

GOVP1200201368

634.98

L293 6

19

최 중  
연구보고서

## 액체 암모니아를 이용한 국산재 곡가공기술 개발

Development of Wood Bent Technology Using Liquid  
Ammonia

주관연구기관  
충남대학교

농 립 부

## 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “액체 암모니아를 이용한 국산재 곡가공기술 개발” 과제  
의 최종보고서로 제출합니다.

2001 년 11 월 23일

주관연구기관명 : 충남대학교

총괄연구책임자 : 강 호 양

세부연구책임자 : 강 호 양

연 구 원 : 조 용 철

연 구 원 : 이 관 영

# 여 백

## 요 약 문

### I. 제 목

#### 액체 암모니아를 이용한 국산재 곡가공기술 개발

### II. 연구개발의 목적 및 중요성

목재를 원하는 형태대로 말거나 굽힐 수 있는 기술을 개발하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다. 목재에 증기를 가하여 휘는 방법은 오래 전부터 사용되어 왔다. 목재에 열과 수분을 동시에 가하면 목재 성분 분자와 물 분자의 운동이 활발해져 가소성이 높아진다. 이러한 방법은 오랜동안 삼자루, 지팡이 등을 완만하게 굽히는데 사용되어 왔다. 그러나 이러한 열가소화 방법은 얻을 수 있는 곡률반경에 한계가 있다.

가소화를 촉진시키기 위해 마이크로파 방법이 개발되어 사용되어 왔다. 마이크로파는 짧은 시간 안에 목재 내부를 가열하여 목재 성분의 온도를 유리전이 온도까지 높여주기 때문에 신속하고 원활하게 곡가공할 수 있도록 해주지만 최소 곡률반경을 현저하게 낮추지 못한다.

화학처리를 통해 목재를 가소화 시킬 수 있는 방법들이 개발되었는데 그 중 액체 암모니아의 효과가 가장 좋은 것으로 알려져 있다. 액체 암모니아는 리그닌을 가소화 시킬 뿐만 아니라 셀룰로오스 수소결합을 팽윤시켜 분자의 미끄럼을 활발하게 한다. 액체 암모니아는 셀룰로오스의 비결정 영역은 물론 결정 영역까지 침투하기 때문에 매우 효과적인 가소성을 나타낸다.

두께 3mm, 폭 100mm, 길이 1000mm의 자작나무를 4-5시간 액체 암모니아 처리하여 목재를 엇가락처럼 휘 수 있었다는 보고가 있다. 액체 암모니아 처리는 거의 모든 수종에 적용할 수 있는데 고밀도 수종보다는 저밀도 수종에서 압축 파괴가 나타날 확률이 높다. 그러나 저밀도 소나무를 액체 암모니아 처리한 결과 결합과 색상의 변화 없이 표면 경도가 높아졌다는 보고가 있다.

액체 암모니아를 목재 곱가공에 사용한지 꽤 오래 되었으나 국내에서는 아직 이 기술을 국산재에 응용하거나 향상시키려고 노력한 적이 없었다. 본 연구에서는 액체 암모니아를 이용하여 목재의 가소성을 높일 수 있는 기술을 개발하고 이를 국산 침엽수재와 활엽수재에 적용하여 다양한 곱가공 소재를 생산할 수 있는 기술을 개발한다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

#### (1) 액체 암모니아 냉동처리장치 개발

액체 암모니아의 비등점은 1기압에서 영하 33℃이기 때문에 그 이하를 유지할 수 있는 냉동 처리장치를 개발하여야 한다.

#### (2) 전처리에 의한 액체 암모니아 투과율 향상 기술 개발

액체 암모니아의 투과율을 향상시키는 것이 목재 가소성을 높이는 방법이므로 자비, 증자, 냉동 처리 등을 통해 투과율을 향상시키는 방법을 찾는다.

#### (3) 액체 암모니아 처리 목재의 물리적 성질 자료 조사

처리 수종의 물성 자료를 기존의 보고서에서 자료를 조사한다. 액체 암모니아를 처리하면 목재의 특성이 바뀌게 된다. 암모니아 처리에 의해 표면의 경도가 증가하기도 한다. 목재의 물리적 성질인 밀도, 수축율, 흡습율, 평형함수율 등 물리적 성질 변화 측정하여 처리전과 처리후를 비교한다.

#### (4) 마이크로파와 액체 암모니아의 병행 처리 방법 개발

본 실험실에 가지고 있는 대형 마이크로파 건조기를 이용하여 마이크로파 곱가공을 시도한 다음 액체 암모니아 처리로 완전 가소화 시키는 방법을 개발한다. 마이크로파 가열 전에 전처리하여 마이크로파 가열 효율을 높이고, 마이크로파 가열시 목재를 비닐로 씌워 건조를 방지하면서 가소성을 높이는 방법을 사용한다.

(5) 수종별 액체 암모니아 가소성 조사

본 연구에 사용될 수종은 소나무, 잣나무, 낙엽송 등 침엽수와 참나무, 밤나무, 자작나무 등 활엽수이다. 각 수종별 적정 처리 시간과 처리효과를 조사한다.

(6) 액체 암모니아 처리재의 두께에 따른 최소 곡률반경 조사

최소 곡률반경은 두께에 따라 달라진다. 수종별로 최적 처리조건을 찾은 후 두께에 따른 최소 곡률반경을 조사하여 database화 한다.

(7) 액체 암모니아 처리재의 공예품 제작

액체 암모니아 처리재의 가소성을 이용하여 독특한 형태의 공예품을 만든다.

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

##### 1. 연구개발 결과

본 연구를 수행하면서 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 액체 암모니아 냉동처리장치를 개발하여 목재의 액체 암모니아 처리에 사용한 결과 효과적이었다.

(2) 액체 암모니아 인출은 매우 어려운 작업이나 특별한 장치 없이 드라이아이스와 아세톤만을 이용하여 고압 액체 암모니아를 대기압 액체 상태로 뽑아내는 기술을 개발하였다.

(3) 증기전처리와 incising은 목재에 대한 액체 암모니아 투과성을 높이는 데 별 효과가 없었다.

(4) 전처리로서 마이크로파 가열 휩가공은 액체 암모니아 처리재의 휩가공성에 비하면 매우 작기 때문에 효과가 없었다.

(5) 밤나무는 휩가공이 어려운 수종으로 액체 암모니아 처리보다 증기처리가

더 효과 있었다. 플라타너스 액체 암모니아 처리제의 가공성은 증기처리 제보다 높았으나 가공시에 많은 시편이 부러져 휩가공에는 적당하지 않았다.

- (6) 증기처리제의 평형함수율은 액체 암모니아 처리제보다 항상 낮았다.
- (7) 흡방·습에 따른 액체 암모니아처리 곡가공재의 복원성은 증기처리 곡가공재보다 훨씬 작았다.
- (8) 액체 암모니아처리에 의해 목재의 섬유방향길이는 거의 변하지 않았으나 섬유직각방향은 처리시간이 길수록 더 많이 줄어들었다.
- (9) 액체 암모니아 처리시간이 증가함에 따라 초음파 전달속도는 감소하고 밀도는 증가하였으며 따라서 동탄성계수는 감소하였다.
- (10) 침엽수와 활엽수 여러 수종의 최대인장변형율 자료를 만들었다. 액체 암모니아 처리 침엽수재의 최대인장변형율은 수종간 큰 차이 없이 10-12%로 가소성이 매우 높았다. 그러나 활엽수재는 수종간 큰 차이를 보였는데 비중이 낮은 오동나무가 평균 18.9%로 가장 컸으며 플라타너스가 4.9%로 가장 낮았다.
- (11) 암모니아 처리 휩가공재로 장식용 솥을 만들 수 있었다.
- (12) 오리나무와 파덕의 액체 암모니아 휩가공 소재를 이용하여 가구를 비롯하여 몇 가지 작품을 만들어 전시회를 개최하여 호평을 받았다.

## 2. 활용에 대한 건의

국내에서 최초로 시도한 액체 암모니아를 이용한 목재의 휩가공은 성공적이었으며 개발한 실험장치는 저렴하면서도 효과적이었다. 액체 암모니아처리에 의한 목재의 물리적 성질 변화에 대한 종합적인 자료를 얻을 수 있었으며 특히 수종별로 최대인장변형율을 알게 됨으로써 휩가공 가능여부를 손쉽게 판정할 수 있는 자료를 얻게되었다. 연구 결과는 주요 학술지에 게재될 예정이

다. 본 연구 결과에 보였듯이 휩가공 소재를 가구제작에 사용하면 독특한 디자인을 할 수 있으며 지팡이와 같이 심하게 휘 소재를 만들 수 있다. 관심있는 목재가공업체를 선정하여 기술을 이전할 계획이다.



## SUMMARY

### I. Title of Research Project

#### **Development of Wood Bent Technology Using Liquid Ammonia**

### II. Objectives and Importances

Researchers have been tried to bent wood in any shapes. Steaming is one of the old-fashioned methods been used for a long time. Applying simultaneously heat and water to wood activates wood components and water molecules resulting in the increase of its plasticity. This steam-bent technique has been used in this country for bending spade handles and wooden canes. But there is a limitation in the radii of steam-bent curvatures.

To improve the wood plasticity a method using microwave has been developed and been used. Microwave radiation increases the inner wood temperature shortly well above the glass transition temperature of wood components and improve the wood plasticity, but not significantly reduce the radius of wood curvature.

Among the wood plasticizing techniques based on chemical modification the liquid ammonia treatment is known to be the most effective. The liquid ammonia does not only plasticize lignin, but also swells the hydrogen bonds between celluloses. It can penetrate crystal regions as well as a amorphous regions.

It was reported that the liquid ammonia made a birch board of  $3 \times 100 \times 1000 \text{mm}^3$  in dimension docile after 4-5 hour treatment. The liquid ammonia treatment can be applied to any density species. Low dense species is subject to compression failure than high dense one. It was also reported that the hardness of liquid ammonia treated low dense wood was improved without discoloration.

This may be the first attempt for making liquid ammonia-bent wood in this country. The objectives of this study are to improve the wood-bent technique using liquid ammonia and to adopt it for producing fancy furniture elements using domestic hardwoods and softwoods.

### III. Contents and Scopes

#### (1) Equipment Development for treating wood with liquid ammonia

Since the boiling point of liquid ammonia at atmospheric pressure is  $-33^{\circ}\text{C}$  a low temperature freezer is needed to treat and store the liquid ammonia.

#### (2) Investigation on Effect of Pretreatments

The effect of pretreatments such as boiling, steaming and freezing on the permeability of liquid ammonia is investigated

#### (3) Examination of physical properties of liquid ammonia treated wood

Liquid ammonia makes the physical properties of treated wood changed. For example the surface hardness of liquid ammonia treated wood gets improved than the untreated. The physical properties such as density, shrinkage, hygroscopicity and equilibrium moisture content are measured before and after liquid ammonia treatment.

#### (4) Combination of microwave radiation and liquid ammonia treatments

Effect of microwave radiation in prior to liquid ammonia treatment on the wood-benting process is examined. To improve the plasticity wood specimens are wrapped with plastic bags during microwave radiation.

#### (5) Comparison of the plasticities between domestic species

The plasticities of domestic species such as white pine, Korean red pine, larch, oak, chestnut, birch etc. and their optimum treatment

conditions are investigated

(6) Effect of board thickness on the minimum radius of curvature

The minimum radii of curvatures are of dependence on board thicknesses, thus their relationships are investigated for many species.

(7) Woodcrafts made of liquid ammonia treated wood Some woodcrafts including small scale furniture are made with liquid ammonia bent-wood and are exhibited at a gallery

#### IV. Results and Recommendations for Applications of the Research Project

##### 1. Results of the Study

- (1) The freezer developed for liquid ammonia treatment was very effective for this purpose.
- (2) It is very difficult to obtain liquid ammonia at atmospheric pressure without any special apparatus. However a simple technique for condensing ammonia gas was developed using dry ice and liquid acetone.
- (3) Presteaming and incising didn't improve the permeability of liquid ammonia in wood.
- (4) Microwave heating as a pretreatment less influenced the plasticity of the liquid ammonia treated wood.
- (5) It was found that chestnut is a refractory species for bending and steaming is rather effective than liquid ammonia treatment. For bending sycamore liquid ammonia treatment is better than steaming, but the treated specimens were easily broken being bent.
- (6) For any species the EMCs of the steamed specimens were always

lower than the liquid ammonia treated.

- (7) The spring-back of liquid ammonia-bent wood was much smaller than that of the steam-bent.
- (8) As the increase of liquid ammonia treatment time the shrinkages of the treated specimens increased in transverse direction, but not in longitudinal direction.
- (9) With the increase of liquid ammonia treatment time the sound velocities transmitted through the treated specimens decreased and the densities increased, thus the dynamic elasticities decreased.
- (10) The list of maximum tensile strains for several softwoods and hardwoods treated with liquid ammonia was completed. The softwoods showed high maximum tensile strains in the range of 10-12% and there were no significant variations among species. However those for the hardwoods varied from species to species, 18.9% for paulownia and 4.9% for sycamore.
- (11) Decorative bent-charcoals could be successfully made from liquid ammonia-bent wood.
- (12) Some furnitures and wood crafts specially designed with liquid ammonia-bent wood were made by a wood working artist and exhibited at an art gallery in Seoul.

## 2. Recommendations and Applications

This research project of Development of Wood Bent Technology Using Liquid Ammonia was successfully completed resulting in improving wood-benting technology and developing an economic liquid ammonia

treatment equipment. We obtained complete data on the physical properties of the liquid ammonia treated wood and the maximum tensile strains of many species, with which the plasticity of each species can be easily determined. During this research period two papers has been published and others are being prepared. As mentioned in this report the technology of liquid ammonia bent-wood extends the horizon of furniture and wood craft design and make it possible to produce sharply curved canes. This technology will be transferred to a company, who wants to industrialize it.

# CONTENTS

## Chapter I. Introduction

Section 1. Objectives and scope

## Chapter II. Development of Wood Bent Technology Using Liquid Ammonia

Section 1. Preface

Section 2. Equipment of Liquid ammonia treatment

1. Properties of liquid ammonia
2. Making a chamber for liquid ammonia treatment
3. Condensing ammonia gas

Section 3. Materials

1. Species used for the study
2. Specimen preparation

Section 4. Microwave vacuum drying of hardwoods

1. Objectives
2. Materials
3. Experimental methods
4. Microwave vacuum drying
5. Moisture contents and specific gravities
6. Final Moisture contents of the boards
7. Drying curves and wood temperatures
8. Drying rates and magnetron operation time
9. Drying defects

Section 5. Effect of treatment time on plasticity and hygroscopicity

1. Objectives
2. Materials and methods
3. Bending liquid ammonia treated specimens

- 4. Effect of pre-treatments ..
  - 5. Heat conductivity of liquid ammonia treated specimens
  - 6. Comparison of hygroscopicity
- Section 6. Comparison of plasticity of liquid ammonia- and steam-bent wood
- 1. Objectives
  - 2. Materials and methods
  - 3. Plasticities of several species
    - 1) Chestnut.
    - 2) Sycamore
    - 3) Softwoods (Douglas-fir, larch, radiata pine and rigitaeda)
- Section 7. Measuring spring-backs of liquid ammonia- and steam-bent wood
- 1. Objectives
  - 2. Materials and methods
  - 3. Bending wood
  - 4. Spring-back of treated specimens
  - 5. Hyterises of treated specimens
- Section 8. Dimensional and physical property changes of liquid ammonia treated wood
- 1. Objectives
  - 2. Materials and methods
    - 1). Specimen preparation
    - 2). Dimensional change
    - 3). Relative dielectric constant
    - 4). Heat conductivity
    - 5). Ultrasonic velocity and dynamic MOE
  - 3. Change of equilibrium moisture contents
  - 4. Dimensional change
  - 5. Physical properties

