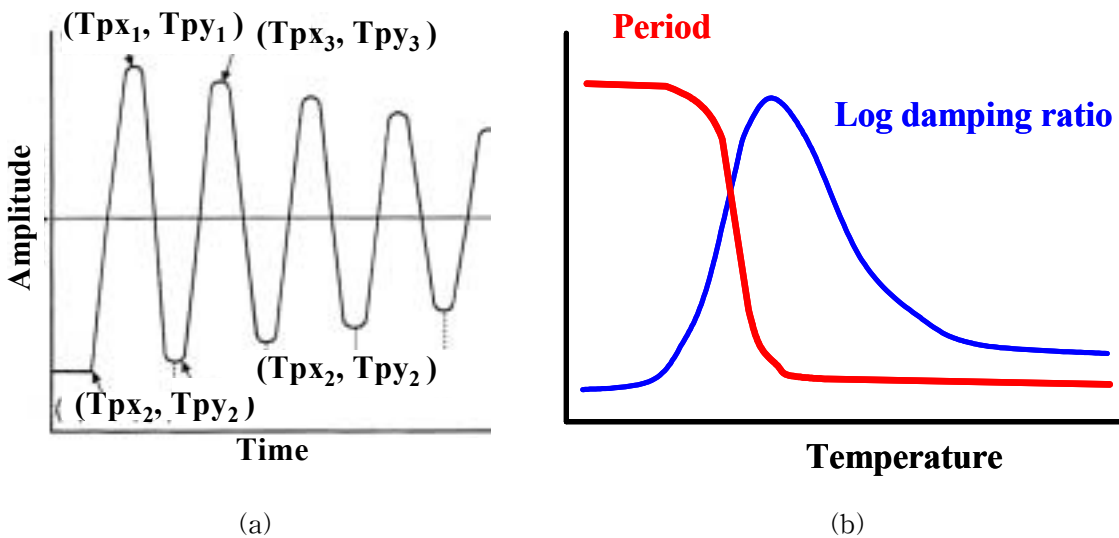


Figure.3. 3. 21. 시간에 따른 진자의 움직임(a)과 RPT 측정결과(b)

그 중에서도 가장 많이 보는 부분은 peak가 위치해 있는 온도와 peak의 높이, 평탄영역의 높이를 가장 많이 보게된다. peak가 위치해 있는 온도는 시료가 가지고 있는 시료 표면의 유리전이온도(glass transition temperature)를 의미하는 값으로 경화된 도막이 가지고 있는 유리전이온도를 구할 수 있다. 평탄영역의 높이는 그 도막이 가지고 있는 도막의 경도를 의미한다. 또한, peak의 높이는 시료가 가지고 있는 damping 영역을 나타내므로, 본 연구에서는 RPT를 통하여 측정한 시료의 peak의 높이를 통하여 경화된 도막이 가지는 damping 영역 즉, 음향적

인 성능을 확인하고자 한다. peak의 높이가 높다는 것은 damping 영역이 크다는 것을 의미하며, 이는 발생된 음이 도막 표면에서 흡수되는 영역이 크다는 것을 의미한다.

#### 4) 도막의 경도 측정

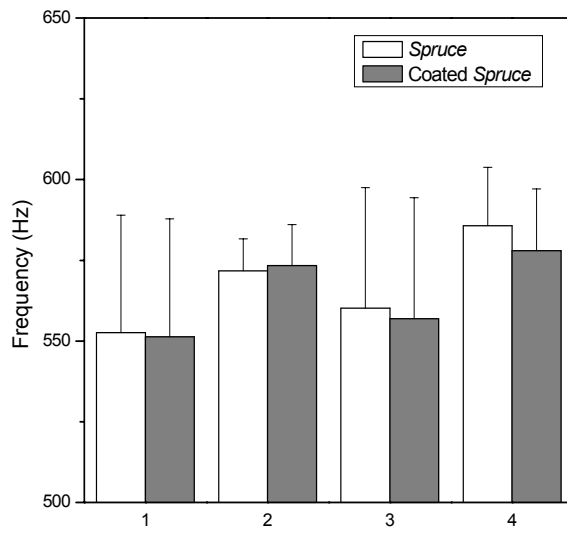
도막 표면이 가지는 점탄성적인 성질 중 탄성적인 영역과 관련이 있는 경도에 대해 알아보기 위해 무도장처리 목재시편과 도장처리 후의 도막의 경도를 측정하여 보았다. 경도를 측정하기 위해 Figure 3. 3. 6의 형태를 가진 Sheen사의 pendulum hardness tester를 사용하였다. König pendulum을 사용하였으며 측정조건은  $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ 와 상대습도  $50\pm 2\%$ 였으며 ASTM D 4366에 의거하여 실험하였다.

### 라. 결과 및 토의

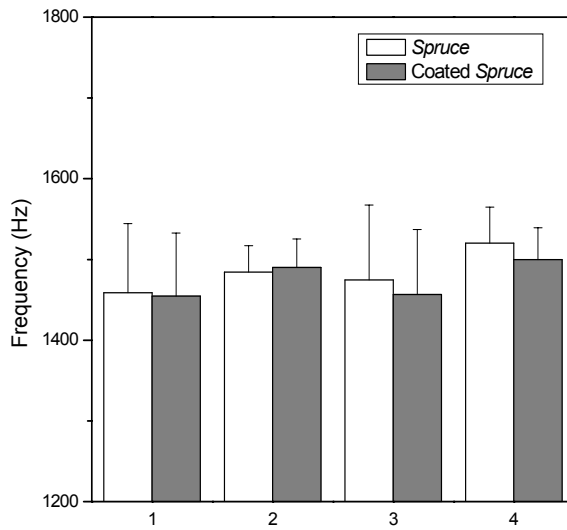
#### 1) 음향특성

목재의 도장처리 시편의 도막 두께에 따른 영향을 확인하기 위해 도장 처리 전의 시편과 후의 시편의 음향성능을 FFT 분석장치를 이용하여 실험하였다. 이때의 도막의 두께는 도장의 횟수를 통하여 1~4회로 결정하였다. FFT 분석장치를 통하여 도장횟수 증가에 따른 경화된 도막의 진동모드는 1~4차의 진동모드 값을 측정하였다.

가) 우레탄 상도 도료의 두께에 의한 음향성능



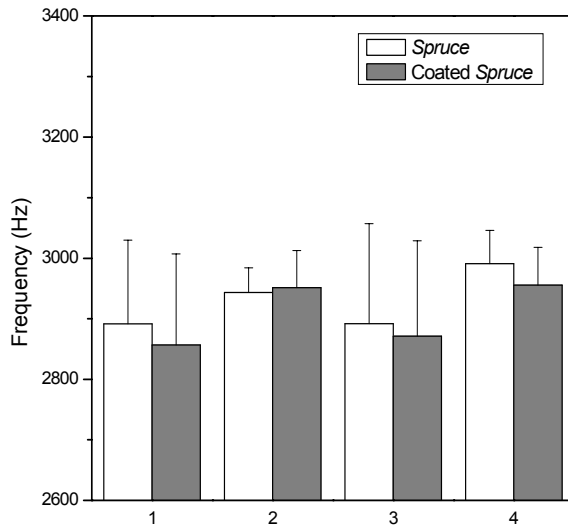
a) 1차 진동모드



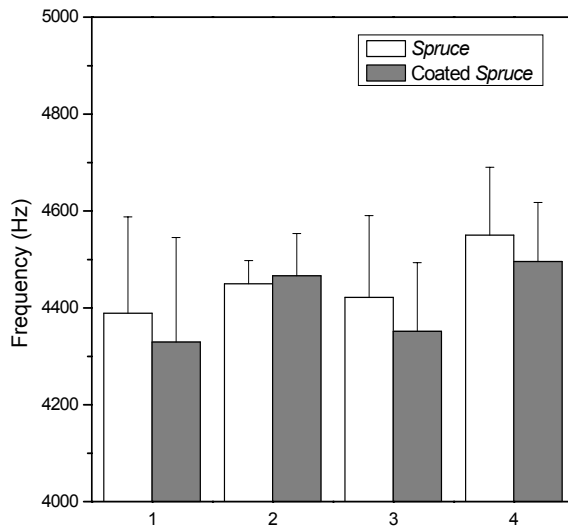
b) 2차 진동모드

Figure 3. 3. 22. 우레탄 상도도료의 도장 횟수의 증가에 따른 공명주파수





c) 3차 진동모드



d) 4차 진동모드

Figure 3. 3. 22. 우레탄 상도도료의 도장 횟수의 증가에 따른 공명주파수

우레탄 상도 도료를 코팅하기 전과 후의 진동모드별 두께에 따른 공명주파수는 Figure 3. 3. 22.에서와 같은 결과로 나타났다. 2회 도장을 한 경우에만 진동모드별 공명주파수가 증가하였고, 1회, 3회, 4회 도장을 한 경우는 진동모드별 공명주파수가 감소하는 결과를 나타내고 있다. 또한 측정된 공명주파수의 값은 짝수횟수의 도장 처리 시 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 공명주파수의 값을 확인하기 위하여 Figure 3. 3. 23.에서 나타낸 것처럼 도장처리전과 후의 공명주파수의 차를 통하여 도막의 특성을 확인하였다.

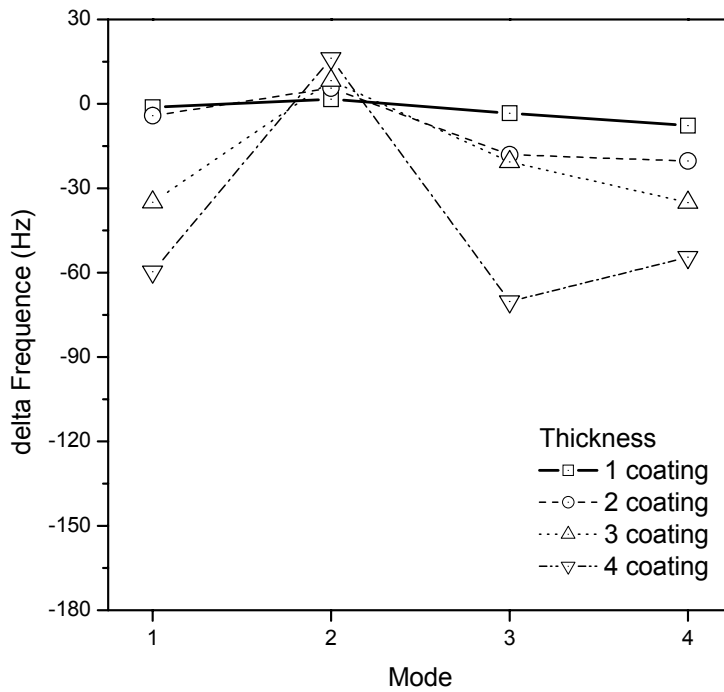
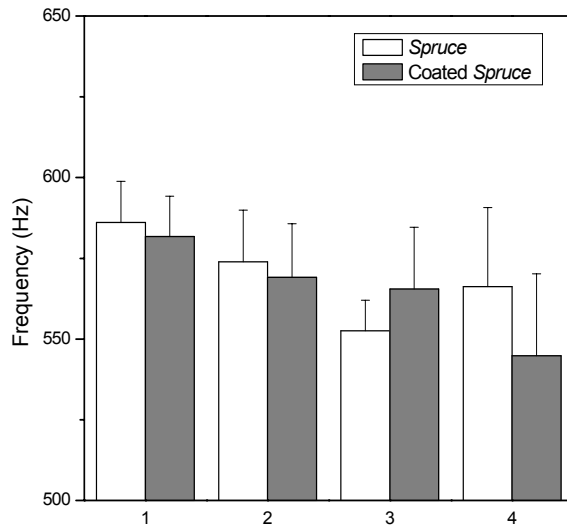


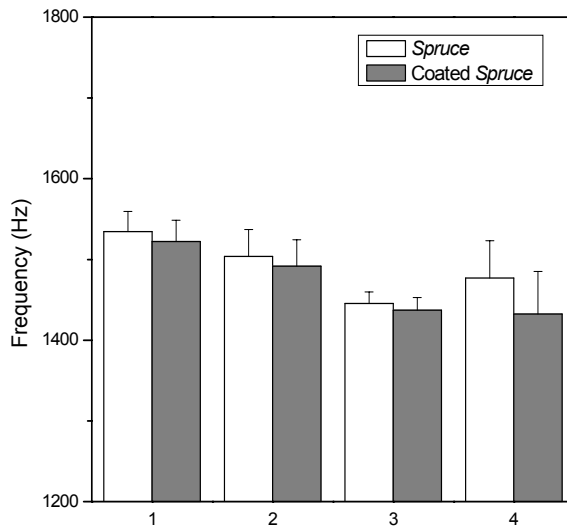
Figure 3. 3. 23. 도장횟수 증가에 따른 우레탄 상도도료의 공명주파수의 변위값

Figure 3. 3. 23.에서는 나타난 결과는 목재 위에 코팅된 도막의 두께가 증가함에 따라 공명 주파수의 변화량이 증가함을 알 수 있으며, 그 값은 모드에 따라 다소 다른 경향을 나타내고 있다. 우레탄 상도도료의 도막에서는 2번 모드에서의 공명주파수의 변화량이 양의 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 목재 표면에 코팅된 우레탄 상도 도료 자체와 목재 사이에서 나타나는 특성으로 보여진다.

나) UV 경화형 에폭시 도료의 두께에 의한 음향성능

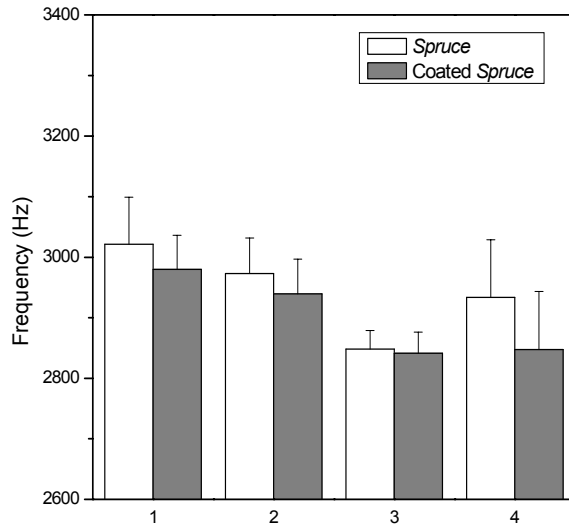


(a) 1차 진동모드

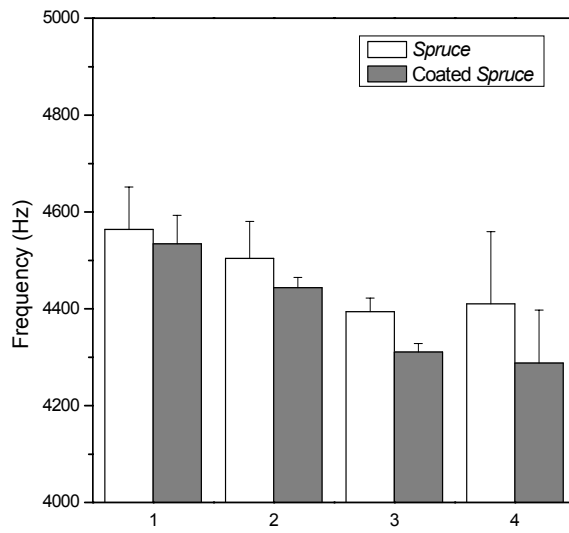


(b) 2차 진동모드

Figure 3. 3. 24. UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 도장 횟수의 증가에 따른 공명주파수



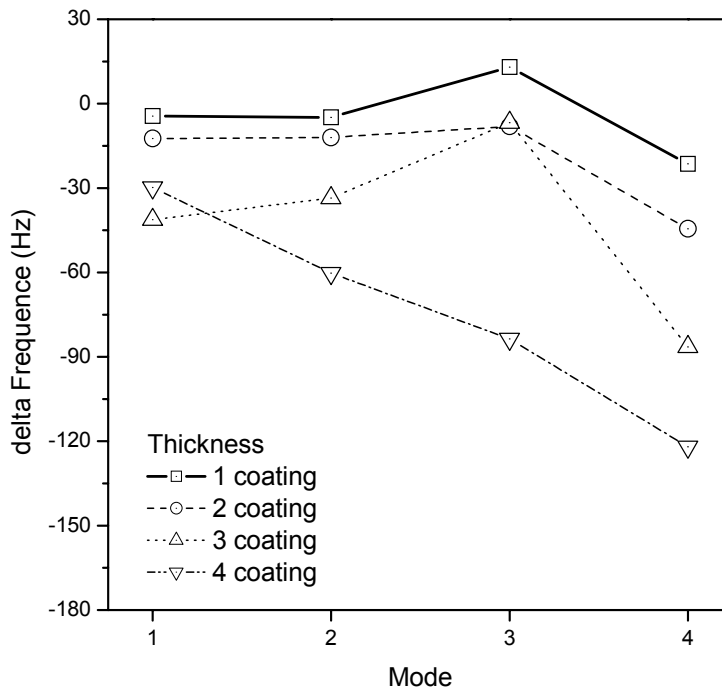
(c) 3차 진동모드



(d) 4차 진동모드

Figure 3. 3. 24. UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 도장 횟수의 증가에 따른 공명주파수

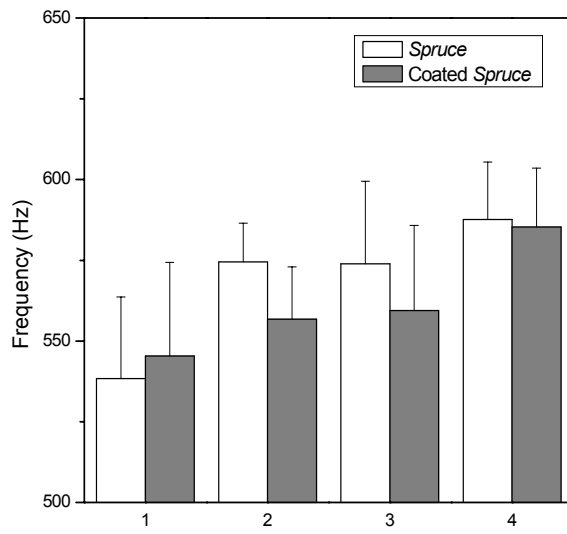
자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료를 도장 처리하기 전과 후의 진동모드별 두께에 따른 공명주파수는 Figure 3. 3. 24에서와 같은 결과로 나타났다. 도장 처리 전과 도장처리 후의 공명주파수는 일반적으로 도장처리를 함에 따라 감소하는 결과를 나타내었다. 그리고 모드별 공명주파수는 전반적으로 도장 처리 횟수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 4회 도장 시의 공명주파수는 도장처리 하기 전에 비하여 크게 감소한 것으로 나타났다.



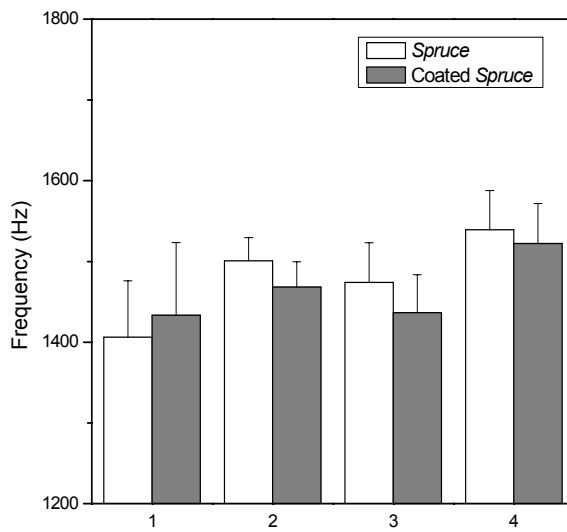
Figur 3. 3. 25. 도장횟수 증가에 따른 UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 공명주파수의 변위값

Figure 3. 3. 25에서는 도장 처리수의 증가에 따른 모드별 공명주파수의 변화율을 나타내었다. 도막이 두꺼워짐에 따라 공명주파수의 변화량이 크게 증가함을 알 수 있다. 4회 도장 시 3회 도장처리까지와는 다른 경향을 나타내었다. 3회 이전까지는 모드가 증가함에 따라 측정된 값이 일정한 경향성을 나타내었으나 4회 도장처리 시편의 경우, 진동모드가 이전까지의 경향과는 달리 증가하다가 감소하는 경향에서 도장 횟수가 증가함에 따라 지속적으로 공명주파수의 이는 도막의 두께가 일정한 값 이상으로 두꺼워진 경우 도장 처리목재 표면에서의 도료와 목재 사이에서 나타나는 특성보다 도막 자체가 가진 특성이 보다 크게 발현되기 때문으로 보여진다.

다) 오일 스테인계 도료의 두께에 의한 음향성능



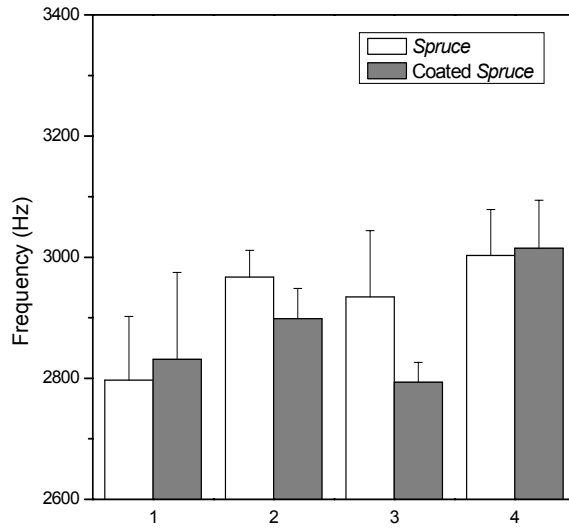
(a) 1차 진동모드



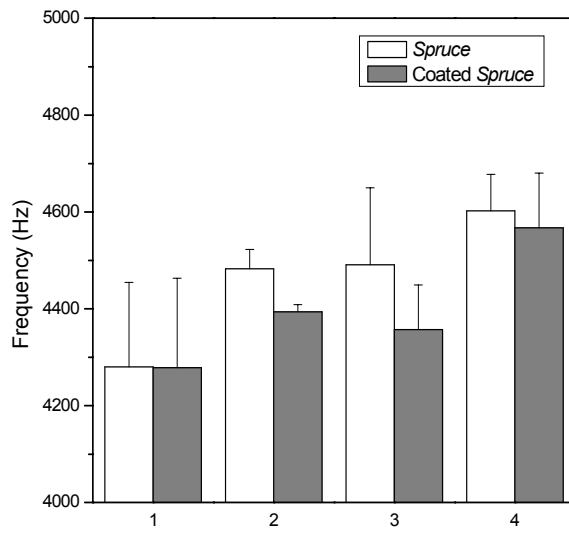
(b) 2차 진동모드

Figure 3. 3. 26. 오일 스테인계 도료의 도장 횟수의 증가에 따른 공명주파수





(c) 3차 진동모드



(d) 4차 진동모드

Figure 3. 3. 26. 오일 스테인계 도료의 도장 횟수의 증가에 따른 공명주파수

오일 스테인계 도료를 코팅하기 전과 후의 진동모드별 두께에 따른 공명주파수는 Figure 3. 3. 26에서와 같은 결과로 나타났다. 1회 도장 시 모드별 공명주파수는 다른 도료와는 달리 공명주파수가 오히려 증가하는 경향을 보였으며, 2회 3회 도장 시에는 전반적으로 도막의 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 4회 도장 시에는 2회와 3회 도장처리한 것에 비해 감소량이 줄어드는 경향을 나타내었다.

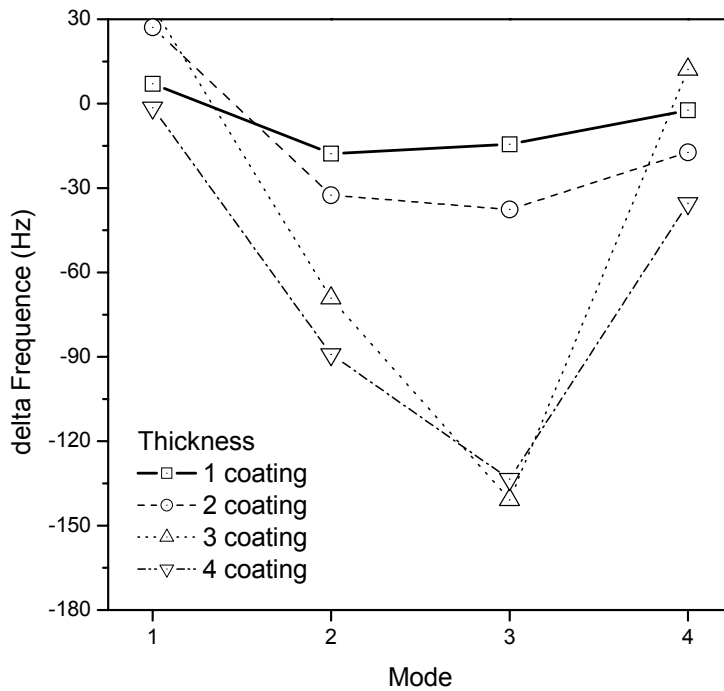


Figure 3. 3. 27. 도장횟수 증가에 따른 오일스테인계 도료의 공명주파수의 변위값

Figure 3. 3. 27.에서는 도막두께에 따른 모드별 공명주파수의 변화율을 나타내었다. 도장처리 횟수가 증가함에 따라 공명주파수의 변화량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히, 2회 도장처리 이후의 변화율은 2번과 3번 모드에서의 공명주파수의 변화량이 크게 증가하는 특성을 나타내었다.