1) Relative dielectric constant and heat conductivity

나. Ultrasonic velocity and dynamic MOE

Section 9. Measuring the minimum radius of liquid ammonia bent wood

1. Objectives

2. Materials and methods

3. the minimum radius and maximum tensile strain of liquid ammonia bent wood

Section 10. Bending  $2 \times 2\text{cm}^2$  pine specimens

1. Objectives

2. Materials and methods

3. Radius of curvature and tensile strain

4. Proposition for making a pine cane

Section 11. Making a decorative charcoal with bent wood

1. Objectives

2. Methods

3. Making a charcoal

Section 12. Making furniture and woodcrafts with liquid ammonia bent wood

1. Objectives

2. Making bent wood

1) Specimens

2) Treatment of liquid ammonia and bending procedures

3) Making bent parts

3. Explanation of arts

1) Concepts

2) Article 1: Chest

3) Article 2: Chest of drawers

4) Article 3: A Hanger

5) Article 4: Napkin Holder

Section 13. Results and discussion



1. Development of equipment for liquid ammonia treatment
  2. Condensing ammonia gas
  3. Effect of pretreatments
    - 1) Pre-steaming
    - 2) Microwave-vacuum drying
    - 3) Incising
  4. Effect of treatment time on physical properties
    - 1) Plasticity
    - 2) Heat conductivity
    - 3) hygroscopicity
  5. Comparison of plasticity of liquid ammonia- and steam-bent wood
    - 1) Hardwoods
    - 2) Softwoods
  6. Measuring spring-backs of liquid ammonia- and steam-bent wood
    - 1) Equilibrium moisture contents
    - 2) Spring-back
    - 3) Hysteresis
  7. Dimensional and physical property changes of liquid ammonia treated wood
    - 1) Equilibrium moisture contents
    - 2) Dimensional change
    - 3) Relative dielectric constant and heat conductivity
    - 4) Ultrasonic velocity and dynamic MOE
  8. Measuring the minimum radius of liquid ammonia bent wood
  9. Bending  $2 \times 2\text{cm}^2$  pine specimens
    - 1) Radius of bent wood and tensile strain
  10. Making a decorative charcoal with bent wood
  11. Making furniture and woodcrafts with liquid ammonia bent wood
- Section 14. Conclusions
- Section 15. References

# 목 차

## 제 1 장 서 론

제1절 연구개발의 목적과 범위

## 제 2 장 액체 암모니아를 이용한 국산재 곡가공기술 개발

제1절 서 설

제2절 액체 암모니아의 처리장치 및 인출

1. 액체 암모니아 특성
2. 액체 암모니아 냉동 처리 장치 제작
3. 액체 암모니아 인출

제3절 공시재료

1. 공시수종
2. 시편의 규격 및 제작

제4절 활엽수재의 마이크로파 진공건조

1. 목적
2. 공시재료
3. 실험방법
4. 마이크로파 진공건조 실험
5. 함수율 및 비중
6. 건조 후 판재 함수율
7. 건조곡선 및 목재의 온도
8. 건조속도 및 마그네트론 작동시간
9. 건조결함

제5절 액체 암모니아 처리시간에 따른 휨가공성 및 흡습율 비교

1. 목적
2. 공시재료 및 실험 방법
3. 처리재의 휨가공
4. 전처리 효과

5. 액체암모니아 처리제의 열전달계수 측정

6. 흡습성 비교

제6절 증기처리제와 액체 암모니아 처리제의 휘가공성 비교

1. 목적

2. 공시재료 및 실험방법

3. 수종별 휘가공성

가. 밤나무

나. 플라타너스

다. 침엽수 (더그라스퍼, 낙엽송, 라디에타파인, 리기테타)

제7절 증기처리제와 액체 암모니아 처리제의 복원성 비교

1. 목적

2. 공시재료 및 실험방법

3. 휘가공

4. 처리제의 복원성

5. 처리제의 이력현상

제8절 액체 암모니아 처리제의 치수 및 물리적 성질 변화

1. 목적

2. 공시재료 및 실험방법

가. 공시재료

나. 치수변화

다. 상대적 유전율

라. 열전달계수 측정

마. 초음파 전달속도와 동탄성계수

3. 평형 함수율 변화

4. 치수변화

5. 물리적 성질 변화

가. 상대적 유전율과 열전달계수

나. 초음파 전달속도와 동탄성계수

제9절 수종별 최소곡률반경 측정

1. 목적

2. 공시재료 및 실험방법
  3. 수종별 최소곡률반경과 최대인장변형을
- 제10절 2×2cm<sup>2</sup> 소나무 각재의 휨가공

1. 목적
  2. 공시재료 및 실험방법
  3. 곡률반경 및 인장변형을
  4. 소나무 지팡이를 만들기 위한 방안
- 제11절 액체 암모니아 처리제를 이용하여 휨가공 숯 만들기

1. 목적
  2. 실험 방법
  3. 곡가공 숯 제조
- 제12절 액체 암모니아 처리제를 이용한 작품 제작

1. 목적
2. 액체 암모니아 휨가공 소재 제작
  - 가. 공시시편
  - 나. 암모니아 처리 및 휨가공
  - 다. 휨가공 소재 제작
    - 1) 소재1: 40mm원과 직선
    - 2) 소재2: 나사모양
3. 작품설명
  - 가. 디자인 개요
  - 나. 작품1: Chest
  - 다. 작품2: Chest of drawers
  - 라. 작품3: A Hanger
  - 마. 작품4: A Napkin Holder

- 제13절 결과 및 고찰
1. 액체 암모니아 냉동 처리 장치 개발
  2. 액체 암모니아 인출
  3. 전처리 효과
    - 가. 증기전처리

- 나. 마이크로파 진공(MWV)건조효과
    - 다. incising 처리
  - 4. 액체 암모니아의 처리시간에 따른 물리적 특성
    - 가. 가소성
    - 나. 열전달계수
    - 다. 흡습성
  - 5. 증기처리제와 액체 암모니아 처리제의 휩가공성 비교
    - 가. 활엽수재
    - 나. 침엽수재
  - 6. 증기처리제와 액체 암모니아 처리제의 복원성 비교
    - 가. 평형함수율
    - 나. 증습에 의한 복원성
    - 다. 이력현상
  - 7. 액체 암모니아 처리제의 치수 및 물리적 성질 변화
    - 가. 평형함수율
    - 나. 치수변화
    - 다. 상대적 유전율과 열전달계수
    - 라. 초음파 전달속도와 동탄성계수
  - 8. 수중별 최소곡률반경과 최대인장변형율
  - 9.  $2 \times 2\text{cm}^2$  소나무 각계의 휩가공
    - 가. 곡률반경 및 인장변형율
  - 10. 휩가공 숯 만들기
  - 11. 액체 암모니아 처리재를 이용한 작품 제작
- 제14절 결론
- 제15절 참고문헌

## 부 록

# 제 1 장 서 론

## 제1절 연구개발의 목적과 범위

목재의 자연스럽게 흰 모습보다 더 아름다운 것은 드무나, 원하는 형태의 천연적으로 흰 목재 소재를 구하기는 어렵다. 목재는 점탄성 물질로서 약간의 가소성을 가지고 있어 힘을 가면 아름다운 곡선을 만들 수 있으나 처리하지 않은 목재로 만들 수 있는 곡선의 곡률반경은 매우 크기 때문에 구조재 이외 용도로는 사용하기 어렵다. 따라서 가소성을 높이기 위해 목재를 수증기에 찌는 방법을 사용해왔는데 이는 목재에 열과 수분을 동시에 가하면 목재성분 분자와 물분자의 운동이 활발해져 가소성이 높아지는 원리를 이용한 것이다. 그러나 이러한 증기처리 방법으로 만들어진 휩가공 소재는 일정한 힘을 계속 가해주지 않으면 어느 정도 원상 회복되는 단점이 있다.

액체 암모니아는 리그닌을 가소화 시킬 뿐만 아니라 셀룰로오스 수소결합을 팽윤시켜 분자의 미끄럼을 촉진한다고 알려져 왔다. 특히 셀룰로오스의 비결정 영역은 물론 결정 영역까지 침투하기 때문에 매우 효과적인 가소성을 나타낸다. 목재 가소화에는 특별한 효과를 나타내지만 암모니아는 상온에서 기체상태로 존재하기 때문에 액체로 유지하기 위해서는 높은 압력(15기압이상)으로 보관하여야 하며 유독성이기 때문에 취급이 매우 어렵다.

여러 가지 화학처리 방법 중 액체 암모니아 처리법이 목재의 가소성을 가장 높인다고 알려져 있다. 본 연구에서는 마이크로파와 액체 암모니아를 이용하여 목재의 가소성을 높일 수 있는 기술을 개발하고 이를 국산 침엽수재와 활엽수재에 적용하여 다양한 휩가공 소재를 생산할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

주요연구 내용은 다음과 같다.

(1)액체 암모니아 냉동-진공 처리장치 개발-영하 33℃이하에서 진공을 받

복하여 액체 암모니아를 목재에 주입시킬 수 있는 장치를 개발한다.

(2)전처리에 의한 액체 암모니아 투과율 향상 기술 개발-자비, 증자, 냉동 등 여러 가지 전처리 방법과 암모니아 기체 전처리 방법을 통해 목재의 투과율을 향상시키고 암모니아의 주입량을 증가시키는 기술을 개발한다.

(3)액체 암모니아 처리 목재의 물리적 성질 조사-밀도, 수축율, 흡습율, 팽형함수율 등 물리적 성질 변화 측정한다.

(4)마이크로파와 액체 암모니아의 병행 처리 방법 개발-마이크로파로 가열하여 예비 톱가공한 후 암모니아 처리하는 방법을 개발한다.

(5)수종별 액체 암모니아 가소성 조사-소나무, 낙엽송 등 침엽수와 아까시나무, 참나무, 밤나무, 자작나무 등 활엽수의 수종별 가소성 조사한다.

(6)액체 암모니아 처리재의 두께에 따른 최소 곡률반경 조사-각 수종의 두께에 따른 최소곡률반경을 측정하여 database화한다.

(7) 액체 암모니아 처리재의 공예품 제작-액체 암모니아 처리재의 가소성을 이용하여 독특한 형태의 공예품을 만든다.

## 제 2 장 액체 암모니아를 이용한 국산재 곡가공기술 개발

### 제1절 서 설

목재를 원하는 형태대로 말거나 굽힐 수 있는 기술을 개발하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다. 목재에 증기를 가하여 휘는 방법은 오래 전부터 사용되어 왔다. 목재에 열과 수분을 동시에 가하면 목재 성분 분자와 물 분자의 운동이 활발해져 가소성이 높아진다. 이러한 방법은 오랜동안 삼자루, 지팡이 등을 완만하게 굽히는데 사용되어 왔다. 그러나 이러한 열가소화 방법은 표 1-1과 같이 얻을 수 있는 곡률반경이 한계가 있다.

표 1-1. 수종별 휨가공 성능

곡률반경/두께	수 종
<4	아카시아, 떡갈나무
≒5	느티나무, 버드나무, 후박나무, 참나무, 때죽나무, 호두나무
≒7	회화나무, 너도밤나무, 자작나무, 노송나무, 소나무, 나한백
굽히기 어려운 것	포플라, 오동나무, 단향목, 미송

열가소화를 촉진시키기 위해 마이크로파 방법이 개발되어 사용되어 왔다. 마이크로파는 짧은 시간 안에 목재 내부를 가열하여 목재 성분의 온도를 유리전이 온도(표 1-2)까지 높여주기 때문에 신속하고 원활하게 휨가공할 수 있도록 해주



지만 최소 곡률반경을 현저하게 낮추지 못한다.

표1-2 목재 구성성분별 유리전이 온도 (°C)

	헤미셀룰로오스	리그닌	셀룰로오스
건조상태	167-217	134-235	231-253
습윤상태	54-142	77-128	222-250

화학처리를 통해 목재를 가소화 시킬 수 있는 방법들이 개발되었는데 그 중 액체 암모니아의 효과가 가장 좋은 것으로 알려져 있다. 액체 암모니아는 리그닌을 가소화 시킬 뿐만 아니라 셀룰로오스 수소결합을 팽윤시켜 분자의 미끄럼을 활발하게 한다. 액체 암모니아는 셀룰로오스의 비결정 영역은 물론 결정 영역까지 침투하기 때문에 매우 효과적인 가소성을 나타낸다.

두께 3mm, 폭 100mm, 길이 1000mm의 자작나무를 4-5시간 액체 암모니아 처리하여 목재를 엇가락처럼 휘 수 있었다는 보고가 있다. 액체 암모니아 처리는 거의 모든 수종에 적용할 수 있는데 고밀도 수종보다는 저밀도 수종에서 압축과피가 나타날 확율이 높다. 그러나 저밀도 소나무를 액체 암모니아 처리한 결과 결합과 색상의 변화 없이 표면 경도가 높아졌다는 보고가 있다.

액체 암모니아로 목재를 가소화하여 다양한 형태의 가공목을 만드는 기술은 70년대에 개발되어 많은 사람들이 여러 수종을 가지고 실험하여 왔다. 다른 휨가공과 같이 활엽수에는 매우 효과적이거나 침엽수에는 약간의 어려움이 있는 것으로 알려져 왔다. 이러한 차이는 침엽수와 활엽수의 리그닌 특성 차에 기인 한 것으로 밝혀졌다.

액체 암모니아 처리법은 확산법과 진공-가압법의 두 가지 방법이 있는데 3mm 정도의 얇은 판재는 수 시간의 확산 만으로도 충분히 가소화가 되나 1인치 두께가 되면 진공-가압으로 주입하여야 한다.

액체 암모니아의 비등점은 영하 33℃로 처리조의 온도를 이보다 낮추어야 한다. 따라서 냉동 처리 장치를 만드는 것이 필요하며, 또 목재 내부까지 침투가 잘 일어나기 위해서는 목재의 투과율을 높이는 기술이 필요하다.

## 제2절 액체 암모니아의 처리장치 및 인출

### 1. 액체 암모니아 특성

고농도 암모니아는 심한 자극성으로 사용에 주의를 요한다. 흡입할 경우 응급조치를 취하지 않으면 사망할 수도 있다. 액체 암모니아의 분자량은 17.03g/mol이며 1기압에서 녹는점은  $-77.7^{\circ}\text{C}$ , 끓는점은  $-33.35^{\circ}\text{C}$ 로 정상조건에서 기체로 존재한다. 압력 13.3 기압일 때 끓는점이  $35^{\circ}\text{C}$ 이므로 액체상태로 보관하기 위해서는 압력을 15기압이상 유지해야 한다. 암모니아는 기체나 액체 모두 무색이며 자극성과 부식성이 높다. 눈에 암모니아 기체가 닿으면 매우 따가우며 고농도 기체를 마시면 기도 점막에 기포가 생겨 호흡을 막게된다. 작업시에는 물안경과 방독면을 착용하는 것이 안전하다.

그러나 암모니아는  $0^{\circ}\text{C}$ 에서 증발열은 301.7 cal/g으로 비교적 높고, 포화증기압은  $4.379 \text{ kg/cm}^2$ 으로 비슷한 기체에 비해 낮은 비교적 안정되므로 약간의 주의만 기울이면 위험을 예방할 수 있다.

표 2-1. 액체 암모니아의 물리적 성질

분자량 (g/mol)	기체밀도(g/l) (1기압에서)	녹는점 ( $^{\circ}\text{C}$ )	끓는점 ( $^{\circ}\text{C}$ )	용해도 ( $\text{g/cm}^3$ )		성질
				찬물	끓는물	
17.03	0.7710	-77.7	-33.35	89.8	7.4	무색, 자극성, 부식성

임계온도와 압력은 각각  $132.4^{\circ}\text{C}$ , 111.5기압 이며 각 압력에서 끓는 온도와 이때 액체 암모니아의 밀도는 아래 표와 같다.

표 2-2. 액체 암모니아의 압력에 따른 끓는 온도 및 밀도

압 력 (기압)	끓는온도 (°C)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )
1.0	-33.35	0.6818
2.332	-15	0.6585
4.238	0	0.6385
7.188	15	0.6175
13.321	35	0.5875

## 2. 액체 암모니아 냉동 처리 장치 제작

처리장치의 설계도면은 아래 그림과 같다. chamber의 외형규격은 1560×480×660mm<sup>3</sup>이며 내부 cavity는 1400×400×480mm<sup>3</sup>로 길이가 1m이상 되는 목재도 처리할 수 있도록 설계하였다. 육면을 우레탄으로 단열하였으며 개구부는 실리콘으로 packing하였다. 최저온도는 -45도까지 내려갈 수 있으므로 대기압에서 액체암모니아의 끓는점 - 33.35°C보다 낮은 온도를 유지할 수 있도록 설계하였다. 암모니아 개스는 공기와 일정 혼합비가 되면 폭발성이 있어 전기단자들을 모두 공기와 접촉하지 않도록 밀폐하여야 하나 비용 문제로 밀폐하지 못하였다. 대신 사고를 예방하기 위하여 환기가 잘 되는 건물 옥상에 설치하였다.