Hearmon에 의하면 기본주파수(fundamental frequency)  $f_1$ 과 모드별 공명주파수  $f_n$ ( $n$ 은 mode number)의 관계 즉,  $f_2/f_1=2.75$ ,  $f_3/f_1=5.4$ ,  $f_4/f_1=8.9$ 로 그 비율의 범위를 벗어나지 않는다고 한다.

다음의 Table 3. 3. 1, 2, 3에서는 우레탄 상도 도료, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료와 오일 스테인계 도료의 도장회수 증가에 따른  $f_n/f_1$ 을 나타내었다. 도장처리를 한 시편의  $f_n/f_1$ 값은 Hearmon의 언급한  $f_n/f_1$ 값에 부합하였으나, Hearmon이 밝힌 값보다는 다소 작은 측정결과를 나타내었다. Hearmon이 언급한  $f_n/f_1$ 값은 무처리된 목재의 경우이고 측정된 값은 목재의 표면에 도장처리를 한 결과이기 때문에 감소된 만큼의 각 모드별 공명주파수와 기본주파수와의 비는 목재 표면에 형성된 고분자 물질의 도막이 흡수한 음과 관련이 있음을 알 수 있다. 측정된  $f_n/f_1$ 값은 도막의 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이므로 이는 도막의 두께가 증가함에 따라 음향성능이 떨어진다는 것을 의미한다.

Table 3. 3. 1. 우레탄 상도 도료의 두께에 따른  $f_n/f_1$

$f_n/f_1$	Hearmon	1 coating	2 coating	3 coating	4 coating
$f_2/f_1$	2.75	2.64	2.60	2.62	2.60
$f_3/f_1$	5.4	5.18	5.15	5.16	5.11
$f_4/f_1$	8.9	7.85	7.79	7.81	7.78

Table 3. 3. 2. UV 경화형 도료의 두께에 따른  $f_n/f_1$

$f_n/f_1$	Hearmon	1 coating	2 coating	3 coating	4 coating
$f_2/f_1$	2.75	2.62	2.62	2.54	2.63
$f_3/f_1$	5.4	5.12	5.17	5.03	5.23
$f_4/f_1$	8.9	7.79	7.81	7.62	7.87

Table 3. 3. 3. 음향성능 향상제의 두께에 따른  $f_n/f_1$

$f_n/f_1$	Hearmon	1 coating	2 coating	3 coating	4 coating
$f_2/f_1$	2.75	2.63	2.64	2.57	2.60
$f_3/f_1$	5.4	5.19	5.21	4.99	5.15
$f_4/f_1$	8.9	7.85	7.89	7.79	7.80

도료의 도막에 대한 특성을 조사하기 위하여 도막의 두께에 따른 도막의 경도를 pendulum hardness tester를 이용하여 측정하였다. 측정된 결과는 Table 3. 3. 4에 나타내었으며, 우레탄 상도도료와 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 도장 횟수가 증가함에 따라 도막의 경도는 증가하는 경향을 나타내었다. 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 도막의 경도가 크기 때문에 도장횟수가 증가함에 따라 경도는 급격하게 증가하였으나 우레탄 상도도료의 경우 도막의 경도가 크지 않아 소폭으로 증가하였다. 오일 스테인의 경우 도장처리 후 경도가 증가하였으나, 2회 도장이후의 경도값은 일정한 값을 유지하였다. 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 높은 경도값을 가지고 있으며, 오일스테인과 우레탄 상도도료는 비슷한 값을 가지고 있으므로 두 도료의 음향적인 성능이 비슷한 경향을 지닐 것으로 생각된다.

Table 3. 3. 4. Pendulum hardness of coatings as a function of coating thickness.

Number of coating	Urethane topcoat	Oil Stain	UV-curable epoxy acrylate coating
0	36.17 ±3.80	37.33 ±6.30	39.90 ±2.47
1	40.60 ±7.41	40.37 ±6.03	92.40 ±9.41
2	50.87 ±6.05	52.50 ±4.22	199.03 ±10.46
3	58.57 ±3.24	47.60 ±9.50	213.50 ±9.23
4	59.03 ±2.99	51.33 ±5.06	223.77 ±12.38

도료 도막의 음향성능을 측정하기 위해 도장 전후의 공명주파수와 댐핑값을 측정하여, TGH 이론에 따라 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하였고, 밀도와 동적탄성계수, 전단탄성계수 사이의 관계를 분석하였다.

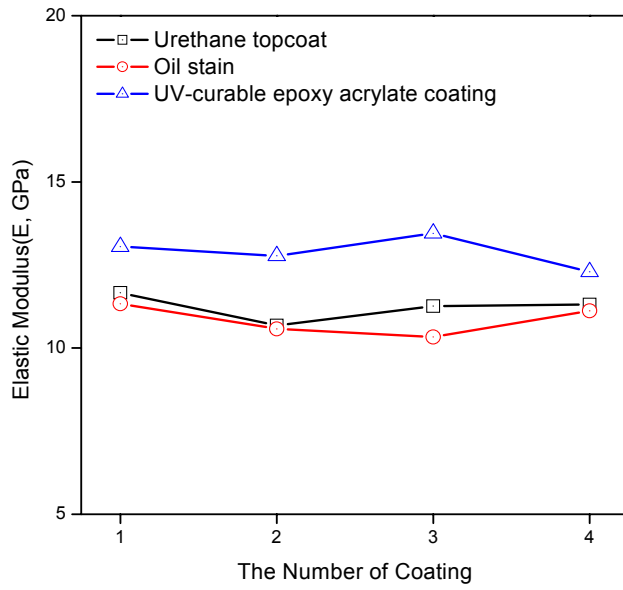


Figure 3. 3. 28. 도장횟수의 증가에 따른 도료의 동적탄성계수

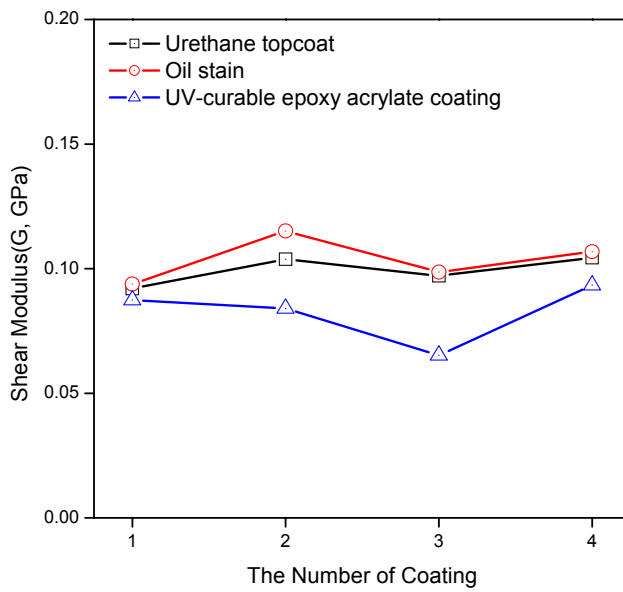
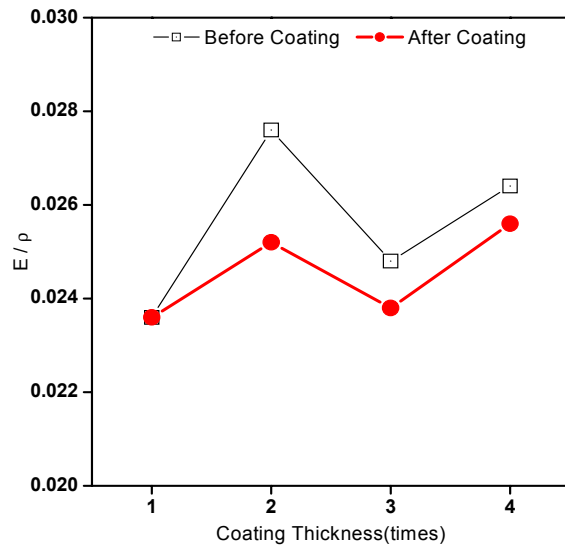


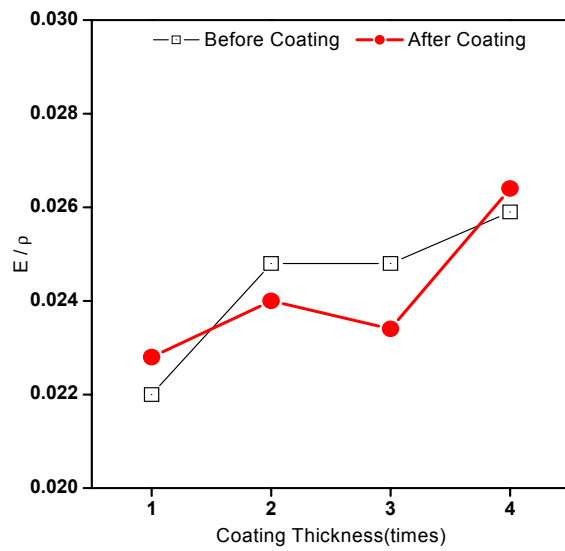
Figure 3. 3. 29. 도장 처리 횟수의 증가에 따른 도료의 전단탄성계수

Figure 3. 3. 28.와 29.에서는 3가지 종류의 도료(우레탄 상도도료, 오일 스테인, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료)의 도막의 두께에 따른 동적탄성계수와 전단탄성계수를 나타내었다. 동적탄성계수는 도장처리하기 전과 후의 값이 유사한 경향을 가지고 있으며, 전반적으로 도장처리한 후의 값이 작아지는 경향을 가지고 있다. 특히 도막의 두께가 증가함에 따라 경도가 증가한다는 것은 Table 3. 3. 4.의 pendulum hardness 측정결과를 통해서 알 수 있었고, 동적탄성계수는 도막의 두께에 따른 영향이 적음을 Figure 3. 3. 28.를 통해 알 수 있다. 이는 고분자물질로 이루어진 도료보다는 기재인 목재의 영향을 크게 받는다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 그러나 도막 자체가 가지는 경도가 큰 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우에는 동적탄성계수의 값이 다른 두 도료에 비해 큰 것을 통해 도막이 가지는 경도에 따른 영향을 전혀 무시할 수는 없다는 것을 알 수 있다.

Figure 3. 3. 28.에서 나타나는 도막의 두께에 따른 전단탄성계수는 도장처리 후 미도장처리 시편에서 나타나는 시편에 따른 편차가 크게 나타나지 않는다. 도막의 두께에 따른 영향이 크지 않았으나 도료에 따른 차이는 나타났다. 그리고 동적탄성계수와는 달리 전단탄성계수에서는 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 값이 작은 것으로 나타났다. 그리고 전단탄성계수는 동적탄성계수에 비해 기재인 목재의 영향을 덜 받는 것으로 생각된다.



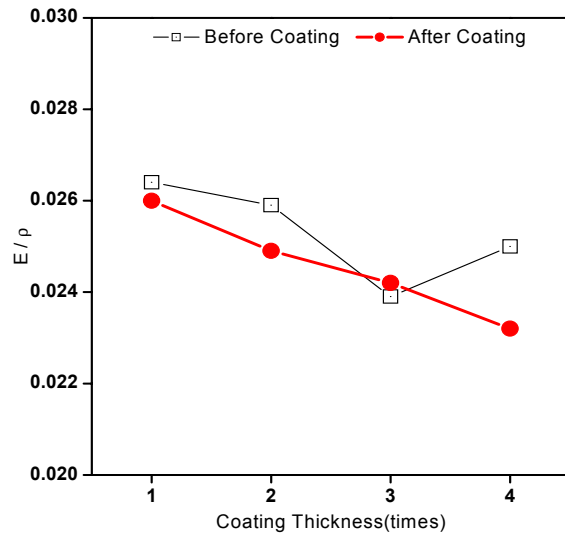
(a)



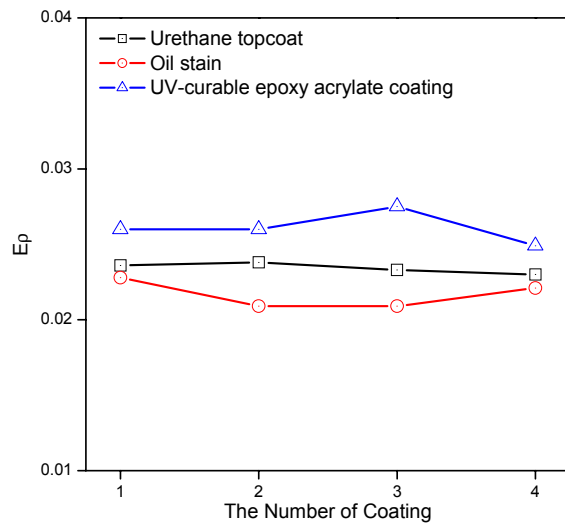
(b)

Figure 3. 3. 30. 도장 처리 횟수의 증가에 따른 도료의 비탄성계수( $E/\rho$ )





(c)

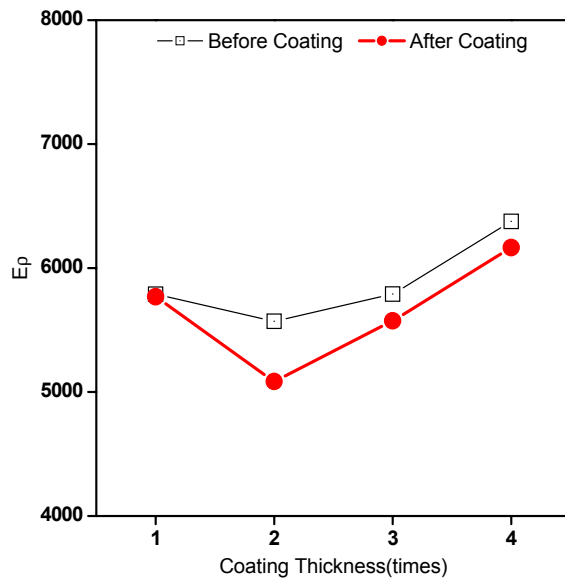


(d)

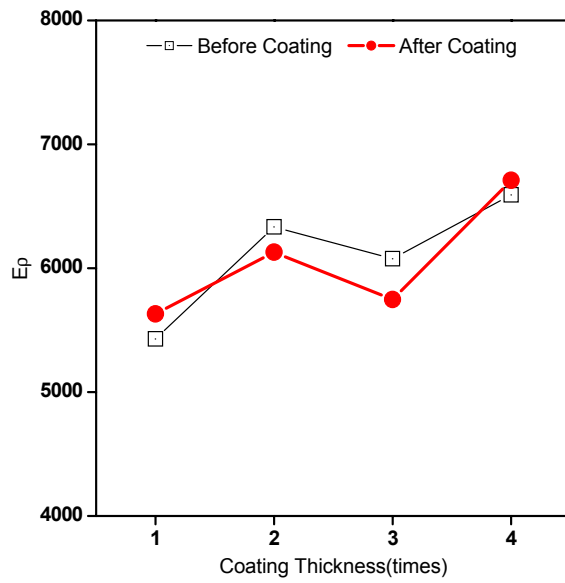
a: 우레탄 상도도료, b: 오일스테인,

c: 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료, d: 종합

Figure 3. 3. 30. 도장 처리 횟수의 증가에 따른 도료의 비탄성계수( $E/\rho$ )

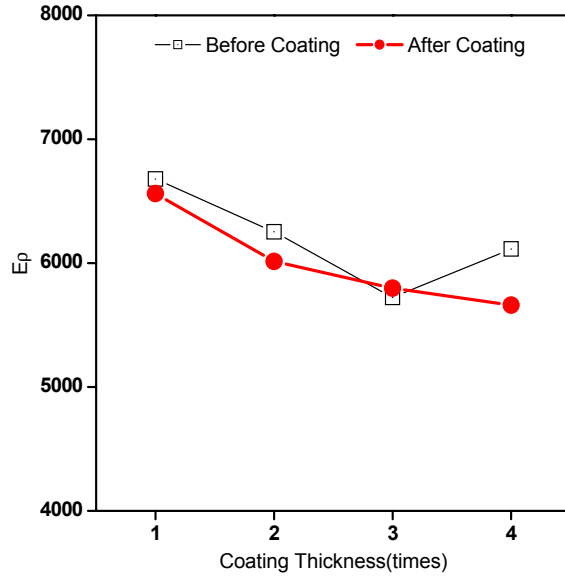


(a)



(b)

Figure 3. 3. 31. 도장 처리 횟수의 증가에 따른 도료의 음의 반응성( $E\rho$ )



(c)

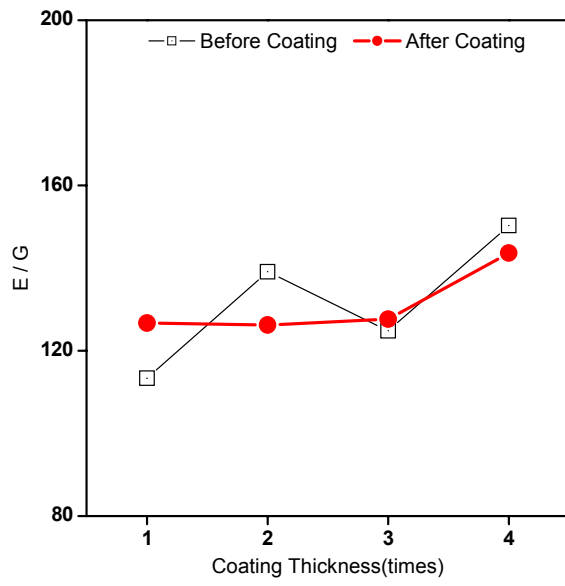
a: urethane topcoat, b: oil stain, c: UV-curable epoxy acrylate coating

Figure 3. 3. 31. 도장 처리 횟수의 증가에 따른 도료의 음의 반응성( $E\rho$ )

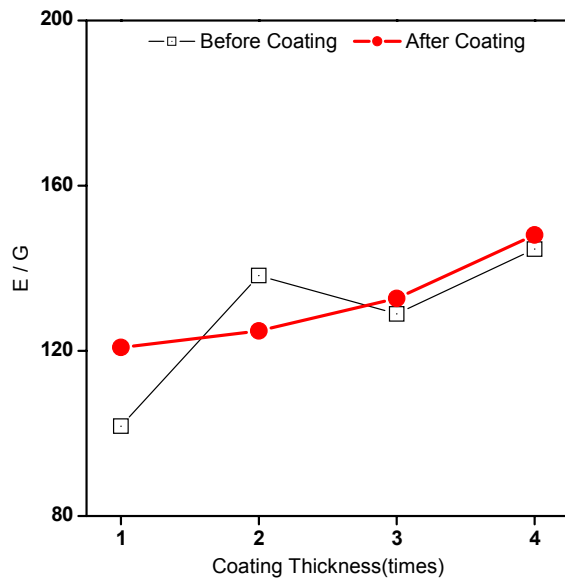
밀도와의 관계를 통하여 비탄성계수( $E/\rho$ )와 음의 반응성( $E\rho$ )을 통하여 음을 평가하기 위해 Figure 3. 3. 30와 31.에서는 도막의 두께에 따른 비탄성계수와 음의 반응성을 나타낸 것이다. 비탄성계수가 가지는 물리적 의미는 동일한 힘이 가해졌을 때, 비탄성계수가 클수록 소리가 잘 발생하는 것을 의미하며, 진동전달속도와 관련이 있다. 이러한 비탄성계수는 Figure 3. 3. 30-(a), (b), (c)에서와 같이 도막의 영향보다는 기재인 목재의 변위차로 발생하는 값에 영향을 크게 받는다. 이것은 앞의 동적탄성계수의 경향과 마찬가지로 시편에서 도막이 차지하는 비율이 시편 전체에서 목재가 차지하는 비율에 비해 크게 작고 목재의 탄성계수가 각각의 도료가 지니고 있는 탄성계수보다 크기 때문에 발생하는 것이다. 그러한 점을 감안하면 Figure 3. 3. 30-(d)에서와 같이 도막의 두께가 증가함에 따라 비탄성계수가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다.

도막이 가지는 음의 반응성을 의미하는  $E\rho$ 는 Figure 3. 3. 31-(a), (b), (c)에서와 같이 우레탄 상도도료와 오일 스테인은 도막의 두께가 증가함에 따라 음의 반응성이 증가하였으나, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 도막의 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 도막이 가지는 경도와 탄성적인 성질이 큰 도막일수록 음의 반응도가 높아지고 유연도가 떨어져 음의 반응성이 낮아지기 때문이다. Table 3. 3. 4.을 통해 도장처리 후 UV 경화형 도료의 경도가 도막의 두께가 증가함에 따라 크게 증가하였음을 통하여 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 음의 반응성이 도막의 두께가 증가함에 따라 감소하는 것을 보여준다. 비탄성계수와 음의 반응성은 도막이 시편에서 차지하는 비율이 작기 때문에 밀도에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있다.

Figure 3. 3. 32.에서 나타나는  $E/G$ 의 값은 음의 깊이 혹은 고저를 의미하며 우레탄 상도도료와 오일스테인은 도막의 두께가 증가함에 따라  $E/G$ 의 값이 증가하고, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 감소하는 경향을 보여준다. 이는 우레탄 상도도료와 오일스테인은 도막의 두께가 증가함에 따라 소리가 깊어지고 저음화 되기 때문에 이에 따라 반주부가 강해지는 것을 의미하며, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 소리가 얇아지고 고음화 되기 때문에 melody부가 강해지는 것을 의미한다.

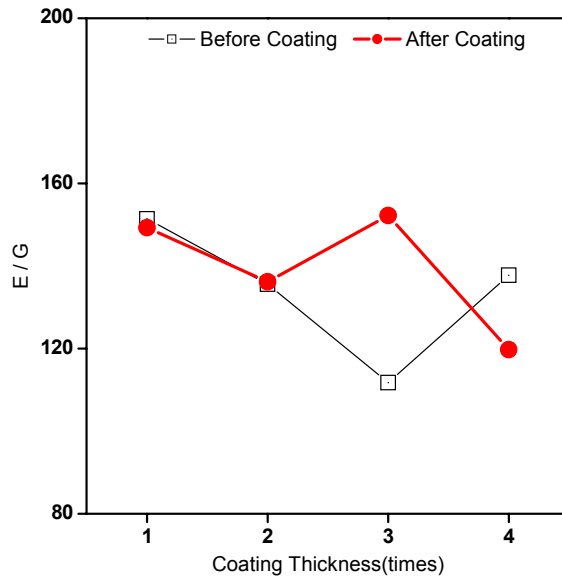


(a)



(b)

Figure 3. 3. 32. 도장 처리 횟수의 증가에 따른 도료의 E/G



(c)

a: urethane topcoat, b: oil stain, c: UV-curable epoxy acrylate coating

Figure 3. 3. 32. 도장 처리 횟수의 증가에 따른 도료의 E/G

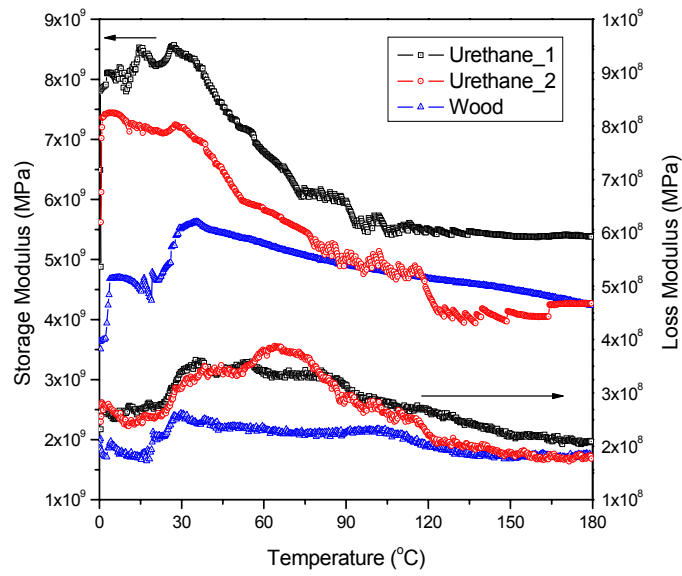
## 2) DMTA에 의한 점탄성적 성질

대부분의 고분자 물질은 탄성적 성질과 점성적 성질 사이의 거동을 지니며 이를 물질의 점탄성적 성질이라고 한다. 그러므로 이러한 고분자물질(도료)의 점탄성적인 성질을 측정하는 방법으로 DMTA가 일반적으로 사용된다. DMTA는 물질에 주기적으로 force를 변화시키면서 물질의 기계적 동적 열특성을 측정하는 기술로써 통상 물질의 stretching 혹은 torsioning을 측정함으로써 물질의 점탄성적인 성질을 파악한다.

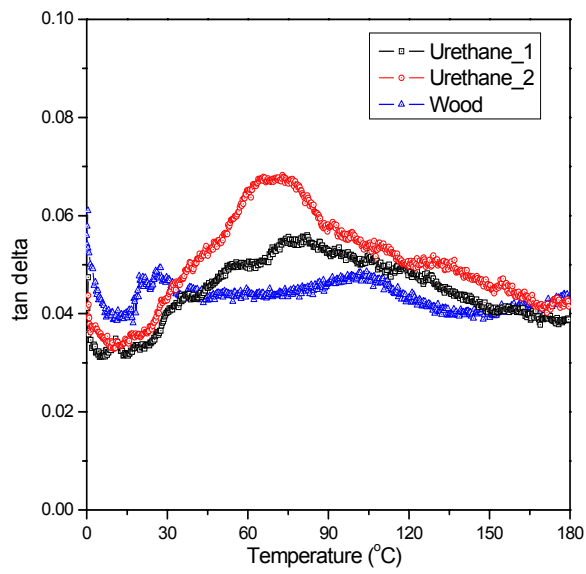
DMTA에서는 저장탄성율, 손실탄성율과 대수감쇄율 등을 얻을 수 있다. 저장탄성율 (storage modulus, elastic component;  $E'$ )과 손실탄성율(loss modulus, viscous component;  $E''$ )은 각각 물질의 탄성적인 성질과 점성적인 성질을 나타내는 부분이며, 대수감쇄율  $\tan \delta = E''/E'$  (damping factor) 은 물질의 탄성적인 영역과 점성적인 영역을 함께 나타내는 부분이다.

저장탄성율이 증가하면 물질의 탄성영역이 증가하여 물질은 딱딱해지고, 감소하면 물질의 점성영역이 증가하여 부드러워진다. 특히 기존의 연구를 통해  $\tan \delta = E''/E'$ 의 수치가 높아지면 음향적 성질은 저하되는 것으로 보고된 바 있다. 이러한 저장탄성율, 손실탄성율과 대수감쇄율을 통하여, 물질의 점탄성적 성질, 유리전이온도 등의 정보를 제공해주며 고분자 물질의 구조(chain length, branching등)에 직접 관련이 있다.

우레탄 상도용 도료의 점탄성적인 성질은 Figure 3. 3. 33에 나타내었다. 우레탄 상도용 도료의 경우 도장처리를 하는 경우 저장탄성율과 손실탄성율이 증가하였으며, 대수감쇄율은 도막의 두께가 증가함에 따라 증가하므로 음향적 성능이 도막의 두께가 증가함에 따라 감소될 것으로 예상할 수 있다.



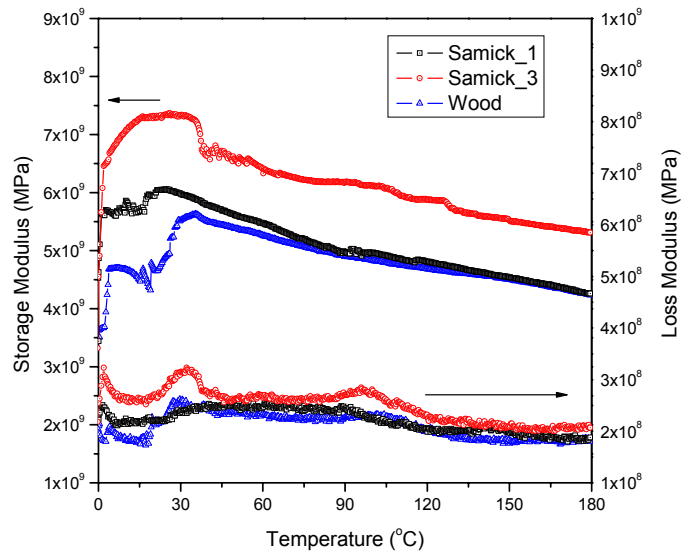
(a)



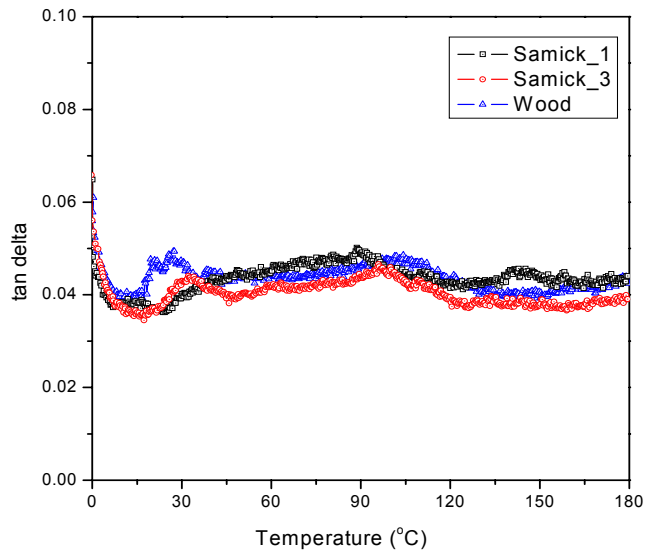
(b)

Figure 3. 3. 33. 우레탄 상도용 도료의 두께에 따른 저장탄성율과 손실탄성율(a), 대수감쇄율(b)



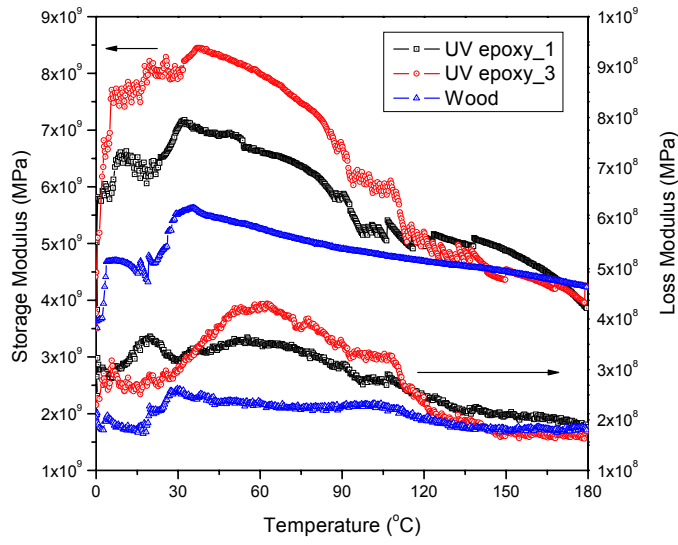


(a)

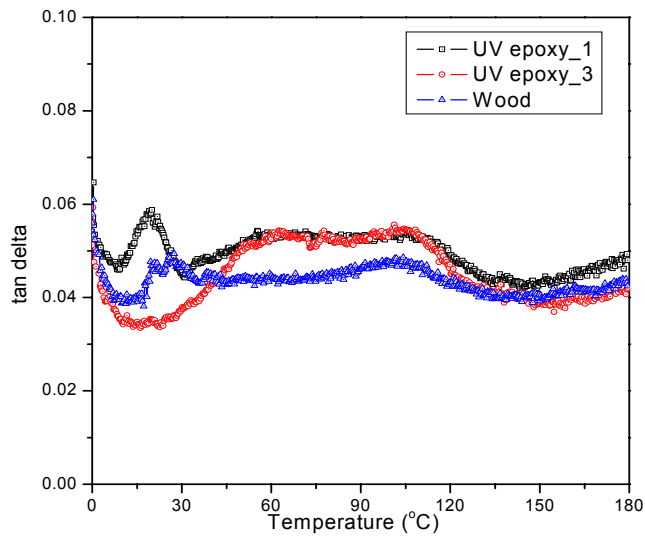


(b)

Figure 3. 3. 34. 오일 스테인의 두께에 따른 저장탄성율과 손실탄성율(a), 대수감쇄율(b)



(a)



(b)

Figure 3. 3. 35. UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 두께에 따른 저장탄성율과 손실탄성율(a), 대수감쇄율(b)

오일스테인과 UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 점탄성적인 성질을 Figure 3. 3. 34 과 Figure 3. 3. 35에 나타내었다. 두 도료의 경우, 코팅의 두께가 증가함에 따라 저장탄성율이 증가하였으며, 손실탄성율도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 대수감쇄율의 경우 오일스테인의 경우 미처리시편과 비슷한 값을 나타내었으며, UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 증가한다.

결과적으로, 음향기능성 제품의 표면에 도장처리를 하는 경우 오일스테인을 제외한 도료들의 경우 미처리 시편보다 대수감쇄율이 증가하여 음향적 성능이 떨어질 것을 예상할 수 있으며, 도막의 두께가 증가하는 경우 일반적으로 음향적 성능이 떨어질 것으로 예상된다. 그 결과,

### 오일 스테인 >> UV 경화형 epoxy 도료 >> 우레탄 상도용 도료

임을 알 수 있었다.

위의 DMTA의 결과로는 음향기능성 제품의 표면에 도장처리를 하는 경우 도막의 두께가 작으면 작을수록 좋다는 것을 알 수 있으며, 사용한 도료 중에서는 음향성능 향상제가 가장 좋은 성능을 나타내었다.

#### 3) RPT에 의한 점탄성적 성질

목재 표면에 형성된 도막의 점탄성적 성질을 파악하기 위한 DMTA의 실험에서는 목재가 가지고 있는 여러 가지 요인들로 인하여 도막이 가지고 있는 점탄성적인 성질을 제대로 파악할 수 없었다. 이를 보완하기 위하여 도막자체가 가지는 점탄성적인 성질을 파악하기 위하여 목재가 아닌 아연도금 철판위에 각각의 도료를 코팅하여 Rigid-body pendulum type physical properties tester를 이용하여 측정하였다.

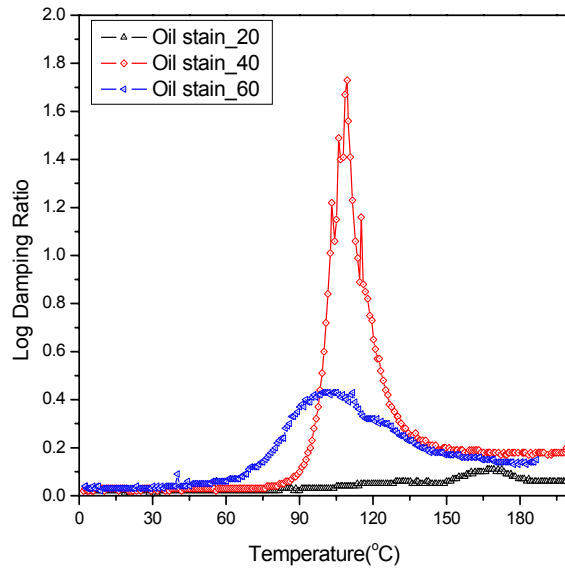


Figure 3. 3. 36. 음향성능향상제의 두께에 따른 log damping ratio

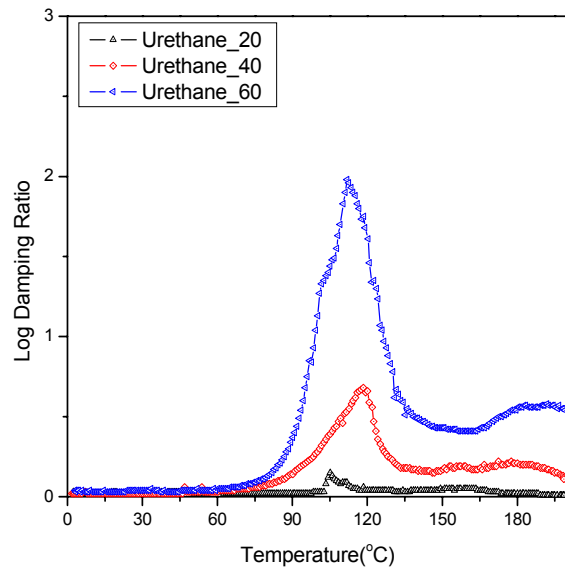


Figure 3. 3. 37. 우레탄 상도용 도료의 두께에 따른 log damping ratio

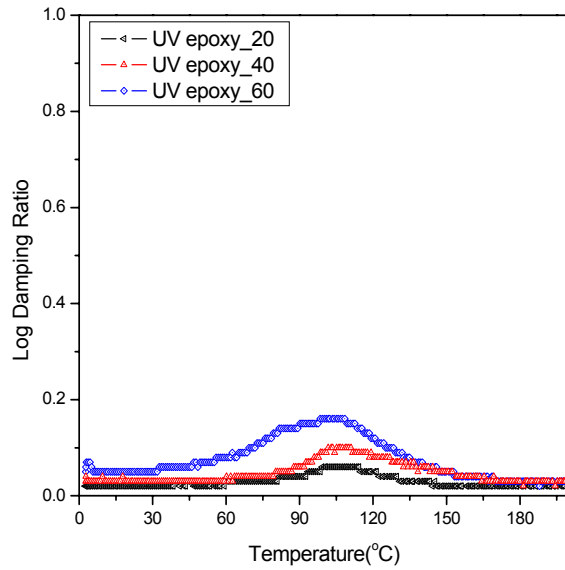


Figure 3. 3. 38. UV 경화형 epoxy 도료의 두께에 따른 log damping ratio

위의 Figure 3. 3. 36, 37, 38에서는 도막의 두께에 따른 점탄성적인 성질을 RPT를 이용하여 log damping ratio로 나타내었다. log damping ratio는 DMTA의 점탄성적인 성질과 음향적인 성질을 보여주는 대수감쇄율( $\tan \delta$ )과 같은 의미를 지니고 있으며, 이때 peak 점은 유리전이온도(glass transition temperature,  $T_g$ )를 의미한다. 그리고 이때의 유리전이온도는 도막이 형성된 그 상태에서의 도막 표면에서의 유리전이온도를 측정하는 것이기 때문에 형성된 도막의 특성을 잘 파악할 수 있다.

log damping ratio이 증가한다는 것은 음향적인 성능이 저하된다는 것과 도막의 유리전이온도가 상승한다는 것을 의미한다. 오일스테인은 peak의 값이 변하고 log damping ratio값이 일관성이 없는 이상한 값이 나왔으나, 우레탄 상도용 도료와 UV 경화형 epoxy 도료는 도막의 두께가 20, 40, 60  $\mu\text{m}$ 로 증가함에 따라 peak의 위치는 변함없지만 log damping ratio값이 증가하였다. peak 값은 고분자물질의 고유한 성질인 유리전이온도를 나타내는 것으로 같은 물질을 측정하는 경우 변함이 없어야 하며, log damping ratio값만 변화가 있어야 한다.

우레탄 상도용 도료와 UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 이를 만족하는 결과를 나타내었다. 그러나 오일스테인이 일정한 경향을 가지지 않는 것은 다른 도료와는 달리 오일스테인의 경우 목재에 스며들면서 막을 형성하는 형태의 도료이기 때문에 아연도금 철판 위에서의 경화는 표면에 그치게 되어 내부적인 미경화가 데이터의 부정확함을 유도하게 된 것으로 판단된다.

도막의 두께에 따른 점탄성적인 성질의 경우 RPT의 결과값은 DMTA의 결과를 만족하며 오히려 보다 정밀하고 뚜렷한 결과를 얻을 수 있었다.

다음은 같은 두께에서의 도료별 log damping ratio값을 비교하였다.

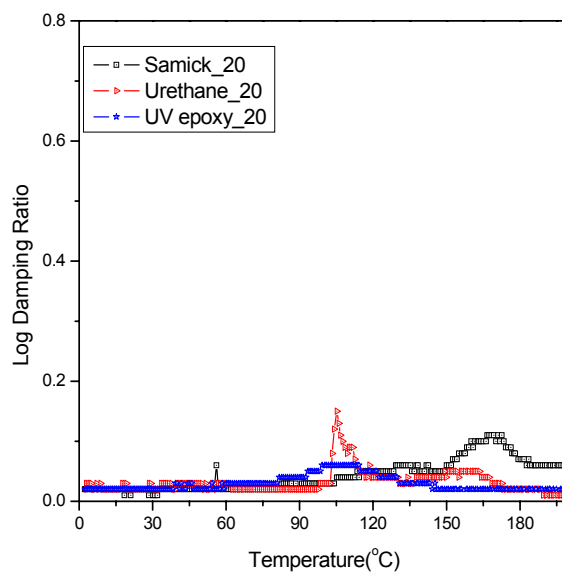


Figure 3. 3. 39. 20 $\mu$ m 두께에서의 각 도료의 log damping ratio

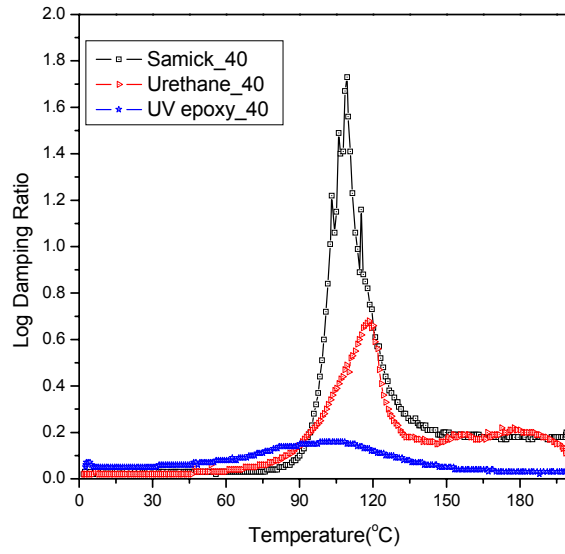


Figure 3. 3. 40. 40 $\mu\text{m}$  두께에서의 각 도료의 log damping ratio

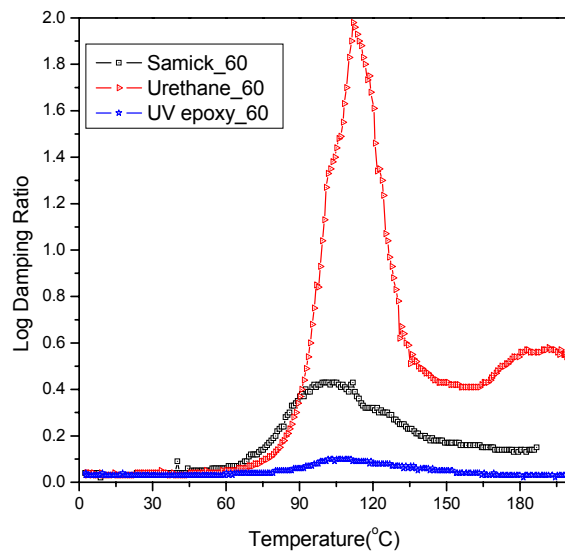


Figure 3. 3. 41. 60 $\mu\text{m}$  두께에서의 각 도료의 log damping ratio

20 $\mu$ m, 40 $\mu$ m, 60 $\mu$ m에서의 각각의 도료에서의 log damping ratio을 비교한 결과, 20 $\mu$ m의 경우는 큰 차이를 보이지 않았으나, 40 $\mu$ m, 60 $\mu$ m 등으로 도막의 두께가 증가함에 따라 log damping ratio값이 크게 차이가 남을 알 수 있었다. 그 결과,

### UV 경화형 epoxy 도료 >> 오일스테인 >> 우레탄 상도용 도료

임을 알 수 있었다.

위의 RPT의 결과로는 음향기능성 제품의 표면에 도장처리를 하는 경우 도막의 두께가 작으면 작을수록 좋다는 것을 알 수 있으며, RPT를 통하여 얻어진 도막의 음향특성은 사용한 도료 중에서는 UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료가 가장 좋은 성능을 나타내었다.

#### 마. 결론

도막의 두께에 따른 목재시편의 음향적인 성능을 알아보기 위해 우레탄 상도도료와 오일스테인, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료를 사용하여 도막의 두께가 증가함에 따른 동적탄성계수와 전단탄성계수를 구하였다. 그리고 밀도와 상관계수와 두 탄성계수간의 상관계수를 통하여 도막의 두께에 따른 목재시편의 음향적인 성능을 분석하였다.

도막의 동적탄성계수와 전단탄성계수는 pendulum hardness를 통해 측정된 도막 표면의 경도와 상관계수를 보였으나, 도막의 두께에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다. 또한 밀도와 상관계수를 통하여 유추하여 본 비탄성계수( $E/\rho$ )와 음의 반응성( $E\rho$ ) 등의 음향성능은 도막의 두께에 따른 영향보다 기재인 목재가 가지는 영향이 크게 나타났다. 그러나 비탄성계수에서는 도막의 두께가 증가함에 따라 비탄성계수가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 도막의 경도가 높은 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우도 같은 경향을 보여주었다. 그리고 음의 깊이를 의미하는 E/G는 도막의 탄성영역 즉 경도에 따라 상대적인 경향을 보여주었다.

전반적으로 시편에서 도막이 차지하는 비율이 적어 기재인 목재의 영향이 커서 도막의 두께에 의한 영향을 정확히 분석하기는 어려웠지만, 도막의 두께가 증가함에 따라 음향적인 성능이 감소되는 것으로 사료된다.



### 3. Sound Pressure Level을 통한 음향기능성 도료의 평가

#### 가. 서론

목재는 자연적인 소재이기 때문에 인간의 피부가 닿는 부분은 되도록이면 목재질감을 갖는 것으로 만들려고 한다. 인공적인 현대 생활에서 인간은 자연으로 돌아가고 싶은 욕구를 충족하기 위하여 인간은 미를 추구하고 예술에 대한 욕구가 있기 때문에 목재를 악기의 재료로도 사용하여 왔다. 목재로 만든 악기는 그 가공성이 좋고 무엇보다도 그 특유의 음색과 음향성능 좋기 때문에 아직도 많은 악기들이 목재 소재로 만들어지고 있다. 그러나 목재로 만든 악기는 아직도 전통적인 재래방식으로 만들어지고 있으며, 이에 따라 체계적이고 과학적인 연구가 많이 진행되지 않았다.

물리학자들에 의해 연구가 진행되긴 했지만 대부분은 목재의 조직, 성분, 점탄성, 동적 특성 및 이방성 등에 대한 이해 부족 및 실제 음향제품설계시 소재의 동적 특성에 대한 정확한 정보제공의 미흡하였다. 그로 인해 물리학자들 또는 제품설계자들만의 노력만으로는 악기 등 많은 목제품의 설계 및 그 발음 메카니즘의 구명에는 한계가 있었던 것도 사실이다.

본 연구에서는 국산 악기재로 쓰이는 4가지 수종에 4종류의 도장처리 후 형성된 도막의 두께와 물리적인 성질인 경도와의 관계물리적인 이러한 성질의 변화가 음향성능에는 어떤 영향을 주는지 Sound Pressure Level 측정을 통하여 규명하고자 하였다. Sound Pressure Level 은 주로 아파트와 같은 주택이나 여러 건축물에 있어서의 차음성, 흡음성, 소음성 측정 등에 주로 사용되었으며, 지하철과 같은 여러 소음 공간의 소음측정에 주로 이용되었다. 본 연구에서는 처음으로 목재소재 악기의 음향성능 측정에 사용하였다. 물리적인 성질인 경도와 두께가 변했을 때 음향성능에는 어떤 영향을 주는지 하는 것이다.

#### 나. 실험재료 및 실험방법

##### 1) 실험재료

악기용 재질로 사용되는 여러 가지 목재 중에서 오동나무(*Paulownia coreana*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 밤나무(*Castanea crenata var. dulcis*), 소나무(*Pinus densiflora*),의 4가지의 국내산 목재를 선택하여 기재로 사용하였다. Table 3. 3. 5에 각각의 기재의 함수율, 비중을 나타내었다. 비중은 소나무가  $0.56 \pm 0.021$ 으로 가장 크고, 다음으로 밤나무가  $0.50 \pm 0.034$ 으로 큰 비중을 인데 비해, 비중이  $0.36 \pm 0.025$ 인 오동나무와  $0.27 \pm 0.004$ 인 잣나무는 비교적 작은 비중을

지닌 기재이다. 샘플 크기는 5cm × 10cm 준비하여 22±1℃, 상대습도 50±2%에서 1개월 이상 조습처리하였다. 사용된 도료는 천연 바니쉬, 오일스테인, 우레탄 상도도료, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료이다.

Table 3. 3. 5. 기재의 함수율과 전건비중

Species	Moisture Content (%)	Oven-dry specific gravity
오동나무( <i>Paulownia coreana</i> )	6.67±0.63	0.27±0.004
잣나무( <i>Pinus koraiensis</i> )	9.75±0.88	0.36±0.025
밤나무( <i>Castanea crenata var. dulcis</i> )	11.44±0.31	0.50±0.034
소나무( <i>Pinus densiflora</i> )	9.39±0.39	0.56±0.021

## 2) 실험방법

### 가) 경화방법

조습처리된 목재시편에 바코터(No. 22)를 이용하여 천연 바니쉬, 오일스테인, 우레탄 상도도료, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료를 각각 코팅하였다. 천연 바니쉬와 오일스테인, 우레탄 상도도료의 경우 상온경화형 도료이기 때문에 코팅 후 충분한 경화를 위하여 22±1℃, 상대습도 50±2% 조건에서 7일 동안 경화시켰다.

자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 2,000 mJ/cm<sup>2</sup>의 광량으로 고압수은램프 (high-pressure mercury lamp: 100 W/cm, main wavelength: 365nm)를 사용하여 경화시켰다. 광량은 Figure 3. 3. 42와 같은 광량측정기 IL390C Light Bug(International light, Inc., USA)로 측정하였다.



Figure 3. 3. 42. 광량측정기 IL390C Light Bug

나머지 샘플을 경화시키는 동안 같은 조건에서 조습처리하였다. 총 코팅횟수는 4회이며 각각의 도료를 경화시킨 후에 Figure 3. 3. 43과 같은 도막두께 측정기 ID-C112(Mitutoyo Corp., Japan)를 사용하여 도막두께를 측정하였다.