### 3. 액체 암모니아 인출

15기압 봄베이에 들어있는 액체 암모니아를 기화되는 양을 최소로 하여 대기압에 뽑아내는 일은 매우 어려웠다. 거의 순수암모니아의 어는점 (-77.7℃, 1기압)까지 낮추어 주어야만 기화된 암모니아 가스를 응축시킬 수 있다. 새로 제작한 냉동 처리장치(-45℃) 만으로 충분히 낮은 온도를 얻을 수 없어 아세톤에 담긴 드라이아이스(승화온도 -78.48℃)를 이용하였다. 드라이아이스-아세톤 용기를 냉동 처리장치에 넣고 삼각플라스크를 드라이아이스-아세톤 용기에 담긴 다음 봄베이와 삼각플라스크를 테프론 튜브로 연결하였다. 응축되고 남은 암모니아 가스를 배출하기 위해 또 다른 테프론 튜브로 배출구를 만들어 냉동 처리장치 밖으로 빼낸 다음 그 끝을 물탱크에 담갔다. 따라서 배출된 가스는 물탱크에 용해되어 공기 중으로 배출되는 양이 거의 없도록 하였다. 냉동 처리장치와 용해수 사이에 설치된 저수조는 용해수의 역류를 방지하기 위한 것으로 만일 이것이 없으면 인출 종료시 낮은 온도로 인해 삼각플라스크의 압력이 낮아지므로 용해수가 역류하여 삼각플라스크로 들어오게 된다. 물과 반응한 액체암모니아는 더 이상 목재의 가스제로서 역할을 할 수 없다.

봄베이를 기울여 놓으므로써 기체보다 액체가 빠져 나오도록 하여 인출시간을 줄였다. 이렇게 뽑아낸 액체 암모니아는 삼각플라스크에 넣어 영하 35℃ 냉동고에 보관하였다. 냉동고 온도가 이보다 높으면 암모니아가 기화되기 쉽고 이보다 낮으면 일부 삼각플라스크에서 새어나온 암모니아가 냉동고 벽면에 석출되어 매우 지저분해진다. 냉동고 보관 시 주의해야할 점은 삼각플라스크 내에서 기화된 기체가 냉동고 외부로 빠져나갈 수 있도록 가는 배출구를 테프론 튜브로 만들어 주어야 한다는 것이다.

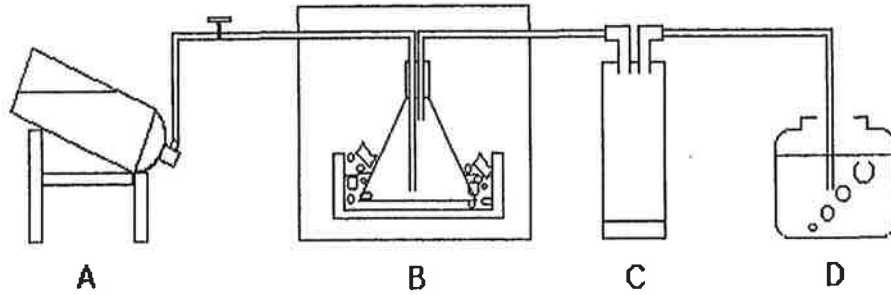


그림 2-3. 액체 암모니아 인출시스템 모식도. 15기압 액체 암모니아 펌페이 (A), 암모니아 응축장치(B), 물의 역류방지를 위한 저수조(C)와 암모니아 용해수(D)로 되어 있으며 장치와 장치사이 연결은 부식되지 않는 테프론 튜브를 사용함.

### 제3절 공시재료

#### 1. 공시수종

본 연구에서는 낙엽송(*Larix leptolepis*), 더그라스퍼(*Pseudotsuga menziesii*), 라디에타파인(*Pinus raidata*), 리기테다(*Pinus rigida*×*taeda*), 소나무(*Pinus densiflora*)의 침엽수 5수종과 굴참나무(*Quercus variabilis blume*), 느티나무(*Zelkova serrata*), 밤나무(*Castanea crenata*), 벚나무(*Prunus serrulata var. spontanea*), 오동나무(*Paulownia coreana*), 오리나무(*Alnus japonica*), 은사시나무(*Populus tometiglandulosa*), 자작나무(*Betula platyphylla var. japonica*), 플라타너스(*Platanus occidentalis*)의 활엽수 9수종 등 모두 14수종을 사용하였다. 교정에서 벌목한 은사시나무를 제외하고는 모두 인근 제재소에서 원목을 구입하여 판재로 제제한 후 실험 장소로 가지고 왔다. 활엽수는 모두 13mm, 침엽수는 모두 30mm 두께로 판목제재하였다.

#### 2. 시편의 규격 및 제작

여러 가지 실험을 위해서 시편의 규격은 다양하였으나 두께는 특별한 경우를 제외하고는 5mm와 10mm의 두 가지를 사용하였다. 제일 많이 사용한 시편의 폭과 길이는 각각 30mm와 300mm였으며 특별한 경우 5mm×5mm×500mm의 시편도 사용하였다. 작품을 위해서는 실험시편과는 달리 디자인에 맞는 규격을 사용하였다. 모든 소재는 구입 시 생재였으며 마이크로파-진공 건조 후 마감규격으로 잘라 액체 암모니아 처리하였다.

예비실험으로 수종 또는 두께에 따라 액체 암모니아 침투가 원활하지 않지 않음을 알게 되어 이를 돕고자 시편에 incising을 만들었다. incising 장치 없이 드릴로 일일이 구멍을 뚫었다. 시편 한 면에 직경 1mm 구멍을 5mm 간



격으로 깊이는 두께의 1/2이 되도록 만들었다 (그림 3-1).

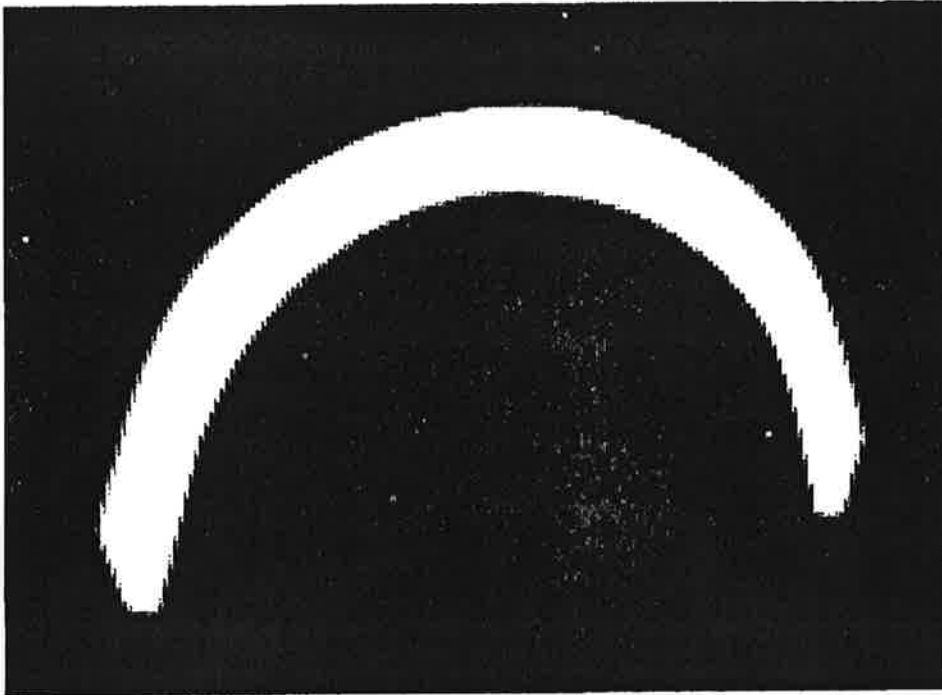


그림 3-1. incising후 액체 암모니아 휩가공한 시편

또 두꺼운 시편은 곡면 안쪽의 압축저항이 강해 시편이 충분히 가소화되었어도 굽어지지 않는다. 따라서 시편 한 면에 시편 길이에 직각 되게 1cm 마다 폭 2mm, 깊이는 두께의 1/2 되는 kerf를 만들면 휩가공이 잘 될 뿐만 아니라 액체 암모니아의 침투가 원활해진다 (그림 3-2).

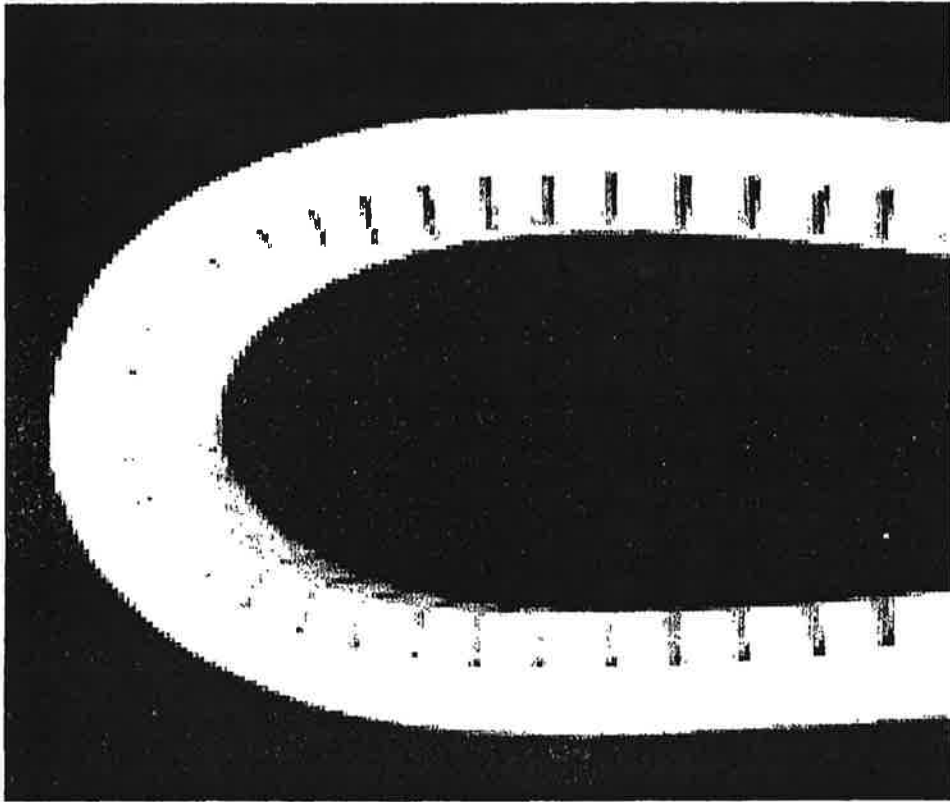


그림 3-2. 시편에 kerf를 만든 후 액체 암모니아 휜가공한 시편

## 제4절 활엽수재의 마이크로파 진공건조

### 1. 목적

액체 암모니아 처리에 사용될 활엽수재의 생재함수율과 생재비중을 측정하고 마이크로파 진공건조하여 함수율 10%내외 판재로 만든다. 마이크로파 진공건조는 건조속도가 빠를 뿐만 아니라 내부부터 건조되기 때문에 부피수축이 열기건조보다 적어 액체 암모니아의 침투가 좋아질 수 있다. 수종별 건조속도와 건조결함을 조사하였다.

### 2. 공시재료

각 수종은 인근 제재소에서 원목을 구입하여 판재로 제재하였다. 각 수종의 평균두께는 13mm였으며 평균폭은 은수원사시나무(*Populus tometiglandulosa*) 120mm, 벚나무(*Prunus serrulata var. spontanea*) 165mm, 밤나무(*Castanea crenata*) 93mm, 굴참나무(*Quercus variabilis blume*) 116mm, 오동나무(*Paulownia coreana*) 152mm, 오리나무(*Alnus japonica*) 128mm, 적오리나무 152mm, 자작나무(*Betula platyphylla var. japonica*) 188mm, 느티나무(*Zelkova serrata*) 147mm, 물박달나무(*Betula davurica*) 129mm, 아카시나무(*Robinia pseudoacacia*) 120mm였다.

### 3. 실험방법

마이크로파-진공건조기 사양은 전보(강, 2001)에 언급한 것과 같다. 이를 요약하면, 건조기 출력은 4.5kw, 마이크로파 주파수는 2.45GHz, cavity 내부용적은 580×580×1360mm이며, 건조 중 목재무게와 온도를 탐지할 수 있도록 설계되어 있다. 건조 중 cavity 내 압력은 진공압 400-600mmHg를

유지하였다.

#### 4. 마이크로파 진공건조 실험

마이크로파-진공건조실험을 위한 각각의 판재는 길이가 1300mm가 되게 다시 제재하여 각 판재의 무게를 측정하였으며 동시에 각 판재에서 함수율 및 비중시편을 2개씩 떼어내어 생재함수율과 생재비중을 측정하였다. 이렇게 제재된 판재는 cavity 내에 있는 로드셀 위에 5~6층으로 밀착시켜 적층 시킨 후 온도감지센서를 중간층에 심어 목재의 온도를 제어하게 하였으며, 과열되는 것을 방지하기 위하여 과열방지센서를 온도센서와 같이 심어 놓았다. 모든 센서의 설치가 끝난 후 건조기의 문을 닫고 완전히 닫힌 것을 확인한 후에 건조기를 작동시키고 마이크로파의 방출이 없음을 확인하고 목재온도 70℃로 20시간 건조하였다. 이 건조스케줄을 모든 수종에 동일하게 적용하였다.

#### 5. 함수율 및 비중

수종별 생재함수율과 생재비중(전건무게-생재부피 기준)은 다음과 같다. 오동나무와 은사시나무의 생재함수율이 100% 이상으로 제일 높았고, 오리나무가 48.3%로 가장 낮았다. 비중은 오동나무가 0.281로 가장 낮았으며 굴참나무가 0.695로 가장 높았다.

표 4-1. 활엽수재의 생재함수율과 생재비중

수 종	Green MC (%)	Green Specific gravity
굴참나무	57.5±3.7	0.695±0.011
느티나무	66.4±13.8	0.625±0.044
물박달나무	50.1±16.7	0.620±0.062
오리나무	48.3±8.9	0.589±0.032
자작나무	69.5±8.0	0.578±0.023
적오리나무	93.8±4.8	0.516±0.013
벗나무	65.2±39.2	0.496±0.066
밤나무	67.7±11.5	0.433±0.016
은사시나무	107.6±19.9	0.318±0.009
오동나무	119.9±19.4	0.281±0.013

#### 6. 건조 후 판재 함수율

마이크로파-진공건조를 20시간 실시한 각 수종의 판재무게를 측정하

였으며 아래 표와 같이 오동나무를 제외하고는 함수율이 10%이하까지 건조되었다. 오동나무의 건조 후 함수율이 다른 수종과 비교했을 때 건조 후 함수율이 상당히 높게 나타난 것은 초기의 함수율이 높는데 원인이 있다. 물박달나무는 온도조절 실패로 건조 중 탄화되어 최종함수율을 측정할 수 없었다.

표 4-2. 수종별 마이크로파 진공건조 후 함수율

수종	건조 후 함수율(%)
은사시나무	9.1
자작나무	7.8
벗나무	8.3
느티나무	7.8
적오리나무	9.6
오리나무	8.5
오동나무	27.2
밤나무	9.3
굴참나무	8.2
아카시나무	9.0
물박달나무	탄 화

#### 7. 건조곡선 및 목재의 온도

마이크로파 진공건조동안에 계속적으로 줄어든 판재의 무게가 계속

측정되었으며 각 수종에서의 건조시간에 대한 함수율 변화와 건조기간 동안에 측정된 목재의 온도와 건조시간의 관계는 아래 그림과 같다.