Figure 3. 3. 43. 도막두께 측정기 ID-C112

나) Sound leveling test

도막의 표면이 가지는 점탄성적인 성질과 음향특성을 분석하기 위해 Figure 3. 3. 44.의 Sound leveling test를 사용하였다. 일정한 크기의 쇠구슬을 떨어뜨리기 위해 연구실에서 제작된 Figure 3. 3. 45의 형태의 시험장치를 통하여 일정한 크기와 무게를 가진 쇠구슬을 일정한 높이에서 일정한 속도로 떨어뜨려 도막에 닿았을 때 발생한 소리의 크기를 Sound leveling tester를 통해 측정하였다.



Figure 3. 3. 44. Sound leveling meter의 모습

이러한 sound leveling tester의 원리는 다음과 같다. 물체가 진동하면 이진동이 대기압을 변화시키고, 이 변화가 고막을 진동시켜 소리로서 듣게 된다. 즉, 소리는 대기압의 압력 변화이며, 이변동분을 음압(sound pressure)이라고 하고, 소리의 물리적인 크기를 나타낸다. 음압은 압력이므로 Pa 단위를 사용 한다.

음의 진행방향에 직각이고, 단위 면적( $1m^2$ )을 단위시간(1초)에 통과하는 음의 에너지를 파워로 나타낸 것을 음의 세기 (sound intensity)라고 한다. 음의 세기는  $I$ 는 다음 식으로 구한다.

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (W/m^2)$$

여기에서  $\rho$ 는 매질의 밀도( $kg/m^3$ )이며,  $c$ 는 음속( $m/s$ ),  $\rho c$ 는 매질의 고유 음향 임피던스 (specific acoustic impedance),  $p$ 는 음압의 실효치이다. 위의 식에서 알 수 있듯이 음의 세기는 음압의 제곱에 비례한다. 음압 레벨(sound pressure level)은 다음 식과 같이 SPL로 표기한다.

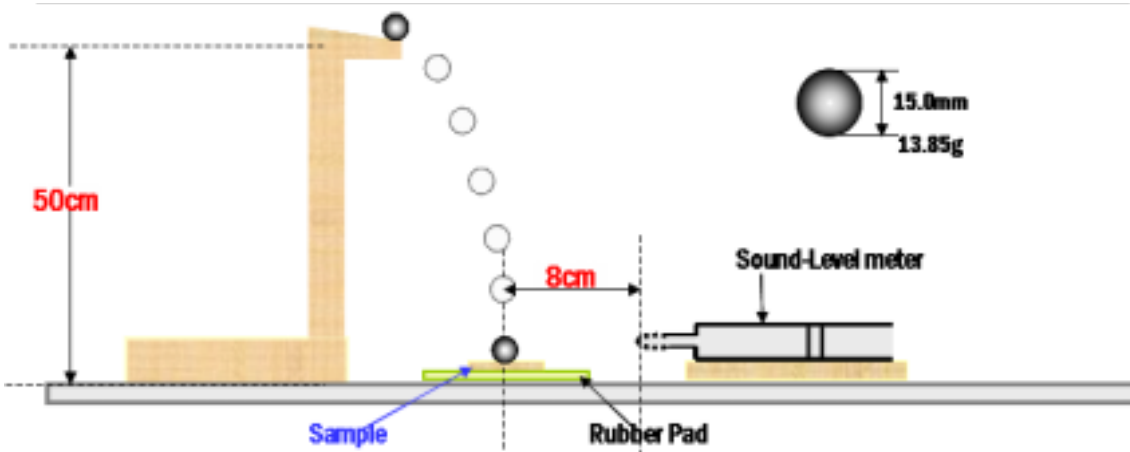
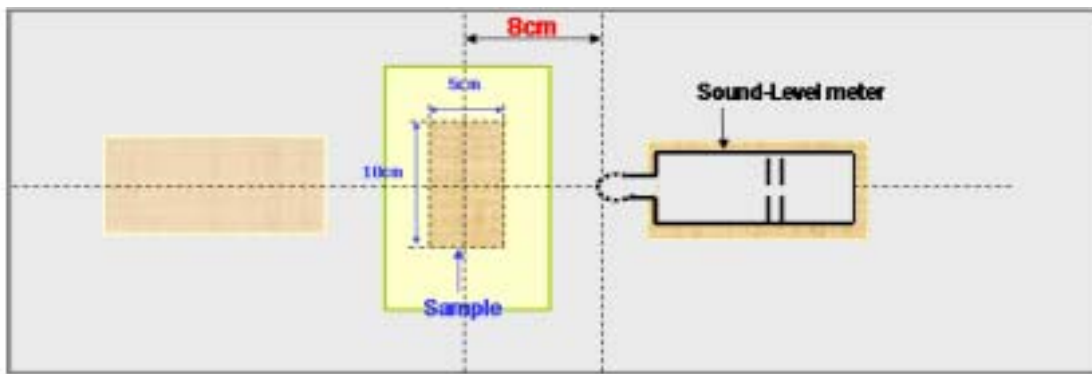


Figure 3. 3. 45. Sound leveling test의 모식도

$$\text{Sound Pressure Level (SPL)} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \text{ [dB]}$$

여기에서  $P_0$ 는  $2 \times 10^{-4}$   $\mu\text{bar}$ (= 20  $\mu\text{Pa}$ )이고,  $P$ 는 대상으로 하는 음의 음압이다.

이러한 SPL을 이용하여 도막의 물리적인 성질과 음향특성과의 관계를 규명하기 위하여 RION사의 NA-24 A-weighting을 사용하여 sound power level(SPL)을 측정하였다. 각각의 수종별과 도료별 코팅 전, 1회 2회, 3회, 4회 도장 후, 총 5회 측정을 하였다. 음향측정의 schematic diagram은 Figure 3. 3. 39에 보이는 바와 같이 샘플을 고무판 위에 놓고, 지름 15.0 mm, 13.85 g의 무게를 가지는 쇠구슬을 50cm 높이에서 샘플 위로 자유낙하시키고 이 때 발생하는 소리를 sound level meter를 샘플에서 수평으로 8cm 정도 떨어뜨려 위치시키고, sound pressure level을 측정하였다

#### 다) 도막의 경도 측정

도막 표면이 가지는 점탄성적인 성질 중 탄성적인 영역과 관련이 있는 경도에 대해 알아보기 위해 무도장처리 목재시편과 도장처리 후의 도막의 경도를 측정하여 보았다. 경도를 측정하기 위해 Figure 3. 3. 7의 형태를 가진 Sheen사의 pendulum hardness tester를 사용하였다. König pendulum을 사용하였으며 측정조건은  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 와 상대습도  $50 \pm 2\%$ 였으며 ASTM D 4366에 의거하여 실험하였다.

### 다. 결과 및 토론

#### 1) 도료의 종류에 의한 영향

음향기능성 도료 도막이 가지는 점탄성적인 성질과 그에 따라 발생하는 소리의 정도를 조사하기 위해 sound level tester를 이용하여 각 도료에 따른 sound pressure level을 측정하였다. 이 때의 각각의 도료들은 오동나무에 1회 도장처리 한 것을 기준으로 하였다. 측정된 결과를 Figure 3. 3. 46에 나타내었으며, 도장 처리 전의 오동나무에서는 54.82 dB의 값이었으나, 도장처리한 결과 천연바니쉬, 오일스테인, 캐슈도료, 우레탄상도도료에서는 도장처리하기 전보다 작은 값을 나타냈으나, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료에서는 오히려 큰 값이 나타났다. 이는 도료에 따라 형성되는 도막에서의 표면경도에 따라 나타나는 차이점이라고 볼 수 있

으며 Figure 3. 3. 12에서의 pendulum hardness결과를 통해서도 확인할 수 있다. 이는 탄성영역이 클수록 음의 반응도와 관련이 있는  $E/\rho$ 값이 커지는 것과 관련이 있으며, 또한 탄성영역이 클수록 도막의 경도가 커지는 것과 비례적인 관계를 가지고 있다. 즉, 도막이 가지는 sound pressure level의 값은 음의 반응도와 도막의 경도와 상관관계가 있으며, 도막의 탄성영역이 커짐에 따라 음의 반응도 즉 소리가 커진다는 것을 의미한다.

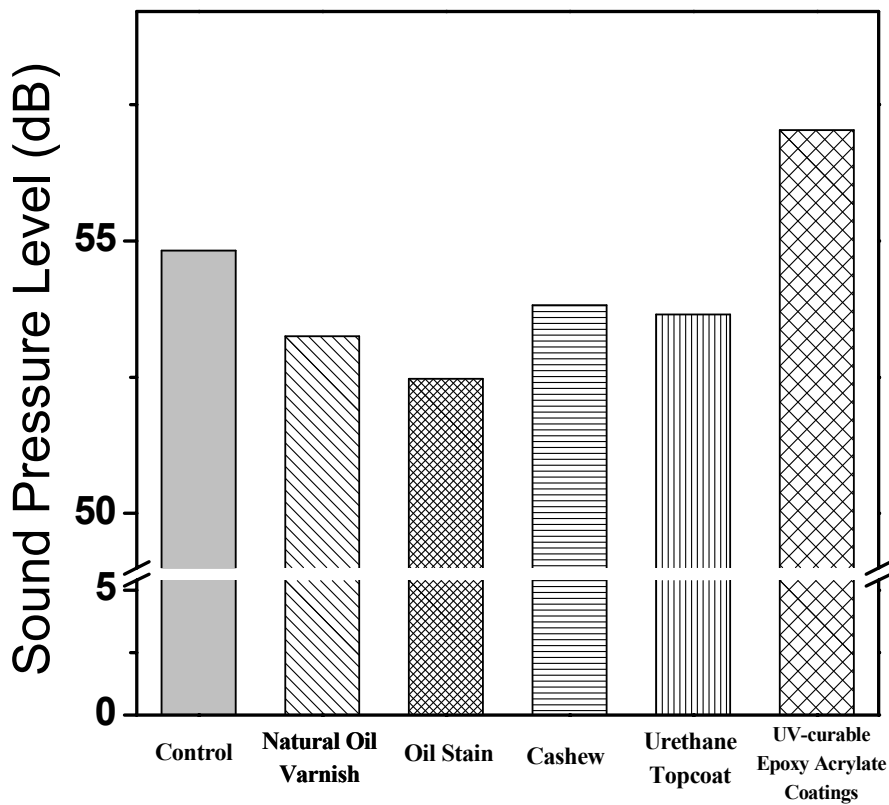


Figure 3. 3. 46. Sound pressure level of several coatings

## 2) 도료의 도막두께에 의한 영향

Table 3. 3. 6.에서는 도료의 종류별 목재의 종류에 따라 도장횟수의 증가에 따른 도막의 두께를 측정된 값을 나타낸 값이다. 이때의 값은 도장처리 1회, 2회, 3회, 4회의 값을 각각 측정하여서 기록하였다.

도료별로 보면 점도가 낮은 오일스테인과 천연바니쉬가 얇은 두께의 도막이 형성되었고, 특히 악기용 도료인 오일스테인의 경우는 매우 얇은 두께로 코팅되었다. 점도가 비교적 높은 우레탄 상도도료의 경우 두껍게 코팅되었고, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 경화특성상 완전히 경화된 층위에 코팅되었기 때문에 다른 코팅들에 비해 매우 두껍게 코팅되었다. 이는 도료의 점도에 의한 영향으로 판단되며, 필요에 따라서 같은 점도를 유지시키면 같은 두께의 도막을 올리는 것이 편리해질 것이다.

또한 도막의 두께에 대한 목재의 종류가 미치는 영향을 살펴보면, 비중이 낮은 오동나무, 잣나무가 비중이 높은 밤나무, 소나무 보다 더 두껍게 코팅되었다. 여러 번 도장 시에 그 차이가 더 커졌다. 또한 수종별로 두께를 살펴보면, 비중이 낮은 오동나무, 잣나무의 경우 표면의 조직도 치밀하기 않기 때문에 더 표면으로 흡수되기 때문에 얇은 두께를 나타냈지만, 여러 번 도장 시에는 더 두껍게 나타났다.



Table 3. 3. 6. 도료의 종류와 기재의 수종에 따른 도막의 두께

Coatings	Number of Coatings	Thickness of Coatings			
		<i>Paulownia coreana,</i>	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Castanea crenata var. dulcis</i>	<i>Pinus densiflora</i>
Natural Oil Varnish	1	13.50±2.10	24.20±3.58	14.33±3.19	12.50±3.96
	2	22.33±3.36	36.50±5.77	21.00±4.05	20.83±4.15
	3	52.17±8.15	54.33±7.71	45.17±5.94	47.33±8.20
	4	77.33±7.14	75.67±9.42	57.17±6.80	56.40±8.09
Oil Stain	1	17.50±1.38	21.20±3.14	15.33±3.33	18.70±3.99
	2	22.40±4.02	35.77±6.64	23.17±4.57	25.30±4.56
	3	29.80±9.42	46.50±6.79	28.17±5.73	34.80±6.02
	4	36.20±9.03	53.40±6.62	30.83±4.96	43.20±6.26
Urethane Topcoat	1	46.33±10.30	49.50±4.39	40.33±5.69	47.50±7.27
	2	65.33±14.62	90.50±6.10	50.67±6.63	62.00±8.54
	3	90.00±16.60	117.67±14.61	76.00±7.94	74.33±8.96
	4	117.50±19.23	137.50±14.72	97.83±9.97	120.33±6.65
UV-curable Epoxy Acrylate coatings	1	78.50±15.37	75.00±12.54	69.83±10.17	74.33±12.98
	2	145.90±6.15	138.00±15.66	126.50±10.17	126.00±31.93
	3	253.50±24.35	256.00±20.02	193.80±15.15	191.67±26.87
	4	376.83±20.48	404.83±26.13	301.00±21.62	276.83±23.72

### 3) 도막의 두께에 따른 pendulum hardness

Figure 3. 3. 47에서는 도료의 종류와 목재의 수중에 따른 도료의 표면경도를 pendulum hardness test를 이용해 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이때 도막의 두께가 0인 첫 값은 기재의 경도를 나타내는 값이며, 이때 기재의 경도는 밤나무, 소나무, 오동나무, 잣나무의 순으로 나타났다. 그러나 기재의 비중은 오동나무, 잣나무, 밤나무, 소나무의 순으로 기재의 경도는 비중에 의한 영향이 적게 나타남을 알 수 있고 오히려 비중보다는 목재의 치밀함과 관련이 있다. 잣나무, 가장 낮은 비중을 보인 오동나무보다 높게 나타났고, 가장 높은 비중을 지닌 소나무도 표면 경도는 밤나무에 비해 약간 낮은 결과를 나타냈다.

Figure 3. 3. 47은 도막의 두께, 기재의 종류와 pendulum hardness와의 관계를 보여주고 있다. 각각의 도료별로 살펴보면 가장 먼저 점도가 낮은 오일스테인의 경우 도막의 두께가 얇기 때문에 기재의 경도가 도막의 경도에 영향을 크게 미치게 되어 Figure 3. 3. 47-(a)에서 나타난 결과와 같이 기재인 밤나무, 소나무, 오동나무, 잣나무의 경도의 순으로 도막의 경도를 유지하게 된다. 그리고 기재의 수중에 관계없이 도막의 두께가 증가함에 따라 도막의 표면 경도가 함께 증가하는 경향을 나타낸다.

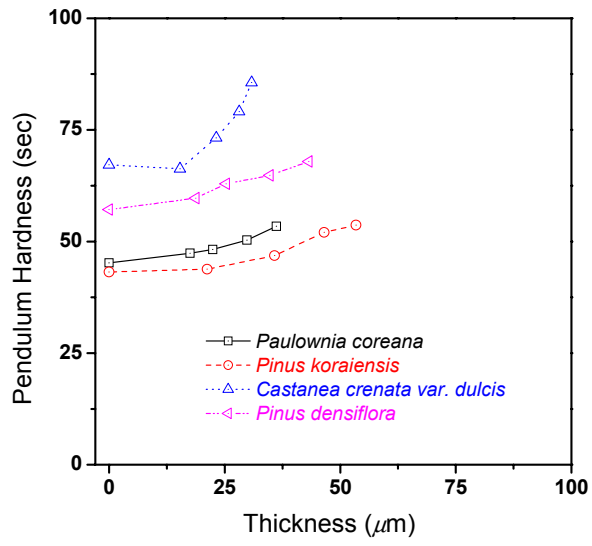
천연 바니쉬의 경우 도료 자체의 특성상 완전 건조가 일어나지 않기 때문에 7일 건조 후에도 표면에서의 완벽한 지축건조가 발생하지 않아 도막의 두께가 증가할수록 표면 경도는 감소하는 경향이 나타난다. 이는 도장처리한 표면이 tacky하기 때문에 pendulum hardness를 측정함에 있어 천연바니쉬의 tacky함이 진자의 움직임을 방해하여 Figure 3. 3. 47-(b)와 같이 일정 두께 이상의 천연바니쉬에서는 같은 결과를 나타내게 된다. 그리고 도막두께가 두꺼워질 수록 tacky한 영향이 커져서 오히려 도막의 경도가 감소하는 결과가 나타난다.

Figure 3. 3. 47-(c)에서 나타난 우레탄 상도도료의 목재수종과 도막두께에 대한 영향을 나타내었다. 점도가 큰 우레탄 상도도료의 경우 도막 두께가 두껍게 나타나기 때문에 표면의 경도가 증가할 것으로 예상되었으나, 도막의 두께가 증가하는 양에 비해 표면의 경도가 적은량으로 증가하는 경향이 나타났다. 이는 우레탄 상도도료는 Figure 3. 3. 12에서 나타나는 것처럼 유연한 도료이기 때문에 도막두께에 증가에 비례하여 크게 표면 경도가 증가하지는 않았다. 그리고 도막의 두께가 두꺼워지더라도 경도가 크게 증가하지 않는다.

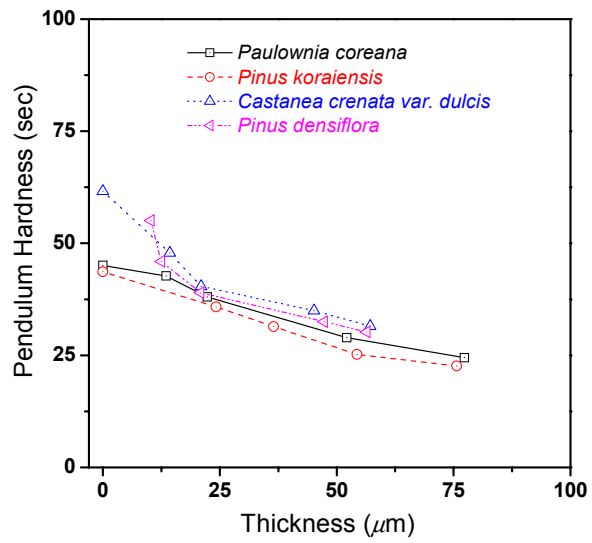
Figure 3. 3. 47-(d)에서는 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 결과를 나타낸 것이다. 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 도장처리 횟수가 증가함에 따라 급격하게 도막의 두께가 증가하고 도막의 표면경도도 크게 증가하였다. 이는 Figure 3. 3. 12에서 나타난 것처럼 도막 자체의 경도가 높기 때문이다. 도막이 후막이 되더라도 경도에 미치는 기재의 영향

은 나타났다.

완전경화가 일어나지 않는 natural oil varnish를 경우를 제외하고 대부분이 도막의 두께가 두꺼워질수록 경도도 증가하는 것을 알 수 있다. 그 중에서 urethane topcoat의 경우는 도료자체의 영향으로 도막의 두께가 두꺼워지더라도 경도가 증가하는 양이 가장 적었다. 이렇게 도막의 두께와 경도가 정비례관계를 나타내는 것은 목재조직에 의한 표면보다 도막이 형성 후의 표면이 더욱 더 단단하기 때문이다. 이로써 도료가 목재표면을 보호하는 기능뿐만 아니라 경도와 같은 물성도 변화시키기 때문에 약기를 통해 발생시키는 음향적인 특성에도 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

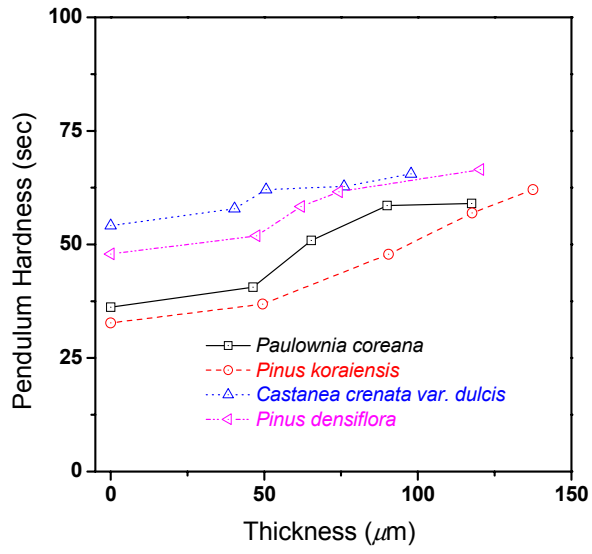


(a)

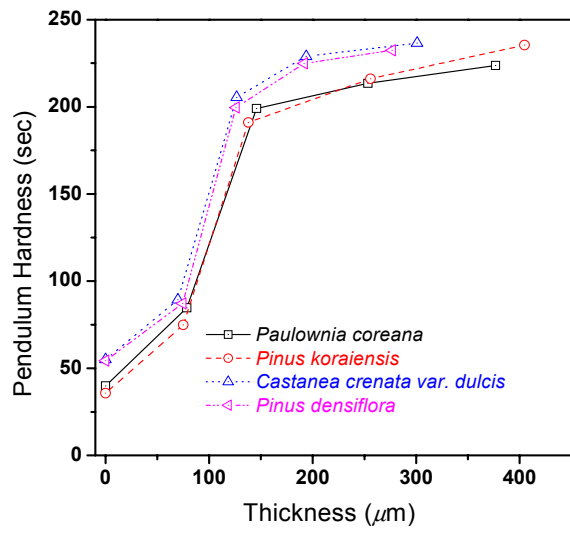


(b)

Figure 3. 3. 47. 도막의 두께에 따른 도막표면의 pendulum hardness



(c)



(d)

a: oil stain, b: natural varnish,

c: urethane topcoat, d: UV-curable epoxy acrylate coating

Figure 3. 3. 47. 도막의 두께에 따른 도막표면의 pendulum hardness

#### 4) 도막의 두께에 따른 sound pressure level (dB)

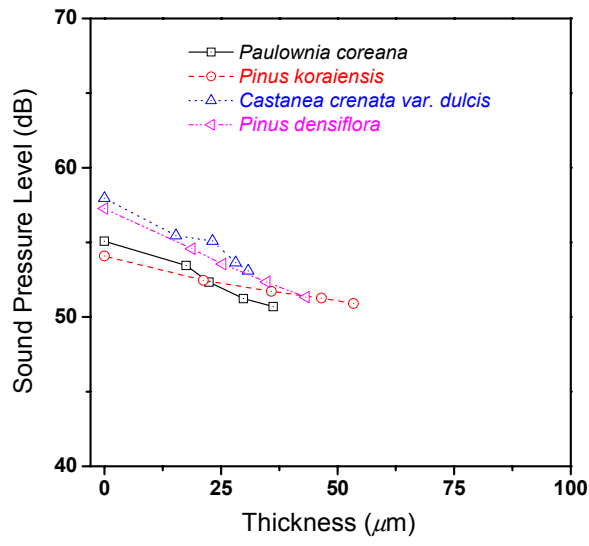
Figure 3. 3. 48에서는 도료의 종류와 목재의 수종에 따른 도막의 sound pressure level을 측정 한 결과를 나타낸 것이다. Figure 3. 3. 48-(a)에서는 오일스테인의 SPL값을 나타낸 결과이다. 가장 얇은 두께를 형성하는 오일스테인의 경우 전반적으로 도막의 두께가 증가할수록 SPL은 감소하는 것을 알 수 있다. 도막의 두께가 얇을 때에는 기재에 따른 영향이 나타났으나, 도막의 두께가 일정 두께 이상으로 두꺼워지면 기재에 따른 영향이 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

천연바니쉬의 결과를 Figure 3. 3. 48-(b)에 나타내었다. 도장 전에는 기재의 따른 차이에 의해 경도가 가장 높은 밤나무가 가장 높은 SPL을 나타냈고, 경도 순으로 SPL 값도 나타났다. 그러나 1회 도장 후에는 천연바니쉬가 완전경화되지 않고 표면이 tacky한 성질을 나타내기 때문에 SPL값이 감소하게 되지만 경도의 결과와 마찬가지로 기재에 따른 차이는 나타나지 않았다. tacky한 도막의 성질에 의해 도막의 두께가 증가할수록 SPL은 낮아지는 것을 알 수 있다.

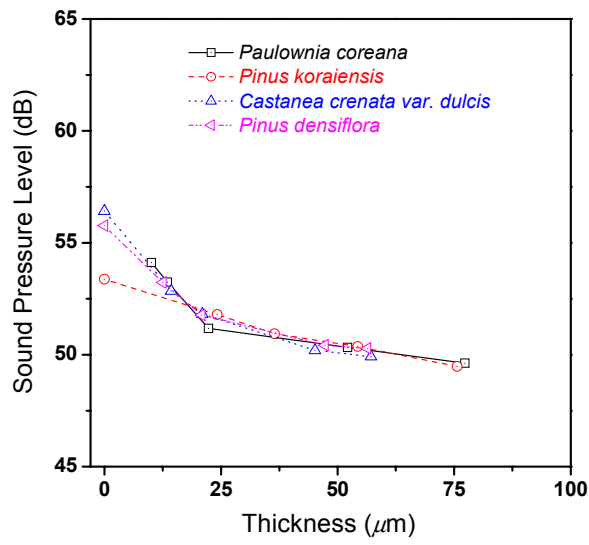
Figure 3. 3. 48-(c)에서는 우레탄 상도도료의 목재의 수종과 도막의 두께에 따른 SPL의 결과를 나타내었다. urethane topcoat의 경우 형성된 도막자체가 flexible 하게 때문에 도막의 두께가 증가하면 SPL이 감소하지만 그 정도는 크지 않았다. 도막의 두께가 증가하더라도 기재의 경도에 따라서 SPL의 순서로 나타나는 경향이 바뀌지 않았다. 3회 도장시에 도막의 두께가 100 $\mu$ m가 정도가 되는데 그 이후에는 SPL이 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 도막의 두께가 100 $\mu$ m 정도까지 도막이 형성되면서 음을 흡수하는 영향을 주지만 그 이상이 되면 도막자체에 의한 영향으로 SPL이 다시 증가하는 경향을 알 수 있다.

Figure 3. 3. 48-(d)에서는 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 결과를 나타내고 있으며, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 1회 도장 처리마다 100 $\mu$ m의 후막이 형성된다. 그리고 기재의 경도가 낮은 오동나무와 잣나무는 도막의 경도가 높기 때문에 오히려 1회 도장 시에 SPL 값이 증가하였다가 감소하는 경향을 나타내며, 2회, 3회 도장까지는 다시 감소하게 되고 그 이후에 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 기재의 경도가 비교적 높은 밤나무와 소나무의 경우에는 3회 도장까지 감소하지만 그이후에는 역시 증가하는 경향을 보였다. 기재의 경도가 약한 것이 더 두꺼운 도막이 형성되는데 이에 의해 SPL값도 4회 도장시에는 더 크게 나타났다.

SPL의 경우 도막의 두께에 의한 영향이 크게 나타났으며, 도막의 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 일정 두께 이상에서는 오히려 SPL이 증가하는 경향이 나타난다.

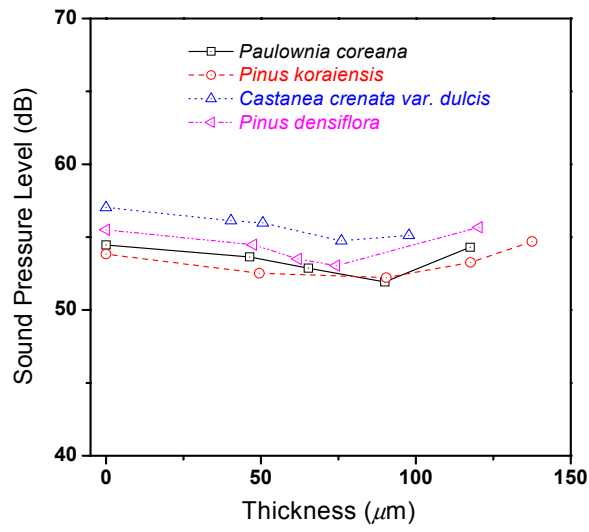


(a)

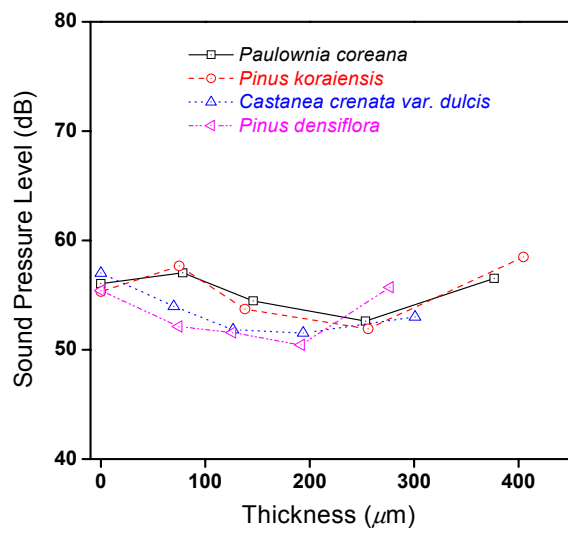


(b)

Figure 3. 3. 48. 도막의 두께에 따른 도막표면의 sound pressure level



(c)



(d)

a: oil stain, b: natural varnish

c: urethane topcoat, d: UV-curable epoxy acrylate coating

Figure 3. 3. 48. 도막의 두께에 따른 도막표면의 sound pressure level



##### 5) 도막의 표면경도와 SPL의 관계

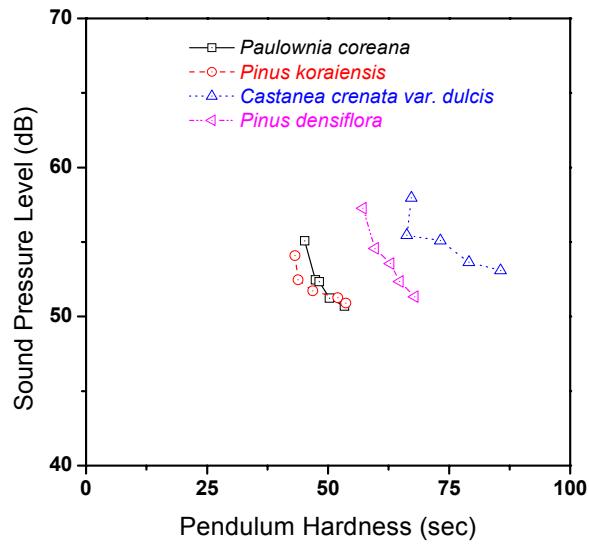
Figure 3. 3. 47.과 48.에서는 도료의 종류, 도막의 두께, 기재의 수종에 따른 pendulum hardness와 SPL의 값의 관계를 나타내고 있다. 이 두 내용을 정리하여 pendulum hardness와 SPL 사이의 관계를 유도할 수 있는데 이러한 결과를 Figure 3. 3. 49.에 나타내었다.

오일 스테인의 SPL과 pendulum hardness와의 관계는 Figure 3. 3. 49-(a)에 나타내었으며, 오일스테인의 경우 도막 표면의 경도가 증가함에 따라 SPL값은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 목재의 수종에 따른 차이가 뚜렷하게 나타나는데, 특히 오동나무나 잣나무와 같이 기재의 경도가 작은 경우와 밤나무와 소나무와 같이 기재의 경도가 큰 경우의 차이가 확연하게 나타난다. 그리고 기재의 경도가 큰 경우 SPL의 값이 증가하는 경향을 보여주고 있다.

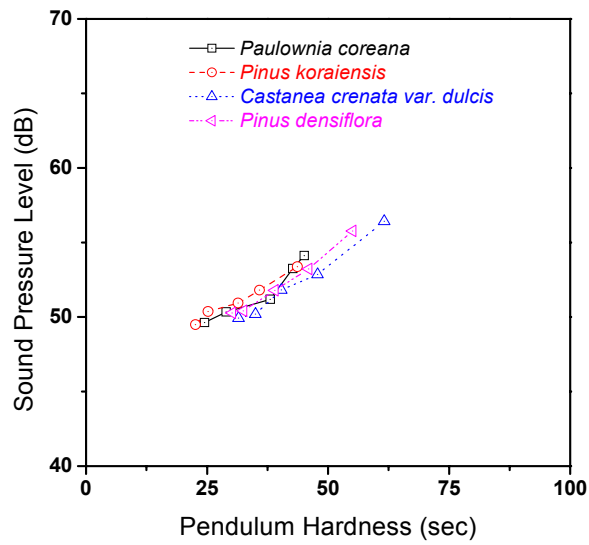
천연바니쉬의 SPL과 표면 경도와와의 관계는 Figure 3. 3. 49-(b)에 나타나는데, 도막의 경도가 증가함에 따라 SPL값이 증가하는 결과가 나타나고 있다. 또한 목재의 수종에 대한 차이는 전혀 나타나지 않고 있다. 이는 천연바니쉬의 경우 완전경화가 이루어지지 않아 도막의 두께가 얇을 때 높은 표면경도를 가지고 있고, 또한 높은 SPL값을 가지게 된다.

우레탄 상도도료의 경우는 Figure 3. 3. 49-(c)에 결과를 나타내었다. 도막의 표면경도가 증가함에 따라 SPL의 값은 감소하였다가 증가하는 결과를 나타낸다. 특히 기재의 종류에 따른 차이가 나타나는데 기재의 경도가 크면 SPL의 값도 큰 값을 가지게 되며, SPL이 감소하였다가 증가하는 변곡점이 보다 크게 나타난다. 이는 도막 자체가 유연한 우레탄 상도도료는 기재의 경도에 의한 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 SPL과 표면 경도와와의 관계를 Figure 3. 3. 49-(d)에 나타내었다. 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 결과는 우레탄 상도도료의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 목재의 수종에 의한 영향은 다르게 나타난다. 소나무와 밤나무의 경우 표면경도가 증가함에 따라 SPL이 감소하다가 일정한 경도에서 증가하는 값을 나타낸다. 그러나 기재의 경도가 낮은 오동나무나 잣나무는 표면의 경도가 증가할 때 초반에 오히려 SPL 증가하였다가 감소하고, 일정한 표면경도에서 증가하는 경향을 보인다. 도료의 종류에 따라서 일정한 도막의 두께까지는 음을 흡수하는 역할을 하다가 어느 정도 더 증가하게 되면 오히려 더 큰 SPL을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

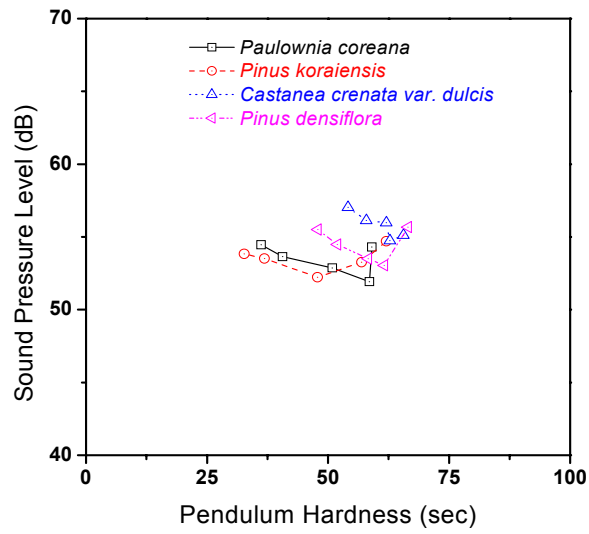


(a)

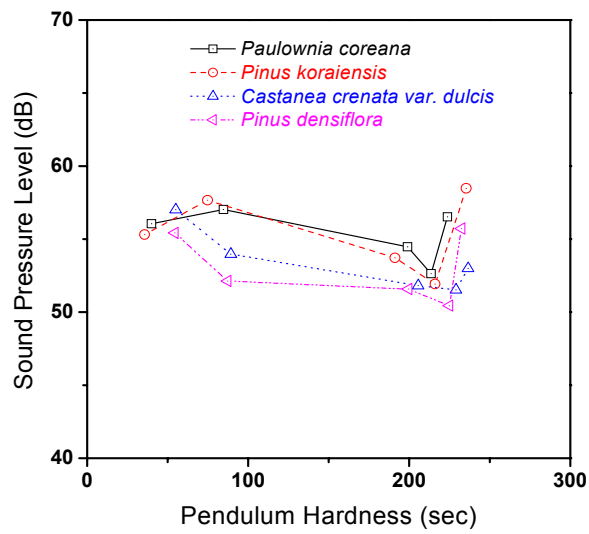


(b)

Figure 3. 3. 49. 도막표면의 pendulum hardness와 sound pressure level 사이의 관계



(c)



(d)

a: oil stain, b: natural varnish,

c: urethane topcoat, d: UV-curable epoxy acrylate coating

Figure 3. 3. 49. 도막표면의 pendulum hardness와 sound pressure level 사이의 관계

## 라. 결 론

악기용 재료로 사용되는 목재는 표면의 보호를 위해 코팅을 하게 된다. 코팅된 목재는 표면의 경도와 같은 물리적인 특성뿐만 아니라 음향적인 성질도 변화하게 된다. 이때 음향적인 성질을 판단하기 위해 sound pressure level과 pendulum hardness를 측정하고, 목재의 수종과 도료의 종류, 도막의 두께에 대한 영향을 판단하기 위한 실험을 진행하였다. 도막의 두께가 두꺼워질수록 도료의 종류에 따라 그 차이가 있기는 하였지만, 대체적으로 경도는 증가하였다. 그렇지만 점도와 같은 도료만의 성질이 다르기 때문에 도막의 두께는 다르게 나타난다. 도막의 두께가 얇을 때는 기재의 경도가 도막의 경도에도 영향을 주지만, 두께가 증가할 경우 도료의 종류에 따른 물성이 더 큰 영향을 미쳤다. 또한 두께가 두꺼워질수록 도료마다 차이는 있지만 대체적으로 경도는 증가하였고, SPL은 감소하였다. 그러나 도막의 두께가 약 100  $\mu\text{m}$  이상에서는 다시 SPL이 증가하는 경향을 보였다. 이는 도막의 두께가 어느 정도일 때까지는 음을 흡수하는 역할을 하지만 그 이후에는 오히려 형성된 도막에 의해 음이 커진다는 것을 알 수 있다. 그러므로 악기 적용시에는 도료와 수종에 따라 적절한 두께선정이 중요하다.

## 4. 맺음말

도막의 두께에 따른 목재시편의 음향적인 성능을 알아보기 위해 우레탄 상도도료와 오일스테인, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료를 사용하여 도막의 두께가 증가함에 따른 동적탄성계수와 전단탄성계수를 구하였다. 그리고 밀도와의 상관관계와 두 탄성계수간의 상관관계를 통하여 도막의 두께에 따른 목재시편의 음향적인 성능을 분석하였다.

도막의 동적탄성계수와 전단탄성계수는 pendulum hardness를 통해 측정된 도막 표면의 경도와 상관관계를 보였으나, 도막의 두께에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다. 또한 밀도와의 상관관계를 통하여 유추하여 본 비탄성계수( $E/\rho$ )와 음의 반응성( $E\rho$ ) 등의 음향성능은 도막의 두께에 따른 영향보다 기재인 목재가 가지는 영향이 크게 나타났다. 그러나 비탄성계수에서는 도막의 두께가 증가함에 따라 비탄성계수가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 도막의 경도가 높은 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우도 같은 경향을 보여주었다. 그리고 음의 깊이를 의미하는 E/G는 도막의 탄성영역 즉 경도에 따라 상대적인 경향을 보여주었다.

전반적으로 시편에서 도막이 차지하는 비율이 적어 기재인 목재의 영향이 커서 도막의 두

께에 의한 영향을 정확히 분석하기는 어려웠지만, 도막의 두께가 증가함에 따라 음향적인 성능이 감소되는 것으로 사료된다.

도막의 두께에 따른 목재시편의 음향적인 성능을 알아보기 위해 우레탄 상도도료와 오일스테인, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료를 사용하여 도막의 두께가 증가함에 따른 동적탄성계수와 전단탄성계수를 구하였다. 그리고 밀도와 상관계수와 두 탄성계수간의 상관계수를 통하여 도막의 두께에 따른 목재시편의 음향적인 성능을 분석하였다.

도막의 동적탄성계수와 전단탄성계수는 pendulum hardness를 통해 측정된 도막 표면의 경도와 상관계수를 보였으나, 도막의 두께에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다. 또한 밀도와 상관계수를 통하여 유추하여 본 비탄성계수( $E/\rho$ )와 음의 반응성( $E\rho$ ) 등의 음향성능은 도막의 두께에 따른 영향보다 기재인 목재가 가지는 영향이 크게 나타났다. 그러나 비탄성계수에서는 도막의 두께가 증가함에 따라 비탄성계수가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 도막의 경도가 높은 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우도 같은 경향을 보여주었다. 그리고 음의 깊이를 의미하는  $E/G$ 는 도막의 탄성영역 즉 경도에 따라 상대적인 경향을 보여주었다.

전반적으로 시편에서 도막이 차지하는 비율이 적어 기재인 목재의 영향이 커서 도막의 두께에 의한 영향을 정확히 분석하기는 어려웠지만, 도막의 두께가 증가함에 따라 음향적인 성능이 감소되는 것으로 사료된다.

악기용 재료로 사용되는 목재는 표면의 보호를 위해 코팅을 하게 된다. 코팅된 목재는 표면의 경도와 같은 물리적인 특성뿐만 아니라 음향적인 성질도 변화하게 된다. 이때 음향적인 성질을 판단하기 위해 sound pressure level과 pendulum hardness를 측정하고, 목재의 수종과 도료의 종류, 도막의 두께에 대한 영향을 판단하기 위한 실험을 진행하였다. 도막의 두께가 두꺼워질수록 도료의 종류에 따라 그 차이가 있기는 하였지만, 대체적으로 경도는 증가하였다. 그렇지만 점도와 같은 도료만의 성질이 다르기 때문에 도막의 두께는 다르게 나타난다. 도막의 두께가 얇을 때는 기재의 경도가 도막의 경도에도 영향을 주지만, 두께가 증가할 경우 도료의 종류에 따른 물성이 더 큰 영향을 미쳤다. 또한 두께가 두꺼워질수록 도료마다 차이는 있지만 대체적으로 경도는 증가하였고, SPL은 감소하였다. 그러나 도막의 두께가 약 100  $\mu\text{m}$  이상에서는 다시 SPL이 증가하는 경향을 보였다. 이는 도막의 두께가 어느 정도일 때까지는 음을 흡수하는 역할을 하지만 그 이후에는 오히려 형성된 도막에 의해 음이 커진다는 것을 알 수 있다.

그러므로 약기 적용시에는 도료와 수중에 따라 적절한 두께선정이 중요하다.

첫째, 음향기능성 도료로 적절한 도료는 오일스테인계의 도료가 적절하다.

둘째, 목재의 수종은 사용되는 약기에 따라 그 음향적인 부분을 만족할 수 있는 것으로 선정하는 것이 중요하다.

셋째, 음향기능성 도료의 도장처리 두께는 약기가 가지는 음향적인 성능에 따라 적절한 값을 선정하는 것이 중요하나, 도막의 두께가 얇을수록 좋다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제1절 연구개발목표의 달성도

#### 1. 연도별 연구목표

##### 가. 1년차 연구개발 목표

구 분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차 년도 (2002 - 2003)	음향학적 특성을 고려한 제품 디자인 (적정 용도개발 및 부재 설계)	<input type="checkbox"/> 국산재의 고부가가치화를 위한 용도 설계 ① 목재 약기의 분류 및 발음 메카니즘 분석 ② 가야금과 장고, 대금의 음향적특성 및 진동특성 구명 ③ 가야금, 장고, 대금의 품질특성 규정·설계 <hr/> <input type="checkbox"/> 주요 국내수종인 소나무, 잣나무, 참오동나무, 밤나무 등 4수종의 3방향별 함수율 변화에 따른 동적특성 조사 ① 막대부재와 관재의 동적 탄성상수 측정 - 방향별 영계수 측정 ( $E_L, E_R, E_T$ ) - 방향별 전단탄성계수 측정 - 방향별 댐핑계수 측정 ② 수분비평형상태에서 동적 탄성상수 변화 ③ 함수율 변동에 따른 동적탄성상수 변화 ④ 1차원 막대부재의 충격에 의한 동적응답 및 소리 시뮬레이션 방법개발
	筒樂器用材의 증기땀 처리 기술개발 및 현 악기용재의 천연건조	<input type="checkbox"/> 주요 筒樂器用材(장고 및 대금)의 증기땀 처리 기술개발 ① 증기땀 처리기법 제시 ② 증기압 형성메카니즘 구명 ③ 통피층내 증기압분포 구명 ④ 재면할렬 및 외주할 발생 경과 조사 <input type="checkbox"/> 가야금용재의 천연건조(건조기간 1~3년) ①천연건조곡선 조사 ②년중 기후치평형함수율 조사 ③건조결함 발생정도 조사
	최적의 기능성 음향 도료 선정	<input type="checkbox"/> 악기용 도료의 선정 및 음향적 성능 평가 ① 음향 도료 도막의 점탄성적 성질 평가를 통한 최적도료 의 선정(장탄성율 $E'$ , 손실탄성율 $E''$ 및 $\tan\delta$ 측정) ② 음향 도료 도막의 음향적 성능 평가를 통한 도막 시스템 결정(sound-level meter 이용)

나. 2년차 연구개발 목표

구 분	연 구 개 발 목 표	연구개발 내용 및 범위
2차 년도 (2003 - 2004)	국산재의 재질개량 연구 및 음향기능제품의 제조기술 표준화	<input type="checkbox"/> 제품공학적 접근에 의한 음향기능제품의 생산기술 개발 및 표준화 ① 국산재의 재질평가 및 음향특성분석 ② 가야금, 장고, 대금의 제조기술 개발 및 표준화 <hr/> <input type="checkbox"/> 주요 용재인 소나무, 잣나무, 참오동나무, 밤나무 등 4개 수종의 건조방법에 따른 음향 특성 차이를 조사 ① 건조방법별 동적탄성상수 비교 ② 건조방법별 함수율 변동에 따른 동적 탄성상수 변화 조사 ③ 시편두께별 동적탄성상수 비교 ④ 2차원 판재의 충격에 의한 동적응답 및 소리 시뮬레이션 방법개발
	筒樂器用 실대재의 음향기능성 건조 기술 개발 및 현악기 용재의 천연 건조	<input type="checkbox"/> 주요 筒樂器用(장고 및 대금) 實對材의 음향기능성 건조기술개발 ① 증기담 처리에 의한 건조성 개선효과 구명 ② 진공건조 기술 개발 ③ 열기건조 기술 개발 ④ 예비천연 건조 기술 개발 <input type="checkbox"/> 가야금용재의 천연 건조(2~3년) ① 천연 건조곡선 조사 ② 년중 기후치 평형함수율 조사 ③ 건조결함 발생정도 조사
	기능성 음향도료의 최적 도막두께 및 적합 수종 선정	<input type="checkbox"/> 악기용 재료 수종 및 도막두께에 따른 음향적 성질 평가 ① 악기용 재료에 따른 도료 도막의 점탄성적 성질 평가를 통한 악기용 재료의 선정 기술마련( 장탄성율 E', 손실탄성율 E'' 및 tanδ 측정 및 sound-level meter 이용) ② 도막의 두께에 따른 음향적 성질 평가



다. 3년차 연구개발 목표

구 분	연 구 개 발 목 표	연구개발 내용 및 범위
3차 년도 (2004 - 2005)	완제품 性能評價 기술개발 (시제품 생산)	<input type="checkbox"/> 사업화를 위한 시제품 개발 및 그 성능 평가 방법 표준화 ① 국산재 이용 목재 흡음 보드와 벽재의 시제품 생산 및 음향적 성능평가 기술 표준화 ② 국산재로 만들어진 장고의 시제품 생산 및 음질 성능평가 기술표준화 ③ 국산재로 만들어진 바이올린의 시제품 생산 및 음질 성능평가 기술표준화 <hr/> <input type="checkbox"/> 목재가 최적 음향적 특성을 발휘할 수 있는 건조방법과 물리적 처리방법을 개발하고 수종에 따른 기술 표준화 확립 ① 수분증감 속도 및 반복횟수 등 이력이 동적특성에 미치는 영향 ② 악기종류에 따른 최적 물리적 처리방법 개발 ③ 상자형 구조물의 충격에 의한 동적응답 및 소리 시뮬레이션 방법개발
	현악기용재의 음향 기능성 건조기술 개발	<input type="checkbox"/> 가야금用材의 음향기능성 건조기술개발 ① 고주파진공건조 기술 개발 ② 예비천연건조 기술 개발 ③ 천연건조 기술 개발
	음향기능제품의 도장시스템 표준화	<input type="checkbox"/> 음향 실험기를 이용해 실제 도막이 형성된 국악기의 음향적 성능 및 도막두께별 성능 평가 ① 실제 제품에 적용한 도료 도막의 점탄성적 성질 및 음향적 성능을 평가 ② 국악기용 적정 도장시스템의 구축 및 자료구축