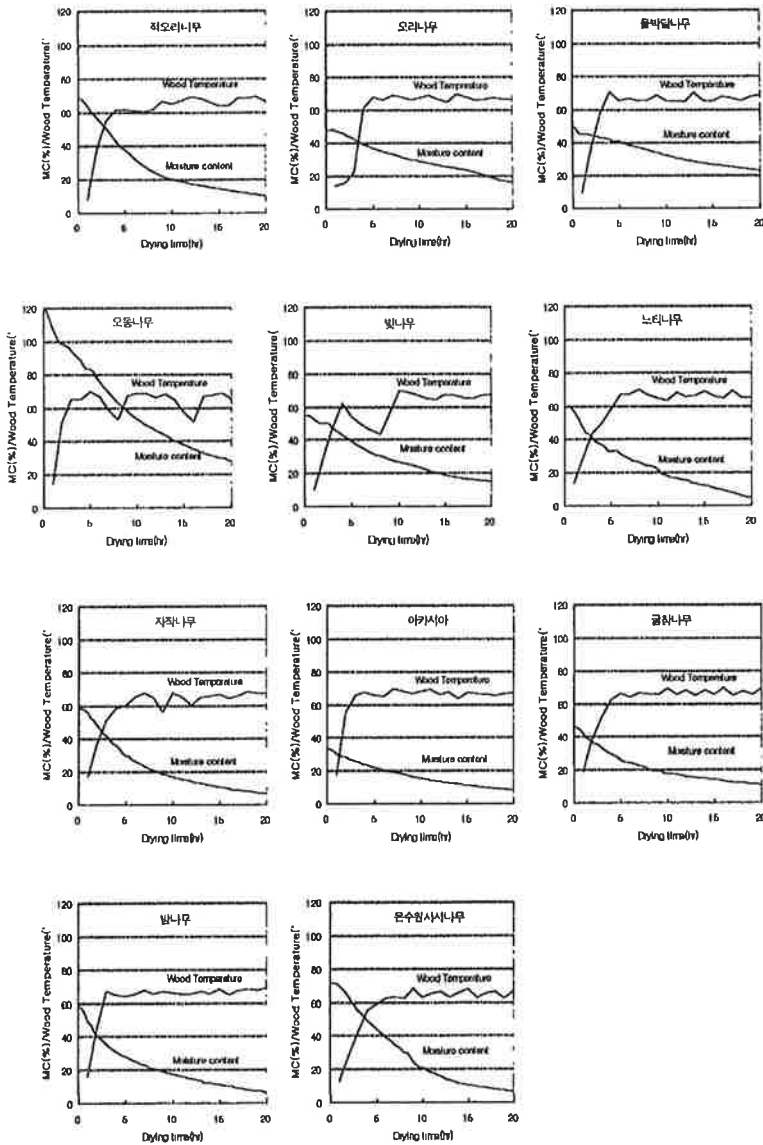


그림 4-1. 각 수종의 건조경과에 따른 건조곡선과 목재의 온도

8. 건조속도 및 마그네트론 작동시간

건조시간에 대한 줄어든 목재의 무게를 측정하면 건조속도를 얻을 수 있다. 이 결과 건조속도의 빠르기는 오동나무가 초기 함수율이 너무 커 건조속도가 빠른 것을 제외하면 은사시나무, 적오리나무, 느티나무, 자작나무, 밤나무, 뱃나무, 굴참나무, 오리나무 순으로 이는 투과성이 높은 수종의 건조가 쉬운 점을 고려해 볼 때 투과성이 높은 순인 것이다.

또, 마이크로파 진공건조동안에 목재내의 수분을 제거하는데 마그네트론이 작동한 시간이 데이터화되어 있어서 누적작동시간을 산출할 수 있어, 건조기간동안에 소모된 에너지의 총량을 구할 수 있었다. 또한, 이것을 단위무게의 수분을 제거하는데 소비되는 에너지량으로 계산할 수 있었다.

표 4-3. 각 수종의 건조속도

수 종	건조속도(%MC/hr)
은사시나무	19.65
자작나무	15.61
뱃나무	11.96
느티나무	16.56
적오리나무	17.39
오리나무	9.41
오동나무	27.70
밤나무	15.36
굴참나무	10.64
아카시나무	7.69
물박달나무	8.02



## 9. 건조결합

각 수종의 판재를 건조하기 전과 건조한 후에 건조결합의 유무 및 재색의 변화를 살펴보았다. 판재를 누르는 하중이 작아 건조경과에 따라 뒤틀림이 발생하였다. 그러나, 표면할렬 및 마구리할렬은 대부분의 판재에서 찾아보기 어려웠다. 일부 판재는 적층 전에 외기에 있었기에 마구리부분에 약간의 할렬이 있었으나 건조완료 후 그 할렬이 더 깊이 진행되지는 않았다.

## 제5절 액체 암모니아 처리시간에 따른 휨가공성 및 흡습율 비교

### 1. 목적

증기처리재는 증기처리중 목재에서 추출물이 빠져 나오므로 무처리재보다 높은 평형흡습율을 가진다고 여겨지나 액체 암모니아 처리재는 처리시간에 따라 결정화도가 달라지므로 흡습성이 어떻게 달라질 지 모른다. 상대습도 100% 조건에서 이들의 흡습성을 비교하였다.

### 2. 공시재료 및 실험 방법

수종은 소나무와 밤나무로 시편의 규격은 폭 30mm, 길이 300mm에 두께 5와 10mm를 사용하였다. 암모니아 처리시간은 4, 6, 8, 24시간을 실시하였다. 처리 후에는 목재가 파괴되지 않는 한도 내에서 손으로 휘었다.

두께 10mm 시편은 소나무만 처리하였으며 일부 10mm 두께 시편에는 10mm 간격으로 깊이 5mm의 kerf를 만들었다.

소나무 5와 10mm, 밤나무 5mm 처리시편과 무처리 시편을 60℃오븐에서 24시간 건조한 후에 무게를 측정하고, 모든 시편을 건구온도 40℃, 상대습도 100%인 건조조에 넣고 30시간 흡습시켰다.

### 3. 처리재의 휨가공

소나무와 밤나무 5mm 시편의 휨가공된 모습은 각각 그림 5-1, 5-2과 같다. 그림 5-1의 상부 3개는 모두 액체암모니아 처리 시편으로 좌측이 4시간 처리, 우측 상단이 6시간 처리, 우측 하단이 8시간 처리된 시편으로 4시간 이상만 처리를 하면 높은 가소성을 나타냄을 보여주고 있다. 그림 5-1의 제일 하단은 증기처리 4시간 시편으로 낮은 가소성을 보여주고 있다.

그림 5-2은 위에서부터 암모니아 처리 4, 6, 8, 24시간과 증기처리 4시간으로 보여주는데 제일 하단 2개 시편을 제외하면 거의 휘어지지 않았다. 암모니아 처리시간 24시간과 증기처리 4시간이 비슷하게 휘 형태를 보이고 있다. 따라서 밤나무 5mm에 있어서는 증기처리가 암모니아처리보다 효과적이라고 볼 수 있다.



그림 5-1. 액체암모니아 처리 소나무시편들 (두께 5mm).

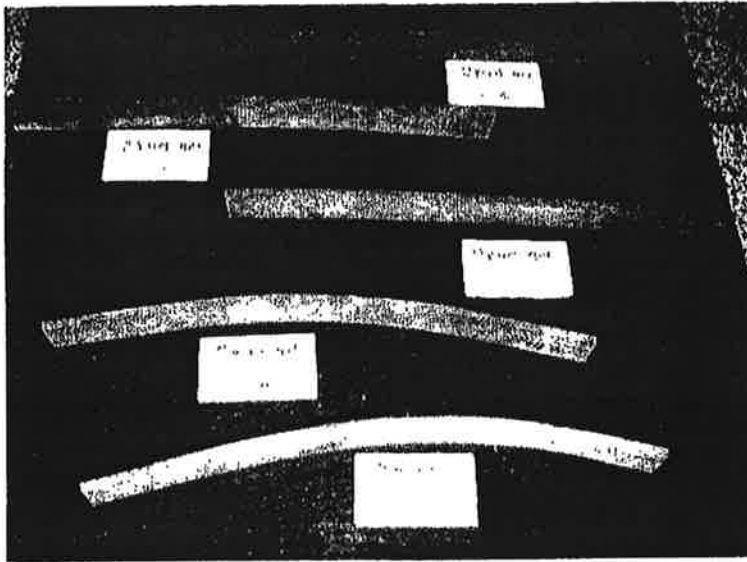


그림 5-2. 액체암모니아 처리 밤나무 시편들 (두께 5mm).

아래 그림 5-3은 두께 10mm 소나무 시편들로 왼쪽 두개는 kerfing되지 않은 것, 오른쪽 두개는 kerfing된 것이다. 먼저 왼쪽 두개의 시편을 8시간 액체 암모니아 처리한 후에 가소성을 조사하였더니 5mm와 같은 큰 가소성을 나타내지 못하였다. 이는 액체암모니아가 내부로 충분히 침투하지 못한 것으로 판단하여 오른쪽 두개 시편에는 kerf를 만들어 동일한 시간 액체암모니아 처리하였다. 그 결과 매우 높은 가소성을 나타냈다.

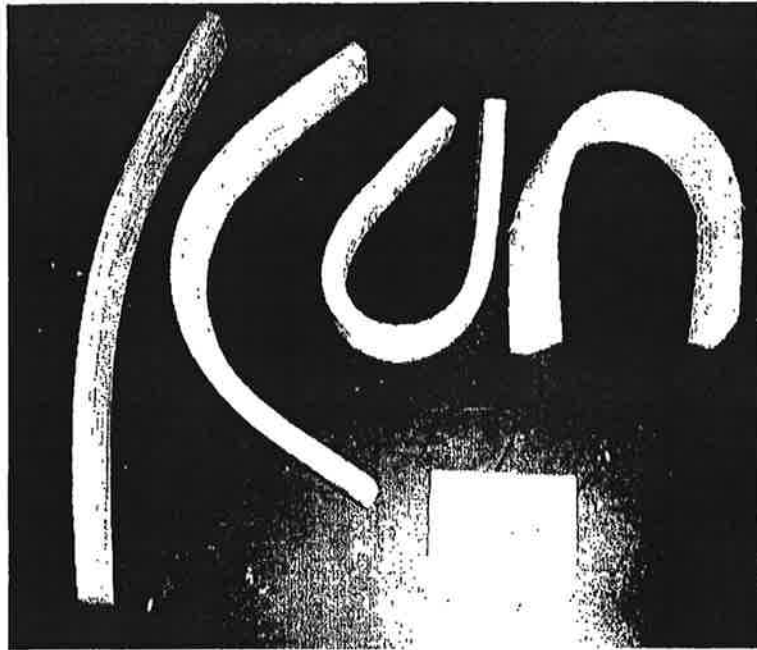


그림 5-3. 액체 암모니아 처리 소나무 시편들 (두께 10mm).

#### 4. 전처리 효과

소나무와 밤나무 두께 5mm 시편을 2시간 증기처리 한 후에 4시간 액체암모니아 처리하였다. 두 수종 모두 증기처리제와 무처리제의 가소성에는 별 차이가 없었다. 4시간 처리 후 소나무는 가소화되어 쉽게 휘어졌으나 밤나무는 거의 변화가 없었다.

#### 5. 액체암모니아 처리제의 열전달계수 측정

처리제의 물성을 조사하기 위해 열전달계수를 측정하였다. 아래 표에서 보이는 바와 같이 소나무에 있어서 열전달 계수는 처리시간이 길어질수록 두께 5와 10mm 모두 증가하는 경향을 보였으나 밤나무는 오히려 감소하거나 거의 변하지 않았다. 밤나무는 액체 암모니아가 충분히 침투되지 않아 목재 성질에 변화가 일어나지 않았기 때문에 휨가공성도 낮고 열전달계수도 변화하지 않았

다. 소나무의 열전달계수 증가는 소재의 밀도증가 때문으로 해석될 수 있다. 액체 암모니아 처리시간이 길수록 밀도가 증가한다는 것은 추후 실험에 의해 증명되었다.

표 5-1. 액체 암모니아 처리시간에 따른 열전달계수

수종	두께(mm)	처리시간 (hr)	열전달계수 (kcal/m <sup>2</sup> °C)
소나무	5	4	0.1154
		6	0.1210
		8	0.0973
		24	0.1425
	10	8	0.1156
		12	0.1342
밤나무	5	4	0.1918
		6	0.1707
		8	0.1772
		24	0.1791

#### 6. 흡습성 비교

각 시편을 흡습처리한 후 측정된 시편들의 평균 함수율은 아래 그림과 같다. 좌측에 있는 밤나무 5mm 시편의 함수율은 처리시간에 상관없이 일정하다. 이는 처리시간 24시간까지 액체 암모니아가 잘 침투하지 않았음을 의미한다. 소나무 5mm는 액체암모니아 처리제의 함수율이 무처리재 (소5-0)보다 모두 높았으나 처리시간에 따른 함수율 증가는 분명하지 않았다. 가소성 실험에서 소나무 5mm는 4시간만 처리하여도 충분한 가소성을 나타냈으므로 처리시

간을 더 연장하여도 액체 암모니아의 침투량이 더 이상 증가하지 않았을 것으로 유추할 수 있다. 소나무 10mm 시편에서 띠톱자육을 낸 시편(소k10-8)이 그렇지 않은 시편보다 함수율이 높았는데 이는 당연한 결과로 전자의 표면적이 kerf때문에 후자보다 넓어졌기 때문으로 볼 수 있다.

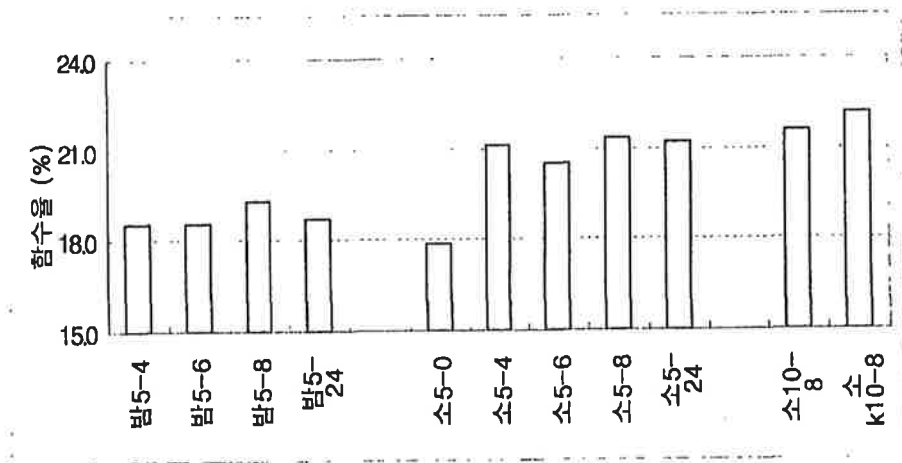


그림 5-4. 암모니아 처리제와 무처리제의 40℃, 100%RH 조건에서 흡습한 후의 함수율

## 제6절 증기처리재와 액체 암모니아 처리재의 휨가공성 비교

### 1. 목적

액체암모니아 처리시편과 증기처리시편의 가소성과 곡률반경을 비교조사하였다.

### 2. 공시재료 및 실험방법

사용된 수종은 밤나무, 플라타너스의 활엽수와 Douglas-fir, 낙엽송, 라디에타 소나무, 리기테다 소나무의 침엽수였다. 시편의 크기는 폭 30mm, 길이 300mm, 두께는 5와 10mm의 두 가지로 만들었다. 휨이 어려운 수종은 incising 시편을 별도로 만들어 비교하였다. incising 장치가 없기 때문에 직경2mm 드릴로 시편 두께의 1/2까지 사방 5mm 간격으로 구멍을 만들었다. incising 시편은 액체암모니아의 침투가 훨씬 용이할 것으로 기대하였다. 메처리별 5개 시편을 시험하였다.

처리시편은 잘 휘어지는 것은 손으로, 큰 힘이 필요한 것은 새로 제작한 휨장치(그림 6-1)를 이용하여 휘었다. 원통을 가운데 넣고 휘지 않았기 때문에 정확한 곡률반경을 얻기 어려웠다. 따라서 다음 그림과 같은 방법으로 계산하였다.



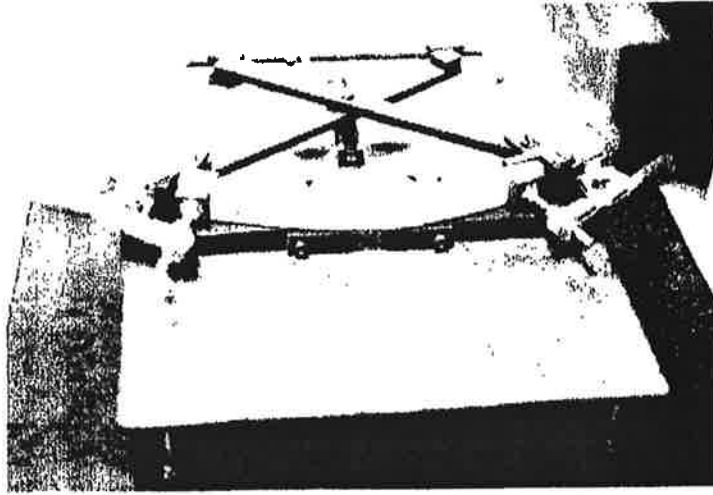


그림 6-1. 휨 장치

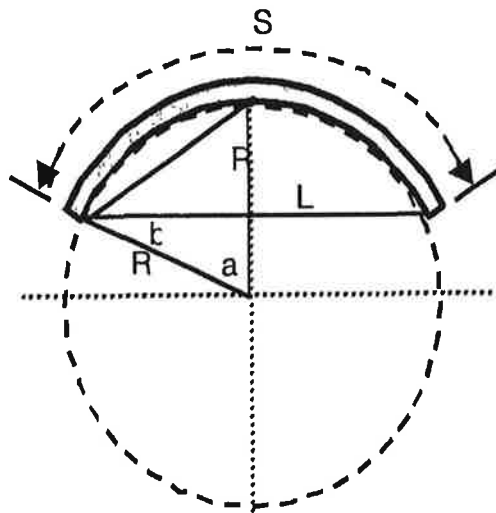


그림 6-2. 휨가공 시편의 곡률반경을 구하는 방식

$$\cos(b) = \frac{L}{2R}$$

$$\frac{S}{2R\pi} = \frac{2a}{2\pi}$$

$$a + b = \frac{\pi}{2}$$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{S}{2R}\right) = \frac{L}{2R} \dots\dots\dots [6.1]$$

위 식[6.1]에서 S는 300mm이고 L은 시편마다 측정하였다. MS EXCEL의 '해찾기' 기능을 이용하여 trial and error 방식으로 R(곡률반경)을 구하였다.