## 2. 평가착안점

구 분	평가의 착안점 및 척도	
	착안 사항	척도(점수)
1차년도 (2002년)	○ 음향학적 특성을 고려한 고기능성 목제품 디자인 여부 - 고부가가치형 악기제품의 설계 및 세부 SPEC 마련 여부 - 방향별 동적성질조사 여부 - 보와 판재에서 측정 전단탄성계수 비교 여부 - 수중간 동적특성 비교 여부 - 1차원 동적음향특성 모델링 시행 여부	<u>40</u> 10 10 10 5 5
	○ 筒樂器用材의 증기뎀처리 기술개발 및 현악기용재의 천연건조 - 증기뎀 처리재의 수증기압 분포 구명 - 증기뎀 처리에 의한 재면할렬 및 외주할 예방효과 구명 - 증기뎀 처리재의 수분유동 및 수분분포 구명 - 현악기용재의 천연건조 특성 구명	<u>30</u> 10 10 5 5
	○ 최적 기능성 음향도료의 선정 여부 - 음향기능제품용 도료의 점탄성 및 음향특성 규명 여부 - 악기용 적정도료의 선정 방법 개발 여부	<u>30</u> 20 10
	○ 목재 악기의 제조기술 표준화/국산재 변성 및 재질개량 - 악기의 제조기술 표준화 여부 - 국산재에 대한 화학적 변성 및 재질개량 기술개발 여부 - 판상재 동적특성 비교 - 함수율 변동에 따른 수중간 동적특성 비교 - 2차원 동적음향특성 모델링	<u>40</u> 10 5 10 5 5
	○ 筒樂器用(장고 및 대금) 實對材의 음향기능성 건조기술 개발 및 현악기(가야금)용재의 천연건조 - 筒樂器用 實對材의 진공건조기술 개발 - 筒樂器用 實對材의 열기건조기술 개발 - 筒樂器用 實對材의 예비천연건조기술 개발 - 현악기용재의 천연건조 특성 구명	<u>30</u> 10 10 5 5
	○ 최적 음향도료의 도막두께 및 수중 선정 - 악기용 도료별 최적 도막두께 결정 여부 - 음향기능제품의 적합수중 제시 여부	<u>30</u> 15 15
3차년도 (2004년)	○ 시제품 개발 및 성능평가 기술개발 - 국산재 이용 국악기 시제품 개발 여부 - 국악기 완제품의 성능평가 기술개발 여부 - 흡탈착 반복처리에 따른 동적특성 조사 - 3차원(상자형 구조물) 동적음향특성 모델링	<u>40</u> 10 10 10 10
	○ 현악기용재의 음향기능성 건조기술개발 - 가야금용재의 고주파진공건조 기술 개발 - 가야금용재의 예비천연건조 기술 개발 - 가야금용재의 천연건조 기술 개발	<u>30</u> 5 10 10 5
	○ 음향기능제품의 도장시스템 표준화	<u>30</u>

3. 연구개발목표 달성도 : 평균 99%

구 분	연구 개발 목표 달성도	
	기술 개발 목표	달성도(%)
1차년도 (2002년)	○ 음향학적 특성을 고려한 고기능성 목제품 디자인 여부	<b>100</b>
	- 고부가가치형 악기제품의 설계 및 세부 SPEC 마련 여부	100
	- 방향별 동적성질조사 여부	100
2차년도 (2003년)	- 보와 판재에서 측정 진단탄성계수 비교 여부	100
	- 수중간 동적특성 비교 여부	100
	- 1차원 동적음향특성 모델링 시행 여부	100
	○ 筒樂器用材의 증기담처리 기술개발 및 현악기용재의 천연건조	<b>99</b>
	- 증기담 처리재의 수증기압 분포 구명	100
	- 증기담 처리에 의한 재면할릴 및 외주할 예방효과 구명	100
	- 증기담 처리재의 수분유동 및 수분분포 구명	95
	- 현악기용재의 천연건조 특성 구명	100
	○ 최적 기능성 음향도료의 선정 여부	<b>100</b>
	- 음향기능제품용 도료의 점탄성 및 음향특성 규명 여부	100
- 악기용 적정도료의 선정 방법 개발 여부	100	
3차년도 (2004년)	○ 목재 악기의 제조기술 표준화/국산재 변성 및 재질개량	<b>95</b>
	- 악기의 제조기술 표준화 여부	100
	- 국산재에 대한 화학적 변성 및 재질개량 기술개발 여부	80
	- 판상재 동적특성 비교	100
	- 함수율 변동에 따른 수중간 동적특성 비교	100
	- 2차원 동적음향특성 모델링	90
	○ 筒樂器用(장고 및 대금) 實對材의 음향기능성 건조기술 개발 및 현악기(가야금)용재의 천연건조	<b>100</b>
	- 筒樂器用 實對材의 진공건조기술 개발	100
	- 筒樂器用 實對材의 열기건조기술 개발	100
	- 筒樂器用 實對材의 예비천연건조기술 개발	100
- 현악기용재의 천연건조 특성 구명	100	
○ 최적 음향도료의 도막두께 및 수중 선정	<b>100</b>	
- 악기용 도료별 최적 도막두께 결정 여부	100	
- 음향기능제품의 적합수중 제시 여부	100	
3차년도 (2004년)	○ 시제품 개발 및 성능평가 기술개발	<b>99</b>
	- 국산재 이용 국악기 시제품 개발 여부	100
	- 국악기 완제품의 성능평가 기술개발 여부	100
	- 흡탈착 반복처리에 따른 동적특성 조사	100
	- 3차원(상자형 구조물) 동적음향특성 모델링	95
	○ 현악기용재의 음향기능성 건조기술개발	<b>100</b>
	- 가야금용재의 고주파진공건조 기술 개발	100
	- 가야금용재의 예비천연건조 기술 개발	100
	- 가야금용재의 천연건조 기술 개발	100
	○ 음향기능제품의 도장시스템 표준화	<b>100</b>

## 제2절 관련분야의 기술발전예의 기여도

### 1. 국악기 제조기술 분야에의 기여도

#### 가. 소재관련 기술분야

본 연구개발을 통해 국산재의 국악기용재로서의 사용의 가능성을 확인하였으며, 세부적으로는 현악기, 관악기 및 타악기용재로서의 오동나무 및 밤나무의 범용성을 확인할 수 있었다. 또 오동나무의 대체수종으로서 유사수종인 잣나무 및 소나무의 채택 가능성을 발견할 수 있었다. 한편 소재의 절삭방향 및 함수율 변화에 따른 악기용재의 물성변화 및 완성제품의 진동특성을 규명함으로써 생산자 뿐 아니라 악기 사용자에게 대한 소재관련 정보제공이 가능하리라고 판단된다.

#### 나. 가공관련 기술분야

악기재와 관련된 중요한 가공특성으로는 진동관의 음방사특성과 밀접한 관련이 있는 진동관의 목리형태(방사단면 혹은 접선단면)을 좌우하는 절삭가공 기술과 역시 진동관의 진동특성에 영향을 미치는 것으로 확인된 건조가공 기술 등이 포함된다.

따라서 본 연구개발을 통해 국악기 중 특히 진동관의 절삭방향과 건조도가 중요한 인자로 작용하는 현악기의 가공기술을 확립할 수 있었다.

#### 다. 도장관련 기술분야

본 연구에서는 악기의 내구성 및 음색에 직접적으로 관여하는 도료의 선정 및 도막 두께의 결정 그리고 도장기법 및 그와 관련된 도장설비의 표준화를 위한 중요한 정보를 악기 제조업체에게 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 국악기 완제품 성능 평가분야에의 기여도

### 가. 국악기 음질평가 분야

본 연구개발에서는 음향관의 진동특성, 현의 진동특성 및 완제품의 연주에 의한 진동특성 등을 체계적으로 구명함으로써 음질품질과 관련하여 단계적 품질관리를 가능케 하고 그로 말미암아 국악기 제조업체의 생산공정 중 발생할 수 있는 실패비용을 최소화하는 데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

### 나. 국악기 내구성 보장 분야

건조 방법 및 주위의 습도 조건에 따른 소재 및 재공품(반제품)의 건조결함 발생 가능성을 예측할 수 있게 되었고 도장에 따른 악기 표면 보호기능을 확인함으로써 완성 악기의 기대 수명(내구성)을 최대화할 수 있고 그에 따라 시장 경쟁력을 제고하는 데에 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

## 3. 국악기 제조업체 엔지니어링 기여도

### 가. 국악기 제조공정 생력화

국악기의 설계에서 주요 부재 절삭, 세부 접착 및 도장가공에 이르기까지 전 제조공정에 대한 기술표준화를 달성할 수 있었으므로 주요 제조과정에서의 인건비의 예측 및 생력화를 기대할 수 있고 이를 통해 원가 경쟁력 및 품질 안정화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

### 나. 국악기 제조시 품질관리(QC) 분야

본 연구개발을 통해 전통 국악기의 설계표준, 소재표준, 부재표준, 공정기술 표준, 설비표준 및 완성품에 대한 음질평가 표준 등을 마련하였으며 이는 국내 국악기 제조업체로 하여금 현대 기업경영의 필수요소인 총합적 품질관리(TQC)를 가능케 할 수 있고 이를 통한 해외시장 개발 및 시장에서의 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단하는 바이다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제1절 타연구에의 응용

#### 1. 재질 비파괴시험

- 가. 진동측정을 통해 탄성계수 및 전단탄성계수의 측정
- 나. 건조중 또는 사용중 목재의 함수율 경사의 추정 - 종진동과 횡진동에 따른 탄성계수 차이를 이용
- 다. 충격에 의한 소리의 측정으로부터 재질파악

#### 2. 건조중 증기압 측정

건조중 목재상태를 파악하기 위해서 기존 온도와 무게변화에 국한하여 측정하였으나, 향후 목재내 증기압을 측정하여 함수율 경사도 추정할 수 있으므로 적정 건조방법 개발과 열/수분 이동모델 개발에 큰 기여를 할 수 있으리라 생각된다.

#### 3. 목재용 도료의 개발과 선정방법

악기용 도료를 개발하거나 선정시 도료특성이 목재의 음향적 성질에 미치는 영향을 사전에 검토할 수 있다.

## 제2절 추가연구를 통한 국제화 분야 활용계획

목재의 진동과 음향적 특성은 수종과 재질에 큰 영향을 받는다. 따라서 좋은 악기를 만들기 위해서는 좋은 재료를 사용하여야만 한다. 그러나 구체적으로 ‘좋은 재료와 좋은 악기란 어떤 것인가?’ 하는 질문에 대해 현재 과학기술로는 구체적으로 대답하기 어려운 것이 사실이다.

따라서 본 연구에서는 재료의 진동과 음향적 성질에 국한하였지만, 향후 목재의 해부학적 및 화학적 특성을 고려한 연구를 실시하여 한다면 음향재의 육종방법과 재질변경에 대한 대안을 제시할 수 있으리라 생각된다.

또한 판과 조립체의 충격음에 대한 예측모델을 개발하고 그에 수반되는 실험적 연구가 이루어지면, 실제 악기성능을 시뮬레이션 할 수 있다면 악기음향학의 발전에 큰 기여를 할 수 있으리라 생각된다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 제1절 서론

인간은 일생동안 자연환경 뿐 아니라 다양한 인공환경에 접하면서 살고 있다. 五感중에서 그 기능발휘 기간이 가장 길다는 聽覺을 통해 인간은 자신을 둘러싸고 있는 환경의 상태 변화를 느끼기도 하고 일상생활에서의 의사소통을 통해 회노에락을 교감하기도 한다. 다시 말해 주위의 소음환경으로부터는 불쾌감 또는 위협을 감지하거나 工程의 異常 등 긴요한 정보를 얻을 수 있는 반면, 악기연주 등 아름다운 소리를 내는 音源(sound source)으로부터는 즐거움 내지 기쁨을 얻고 있다. 이렇듯 음향환경은 대체로 바람직하지 않은 騒音(noise)과 의도적으로 추구해야할 樂音(designed sound)으로 구분된다. 이들은 각각 나름대로의 發音機構(sound generation mechanism)를 지니고 있기 때문에, 인간은 원하지 않는 騒音을 제거하거나 보다 질 높은 樂音を 발생시키고자 노력을 기울이고 있다.

이렇듯 인간의 생활과 밀접한 관련을 지니고 있는 音響환경에 대한 과학적 접근은 주로 물리학자들의 이론적 해석 및 기계공학자들에 실험적 연구를 통해 의해 이루어져 왔다. 즉 물리적 이론에 의해 유체나 고체 내에서의 음파(sound wave)의 생성, 방사, 전달, 흡수 및 수신에 관련된 접근 및 해석을 하고 실제 악기, 기계 등 각종 音源들에 대한 모델링 및 시 물레이션을 통해 그 發音메카니즘을 구명을 함으로써 발생될 소리의 質(sound quality)을 예측하거나 원하는 음질의 소리를 설계하여 재현하는 기술이 개발되어왔다.(이병호 1999).

목재는 주택 등의 건축, 실내장식 및 가구 등 인간의 주거환경과 관련된 주요재료일 뿐 아니라 문화상품인 악기의 주재료이기도 하다. 따라서 건축음향학 및 악기음향학 분야에서 반드시 다뤄져야할 소재이며 실제로 많은 물리학자들에 의해 연구된 바 있다. 그러나 목재의 조직, 성분, 점탄성, 동적특성 및 이방성 등에 대한 이해 부족 및 실제 음향제품설계시 소재의 동적특성에 대한 的確한 정보제공의 미흡 등으로 인해 물리학자들 또는 제품설계자들만의 노력만으로는 악기 등 많은 목제품의 설계 및 그 發音메카니즘의 구명에 한계가 있었던 것도 사실이다.



이에 本稿에서는 악기와 관련된 지금까지의 접근방식 및 최근의 관련분야의 연구동향을 종합적으로 고찰하고, 이들 연구의 보완책 모색의 일환으로서 목재과학의 역할을 새롭게 조명하고자 한다. 따라서 고품질의 음향기능성 목제품 생산을 위한 소재과학적 토대를 마련하고 그동안 지나치게 재료과학으로서의 역할에만 치중하였던 목재과학의 새로운 연구방향을 제시하고자 하였다.

즉, 악기 소리(音響)와 관련된 환경을 총괄적으로 이해·분류하고 영역별로 관련된 목재과학적 접근방식을 체계적으로 제시함으로써 인간을 둘러싼 음향환경을 개선하고 나아가 삶의 질을 향상시키기 위한 과학기술적 접근을 시도해보고자 한다.

## 제2절 음향과 악기소리

소리(sound)란 교란이 탄성매질을 통하여 전파하는 파동으로 귀로 감지할 수 있는 물리적인 현상을 뜻한다. 쉽게 말하면, 귀로 느낄 수 있는 공기의 진동이 바로 소리이다. 물체가 진동하면 그 진동이 주위의 공기에 전해지고 파동을 이루어 점차 주위로 퍼져 가는데, 이 파동을 음파(sound wave)라 한다. 음향학은 소리의 생성, 전달 및 그 효과를 연구하는 과학으로, 악기 음향학에서 다루는 소리는 귀로 들을 수 있는 소리, 즉 가청주파수에 국한된다.

보통 인간이 낼 수 있는 소리는 85~1,100Hz이지만 들을 수 있는 소리는 20~20,000Hz이다. 따라서 낼 수 있는 소리보다 훨씬 더 넓은 주파수 대역을 들을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 인간은 1000~5000 Hz의 소리에 대해서 가장 민감한데, 악기의 발음대역을 살펴보면 피아노는 30~4,100Hz, 바이올린은 200~2,650Hz이다.

따라서 인간이 어느 정도 공기가 진폭( $D$ )이 발생하는 소리를 느낄 수 있는지에 대해 다음 식 (1)을 적용하여 계산할 수 있다(이병호, 1999).

$$D = \frac{v}{w} = \frac{v}{2\pi f} = \frac{p}{2\pi f \rho c} = 0.0039 \frac{p}{f} \quad (6. 1)$$

여기서 공기 밀도( $\rho$ , 22°C)=0.00118g/cm<sup>3</sup>, 음속( $c$ )=3.44 × 10<sup>4</sup>cm/sec

예를 들어 청각에 가장 민감한 주파수가 3,900Hz이고 최소음압( $p$ )을 2×10<sup>-4</sup>dyne/cm<sup>2</sup>이라면 수소원자의 크기(1Å)의 1/100로, 인간의 청각이 얼마나 소리에 예민한 기관인지를 알 수 있다.

소리는 표 1과 같이 소리의 크기(loudness)가 음압 레벨에 의존하고 음고(pitch)가 주파수에 의해 주로 결정되듯이 음색(timbre)은 스펙트럼에 의해 설명된다. 주파수 스펙트럼이란 각 주파수대에서의 시간에 따른 에너지 분포 상태를 말한다. 그러나 소리의 스펙트럼 분석도 음색에 대한 모든 정보를 알려주지 못한다. 스펙트럼을 통해 소리의 대략적인 모습만을 추측할 수 있을 뿐이다.

또한 어택(attack)과 릴리즈(release)가 음색을 결정짓는 데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 그 외에도 박자(지속길이), 비브라토, 비트, 협화, 음량, 울동, 현장감 등 여러 요소가

악기의 소리에 복합적 영향을 미친다.

일반적으로 소리는 둘 이상의 순음이 섞여있는 복합음 형태인데, 악기는 사람의 목소리처럼 불규칙한 배음 구조를 갖는 자연 복합음(natural complex tone)를 지닌다(그림 4).

그런데, 자연 복합음은 배음의 구성과 그 각각의 에너지 분포가 일정하지 않지만 인간의 귀는 이와 같이 무질서해 보이는 소리에 더 익숙하며 그것에서 음고를 가려내고 크기를 지각하며 방향과 위치를 감지한다. 따라서 현재 비교적 규칙적인 복합음을 생성하는 신디사이저 등에 의한 악기소리와 실제 악기소리는 차이가 있는데, 그 차이를 감소시키기 위한 많은 연구가 실시되고 있다.

Table 6. 1. The characteristics of musical sounds(Olson, 1967)

구분	심리학적	물리학적
음 고	○음階에 따른 주파수로부터 생기는 감각적 특성(주관적 성질)	○주파수 : 단위시간당 주기의 數 (cycle/s, Hz)
세 기	○음향에 의해 생기는 聽覺感의 크기 ○sone : 40db상의 1000Hz 순음	○음압 : 일정지점에서 특정방향으로 수직한 단면적을 통해 특정방향으로 단위시간에 전달되는 음향 에너지(erg/s·cm <sup>2</sup> )
音 色	○모든 음악의 가장 중요한 기본속성 ○高調波 구조에 의해 생기는 음의 특성 ○음의 스펙트럼 : 성분음의 개수, 분포, 상대강도, 부조화 성분음, 기본음, 전체 강도	○음파는 기본주파수와 배음으로 구성 ○배음(고조파)의 구조는 성분의 개수, 강도, 분포 및 위상관계로 표시 ○기본주파수와 배음의 시간에 따른 에너지 분포 상태의 변화
어 택 과 릴 리 즈	○음의 음고, 세기 및 음색에 영향 ○언어에서 모음은 대부분 어택과 릴리즈間이 김. ○Portamento : 어떤 주파수의 음으로부터 다른 주파수의 음으로 변화	○어택 : 음이 최종강도 임의 크기까지 성장하는데 걸리는 시간, $p = p_0(1 - e^{-kt})$ ○릴리즈 : 기준강도의 임의 크기까지 음이 감소하는데 걸리는 시간, $p = p_0e^{-kt}$ ○피아노,기타: 어택은 짧고 릴리즈가 길다 ○파이프오르간 : 어택과 릴리즈가 길다

### 제3절 관련분야 연구동향

#### 1. 목재 재료

서양 바이올린 제작자들은 향판재로 가문비나무를 사용하는데, 그 판단기준으로 목재의 외관을 보고 목리가 통직하고 조직이 치밀하며 밀도가 낮은 것을 선호하였다. 평균연륜폭은 악기마다 차이가 있는데, 바이올린과 비올라는 1mm(0.8~2.5mm), 첼로는 3mm, 더블 베이스는 5mm로 악기 크기가 클수록 연륜폭이 증가하는 경향이 있다. 추재율은 25%이고 춘추재 이행은 완만한 것을 선택하였다. 특히 haselfichte라는 거치상 연륜(indented ring)을 갖는 가문비나무 변종이 가공하기는 어려우나 음색이 풍부하고 아름다워 매우 선호된다고 한다(Bucur, 1995). 기타와 피아노 연륜폭은 각각 2.0mm와 1.2~2.5mm가 적당하다고 한다(Bucur, 1995; 岡野, 1991).

일본 가야금(koto)에 사용되는 오동나무의 良否에 대한 기준은 가문비나무와 마찬가지로 산지, 수령, 목취에 좌우된다고 한다(山田, 1987). 수령이 높은 樹幹의 표면에 가깝고 목리가 촘촘한 부분에서 목취된 목재가 좋다. 동일 산지에서도 산의 북쪽 경사면에서 보다 혹독한 기후조건에서 가능한한 느리게 성장한 것이 좋고, 또한 동일한 수간에서 목취하여도 북쪽 면에 연한 곳에서 목취한 것이 가장 우수한 평가를 얻을 수 있다. 정목재(quarter sawn lumber)는 수령 60년 이상이 요구되고 음색은 "수수하고", "질"이 좋으며 판목재(flat sawn lumber)는 수령 30년 이상이 필요하다. 외관상 목리가 촘촘한 것이 바람직하고, 그 중에서도 도관의 분포밀도가 춘재와 추재의 경계에서 점차적으로 변화되는 것이 좋다. 또한 대패로 깎은 면에 광택이 있고 손이 잘 미끌어지는 목재는 "찰기"가 있어 좋다. 목리가 촘촘하고 무거운 목재가 좋지만 극단의 경우는 재질이 단단하면 가야금의 음색도 단단하다고 한다.

이상과 같이 악기용 향판재는 동서양 모두 특정 수종, 산지, 외관적 성질 등으로 선정됨을 알 수 있다. 따라서 간접적으로 향판재는 목재 세포와 화학성분의 조성 및 분포에 의해 양부가 결정되는데, 이에 대한 연구는 매우 찾아보기 어렵다.

그러나 최근 위도에 따른 목재의 일부 성질에 대한 연구가 실시된바 있어, 산지에 따른 목재성질의 차이를 간접적으로 알 수 있다. lodgepole pine의 경우 위도가 높을수록 평형함수율이 감소하는데, 그 이유는 헤미셀룰로오스가 감소하고 추출물이 증가하여 흡습성이 감소되기 때문이라고 한다(Wiedenbeck 등, 1990). Kim 등(1988)은 위도, 고도 및 원목직경에 따른 화학적 조성의 변화를 조사하였는데, 수종에 따라 차이가 있지만 위도가 증가하면 리그닌이 감소하고 직

경이 클수록 추출물양이 증가하는 경향을 나타내었다고 한다. 그러나 고도에 따라서는 뚜렷한 경향을 나타내지는 않았다. 또한 여러 침엽수에 대해 조사한 결과, 비중도 위도가 높으면 감소하는 경향을 나타내었으나 연간 평균온도의 비중에 대한 영향이 더 크다고 한다(Wiemann 등, 2002).

## 2. 목재의 진동특성

1950년대 이전까지만 하더라도 진동이론의 대상은 주로 목재이었으나, 그 이후 철강공업과 석유화학공업의 발전으로 부가가치가 비교적 낮은 목재를 대상으로한 진동이론에 대한 연구는 비교적 찾아보기 어렵다.

목재 진동에 대한 연구는 Hearmon(1948, 1961, 1966)에 이르러 정점을 이룬 후, 일부 연구(Nakao, 1987)를 제외하고는 대부분 개발된 식을 이용한 목재의 물리역학적 성질의 평가에 집중되고 있다.

### 가. 보의 진동

보의 진동은 종진동, 횡진동, 비틀림진동으로 구분할 수 있으며 이에 대한 연구는 다수가 있다(Hearmon, 1966; Brancheriau 등, 2002). 보의 길이가 길어도 고차진동에서는 전단응력과 회전관성을 고려한 Timoshenko 보 이론을 적용하여야 한다. 그러나 더욱 엄밀한 의미에서는 휨과 전단의 댄핑을 고려하여야만 한다. 따라서 점탄성 보의 횡진동 지배방정식은 다음과 같다(Nakao, 1985).

$$\begin{aligned}
 EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \left( \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\eta_s}{G} \frac{\partial^3 y}{\partial t^3} \right) - \rho I \left( 1 + \frac{E}{KG} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} \\
 - \frac{\rho I}{KG} (\eta_b + \eta_s) \frac{\partial^5 y}{\partial x^2 \partial t^3} + \frac{I}{G} (E\eta_s + G\eta_b) \frac{\partial^5 y}{\partial x^4 \partial t} + \frac{\rho^2 I}{KG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} \\
 + \eta_b \eta_s \frac{I}{G} \frac{\partial^6 y}{\partial x^4 \partial t^2} = F(x, t)
 \end{aligned} \tag{6. 2}$$

여기서  $K$ 는 보 단면의 전단응력분포를 나타내는 형상계수(form factor)로 전단계수라고 불리우기도 한다. Hearmon(1966)에 따르면 수종에 따라 다르지만 0.89~1.04로 평균 0.943 이라고 한다. 최근 Hutchinson(2001)은  $K$  계산식을 구하였는데, 장방형 단면의 경우 보 단면의 형상비

와 포아송비에 따라 영향을 받는다고 한다. Stephen(2002)은  $K$ 의 가정에 따른 공진주파수의 오차에 대해 보고한 바 있다.