이렇게 구한 곡률반경은 실제 최소곡률반경보다 크게 나왔다. 실험에서 얻은 휨재는 대부분 원형이 아닌 타원형이기 때문에 위 식[6.1]을 이용하면 최소 곡률반경이 크게 나온다. 아래 그림들에서 곡률반경이 30cm 이상인 시편은 거의 굽어지지 않거나 부러진 것이다.

### 3. 수종별 휨가공성

#### 가. 밤나무

전체적으로 밤나무 시편은 암모니아 처리효과가 매우 적었다. 5mm시편을 12시간 암모니아 처리 한 것의 곡률반경이 증기처리 8시간하고 비슷한 결과를 얻었다. 10mm시편의 경우도 암모니아 처리는 거의 휘지 않았으나 증기처리하는 곡률반경을 13.4cm까지 얻을 수 있었다(그림 6-3). 이는 암모니아 처리 후에 즉시 휘어야 하나 10mm시편이 너무 단단해 바로 휘지 못했기 때문에 그사이 암모니아가 증발했기 때문이거나 암모니아가 10mm시편의 내부까지 충분히 침투를 못했기 때문이다. 따라서 밤나무는 증기처리가 더 효과 있다고 할 수 있다. 밤나무 5mm와 10mm 모두 incising 효과는 없었다.

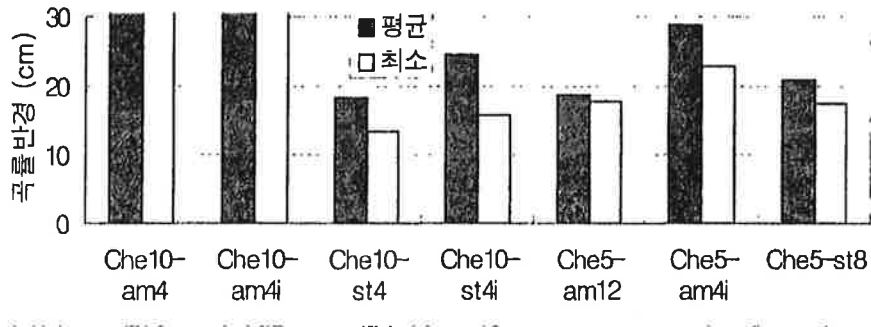


그림 6-3. 액체 암모니아 처리 밤나무재의 곡률반경

나. 플라타너스

증기처리재는 휘가공 중에 5개 시편 모두 인장파괴가 일어났다. 증기처리에 의해 플라타너스 강도가 약해졌기 때문에 휘는 도중에 갑자기 부러지게 된다. 플라타너스 건조재는 어느 정도 단단하나 젖으면 강도가 매우 약해진다. 암모니아 처리재도 대부분 휘는 도중에 인장파괴가 일어나고 각 처리별로 1-3개만 남았다. 그림 14의 액체 암모니아 처리재의 값은 인장파괴된 것을 제외한 시편들의 평균과 최소곡률반경이나 증기처리재의 값은 인장파괴된 시편의 것들을 포함하였다. 5mm시편이 10mm시편보다는 작은 곡률반경을 나타냈다. 밤나무와 마찬가지로 incising 효과는 없었다.

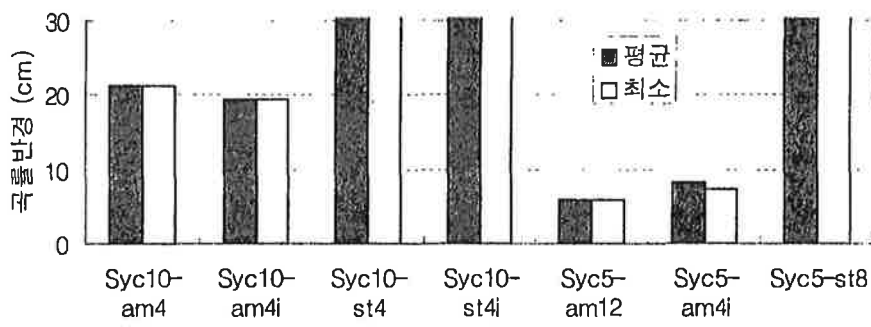


그림 6-4. 액체 암모니아 처리 플라타너스재의 곡률반경

다. 칩엽수 (더그라스퍼, 낙엽송, 라디에타파인, 리기테타) (그림 6-5, 6-6)

증기처리 칩엽수재는 부러지거나 거의 휘어지지 않았다. 대부분 인장파괴가 휨 초기에 일어나서 휨을 중단하였기 때문이다. 그런 중에도 가장 좋은 휨가공성을 나타낸 것은 낙엽송이었다. 5개의 시편 모두 균일한 휨을 나타냈다. 10mm 시편은 리기테타만 증기처리 하였는데 칩엽수재 10mm를 증기처리로 휘기는 매우 힘들었다. 모든 시편에서 인장파괴가 일어났다.

칩엽수재 5mm의 암모니아 처리 효과는 매우 좋았다. 더그라스퍼, 낙엽송, 라디에타는 시편 5개중 1-2개를 제외하고 시편의 양단이 마주 닿았다.

리기테타의 10mm 암모니아 처리재의 경우 incising 시편은 모두 어느 정도 휘어졌으나 incising을 하지 않은 시편은 모두 인장파괴가 발생하여 조금도 휘지 못하였다. 이 결과만 보면 incising 효과가 있는 것으로 볼 수 있으나, incising을 하지 않은 시편을 실험할 당시 기온이 매우 낮아서 암모니아 처리재가 유연성을 갖지 못하였기 때문에 인장파괴가 많이 일어난 것으로 생각된다. 암모니아 처리재는 대기에 수분동안 둔 후에 휘어야만 잘 휘어지는데 자칫 긴 시간 방치하면 암모니아가 휘발되어 처리효과가 없게 된다. 실험 당시와 같이 추운 날에는 휘발이 잘되지 않아 유연성이 낮아질 수도 있다.

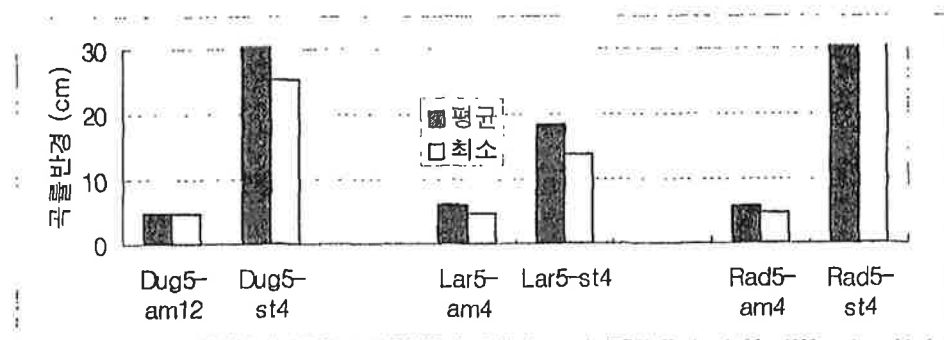


그림 6-5. 더그라스퍼, 낙엽송, 라디에타파인 액체 암모니아 처리재의 곡률반경

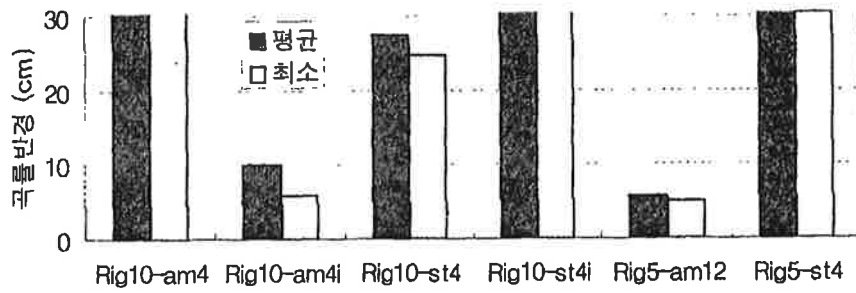


그림 6-6. 액체 암모니아 처리 리기테다의 곡률반경

## 제7절 증기처리재와 액체 암모니아 처리재의 복원성 비교

### 1. 목적

목재는 탄성체로 인장응력이나 압축응력을 받으면 원래 모습으로 돌아가려는 성질이 있다. 이런 성질을 복원성이라고 하는데 액체 암모니아 처리 후 휨 가공한 목재도 어느 정도 복원성을 가지고 있다. 액체 암모니아 휨가공재를 높은 상대습도에서 흡습시키므로써 어느 정도 복원되는지 증기처리재와 비교하였다.

### 2. 공시재료 및 실험방법

마이크로파 진공건조된 판재에서 가로 세로 각각 5mm, 길이 500mm인 시편을 만들었다. 사용된 수종은 굴참나무, 느티나무, 밤나무, 벗나무, 오동나무, 오리나무, 은사시나무, 자작나무의 7수종으로 수종별로 5개씩 시편을 만들었다. 굴참나무, 밤나무, 벗나무, 자작나무는 비교를 위한 증기처리를 위해 5개씩 별도로 만들었다.

모든 수종의 액체 암모니아와 증기처리는 각각 4시간씩 실시하였다. 수종에 따라서는 4시간 처리가 충분하지 않으나 동일한 조건에서 비교하기 위하여 예외가 없었다. 처리 후 휨가공은 특별히 제작한 직경 125mm의 원통고정기(그림 7-1)를 사용하여 목재를 고정시켰다. 목재의 탄성 때문에 고정 후 원직경은 원통고정기의 직경보다 약간 큰 130mm정도 되었다.



그림 7-1. 원통 고정기

원으로 고정된 후 원통고정기에서 빼내어 실내에서 평형에 도달하도록 오래 두었다. 시편의 무게를 측정하고 온도 30℃ 상대습도 100% 조건에 넣어 두었다. 48시간 후에 무게를 재고 각 시편 원주의 늘어난 길이를 측정하였다. 측정방법은 아래 그림과 같이 하였다. 양단이 교차하는 지점을 흡습 전과 후에 시편에 표시하고 그 길이를 재었다.

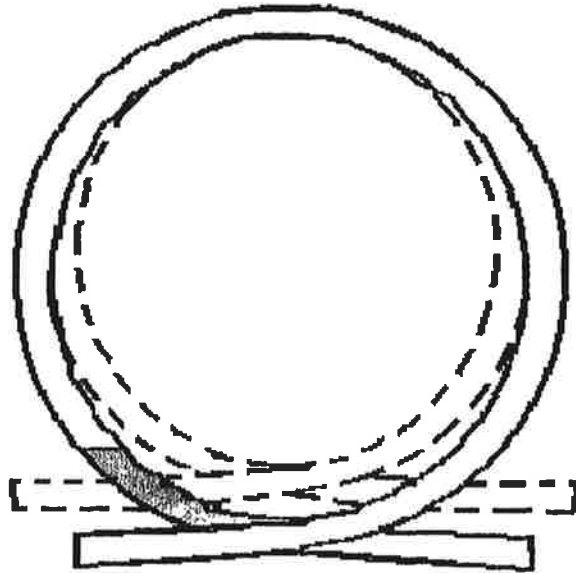


그림 7-2. 흡습한 시편의 늘어난 원주 측정 방법

### 3. 휨가공

액체 암모니아처리제는 굴참나무와 밤나무를 제외하고는 잘 휘어졌다. 굴참나무는 5개 시편이 모두 완전히 부러졌으며 밤나무는 2개 시편은 완전히 부러지고 3개 시편은 인장할열이 발생하였다. 밤나무의 이 나머지 3개 시편은 복원성실험에 사용되었다.

한편 증기처리제는 굴참나무와 밤나무는 거의 조금도 굽어지지 않았으나 나머지 두 수종 약간의 인장할열이 생기는 했지만 직경 130mm의 원은 만들 수 있었다.

### 4. 처리재의 복원성

오동나무, 오리나무, 은사시나무의 늘어난 원주는 5mm미만으로 매우 안정



되었다 (표 7-1). 그 밖의 암모니아 처리재의 늘어난 길이도 18mm이하로 적은데 반해 증기처리 자작나무와 벗나무는 각각 25.6, 46.8mm로 대단히 컸다. 액체 암모니아처리 밤나무는 증습에 의해 원주가 늘어나지 않고 오히려 줄어들었는데 이는 인장할열이 있는 밤나무 시편을 사용하였기 때문에 예상외의 변형이 발생했다고 볼 수 있다.

표 7-1. 액체 암모니아와 증기처리재의 복원성 실험 결과

처리	수 종	함수율 (%)		늘어난 길이 (mm)
		증습전	증습후	
액체암모니아	느티나무	10.2%	15.7%	11.2
	밤나무	11.3%	17.4%	-1.7
	벗나무	10.8%	16.1%	12.2
	오동나무	9.9%	15.0%	2.4
	오리나무	10.9%	16.0%	1.3
	은사시나무	10.2%	15.6%	3.8
	자작나무	10.6%	16.9%	18.0
증기	벗나무(증기)	9.2%	15.0%	46.8
	자작(증기)	9.8%	16.0%	25.6

벗나무와 자작나무 증기처리재의 평형함수율은 액체 암모니아 처리재보다 증습전과 증습후 모두 낮았다. 이는 고온으로 증기처리하므로써 목재가 열화하여 흡습성 손실이 일어난 때문으로 볼 수 있다. 만일 증기처리로 추출물이

제거되었다면 평형함수율이 더 높아지는 것이 정상일 텐데 추출물 제거로 인한 평형함수율 증가보다는 열화에 의해 흡습성 손실이 더 큰 것으로 보인다.

벚나무나 자작나무 모두 암모니아처리제나 증기처리제의 함수율증가는 비슷했으나 늘어난 원주는 벚나무는 거의 4배, 자작나무는 거의 1.5배에 달했다.

### 5. 처리제의 이력현상

온도 30℃ 상대습도 100%에서 흡습시켰던 증기처리제와 액체 암모니아처리제를 전건시켰다. 액체 암모니아처리제는 전건 후에 거의 제자리로 돌아와 원래 모습을 갖추었으나 증기처리제는 어느 정도 복원되었으나 원래 자리로 돌아오진 못하였다(그림 7-3). 시편 좌측 끝 부근에 검은색으로 표시한 곳이 흡습 전에 양단이 교차하였던 자리이다.

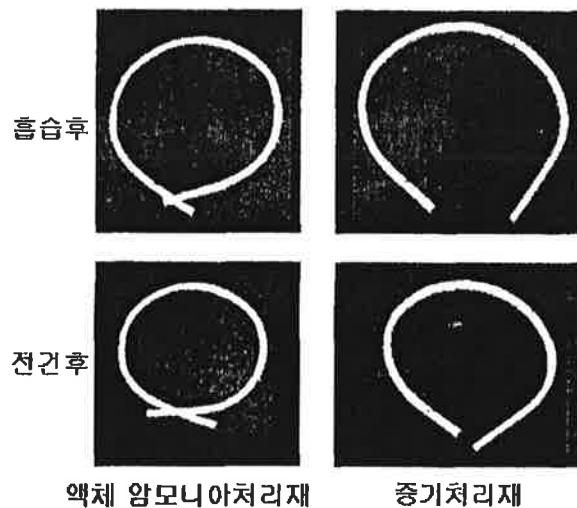


그림 7-3. 벚나무 액체 암모니아처리제와 증기처리의 복원성 비교

## 제8절 액체 암모니아 처리재의 치수 및 물리적 성질 변화

### 1. 목적

액체 암모니아처리에 의해 시편의 치수가 변하고 굽거나 비틀어지는 것이 발견되었다. 침엽수와 활엽수의 대표적 수종을 뽑아 암모니아 처리시간에 따라 시편 치수가 어떻게 달라지는가를 조사하고 상대적 유전율, 열전달계수 등 물리적 성질변화를 조사하였다.

### 2. 공시재료 및 실험방법

#### 가. 공시재료

공시수종으로 침엽수는 소나무, 활엽수는 은수사시나무를 선정하고 마이크로파 진공건조된 두께 20mm 판목 판재에서 섬유방향 길이 200mm, 섬유직각 방향 길이 150mm의 시편을 수종별로 5개씩 자른 다음 각 시편을 다시 섬유 방향 길이가 60mm씩 되게 시편 3개로 만들었다. 따라서 최종시편의 크기는 폭(섬유방향) 60mm, 두께 20mm, 길이 150mm로 3개가 한 조가 된다. 한 조인 3개 시편을 무처리, 4시간, 18시간 처리로 나누었다.

#### 나. 치수변화

무처리재와 액체 암모니아처리재를 실온에 오래 방치하여 평형상태에 도달하게 한 후에 무게와 폭(섬유방향), 두께, 길이를 버니어캘리퍼스로 측정하고, 40℃, 90%RH, 풍속 4m/s 조건의 건조기에서 3일간 흡습시켰다. 흡습 후 무게와 치수를 측정한 후 온도와 풍속은 같은 조건이고 상대습도만 29%로 낮추어 건조하였다. 3일 건조 후에 무게와 치수를 측정하고 103±2℃ 오븐에서 건조하여 전건무게를 계산하였다.

다. 상대적 유전율

목재의 유전율을 측정하기 위해서는 Network Analyser라는 고가의 장비와 기술이 필요하다. 본 연구에서는 상대적인 유전율을 구하기 위하여 유전율식 수분계를 이용하였다. 유전율이 높아지면 수분계 측정값이 증가하고 유전율이 낮아지면 감소한다는 원리를 이용하여 동일한 조건에서 측정된 유전율식 수분계 값을 비교하였다.

라. 열전달계수 측정

암모니아 처리 시편의 물성 변화를 조사하기 위해 열전달계수를 측정하였다. 사용된 열전달계수 측정기기는 열선 타입의 QTM-500 Quick Thermal Conductivity Meter로 정도 범위는 0.0000~150.0000 W/m·K 이다. 사용된 탐촉자는 모델 PD-11로 단열재, 수지, 세라믹, 고무, 목재, 콘크리트 등에 사용하는 것으로 측정범위는 0.023~11.63W/m·K이며 측정온도는 -10~200℃, 측정시간은 60초이다.

마. 초음파 전달속도와 동탄성계수

무처리제와 액체 암모니아 처리제를 전진시킨 후에 시편 하나마다 세 곳의 초음파 전달속도를 측정하였다. 목재 또는 콘크리트 구조물의 초음파비파괴 검사에 쓰이는 PUNDIT를 사용하였으며 54kHz 공진탐촉자를 사용하였다. couplant는 사용하지 않았으며 약 2500gf의 힘을 시편에 가하여 측정하였다.

초음파 전달속도와 밀도, 동탄성계수의 관계식은 다음과 같다.

$$E = \rho V^2 \times 9.8 \dots \dots \dots [8.1]$$

여기서 E=동탄성계수(ton/m<sup>2</sup>), ρ=밀도(g/cm<sup>3</sup>), V=속도(m/s)

위 식을 이용하여 액체 암모니아처리시간과 동탄성계수의 관계를 조사하였다.

### 3. 평형 함수율 변화

흡습 후 소나무와 은사시나무 모두 암모니아 처리재의 평형함수율이 무처리보다 높았으나 건조 후에는 차이가 거의 없었다 (그림 8-1, 8-2). 이는 암모니아 처리의 목재 흡습성 증가 효과는 높은 함수율일 때 분명하나 낮은 함수율에서는 분명하지 않았음을 의미한다.

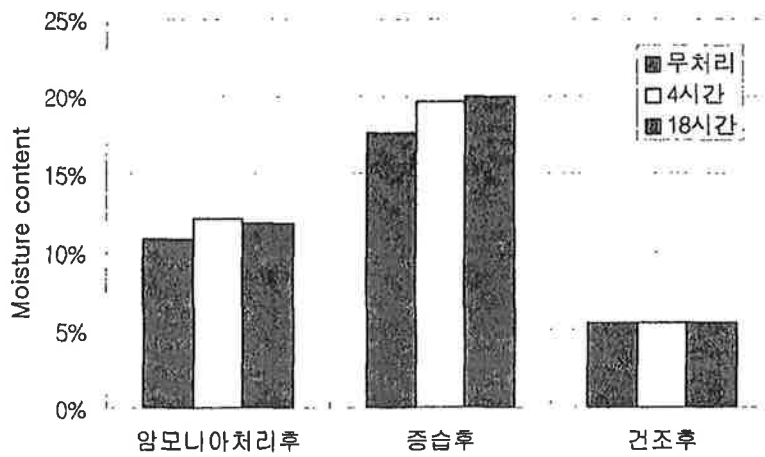


그림 8-1. 소나무재의 암모니아 처리시간에 따른 함수율 변화

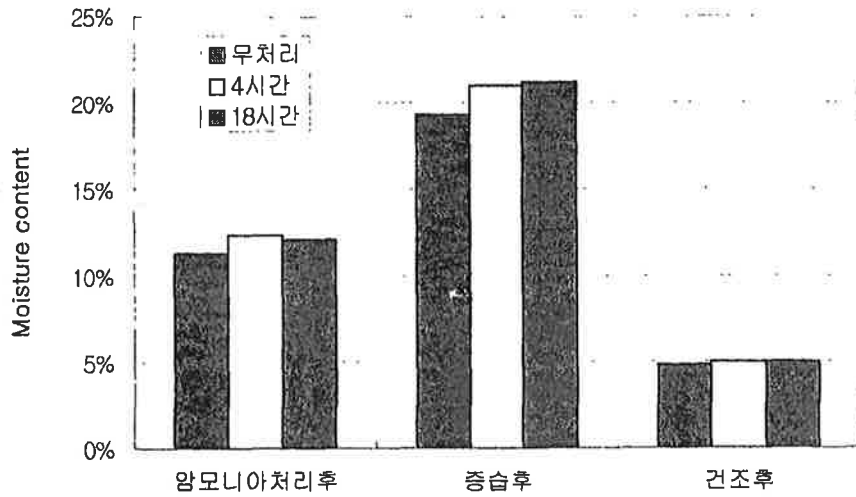


그림 8-2. 은사시나무의 액체 암모니아 처리시간에 따른 함수율 변화

#### 4. 치수변화

액체 암모니아처리에 따른 소나무와 은사시나무의 치수변화형태는 비슷하였다 (그림 8-3, 8-4). 폭 변화는 거의 없었으며 길이와 두께는 처리시간이 길수록 수축하였다. 시편에서 폭 방향은 섬유방향과 같다. 그림에서 두께가 길이보다 더 수축한 것으로 보이나 이는 눈금차에 의해 보일 뿐이고 길이가 더 많이 수축하였다. 18시간 처리제의 두께는 무처리에 비해 소나무는 약 3%, 은사시나무는 약 4% 감소하였으며 길이는 이보다 커서 소나무는 5.2%, 은사시나무는 6.6% 수축하였다. 두 수종 모두 액체 암모니아처리에 의해 길이 굽음이 많이 나타나서 길이 측정에 어려움이 있었으나 정확한 측정을 위해 굽은 형태를 따라 측정하였다.

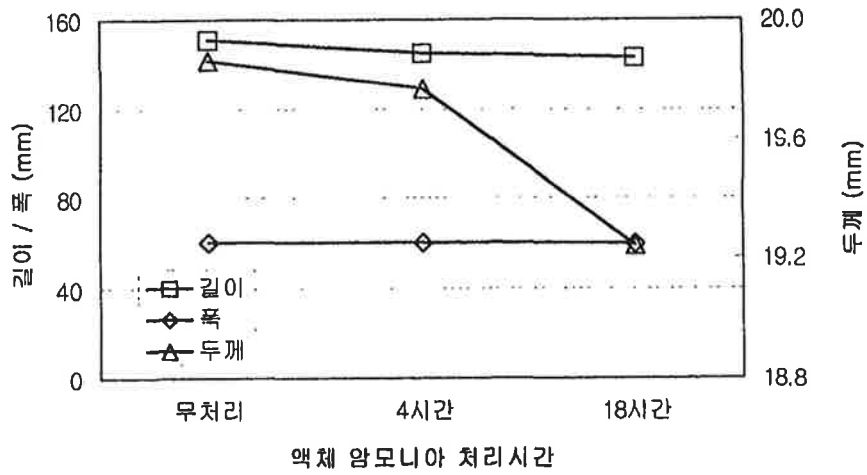


그림 8-3. 소나무의 액체 암모니아 처리시간에 따른 치수변화

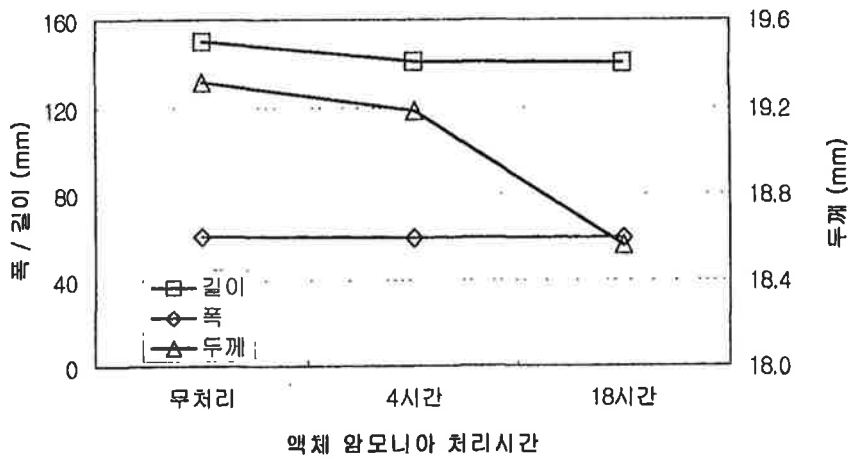


그림 8-4. 은사시나무의 액체 암모니아 처리시간에 따른 치수변화

## 5. 물리적 성질 변화

### 가. 상대적 유전율과 열전달계수

상대적 유전율과 열전달계수 모두 소나무가 은사시나무보다 높았다 (그림

8-5). 동일 수종에서 상대적 유전율은 액체 암모니아처리 4시간은 무처리와 비슷하나 18시간은 현격히 떨어졌다. 유전율은 목재의 함수율을 측정하는데 중요한 인자이므로 암모니아 처리재의 함수율을 측정하기 위해서는 보정이 필요함을 알 수 있다.

소나무의 열전달계수는 무처리, 4시간 처리, 18시간 처리 순으로 높았으나 은사시나무는 4시간 처리가 가장 낮고 무처리와 18시간 처리가 같은 값을 나타냈다. 이러한 수종간 차이의 원인은 밝혀지지 않았으나 액체 암모니아처리에 의해 열전달계수가 변함을 알 수 있었다.

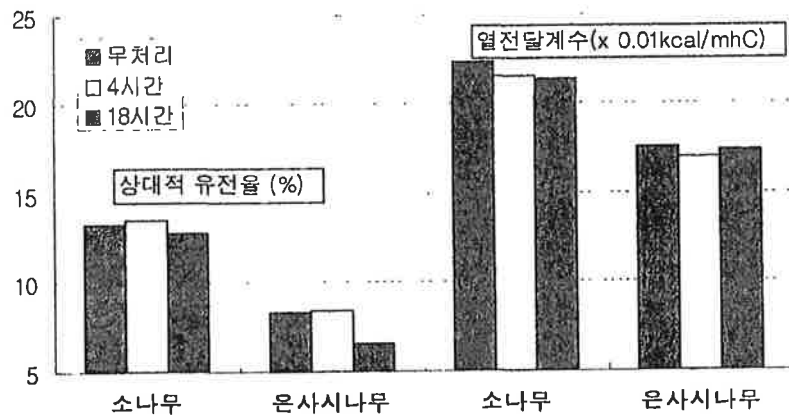


그림 8-5. 무처리와 액체 암모니아처리 소나무 및 은사시나무의 상대적 유전율과 열전달계수 비교

#### 나. 초음파 전달속도와 동탄성계수

그림 8-6에 보인 바와 같이 액체 암모니아 처리시간이 길수록 소나무와 은사시나무 모두 초음파 전달속도가 감소하였다. 액체 암모니아처리에 의해 목재 구성요소의 재배치가 일어나는데 목재가 가지고 있는 응력을 완화하는 방향으로 일어난다. 이러한 재배치가 어떻게 초음파 전달속도를 감소시키는지



대해서는 밝혀지지 않았다.

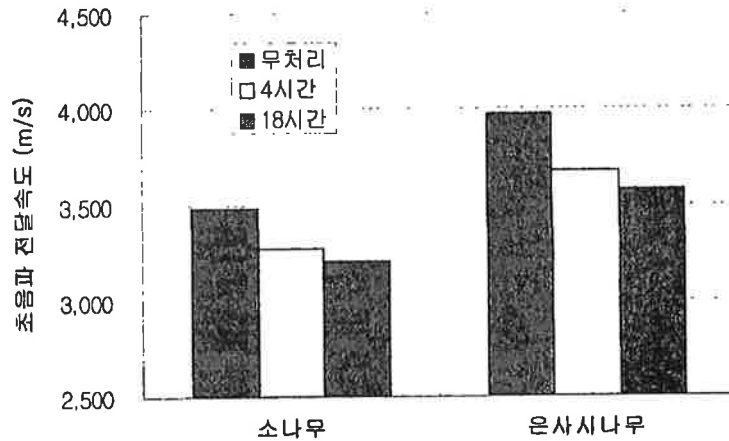


그림 8-6. 액체 암모니아처리 소나무와 은사시나무의 초음파 전달속도

동탄성계수를 계산하기 위해 먼저 각 시편의 밀도를 측정하였다. 아래 그림은 평균 밀도를 처리시간에 따라 나타낸 것으로 액체 암모니아처리 후의 밀도이다. 뚜렷이 처리시간이 길어질수록 밀도가 증가하였다.

액체 암모니아 처리시간이 증가함에 따라 초음파 전달속도는 감소하고 밀도는 증가하는데 위 식[8.1]에 의하면 동탄성계수는 밀도에는 비례하지만 초음파 전달속도에는 제곱에 비례하므로 초음파 전달속도와 같은 경향을 나타낼 것으로 예측할 수 있다. 아래 그림에서 액체 암모니아 처리시간이 증가함에 따라 동탄성계수가 감소한다는 것을 증명해 보인다. 이 같은 감소경향은 소나무 보다 은사시나무가 더욱 현저하다.

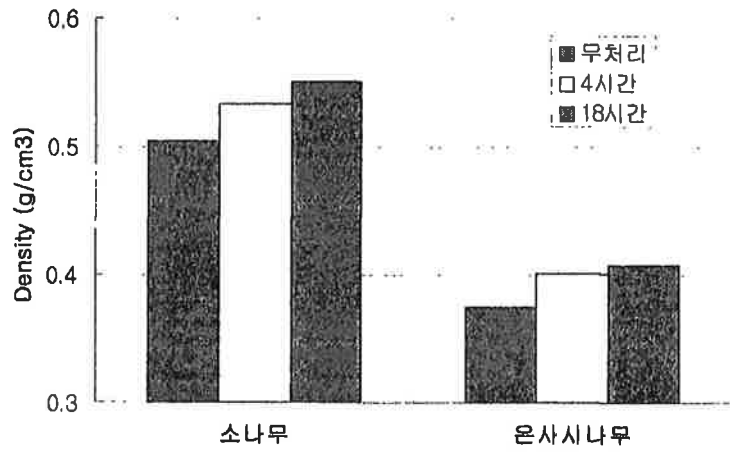


그림 8-7. 액체 암모니아처리 소나무와 은사시나무의 밀도 변화

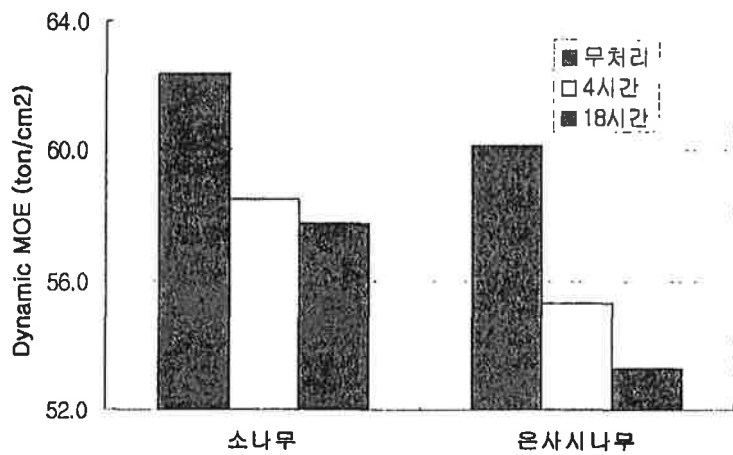


그림 8-8. 액체 암모니아처리 소나무와 은사시나무의 동탄성계수

## 제9절 수종별 최소곡률반경 측정

### 1. 목적

가구나 목제품의 휨가공 소재를 디자인할 때 목재의 최소곡률반경을 알아야만 정확하게 설계할 수 있다. 그러나 최소곡률반경은 목재의 강도, 벗벗함, 도관배열, 수선조직 등 여러 요소의 영향을 받기 때문에 수종별로 다르다. 한 두 가지 요소로 예측 가능하지 않기 때문에 직접 휨가공 실험을 통해서만 얻을 수 있다. 본 연구에서는 암모니아 처리재를 인장파괴가 일어나지 않는 범위에서 최대로 휘었을 때 얻을 수 있는 최소반경을 측정하였다. 최소곡률반경과 최대인장변형율은 직접적인 관계가 있으므로 전자의 측정치를 이용하여 후자를 계산하였다.