여기서  $\eta_b, \eta_s$ 는 휨응력과 전단응력에 대한 점성계수(coefficient of viscosity)로 손실인자(loss factor)와 탄성계수 및 공진주파수와 관계는 다음 식과 같다.

$$\eta_b = \frac{\tan\delta_b E}{w_r}, \quad \eta_s = \frac{\tan\delta_s G}{w_r} \quad (6. 3)$$

점성계수가 “0”인 탄성보의 경우 해석적 해를 구할 수 있다(Brancheriau, 2002. Bordonné(1989년)에 따른 양단자유 보의 모드별 공진주파수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A} \frac{P_n}{L^4 [1 + \frac{I}{AL^2} F_1(m) + \frac{EI}{KGAL^2} F_2(m)]}} \quad (6. 4)$$

여기서

$$P_n = \left[ \frac{(2n+1)\pi}{2} \right]^4 = m^4$$

$$F_1(m) = \theta^2(m) + 6\theta(m), \quad F_2(m) = \theta^2(m) - 2\theta(m)$$

$$\theta(m) = m \frac{\tan(m) \tanh(m)}{\tan(m) - \tanh(m)}$$

그러나 상기 식은 다음과 같은 세장비에만 적용이 된다.

$$\frac{L}{h} \geq \left( \frac{1}{12\pi^2} \frac{E}{G} P_n \right)^{1/4} \quad (6. 5)$$

또한 Nakao 등(1985)은 점탄성보의 공진주파수와 모드별 손실인자를 예측할 수 있는 식을 발표한 바 있다.

따라서 상기 식 (6. 5)에 의한 공진주파수 예측은 다음과 같은 모드이내에서 비교적 정확하게 예측이 가능하다.

$$n \leq \frac{L}{h} \frac{1}{\pi} \left( \frac{12\pi^2 G}{E} \right)^{1/4} - \frac{1}{2} \quad (6. 6)$$

예를들어 형상비( $L/h$ )가 20이고  $E/G = 10$ 이라면 18차 모드까지 예측할 수 있다.

Bordonné 해를 수치해석법에 의한 결과와 비교한 결과, 세장비가 10인 경우에도 2차모드에 대한 오차는 약 1%로 매우 정확하였다(Brancheriau, 2002).

따라서 상기 식을 이용해 보에 대해 한번의 자유진동 실험에 의해 축방향 탄성계수뿐만 아니라 전단탄성계수를 구할 수 있다. 이와 유사한 Timoshenko-Goens-Hearmon(TGH) 법이 전단탄성계수를 구하는데 사용되고 있으며(Hearmon, 1966), 강 등(1988)은 동일한 방법으로 주요 국산수중에 대한 전단탄성계수를 구한 바 있다. Kubojima 등(1996, 1997)은 TGH법으로 전단탄성계수를 구하는데 있어 그 정확도에 미치는 영향을 조사하였다.,

점성뿐만 아니라 회전관성과 전단의 영향을 무시한 Bernoulli 해는 식 (6. 4)에서  $F_1$ 과  $F_2$ 가 “0”이 된다. 따라서 Bernoulli 해와 Bordonné 해에 따른 주파수를 각각  $f_{rE}$ ,  $f_{rT}$ 라고 하면 세장비가 감소하고 모드증가하면  $f_{rE}/f_{rT}$ 는 증가하게 됨을 알 수 있다.

$$\frac{f_{rE}}{f_{rT}} = \sqrt{1 + \frac{I}{AL^2} F_1(m) + \frac{EI}{K GAL^2} F_2(m)} \quad (6. 7)$$

동일한 양단자유 보에 있어 종진동( $f_l$ )의 공진주파수는 횡진동보다 매우 큰데, 시편길이에 비례하고  $k^2$ 에 반비례한다.

$$\frac{f_l}{f_n} = \left(\frac{2\sqrt{n}}{2n+1}\right)^2 \frac{L}{\pi k^2} \frac{f_{rE}}{f_{rT}} \quad (6. 8)$$

비틀림진동시 양단자유보의 공진주파수는 다음 식 (6. 9)로 나타낼 수 있으므로 공진주파수를 측정하여 안다면 전단탄성계수를 계산할 수 있다. 모드가 증가할수록 식 (6. 9)의 오차가 증가한다(Nakao, 1996). 따라서 전단탄성계수를 구하기 위해서는 1차모드의 공진주파수를 적용하여야만 한다.

$$f_r = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{G_{xy} K}{\rho J}} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (6. 9)$$

여기서

$$K = \frac{1}{3} b h^3 \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{h}{b} \sqrt{\frac{G_{xy}}{G_{xz}}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^5} \tanh \frac{m\pi b}{2h} \sqrt{\frac{G_{xz}}{G_{xy}}}\right)$$

$$J = \frac{1}{12} b h (b^2 + h^2)$$

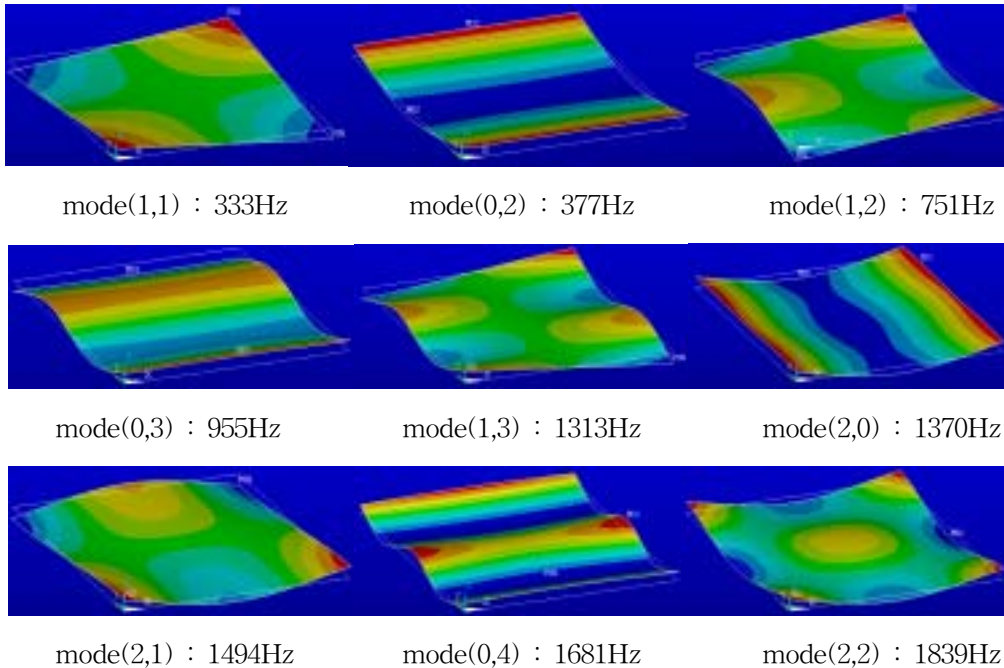
나. 판의 진동

회전관성과 전단영향을 무시한 점탄성 판의 진동방정식은 다음과 같다.

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \Omega_1 \frac{\partial^5 w}{\partial x^4 \partial t} + \Omega_2 \frac{\partial^5 w}{\partial y^4 \partial t} + 2\Omega_3 \frac{\partial^5 w}{\partial x^2 \partial y^2 \partial t} = N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + F(x, y, t) \quad (6. 10)$$

식 (6. 10)의 우측항은 면내하중(in-plane load)이 판에 작용될 때의 경우로 자유진동의 경우에는 “0”이 된다.

예를 들어 sitka spruce의 치수가 20×20×1cm(L×R×T)인 경우, 유한요소법에 의한 양변자유 직교판의 모드별 공진주파수의 계산결과는 다음과 같다.



( $\rho=390\text{kg/m}^3$ ,  $E_L=11.6\text{GPa}$ ,  $E_R=0.90\text{GPa}$ ,  $E_T=0.50\text{GPa}$ ,

$G_{LR}=0.75\text{GPa}$ ,  $G_{LT}=0.72\text{GPa}$ ,  $G_{TR}=0.039\text{GPa}$ ,  $\nu_{LR}=0.37$ ,  $\nu_{LT}=0.47$ ,  $\nu_{RT}=0.43$ )

Figure 6. 1. The first modes of the orthotropic plate made by sitka spruce.



그러나 등방성 재료와는 달리 이방성 판의 주파수별 모드 순서는 탄성상수 간의 상대크기 비에 따라 달라질 수 있다.

또한 여러 가지 경계조건에 따른 공진주파수를 Rayleigh-Ritz 법으로 구할 수 있는데, 양변 자유 판에 대한 공진주파수는 다음 식 (6. 11)과 같이 나타낼 수 있다(Hearmon, 1961; Nakao, 1985).

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\rho h} (D_{11} \frac{\alpha_1}{a^4} + D_{22} \frac{\alpha_2}{b} + 2D_{12} \frac{\alpha_3}{a^2 b^2} + 4D_{66} \frac{\alpha_4}{a^2 b^2})} \quad (6. 11)$$

여기서

$$\alpha_1 = a^4 \int W_{xx}^2 dA / \int W^2 dA, \quad \alpha_2 = b^4 \int W_{yy}^2 dA / \int W^2 dA,$$

$$\alpha_3 = a^2 b^2 \int W_{xx} W_{yy} dA / \int W^2 dA, \quad \alpha_4 = a^2 b^2 \int W_{xy}^2 dA / \int W^2 dA$$

에너지법으로 식 (6. 10)의 해를 구할 때 변위함수  $W$ 의 설정에 따라 해의 계산 효율성과 정확도가 달라지는데(Ding 등, 1996; Rajalingham 등, 1996), 대표적인 것은 삼각함수와 초월함수의 혼합형태인 특정보함수(characteristic beam function)를 사용하는 경우가 많다.

$$\phi_n = \cosh \beta_n x \pm \cos \beta_n x - \alpha_n (\sinh \beta_n x \pm \sin \beta_n x) \quad (6. 12)$$

Table 6. 2. Characteristic functions (Hearmon, 1961)

Beam	cos	sin	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_n$ (n>2)	$\beta_1 a$	$\beta_2 a$	$\beta_n a$ (n>2)	End conditions
CC	-	-	0.982	1.001	1.000	4.730	7.853	$(2n+1)\pi/2$	$\phi_n(0) = \phi_n'(0) = \phi_n(a) = \phi_n'(a) = 0$
CS	-	-	1.001	1.000	1.000	3.927	7.069	$(4n+1)\pi/4$	$\phi_n(0) = \phi_n'(0) = \phi_n(a) = \phi_n''(a) = 0$
CF	-	-	0.734	1.018	1.000	1.875	4.691	$(2n-1)\pi/2$	$\phi_n(0) = \phi_n'(0) = \phi_n''(a) = \phi_n'''(a) = 0$
FS	+	+	1.001	1.000	1.000	3.927	7.069	$(4n+1)\pi/4$	$\phi_n''(0) = \phi_n'''(0) = \phi_n(a) = \phi_n''(a) = 0$
FF	+	+	0.982	1.001	1.000	4.730	7.853	$(2n+1)\pi/2$	$\phi_n''(0) = \phi_n'''(0) = \phi_n''(a) = \phi_n'''(a) = 0$

양단 단순지지의 특성함수는 다음과 같다.

$$\phi_n = \sqrt{2} \sin(n\pi x/a) \quad (6. 13)$$

따라서 판의 특성함수는 다음과 같이 보 특성함수의 급수형태로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{mn} = \sum_{m,n=1}^{\infty} A_{mn} \phi_m(x) \phi_n(y) \quad (6. 14)$$

주파수가 증가함에 따라 댐핑이 증가하는데, Nakao(1985)는 모드별 댐핑에 대한 예측을 다음 식과 같이 나타내었다.

$$\tan \delta_{mn} = \frac{D_{11} \tan \delta_x \frac{\alpha_1}{a^4} + D_{22} \tan \delta_y \frac{\alpha_2}{b} + D_{12} (\tan \delta_x + \tan \delta_y) \frac{\alpha_3}{a^2 b^2} + 4D_{66} \tan \delta_{xy} \frac{\alpha_4}{a^2 b^2}}{D_{11} \frac{\alpha_1}{a^4} + D_{22} \frac{\alpha_2}{b} + 2D_{12} \frac{\alpha_3}{a^2 b^2} + 4D_{66} \frac{\alpha_4}{a^2 b^2}} \quad (6. 15)$$

이 결과는 Caldersmith(1984)와 McIntyre(1988)의 결과와 거의 동일하다.

그리고 재료내에 인장응력이 작용하면 공진주파수는 증가하며, 반대로 압축응력이 작용하면 감소하게 된다. Dickinson(1978)은 Rayleigh법을 이용해 면내하중(in-plane load) 작용시 여러 경계조건에 대한 주파수 예측식을 발표한 바 있으며, Kang 등(2002a, b)은 크립을 고려한 면내하중이 공진주파수 변화에 미치는 영향에 대해 보고한 바 있다. 또한 Nakao(1987)는 동일한 방법을 이용해 회전관성과 전단의 영향을 고려한 Mindlin 판의 공진주파수와 댐핑에 대한 예측식을 보고한 바 있다.

### 3. 동역학적 성질

목재의 동역학적 성질은 탄성상수와 댐핑(damping)으로 구분할 수 있다. 엄밀히 말하면 목재는 이방성 재료이지만 편의상 직교성 재료라 가정하면, 직교좌표축에 따른 방향별 탄성상수는 축방향 탄성계수  $E_L$ ,  $E_R$ ,  $E_T$ 와 전단탄성계수  $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$ ,  $G_{RT}$  및 포아송비  $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{RT}$ ,  $\nu_{TL}$  등 9가지 상수로 되어 있다. 댐핑은  $\tan \delta_L$ ,  $\tan \delta_R$ ,  $\tan \delta_T$ ,  $\tan \delta_{LR}$ ,  $\tan \delta_{LT}$ ,  $\tan \delta_{RT}$  등 6가지로 구분할 수 있다.

목재는 천연재료이므로 변이(variation)가 매우 크다. 수종간, 입목간, 입목내에서도 물리역학적 성질이 다르다. 따라서 관심대상의 동역학적 성질을 파악하는 것이 매우 번거롭고 어려운 일이다. 그러나 개략적으로 이를 알 수 있는 방법을 소개하고자 한다.

### 가. 탄성계수

목재의 비중이 증가하면 실질 목질량이 증대되므로 대부분의 역학적 성질의 값은 증가하게 된다(표 3). 섬유방향의 탄성계수는 밀도에 정비례하지만, 횡방향은 3승에 비례함에 주목할 필요가 있다. 그러나 침엽수의 동적  $E_R$ 은 4승에 비례한다는 보고도 있다(Norimoto, 1987). 이와 같이 방향별로 탄성계수가 다른 이유는 세포 횡단면의 형상과 그 배열에 기인한다(Mark, 1967). 따라서 로그함수로 비중과 정적 탄성계수간의 관계를 조사한 결과, 표 2와 그림 2에 나타난 바와 같이 높은 상관관계를 나타내었다.

Table 6. 3. Approximate mechanical properties for wood properties in terms of density  
(from Gibson, 1988)

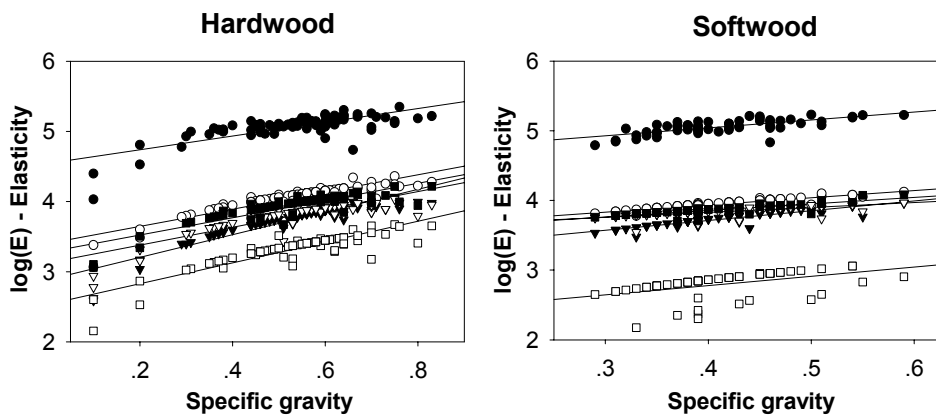
Property	Direction of loading		
	Longitudinal	Radial	Tangential
Young's modulus	$E_S \times (\rho/\rho_s)$	$0.8 E_S \times (\rho/\rho_s)^3$	$0.54 E_S \times (\rho/\rho_s)^3$
Shear modulus	$G_{LR}=G_{LT}=0.074 E_S \times (\rho/\rho_s)$	$G_{RT} = 0.074 E_S \times (\rho/\rho_s)^3$	
Crushing strength	$0.34 \sigma_{ys} \times (\rho/\rho_s)$	$0.2 \sigma_{ys} \times (\rho/\rho_s)^2$	$0.14 \sigma_{ys} \times (\rho/\rho_s)^2$
Shear strength	$\tau_{LR}=\tau_{LT}=0.086 \sigma_{ys} \times (\rho/\rho_s)$	$\tau_{RT}=C \sigma_S \times (\rho/\rho_s)^2$	
Fracture toughness (MPa <sup>3/2</sup> )	$20 \times (\rho/\rho_s)^{3/2}$	$1.8 (\rho/\rho_s)^{3/2}$	

\*  $\rho_s$ =cell wall density=1500kg/m<sup>3</sup>,  $E_S$ =axial cell wall Young's modulus=35GPa,  $\sigma_{ys}$ =axial cell wall strength=350MPa

Table 6. 4. Regression coefficients between specific gravity and elasticity.

Species		$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LT}$	$G_{LR}$	$G_{TR}$
Hardwood	$a$	4.543	3.398	2.879	3.124	3.277	2.531
	$b$	0.978	1.228	1.618	1.271	1.227	1.487
	$r^2$	0.562	0.814	0.827	0.696	0.747	0.764
Softwood	$a$	4.588	3.525	3.147	3.550	3.480	2.246
	$b$	1.133	1.028	1.412	0.699	0.939	1.332
	$r^2$	0.527	0.780	0.802	0.417	0.683	0.213

\*  $\log(y) = a + bx$  :  $y$  - elasticity(  $kg/cm^2$ ),  $x$  - specific gravity.



●  $E_L$  ○  $E_R$  ▼  $E_T$  ▽  $G_{LT}$  ■  $G_{LR}$  □  $G_{TR}$

Figure 6. 2. Relationships between specific gravity and elasticity.

정적탄성계수보다 진동시험에 의한 동적탄성계수는 약 10% 더 크며(강 등, 1988), 초음파 시험에 의한 탄성계수는 진동시험에 의한 것보다 섬유방향의 경우 25%, 방사방향의 경우에는 25% 이상 더 크다(Bucur pp136). 그 이유는 하중속도가 클수록, 즉 주파수가 증가할수록 결보

기 탄성계수가 증가하기 때문이다(Ouis, 2002). 그러나 가청주파수내에서는 증가비가 그다지 크지 않기 때문에 일정하다고 가정하는 것이 일반적이다(Okano, 1991).

전단탄성계수는 다음 식과 같은 관계를 이용해 근사값을 구할 수 있다(Weaver 등, 1984)

$$\frac{1}{G_{ij}} \cong \frac{1+\nu_{ji}}{E_i} + \frac{1+\nu_{ij}}{E_j} \quad i \neq j, i, j = L, R, T \quad (6. 16)$$

그러나 목재의 경우 표 5와 같이  $G_{LR}$ ,  $G_{TR}$ 에 비해  $G_{LT}$ 는 상기 식의 오차가 큰 것을 알 수 있다.

Table 6. 5 The ratio of measurements to theoretical values of shear modulus by Eq. (6. 16)

Species	No. of specimen	$G_{LT}$	$G_{LR}$	$G_{TR}$
Softwood	54	1.95	1.24	0.804
Hardwood	29	1.76	1.15	0.896
Average		1.86	1.20	0.850

#### 나. 포아송비

금속이나 플라스틱 등과 같은 등방성 재료의 포아송비(Poisson's ratio)는 0.3 전후로 재료 간 변동이 비교적 작다. 그러나 목재 및 목질재료의 포아송비에 대한 조사는 다른 탄성상수에 비해 매우 찾아보기 어려우며, 등방성에 가까운 목질재료인 파티클보드의 포아송비는 0.1~0.3이다(Moarcas 등, 1999). 목재의 경우는 수종간 뿐만 아니라 침엽수와 활엽수간에도 차이가 크다(Table 6. 1.). 특히 침엽수와 활엽수  $\nu_{RT}$ 가 침엽수보다 훨씬 큰데, 그 이유는 해부학적 특성에 기인한다고 생각된다. 주로 가도관으로 이루어진 침엽수는  $RT$  평면에서 관공크기가 균일하므로 관공크기가 매우 다른 도관과 목섬유로 이루어진 활엽수에 비해 응력집중이 작기 때문이다.

Silker(1989)와 Zink 등(1997)에 의해 포아송비의 값이 매우 작은  $\nu_{RL}$ 과  $\nu_{TL}$ 의 측정방법의 개발에 대한 연구가 실시된 바 있으며, Kahle 등(1994)은 세포 형태에 따른 포아송비의 예측방법을 제시한 바 있다.

Table 6. 6. Average Poission's ratio for various species.

Ratio	Softwood	Hardwood
$\nu_{LR}$	0.369 (32)	0.382 (43)
$\nu_{LT}$	0.425 (32)	0.520 (43)
$\nu_{RT}$	0.493 (32)	0.701 (40)
$\nu_{TR}$	0.336 (29)	0.329 (30)
$\nu_{RL}$	0.034 (14)	0.051 (30)
$\nu_{TL}$	0.023 (14)	0.031 (30)

\*Paranthesis represents number of species.

특히 포아송비와 밀도간에 관계가 있다는 견해(Wood Handbook, 1999)와 그 반대 견해가 있다(Bodig, 1982). 따라서 그 관계를 알기 위해 조사한 결과, 침엽수의 경우는 밀도와 관계가 없는 것으로 나타났다. 그러나 활엽수의 경우는  $\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{TR}, \nu_{RL}, \nu_{TL}$ 의  $r^2$ 값이 각각 0.155, 0.238, 0.446, 0.249, 0.548, 0.0434로 그 종류에 따라 차이는 있지만 밀도에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 목재의 포아송비에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

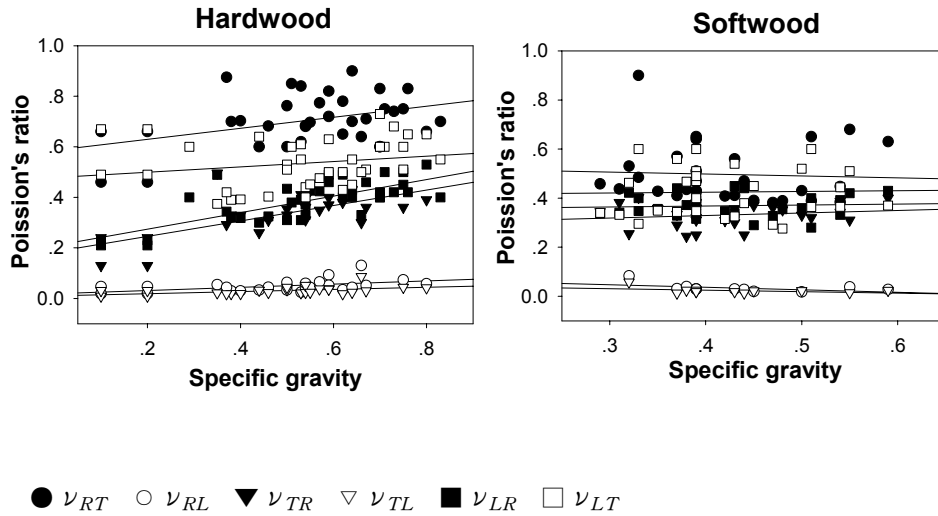


Figure 6. 3. Relationships between specific gravity and Poisson's ratios.

#### 다. 댐핑

재료댐핑과 비재료 댐핑으로 대별되며 재료댐핑은 열탄성(thermoelastivity)와 점탄성(viscoelasticity)로 나눌 수 있으며(Chaigne 등, 2001), 비재료 댐핑은 음향방사(acoustic radiation damping), 선형공기펌핑(linear air pumping), 쿨롱마찰댐핑(Coulomb friction)로 나눌 수 있다(Nashif 등, 1985).

열탄성 댐핑은 금속과 같이 열전도가 큰 재료와 밀접한 관계가 있으나 목재를 포함한 대부분의 재료의 댐핑은 점탄성 댐핑이다.

댐핑중 대수감쇠(logarithmic decrement)는 자유진동과 강제진동으로 구할 수 있으며, 그 물리적 의미는 다음 식 (6. 17)과 같이 주기당 에너지손실과 관련 있으며

$$\Delta W = 2W\lambda \quad (6. 17)$$

그 값은 식 (6. 18)~(6. 19)와 같이 여러 가지 방법으로 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_{n+1}} = \frac{0.69315}{tf_r} = \frac{6.9315}{\tau f_r} \quad (6. 18)$$

$$\lambda = \frac{\pi \Delta f}{f_r} \frac{1}{[(A_r/A)^2 - 1]^{1/2}} \quad (6. 19)$$

또한 손실인자(loss factor, loss tangent)와의 관계는 다음과 같다.

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} = Q^{-1} \cong \frac{\lambda}{\pi} \quad (6. 20)$$

그러나 목재의 경우 공진곡선은 대칭형태를 나타내지 않는다. 용이가 있거나 비균질재료의 경우 공진곡선은 비대칭 형태를 나타내게 된다. 이와 같은 성질을 이용해 재료의 비균질성을 측정하는데 이용하기도 한다.

그리고 주파수가 증가하면 댐핑이 증가하는데, Ouis(2002)는 다음과 같은 모델을 개발하였다.

$$\tan(w) = \frac{(c-1)\sin(\alpha\pi/2)(w\tau_r)^\alpha}{1 + (c+1)\cos(\alpha\pi/2)(w\tau_r)^\alpha + c(w\tau_r)^\alpha} \quad (6. 21)$$

여기서  $\alpha$ 는 상수로  $0 < \alpha < 1$ ,  $c = E_\infty/E_0$ ,  $\tau_r$ 은 완화시간이다.

Ouis(2002)에 따르면 spruce 경우  $\alpha=0.3$ ,  $c=1.5$ ,  $\tau_r=10^{-7}$ 을 적용한 결과 기존 연구결과와 잘 일치하였다고 한다. 댐핑은 약 100kHz까지 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 가청주파수내에서는 증가하게 된다.

방향별 이방성을 조사하기 위해 Haines(1979)의 결과를 분석해 보면,  $\tan \delta_L=0.026/\pi$ ,  $\tan \delta_R=0.063/\pi$ 이고  $\tan \delta_R/\tan \delta_L=2.4$ 로 탄성계수에 비해 이방성은 작았다. 또한 Tonosaki 등의 13수종에 대한  $\tan \delta_R/\tan \delta_L=2.0\sim 3.0$ 으로 비교적 잘 일치하였다. Hearmon(1948)에 따르면 섬유방향과 횡방향의 이방성비는 3~4라고 한다. 그리고  $\tan_{LR}$ ,  $\tan_{LT}$ ,  $\tan_{RT}$ 에 대한 조사는 찾아보기 어려우나 섬유방향의 것보다 2~3 정도 된다(Hearmon, 1948; Nakao 등, 1987)

댐핑은 밀도에 비례하고 탄성계수에 반비례하며, 댐핑이 생기는 주 원인은  $S_2$ 층의 마이크로 피브릴 변형과 매트릭스 변형간의 위상차에 있다고 한다.(Norimoto, 1987).

$$\tan \delta \propto \left(\frac{\rho}{E}\right)^k \quad (6. 22)$$

그러나 밀도와 탄성계수는 정비례 관계에 있기 때문에 모순점이 있지만, 댐핑이 작은 목재를 선별하기 위해서는 밀도가 작고 탄성계수가 큰 수종을 선택해야 함을 간접적으로 알 수 있다. Booker 등(1998)은 세포벽  $S_2$ 층의 마이크로피브릴이 경사를 이루고 인접 세포간 교차각을 이루므로 목재에 축방향 응력이 작용되면 세포벽간에 전단응력이 발생하게 된다. 이 전단응력은 복합간층(compound middle lammella)의 리그닌이 에너지 흡수역할을 한다고 한다. 따라서



마이크로피브릴 경사각이 클수록 발생 내부에너지가 크고 리그닌의 함유량이 많을 수록 댄핑이 증가함을 알 수 있다.

#### 라. 환경영향

온도와 상대습도에 따라 모든 동적성질은 변화되는데, 그 크기는 방향별로 차이가 있다.

탄성계수는 섬유포화점에서 함수율 12%까지 건조되면  $E_L$  값은 약 30% 증가한다. 그러나  $E_R, E_T$  및  $G$ 는 함수율 변동에 훨씬 더 민감하다. 포아송비는 함수율 변동에 따라 증가 또는 감소하게 된다. 댄핑은 함수율 약 5~8%에서 최소를 나타내고, 그 이하와 이상의 함수율에서는 오히려 더 증가한다. 침지목재의 댄핑은 약 75% 정도 증가된다고 한다(Hearmon, 1948).

또한 온도가 증가하면 탄성계수는 감소하게 된다. 목재의 함수율이 클수록 온도의 변동에 따른 영향이 더 크다. 온도  $-100^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$  범위에서 온도와 탄성계수는 반비례 선형관계에 있으며,  $E_L$ 은 온도  $1^{\circ}\text{C}$ 당 0.1~0.7% 변화된다.  $E_R, E_T$  및  $G$ 는 훨씬 더 민감하여 0.5~1.5%/ $^{\circ}\text{C}$  변화된다. 포아송비에 대한 온도의 영향은 찾아보기 어려우며, 댄핑은 온도가 증가할수록 감소하는 경향이 있지만 상세한 자료는 찾기 어렵다.

#### 4. 목재와 약기의 동적특성 해석

이방성재료의 탄성상수를 측정하기 위한 여러 연구가 실시되었으나 등방성재료에 비해 독립계수가 많기 때문에 비교적 구하기 어렵다.

한번의 실험으로 많은 동적성질을 파악하기 위한 방법에 대해 많은 연구가 이루어졌으나 (Caldersmith, 1984; McIntyre 등 1988), 직교성 판재의 포아송비를 측정하기 위해서는 시편의 가로와 세로폭을 다음 식과 같이 가공되어야 하는 제한이 있고, 반복법으로 구하여야 하는 단점이 있다.

$$\frac{a}{b} = \left(\frac{D_x}{D_y}\right)^{1/4} \quad (6. 23)$$

그러나 한 측정위치에서 모든 모드를 순차적으로 구분하는 것은 매우 어렵다. 왜냐하면 측정 위치가 nodal line에 해당 모드의 주파수 스펙트럼 진폭이 매우 작기 때문이다. 따라서 Sobue 등(1991)은 측정위치가 다른 주파수 스펙트럼을 서로 더하거나 빼는 방법으로 양변자유 직교판의 동적성질을 측정하는 방법을 개발하였다. 그러나 포아송비를 구하는 것은 어려웠다.

Grédiac(1996)은 가중합수를 Rayleigh법과 결합하여 이방성 판의 강성계수를 직접 구할 수 있는 방법을 제시하였는데, 유한요소법과 비교한 결과 등방성, 직교성, 이방성 판의 순으로 오차가 컸으나 직교성의 경우 오차는 1%이하로 매우 작았다.

악기용재의 진동성질의 평가법으로 섬유방향에 대한  $\sqrt{E/\rho^3}$ ,  $\sqrt{E/\rho^3}/\tan\delta$ ,  $\tan\delta/E$  등과 같은 기존의 보(beam)에 대한 일차원 해석에서 탈피한 판(plate)에 대한 2차원 평가법으로는 Haines(1979)의 보의 평가법 확장식이 있으며

$$L = \frac{\sqrt{E_L/\rho^3}}{\tan\delta_L} \frac{\sqrt{E_R/\rho^3}}{\tan\delta_R} \quad (6. 24)$$

또한 Tonosaki(1985)는 정현파 가진시 응답진폭을 구하는 식 (6. 24)를 이용하여 판의 모드 응답계수( $R_{mm}$ )를 구한바 있다.

$$A = \frac{F}{4\pi^2 m'} \frac{1}{\rho h \sqrt{(f^2 - f_r^2) + \tan^2\delta f_r^2}} \quad (6. 25)$$

비탄성계수( $E/\rho$ ), 즉 음파속도의 자승이 크다는 물리적 의미는 동일한 가진력에 있어 비탄성계수가 클수록 소리가 잘 난다는 것이나, 일반적으로  $E$ 와  $\rho$ 는 정비례 관계에 있으므로 모순된 면이 있다. 그러므로  $E/G$  값은 등방성 재료의 경우 약 1.5이고 목재는 수종과 방향에 따라 다르지만 약 10배나 큰 15.0이다. Okano(1991)에 따르면 특히 가문비나무의  $E_R/G_{RT}$ 는  $\sim 30.0$ 으로 다른 수종에 비해 매우 큰 편이다. 따라서 현재 오동나무와 가문비나무가 각각 동양과 서양에서 향판재로 사용되고 있는 것은 오랜 경험의 산물이라 생각된다.

악기 음의 평가는 크게 시간축과 주파수축 평가로 나눌 수 있다. 시간축 평가란 가진후 물체의 시간에 따른 반응성으로 어택과 릴리즈와 관계되며, 주파수축 평가는 소리의 울림, 깊이, 균형감 등 음색에 관계되는 것으로 시간축상의 평가는  $E\rho$ 와 상관이 있으며 주파수축상의 평가는  $E/G$ 와 상관이 있다고 한다.

$E\rho$ 가 크면 음의 올라감이 둔하여 감응도(response)가 나쁘지만 유연도(flexibility)가 있다. 또한  $E/G$ 가 크면 소리가 깊고 목재음이 나며, 역으로 작으면 소리가 얇고 금속음이 나게 된다. 종합적인 평가로서  $E\rho$ ,  $E/G$ 가 모두 크면 울림이 자연스럽고 소리가 깊으며 중후하다는 평가를 받는다.

악기의 양부를 과학적으로 판단하는 것은 아직 논란이 많다(Okano, 1991). 동일한 악기라도 연주자 개인특성과 능숙도에 따라 소리의 질이 다르다. 예를 들어 기타의 경우 현과 손가락의

상호작용은 손톱의 마찰특성, 손가락 근육의 감응(response), 기타 몸체의 admittance 및 손가락 연주방향 등에 영향을 받는다. 따라서 능숙한 연주자는 연주시 악기 응답특성에 따라 연주 기법을 조절하여 소리를 조절할 수 있기 때문이다.

그러나 연주특성을 무시하고 단순히 Jansson(1997)의 브릿지 타격에 의한 응답을 측정하는 것이 매우 시사적이다.

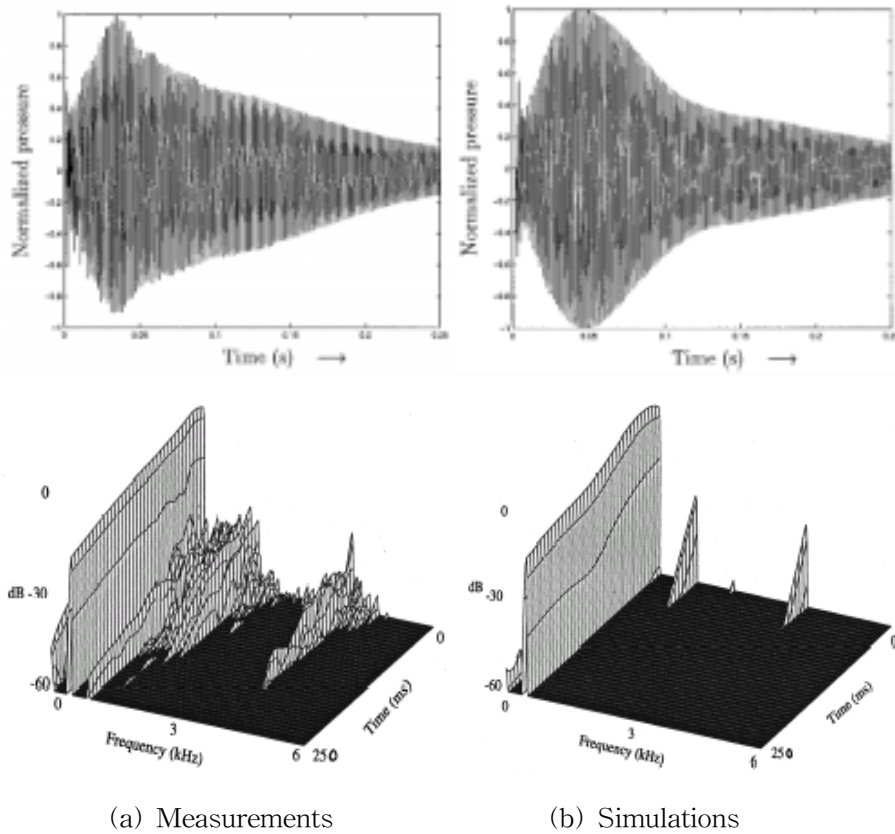


Figure 6. 4. Comparison between measurements and simulations of sound pressure by a xylophone bar struck by a rubber mallet(Doutaut, 1998).

악기의 수치적 시뮬레이션 결과를 직접 소리로 듣고자 하는 연구는 컴퓨터 급속한 발달로 인해 20세기 후반에야 가능하게 되었다(Chaigne, 2002). 그러나 아직까지는 그러한 일련의 해석에 요구되는 계산시간이 과도하게 걸리는 것이 가장 큰 문제점이다. 예를 들어 비교적 단순한 현(string)의 타격에 의한 1초간 소리를 내는데, 약 100초라는 시간이 소요되었다(Chaigne, 1994). 또한 Figure 6. 4와 같이 기본 공진주파수의 경우는 시간경과에 따른 감쇠가 유사하나 고차 공진주파수의 경우는 시뮬레이션 결과가 실제보다 더 단조롭고 감소도 차이가 있음을 알 수 있다.

그러나 수치적 시뮬레이션을 통해 악기가 어떻게 소리를 내는지에 대한 이해를 한층 더 높일 수 있고, CAL (Computer-Aided-Lutherie)의 유용한 도구가 될 수 있으므로 향후 이러한 연구방향은 급속히 진전되리라 생각된다.

## 제 7 장 참고문헌

1. Ambartsumyan S.A. and I. Kunin. 1991. Theory of anisotropic plates. Hemisphere Publishing Co. pp249.
2. Atalla, R. H., D. L. Venderhart. 1984. Native cellulose: A composite of two distinctive forms. Science 223: 283- 285.
3. Barrducci, I and G. Pasqualini. 1948. Misura dell'attrio interno e delle costanti elastiche del legno. H Nuovo Cimento 5(5):416~466.
4. Bert, C.W. and P.H. Francis. 1974. Composite mechanics : Structural mechanics. AIAA Journal 12(9):1173~1186.
5. Bodig J., and J.R. Goodman. 1973. Prediction of elastic parameters for wood. Wood Science. 5(4):249~264.
6. Bodig J., and B.A. Jayne. 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold.
7. Booker, R.E. and J. Sell. 1998. The nanostructure of the cell wall of softwoods and its functions in a living tree. Holz als Roh- und Werkstoff 56:1~8.
8. Brancheriau, L. and H. Bailleres. 2002. Natural vibrations analysis of clear wooden beams : a theoretical review. Wood Sci. and Technol. 36:347~365.
9. Bucur, V. 1995. Acoustics of Wood. CRC Press. pp264.
10. Caldersmith, G.W. 1984. Vibrations of orthotropic rectangular plates. Acustica 56:144~152.
11. Chaigne, A. 2002. Numerical simulation of stringed instruments - today's situation and trends for the future. CASJ 4(5):12~20.
12. Chaigne, A. 1994. Numerical simulations of piano strings. I. A physical model for a struck using finite difference methods. J. Acoust. Soc. Am. 95(2):1112~1118.
13. Chaigne, A. and C. Lambourg. 2001. Time-domain simulation of damped impacted plates. I. Theory and experiments. J. Acoust. Soc. Am. 109(4):1422~1432.
14. Dickinson, SM. 1978. The buckling and frequency of flexural vibration of rectangular

- isotropic and orthotropic plates using Rayleigh's method. *J. of Sound and Vibration*. 61(1):1~8.
15. Ding, Z. 1996. Natural frequencies of rectangular plates using a set of static beam functions in Rayleigh-Ritz method. *J. of Sound and Vibration*. 189(1):81~87.
  16. Doutaut, V., D. Matignon, and A. Chaigne. 1998. Numerical simulations of xylophones. II. Time-domain modeling of the resonator and of the radiated sound pressure. *J. Acoust. Soc. Am.* 104(3):1633~1647.
  17. Dunlop, J. I. 1978. Damping Loss in Wood at Mid Kilohertz Frequencies. *Wood Sci. Technol.* 12: 49-62.
  18. Dunlop, J. I. 1989. The Acoustic Properties of Wood in Relation to Stringed Musical Instruments. *Australian Acoustic Society*. 17(2): 37-40.
  19. Dunlop, J. I. and M. Shaw. 1991. Acoustical Properties of Some Australian Woods. *Catgut. Acoust. Soc. J.* 1(7): 827-830.
  20. Fahy, F. J. 1995. *Sound intensity*. Chapman & Hall. pp. 38-61.
  21. Forest Products Laboratory. 1999. *Wood handbook-Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p4-3.
  22. Gibson, L.J. and Michael F.A. 1988. *Cellular solids : structure & properties*. Pergamon Press. p278~315.
  23. Grédiac, M. and P.A. Paris. 1996. Direct identification of elastic constants of anisotropic plates by modal analysis : theoretical and numerical aspects. *J. of Sound and Vibration*. 195(3):401~405.
  24. Haines, Daniel W. 1979. On musical instrument wood. *Catgut Acoustical Society Newsletter* 31:23~32.
  25. Hall, D. E. 1993. *Basic acoustics*. Harper & Row. pp. 7-13.
  26. Hearmon R.F.S. 1948. *The elasticity of wood and plywood*. His Majesty's Stationary Office. Forest Products Research. Special Report No. 7.
  27. Hearmon, RFS. 1961. *An introduction to applied anisotropic elasticity*. University Press, Oxford, England.
  28. Hearmon, RFS. 1966. *Theory of the vibration testing of wood*. *Forest Products J.*

- 16(8):29~40.
29. Hutchinson, J.R. 2001. Shear coefficients for Timoshenko beam theory. *J. of Applied Mechanics*. 68:87~92.
  30. Jansson, E.V. 1997. Admittance measurements of 25 high quality violins. *Acustica* 83:337~341.
  31. Kahle, E. and J. Woodhouse. 1994. The influence of cell geometry on the elasticity of softwood. *J. of Materials Science*. 29:1250~1259.
  32. Kalnins, A and CL Dym. 1976. *Vibration : Beams, Plates, and Shells*. Benchmark Papers in Acoustics/8. Downen, Hutchinson & Ross, Inc.
  33. Kang, W and NH Lee. 2002a. Analytical model of free vibration of cylindrically circular plate with internal stresses. 한국목재공학회 학술발표논문집. pp32~37.
  34. Kang, W, W.Y. Chung and K.W. Lee. 2002b. Nonlinear vibration of orthotropic plates with residual stresses. 한국목재공학회 학술발표논문집. pp212~216.
  35. Kim, J.-N., Yoo, D.-H., Park, K.-H. 1998. Interior Noise Reduction for Subway Railroad Vehicles. *Proceeding of Korean Society for Railway*. pp. 265-272.
  36. Kim, W.J., A.G. Campbell, and P. Koch. 1988. Chemical variation in lodgepole pine with latitude, elevation, and diameter class. *Forest Prod. J.* 38(3):7~12.
  37. Kim, Y. T., Lee, Y. B., Jho, M. J. 2003. A fast automatic calibration system for a sound level meter in an anechoic room. *Applied Acoustics*. 64: 459-470.
  38. Kubojima, Y., H. Yoshihara, M. Ohta, and T. Okano. 1996. Examination of the method of measuring the shear modulus of wood based on the Timoshenko's theory of bending. *Mokuzai Gakkaishi* 42(12):1170~1176.
  39. Kubojima, Y., H. Yoshihara, M. Ohta, and T. Okano. 1997. Accuracy of the shear modulus of wood obtained by Timoshenko's theory of bending. *Mokuzai Gakkaishi* 43(5):439~443.
  40. Leissa, AW. *Vibration of plates*. NASA SP-160. US Dept. of Commerce.
  41. McIntyre, M.E. and J. Woodhouse. 1988. On measuring the elastic and damping constants of orthotropic sheet materials. *Acta Metallurgica* 36(6):1397~1416.
  42. Morcas, O. and M. Irle. 1999. Determination of Poisson's ratio for particleboard in pure bending. *Wood Sci. and Technology* 33:439~444.

43. Nakao, T., T. Okano, and I. Asano. 1985. Theoretical and experimental analysis of flexural vibration of the viscoelastic Timoshenko beam. *J. of Applied Mechanics*. 52:728~731.
44. Nakao, T., C. Tanaka, A. Takahashi., and T. Okano. 1987. Experimental study of flexural vibration of orthotropic, viscoelastic plates. *J of Sound and Vibration*. 116(3):465~473.
45. Nakao, T. 1996. Experimental study of torsional vibration of wooden bars by plate theories. *Mokuzai Gakkaishi* 42(1):10~15.
46. Nam, J.-W., Park, J.-S., and Lee, J.-J. 2002. Evaluation of Impact Sound Insulation Properties of Light-Framed Floor with Radiant Floor Heating System, *Mokchaekonhak*. 30(3): 75-84.
47. Nashif, AD, DIG Jones and JP Henderson. 1985. *Vibration damping*. Wiley-Interscience.
48. Norimoto, M. 1987. Specific Young's modulus and quality of coniferous wood. *Mokuzai Gakkaishi* 33(7):545~551.
49. Mark, R.H. 1967. *Cell wall mechanics of tracheids*. Yale Univ. Press.
50. Matsumoto, T. 196?. Studies of the dynamic modulus E and the logarithmic decrement of wood by transverse vibration. *Bulletin of the Kyushu Univ. Forests*. No. 36.
51. Okano, T. 1991. Acoustical properties of wood. *Mokuzai Gakkaishi* 37(11):991~997.
52. Olson, HF. 1967. 音楽工学. 誠文堂新光社(平岡正徳 譯).
53. Ouis, D. 2002. On the frequency dependence of the modulus of elasticity of wood. *Wood Sci. & Technol.* 36(4):335~346.
54. Park, H.-G., Park, B.-J. and An, M.-S. 1999. The Analysis of Acoustic Environmental in Courtyard of Apartment; A Study of Sound Pressure Level. *Engineering Research*. 30: 177-183.
55. Rajalingham, C., B. Bhat, and G.D. Xistris. 1996. Vibration of rectangular plates using plate characteristic functions as shape functions in the Rayleigh-Ritz method. *J. of Sound and Vibration*. 193(2):497~509.
56. Reynolds, DD. 1981. *Engineering principles of acoustics : Noise and vibration control*. Allyn and Bacon.
57. Rossing, T. D. 2002. *The science of sound*. Addison-Wesley Pub. Co. pp. 85-137.
58. Silker, A. 1989. Measurement of the smaller Poisson's ratios and related compliances for



- wood. Wood and Fiber 21(3):252~262.
59. Speaks, C. E. 1996. Introduction to sound: acoustics for the hearing and speech sciences. Singular Publishing Group Inc. pp. 131-184.
  60. Stephen, N.G. 2002. On "A check on the accuracy of Timoshenko's beam theory". J. of Sound and Vibration. 257(4):809~812.
  61. Soeta, Y., Ohtori, K., Fujii, K., and Ando, Y. 2001. Measurement of Sound Transmission by Hall Doors. J. Sound and Vibration. 241(1): 79-86.
  62. Tonosaki, M. and T. Okano. 1985. Evaluation of acoustical properties of wood by plate-vibration tests. Mokuzai Gakkaishi 31(8):627~632.
  63. Weaver, W. and P.R. Johnson. 1984. Finite elements for structural analysis. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. pp403.
  64. Wiedenbeck, J.K., K. Hofmann, P. Peralta, C. Skaar, and P. Koch. 1990. Air permeability, shrinkage, and moisture sorption of lodgepole pine stemwood. Wood and Fiber Sci. 22(3):229~245.
  65. Wiemann, M.C. and G.B. Williamson. 2002. Geographic variation in wood specific gravity : Effects of latitude, temperature, and precipitation. Wood and Fiber Sci. 34(1):96~107.
  66. Zink, A.G., R.B. Hanna, and J.W. Stelmokas. 1997. Measurement of Poisson's ratios for yellow-poplar. Forest Prod. J. 47(3):78~80.
  67. 山田正. 1987. 木質環境の 科學. 海青社 (p117-132) pp484.
  68. 강욱, 정희석. 1988. 향판용 관행수종과 대체가능수종의 자유진동적 성질에 관한 연구. 목재공학 16(3):48~64.
  69. 이병호. 1999. 음향학 I, II. 민음사
  70. 정우양, 홍병화. 1998. 바이올린용 주용 소재의 품질관리를 위한 음향학적 연구. 1998 학술발표논문집. 한국목재공학회. 108-113.
  71. 鄭雨陽, 朴善行. 1999. 바이올린用 素材의 진동모드 解析 에 관한 연구. 목재공학. 27(3): 1~6
  72. 정우양, 박선행. 2000. 바이올린계 현악기용 브릿지의 진동특성에 관한 연구. 2000 학술발표논문집. 한국목재공학회. 191-196
  73. 강춘원, 정희석. 1991. 진동시험에 의한 대체 향판수종의 음향적 성질 평가에 관한 연구. 목재공학. 19(1):71-80.

74. 이원희, 황권한. 1997. 공명주파수에 의한 목재의 동적탄성계수 추정. 목재공학. 25(1):42-50.
75. 정희석, 유태경, 권주용. 1998. 전통악기 음향관의 양면도장이 음향성에 미치는 영향. 목재공학. 26(4):26-33.
76. 이큰울. 2004. 휨진동법에 의한 국악기용 주요 국산재의 재질 및 음향특성 평가에 관한 연구. 석사학위 논문. 전남대학교.
77. 정우양, 박선행. 2000. 바이올린계 현악기용 브릿지의 진동특성에 관한 연구. 2000 학술발표논문집. 한국목재공학회. 191-196
78. 최재훈, 이병후, 김현중, 정우양. 2005 현악기용 음향기능성 도료의 점탄성 성질과 음향적 성질. 목재공학. 33(4):15~22