### 2. 공시재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 수종은 낙엽송, 더글라스피, 리기테다의 침엽수 세 수종과 굴참나무, 느티나무, 밤나무, 벚나무, 오동나무, 오리나무, 은사시나무, 자작나무, 플라타너스의 활엽수 8수종이었다. 그중 굴참나무는 휨가공 중 모두 부러져서 최소곡률반경을 측정치 못하였다. 굴참나무는 가소화가 잘 되지 않는 수종이기도 하지만 환공재이고 광방사조직을 가지고 있기 때문에 인장응력을 받으면 도관주위나 방사조직 주위가 쉽게 파괴된다.

시편의 크기는 폭 20mm, 길이 300mm이고 두께는 5mm내외였다. 수종별 5개 시편을 만들었으며 정목판재와 판목판재를 구분하지 않았다. 액체 암모니아가 시편에 충분히 침투할 수 있도록 하루 밤을 침지하였다. 휨가공은 손으로 하였으며 암모니아가 증발하는 동안 곡률반경에 맞는 스테인레스 관을 이용하여 고정시켰다. 하루이상 실내에서 고정시켰다가 곡률반경을 측정하였다.

곡률반경은 아래 그림과 같이 5mm간격의 반경을 갖는 동심원을 그리고 휨소재의 내경을 맞춰보아 가장 잘 맞는 동심원의 반경을 찾았다.

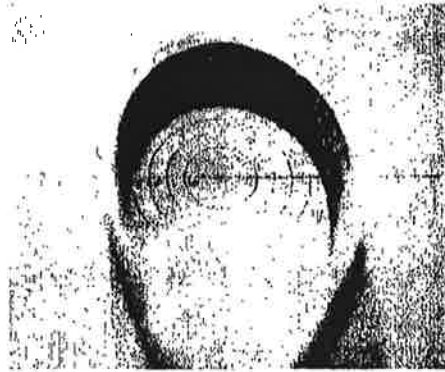


그림 9-1. 액체 암모니아처리 휨소재의 곡률반경측정 모습

목재의 변형율은 두께와 곡률반경의 관계식으로 구하였다.

$$\epsilon = \frac{a}{2R} \times 100\% \dots \dots \dots [9.1]$$

여기서  $\epsilon$ 는 변형율(%),  $a$ 는 목재두께(mm),  $R$ 은 곡률반경이다.

### 3. 수종별 최소곡률반경과 최대인장변형율

수종별 곡률반경과 인장변형율을 평균과 최대/최소치를 아래 표에 나타냈다. 침엽수재의 최대인장변형율은 수종간 큰 차이 없이 10-12%를 보였다. 한편 활엽수재는 수종간 큰 차이를 보였는데 비중이 낮은 오동나무가 최대 19.5%, 평균 18.9%로 가장 컸으며 그 다음으로 비중이 낮은 은사시나무가 최대 14.1%, 평균 11.9%였다.

한편 플라타너스가 최대 5.0%, 평균 4.9%로 가장 낮았는데 본 연구에 사용된 수종 중 앞에 언급한 대로 굴참나무가 제일 휘기 어려웠으며 그 다음이 밤나무였다. 비록 플라타너스의 인장변형율이 밤나무보다 낮았지만 휘는데 어려

음은 적었다. 플라타너스는 젖어 있을 때 매우 낮은 강도를 나타내기 때문에 조금만 힘을 주어도 인장할열이 발생하였다.

표 9-1. 수종별 최소곡률반경 및 최대인장변형율

수종	두께 (mm)	생재비중	곡률반경(mm)		인장변형율(%)	
			평균	최대	평균	최대
<침엽수>						
낙엽송	5.36		27.7	27.6	9.7	10.2
더글라스피	4.72		23.6	22.1	10.0	10.8
리기테다	6.85		33.4	27.6	10.1	11.8
<활엽수>						
느티나무	5.48	0.625	31.7	27.8	8.7	10.1
밤나무	5.72	0.433	42.9	42.8	6.7	6.7
벗나무	4.43	0.496	27.2	27.0	8.1	8.7
오동나무	4.66	0.281	12.3	12.2	18.9	19.5
오리나무	4.74	0.589	22.4	22.3	10.6	10.9
은사시나무	4.06	0.318	17.0	16.8	11.9	14.1
자작나무	4.89	0.578	28.7	27.3	8.6	9.4
플라타너스	5.67	0.54	57.8	52.7	4.9	5.0

그 밖의 느티나무, 벗나무, 오리나무, 자작나무는 최대인장변형율 8~11%

의 비슷한 값을 나타냈다. 이들 수종들은 비교적 단단하며 곧고 치밀한 조직과 아름다운 무늬결을 가지고 있어 공예품 소재로 많이 사용되고 있다는 공통점이 있다. 지금까지 사용된 단순가공 공예품뿐만 아니라 헝가공 소재로도 가치가 높다고 할 수 있다.

활엽수 8수종의 생재비중과 평균인장변형율의 관계는 아래 그림과 같다. 비중 0.4이하에서는 비중이 낮아질수록 평균인장변형율이 뚜렷이 증가했으나 비중 0.4이상에서는 비중에 따른 경향이 없고 대부분 5-10%선에 걸쳐있다. 오히려 높은 비중에서는 비중이 증가할수록 인장변형율도 증가하는 듯이 보인다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다.

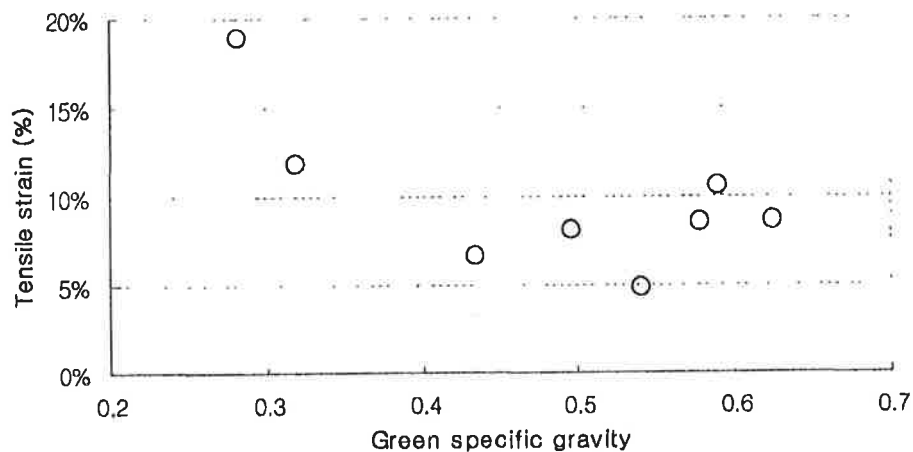
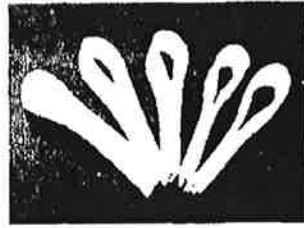


그림 9-2. 여러 활엽수종의 생재비중과 액체 암모니아처리에 의한 평균인장 변형율

비중 0.4이하의 활엽수종은 은사시나무와 오동나무로 이들의 헝가공 소재(그림 27)에서 보듯이 압축이 쉽다. 압축은 강도가 약할수록 잘 일어나며 작은 곡률반경을 만들 수 있다. 목재 강도는 비중과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 비중이 작으면 보통 강도가 약하다. 따라서 비중이 작아질수록 인장 변형율이 커지게 된다.



은사시나무(5mm)



오동나무(5mm)

그림 9-3. 은사시나무와 오동나무 소재의 휨가공

그러나 비중이 큰 수종은 압축을 견딜 정도로 충분히 단단하므로 휨가공 시 인장응력을 주로 받게된다. 목재의 인장파괴는 대부분 결합에서 시작하기 때문에 비중이 큰 수종의 인장변형율은 비중이 아닌 결합여부에 의해 결정된다. 여기서 말하는 결합에는 응력집중이 일어날 수 있는 수선조직, 광도관 등도 포함된다.

## 제10절 $2 \times 2\text{cm}^2$ 소나무 각재의 휨가공

### 1. 목적

위에서 구한 수종별 최소곡률반경과 최대인장변형율을 이용하여 지금까지 휨가공한 소재 중 가장 큰  $2 \times 2\text{cm}^2$  소나무 각재를 휘므로써 보다 큰 소재를 휨가공할 수 있는 방법을 찾고자 한다. 최종목적은  $3 \times 3\text{cm}^2$  소나무 각재를 휘어서 지팡이를 만들 수 있는 기술을 개발하는 것이다.

### 2. 공시재료 및 실험방법

가로 세로 20mm, 길이 700mm의 소나무 각재 5개를 잘라 한 면에 10mm 가격으로 4mm폭의 kerf를 만들었다. kerf의 깊이는 10mm와 7mm의 두 가지로 전자는 3개, 후자는 2개를 만들었다. kerf의 역할은 액체 암모니아의 침투를 원활하게 하는 것과 휨가공 시에 압축저항을 낮추어주는 것의 두 가지인데 본 실험에서는 후자의 역할이 더 컸다.

시편을 액체 암모니아에 담가 하루 밤을 두었다. 손힘으로 휘었으며 스텐레스 원통을 이용하여 고정하였으며 암모니아가 완전히 휘발될 때까지 두었다.

### 3. 곡률반경 및 인장변형율

7mm kerf 시편은 모두 인장 파괴가 일어났으나 10mm kerf 시편은 아래 그림과 같이 잘 휘어졌다. 10mm kerf 시편의 kerf 부위를 제외하면 실제 두께는 10mm이다. kerf의 끝으로 측정된 곡률반경은 25mm이나 neutral axis에서의 곡률반경은 40mm가 된다. 따라서 인장변형율은 12.5%이 된다. 이 수치는 앞서 조사된 침엽수재들과 비슷한 값이다.





그림 10-1. 직경 50mm 원형으로  
 칩가공된 소나무 각재(2cmx2cm).  
 kerfing의 폭과 깊이는 각각  
 4mm와 10mm.

#### 4. 소나무 지팡이를 만들기 위한 방안

위 실험에서 소나무의 최대인장변형율은 12.5%임을 알았다. 20mm이상 소나무 각재를 휘다고 할 때 최대인장변형율이 12.5%이상 되지 않게 하려면 kerf의 깊이를 조절하여야 한다. 아래 그림에서 보이는 바와 같이 내측곡률반경(R)와 각재 두께(D)에 따라 kerf 깊이(k) 각재의 인장응력이 발생하는 실제 두께(d=D-k) 그리고 neutral axis까지의 곡률반경(R)이 결정된다.

여기서 인장변형율( $\epsilon$ )는 다음과 같이 구한다.

$$R = r + k + \frac{d}{2} \dots\dots\dots [10.1]$$

$$\epsilon = \frac{d}{2R} \dots\dots\dots [10.2]$$

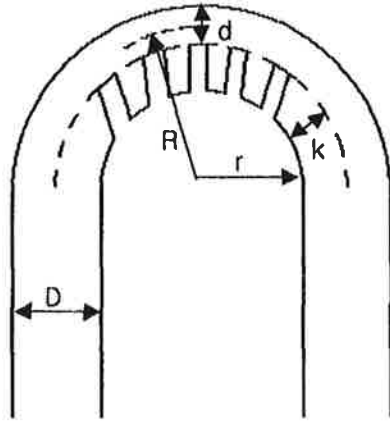


그림 10-2. 소나무 각재의 휨 모형.  
 R: 곡률반경, r: 내측곡률반경, D: 각재 두께, k: kerf 깊이, d: 실제인장변형을 받는 두께 (D-k)

위 식 10.1, 10.2를 이용하여 각재 두께와 내측곡률반경에 따라 파괴되지 않는 범위에서 최대인장변형율( $\epsilon \leq 12.5\%$ )을 얻을 수 있는 kerf의 깊이를 다음 표에 나타냈다 (부록 참조). 각재 두께가 클수록 내측곡률반경이 작을수록 kerf 깊이는 깊어져야만 표면의 인장파괴를 막을 수 있다.

표 10-1. 소나무 각재 휨가공을 위한 kerf 깊이 자료

각재두께(D) (mm)	내측곡률반경 (r)(mm)	실제두께(d) mm	kerf 깊이(k) (mm)	인장변형율 (%)
20	20	8	12	11.1%
	30	11	9	12.4%
	40	13	7	12.1%
	50	15	5	12.0%
30	20	11	19	12.4%
	30	13	17	12.1%
	40	15	15	12.0%
	50	17	13	11.9%
40	20	13	27	12.1%
	30	15	25	12.0%
	40	17	23	11.9%
	50	20	20	12.5%
50	20	15	35	12.0%
	30	17	33	11.9%
	40	20	30	12.5%
	50	22	28	12.4%

## 제11절 액체 암모니아 처리재를 이용하여 휩가공 숯 만들기

### 1. 목적

가정에 숯으로 만들어진 장식품을 걸어 놓아 실내 공기를 정화하려는 사람들이 늘어나면서 숯 장식품 시장이 커지고 있다. 숯바구니, 숯화분이 대부분을 차지하고 있는데 통나무로 만든 숯을 짧게 잘라서 크기에 따라 배열한 정도이다. 숯으로 정원이나 숲 등을 모델로 miniature를 만들어 장식하면 보기에 아름다울 뿐만 아니라 실내 환경을 정화하기 때문에 건강에도 좋다. 이런 장식품을 만들려면 적당하게 굵은 숯이 있어야 하는데 구하기가 매우 어려워서 고가에 판매된다고 한다.

본 실험에서는 곡가공된 시편을 탄화시켜 휩가공 숯을 만들었다.

### 2. 실험 방법

액체 암모니아 곡가공된 두께 5~10mm 리기테다, 라디에타 파인, 밤나무 시편을 사용하였다. 시편을 알루미늄박으로 여러 겹 촘촘히 싸서 공기가 잘 통하지 않도록 하여 실험실용 furnace에 넣고 600℃로 가열하였다. 가열시간은 1.5~3.0시간이었다. 탄화가 끝난 후에는 furnace 내에서 충분히 식혀서 꺼냈다. 시편이 얇아 잘 부러지므로 알루미늄박을 벗기는데 조심이 필요했다.

### 3. 곡가공 숯 제조

수탄율은 리기테다와 라디에타 파인은 평균 22%정도, 밤나무는 22-26% 였다. 모두 탄화가 잘 되었으나 얇은 시편이기 때문에 강도가 낮아 취급에 어려움이 있다.



그림 11-1. 액체 암모니아 처리제로 만든 헝가공 숯

표 11-1. 액체 암모니아 곡가공재의 숯제조

번호	수종	규격 (mm)	온도 (℃)	가열시간 (hr)	결과	수탄율 (%)	비고
1	리기테다	5x30x300	600	2.0	Good	22.6	
2	radiata pine	5x30x300	600	3.0	Good	-	
3	radiata pine	10x30x300	600	3.3	Good	-	
4	radiata pine	10x30x300	600	3.0	Good	22.5	
5	radiata pine	10x30x300	600	2.0	Good	23.5	
6	radiata pine	10x30x300	600	1.5	Good	21.6	공기유통
7	밤나무	5x30x300	600	2.0	Good	22.5	
8	밤나무	5x30x300	600	2.0	Good	26.4	
9	참나무	30x50x150	600	4.0	조개집	27.2	

## 제12절 액체 암모니아 처리재를 이용한 작품 제작

### 1. 목적

증기처리로 휨가공한 목재는 곡률반경이 한정적이며 원상태로 회복되려는 경향이 커 다양하게 이용되지 못하였다. 액체 암모니아처리는 이러한 한계를 극복하고 복잡한 형태의 휨가공을 할 수 있다. 오리나무와 파덕의 액체 암모니아 휨소재를 이용하여 몇 가지 작품을 만들었다. 본 연구를 통해 인위적이긴 하지만 자연스럽게 휨 모양을 자유자재로 연출할 수 있음을 보였으며 이러한 휨가공 소재의 이용은 디자인의 새로운 영역을 확장시키는데 큰 도움이 될 것이다.

### 2. 액체 암모니아 휨가공 소재 제작

#### 가. 공시시편

액체 암모니아 휨가공 소재로 수입산인 아프리카 파덕(*Pterocarpus soyauzii*)과 국내산 오리나무(*Alnus japonica*)를 사용하였다. 파덕의 생제비중(전건무게-생제부피 기준)은 0.55-0.67(Flynn Jr. and Holder, 2001)이며 오리나무는 0.52 이다.

그밖에 가구제작에 사용된 수종은 백참나무(*Quercus alba*)로 평균 생제비중이 0.6이다(Flynn Jr. and Holder, 2001).

#### 나. 암모니아 처리 및 휨가공

작품을 위해서 직경 40mm의 원을 만들어야 하기 때문에 휨소재를 고정시킴 철물을 아래 그림과 같이 특수 제작하였다. 이 철물의 내경은 50mm 인데 그 속에 암모니아 처리재를 넣고 고정시키면 목재가 줄어들어 약 40mm 직경의 원이 만들어진다.

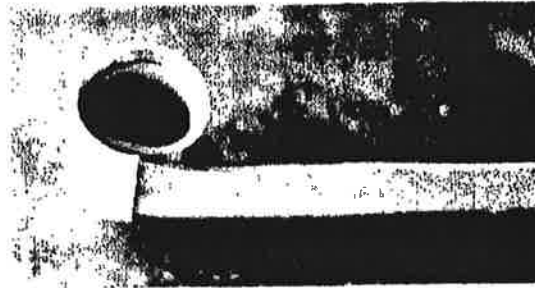


그림 2. 액체 암모니아 처리 후 고정하고 있는 모습

암모니아 처리는 다음과 같이 하였다. 영하 35℃ 냉동 처리장치 안에 스테인리스 용기와 목재 시편을 넣고 문을 닫은 다음 온도평형이 될 때까지 기다린다. 만일 용기나 목재의 온도가 실온일 때 액체 암모니아를 부으면 갑자기 많은 양이 기화하여 위험하게 된다. 용기의 온도가 처리장치 내부온도에 가까워지면 냉동고에 보관하였던 액체 암모니아를 용기 속에 목재 시편이 잠기도록 충분히 붓는다. 용기 뚜껑과 냉동고 문을 닫고 정해진 처리시간동안 기다린다. 액체 암모니아를 목재에 충분히 침투시키기 위해 저녁에 담그고 다음날 오전에 꺼내었다. 꺼낸 후에 약 10분 정도 공기 중에 두면, 표면에 묻은 암모니아를 증발하면서 목재 온도가 약간 정도 상승하기 때문에 목재 유연성이 좋아져서 잘 휘어진다.

파덕은 매우 비중이 높은 수종으로 직경 40mm 원을 만들기 위해서 두께가 2mm를 넘지 않아야 된다는 것을 여러차례 시행착오를 겪은 후에 알게되었다. 한편 오리나무의 평균 인장변형율은 11.8%로 아래 식에 의해 두께 4.7mm까지 가능하나 본 실험에서는 3mm두께 밖에 얻지 못하였다. 그 이유는 원래 변형율은 목재 시편의 양단을 잡고 구부렸을 때 중앙에서 얻을 수 있는 값으로 본 실험에서 만들어야 할 소재같이 한쪽 끝만 휘 때는 곡률반경이 더 커질 수 밖에 없다.

$$\epsilon = \frac{a}{2R} \times 100\% \dots \dots [12.1]$$

여기서  $\epsilon$ 는 변형율(%),  $a$ 는 목재두께(mm),  $2R$ 은 원의 직경이다.

다. 휘가공 소재 제작

본 연구에 사용된 소재 형태는 소재 끝을 내경 40mm의 원으로 휘 것파 소재 전체 길이를 나사모양으로 휘 것의 두 가지였다.

1) 소재1: 40mm원파 직선

오리나무는 폭 65mm, 두께 3mm, 길이 1000mm 소재를, 파덕은 폭 35mm 두께 2mm, 길이 500-1000mm 소재를 사용하였다. 액체 암모니아 처리된 소재를 손힘을 가해 굽힌 다음, 특수 제작된 철물에 넣었다 (그림 2). 직선부분은 액체 암모니아 처리하지 않아도 되나 그 부분만 피할 수 없기 때문에 처리된 부분을 무거운 것으로 눌러 폈다 (그림 3). 암모니아가 모두 증발되면 냄새도 나지 않을 뿐만 아니라 소재의 원래 강도를 되찾게된다 (그림 4). 보통 24시간 하중을 가해 두었다.

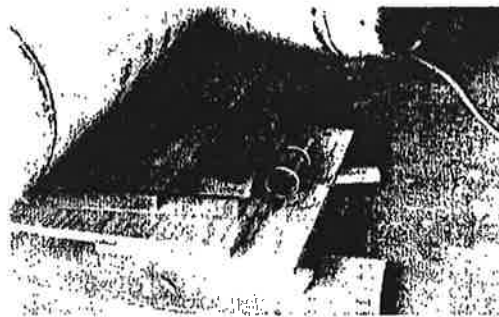


그림 3. 액체 암모니아 처리 후 하중을 가해 펴는 모습



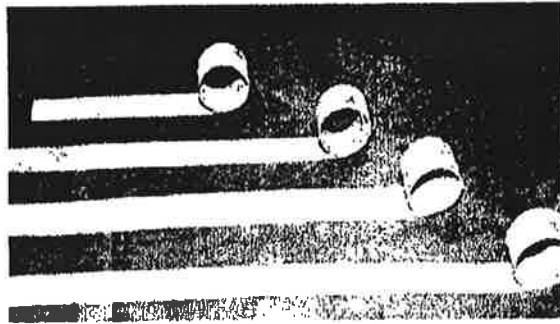


그림 4. 완성된 펄가공 파덕 소재

2) 소재2: 나사모양

폭 23-33mm, 두께 1.5mm, 길이 600-800mm 파덕 소재를 사용하였다. 손 힘을 천천히 그리고 조금씩 증가시키면서 작품에 필요한 오른 나선과 왼 나선을 구분하여 휘었다 (그림 5). 소재에 하중을 가할 수 없으므로 암모니아가 모두 증발될 때까지 계속 손으로 힘을 가해 주었다.

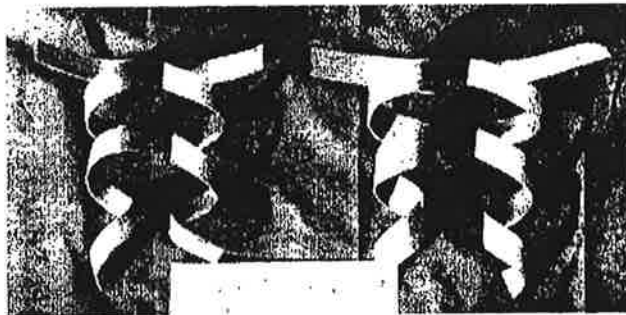


그림 5. 완성된 나사모양의 파덕 소재

### 3. 작품설명

#### 가. 디자인 개요

본 연구 작품은 조형의 기본 요소 가운데 하나인 선을 이용한 기하학적인 구성으로서 선적인 요소를 중시하였다. 또한 가구제작에서 사용되어지는 일반적인 휨 가공인 스팀 벤딩(steam bending)이나 고주파 벤딩(High-Frequency Bending)으로 해결하기 힘든 디자인적인 부분을 액체 암모니아 휨 가공 소재를 이용하여 그 문제점을 해결하였다.

액체 암모니아 휨 가공을 이용하여 표현해 낼 수 있는 곡선적 이미지를 직선적 형태와 조화시켜 천편일률적인 가구형태에서 벗어나 소비자에게 새로운 수용미학을 제시함과 동시에 가구제작 공법으로서 액체 암모니아 휨 가공을 응용하는데 그 의미가 있다.

나. 작품1: Geometric Composition 0106-Chest (180×180×1690) Oak  
Padauk (그림 6)

Geometric Composition 0106은 오크와 파덕 원목으로 만들어진 CD장으로서 가운데 붉은 선과 이어진 원의 형태가 손잡이의 기능을 하고 있다. 이 원은 전체적 이미지가 직선으로 이루어진 형태에서 조형적 요소로서의 시각적인 메시지를 전달함과 동시에 손잡이라는 기능적 역할을 동반하고 있다. 내경이 35mm에 폭 20mm 두께 2mm인 파덕 원목을 액체 암모니아 휘 가공에 의해 제작함으로써 일반적인 휘 가공 기술로서 해결하기 힘든 디자인적인 요소를 해결하고 더불어 자체 경도를 갖고 있어 손잡이로서의 기능도 무난하게 소화해 내고 있다.

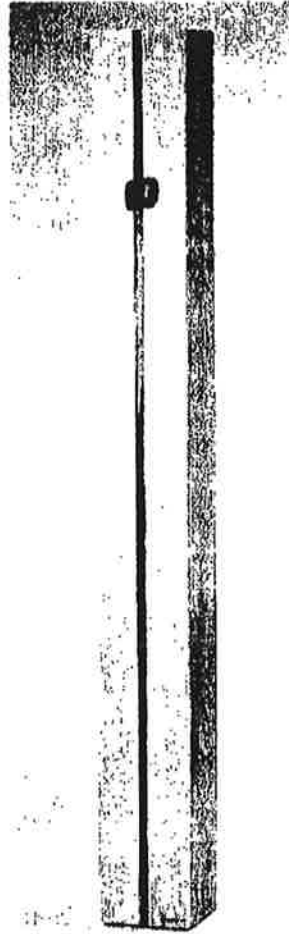


그림 6. 작품1: Geometric  
Composition 0106-Chest  
(180×180×1690)Oak,  
Padauk

다. 작품2: Geometric Composition 0107 Chest of drawers (1100×200×200)  
Oak, Padauk (그림 7)

이 작품은 벽걸이용 서랍장으로서 작품 1에서 보여진 재료와 동일하게 사용되어 졌으며, 가운데 보이는 파베기 형태의 선이 파덕 원목으로서 액체 암모니아 휩 가공으로 만들어진 것이다. 이 선의 형태가 갖는 느낌은 사물놀이패가 흔들어대는 리듬에 맞춰 자연스럽게 생겨나는 곡선의 흐름을 표현한 것이며, 장식적, 기능적 역할을 동반하고 있다.



그림 7. 작품2: Geometric Composition 0107 Chest of drawers  
(1100×200×200) Oak, Padauk

라. 작품3: Geometric Composition 0110 A Hanger (140×130×1800)  
Maple, Alder (그림 8)

이 작품은 작품1과 같은 이미지를 갖고 있으나 또 다른 기능을 수반하고 있다. 세 개의 서로 다른 원형의 고리 모양이 옷걸이로서 양쪽 측면과 정면의 고리가 서로 다른 위치를 가지므로 해서 시각적 변화와 함께 옷을 거는 위치에 차이를 두어 사용상의 불편함을 최소화 하였다. 또한 옷의 무게를 감당하기 위하여 앞에서 사용한 두께보다 더 두꺼운 재료를 얻기 위하여 오리나무를 사용하였고, 최소한의 두께를 사용하면서 동시에 옷의 무게를 감당할 수 있게 되었다.

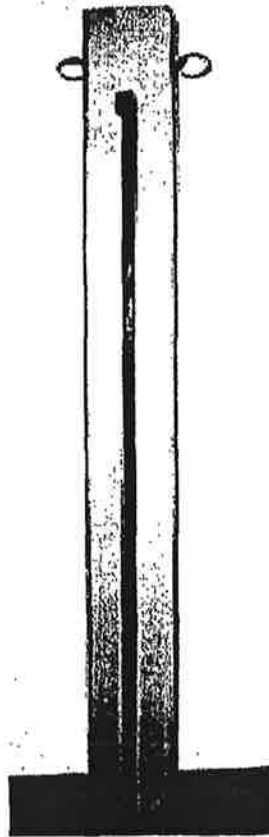


그림 8. 작품3:  
Geometric Composition  
0110 A Hanger  
(140×130×1800) Maple,  
Alder

다. 작품4: Geometric Composition 0111 A Napkin Holder Alder (그림 9)

이 작품은 테이블에서 사용되어지는 소품으로서 Napkin을 꽂아 놓는 기능을 한다. 기본적인 형태는 작품1과 3에서 사용되어진 것과 동일하나 원의 폭 일부분에 틈을 주어 Napkin을 꽂을 수 있도록 하였다. 재료는 오리나무를 사용하였고 붉은 계열의 장미목 스테인(wood stain)으로 마감하여 좀 더 무게감이 있고 고급스러운 이미지를 주었다.

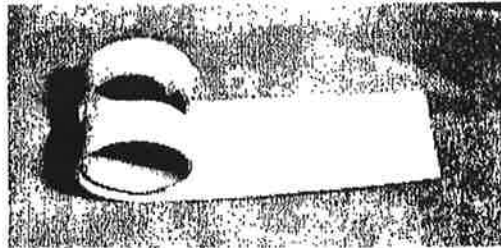


그림 9. 작품4: Geometric Composition 0111 A Napkin Holder Alder

## 제13절 결과 및 고찰

### 1. 액체 암모니아 냉동 처리 장치 개발

본 연구에서 제작한 액체 암모니아 냉동처리장치는 다음과 같다. chamber의 외형규격은  $1560 \times 480 \times 660 \text{mm}^3$ 이며 내부 cavity는  $1400 \times 400 \times 480 \text{mm}^3$ 이며 육면을 우레탄으로 단열하였으며 개구부는 실리콘으로 packing하였다. 최저온도는  $-45^\circ\text{C}$  까지 내려갈 수 있도록 설계하였으나 실제 내부온도는 겨울에  $-40^\circ\text{C}$ , 여름에  $-33^\circ\text{C}$  이하를 내려가지 못하였다. 최소한  $-35^\circ\text{C}$ 가 되어야만 작업이 가능하기 때문에 한 여름에는 실험하지 못하였다.

암모니아 가스의 폭발성을 고려한다면 전기단자들을 밀폐하여야 하나 본 장치에는 설치하지 않았기 때문에 공기유통이 잘 되는 옥상에 장치하였다. 본 연구에서 만든 처리장치는 비록 고급으로 제작되지 않았지만 액체 암모니아 인출과 목재의 암모니아 처리에 효과적으로 사용되었다.

### 2. 액체 암모니아 인출

특별한 장치 없이 드라이아이스와 아세톤만을 이용하여 고압 액체 암모니아를 대기압 액체 상태로 뽑아내는 기술을 개발하였다. 응축기 내 온도는  $-35^\circ\text{C}$ 가 가장 적당하였다. 온도가 이보다 높으면 응축 플라스크에서 일부 새어나온 암모니아 가스가 주위에 석출되어 달라 붙게된다.

고압 암모니아 봄베이를 누어 놓으므로 써 액체 암모니아가 빠져나오도록 하는 것이 효과적이었다.

### 3. 전처리 효과

#### 가. 증기전처리

소나무와 밤나무 두께 5mm 시편을 2시간 증기처리 한 후에 4시간 액체암

모니아 처리하여 무처리와 비교한 결과, 두 수종 모두 증기처리제와 무처리제의 가소성에는 별 차이가 없었다. 오히려 증기전처리에 의해 목재 강도가 떨어져 인장파괴가 쉽게 일어났다. 증기전처리가 목재에 대한 액체 암모니아 투과성을 높이는데 별 효과가 없었다.

#### 나. 마이크로파 진공(MWV)건조효과

마이크로파로 가열하여 예비 휩가공한 후 암모니아 처리하는 방법을 여러 차례 시도 하였으나 효과를 얻지 못했다. 마이크로파로 가열하든지 가열하지 않던지 암모니아 휩가공 결과는 동일하였다. 증기전처리와 마찬가지로 전처리로서 암모니아 휩가공에 아무 영향을 미치지 않았다. 액체 암모니아 처리제의 휩가공성은 매우 커서 이에 비하면 마이크로파 가열에 의한 휩가공량은 매우 미미한 정도이다.

#### 다. incising 처리

두께 5mm 밤나무와 플라타너스의 incising 소재는 incising하지 않은 소재에 비해 액체 암모니아 처리 후 휩가공성이 조금도 나아지지 않았다.

그러나 두께 10mm 리기테다 액체 암모니아 처리제의 incising 시편은 모두 어느 정도 인장파괴 없이 휘어졌으나 incising을 하지 않은 시편은 모두 인장파괴 되었다. 이 사실로만 볼 때 incising이 침엽수의 경우 액체 암모니아 침투에 도움이 된다고 볼 수 있으나 이는 처리 초기에 국한된다고 보여진다. 차후 실험에서 incising을 하지 않더라도 처리시간이 길어지면 침엽수재는 충분히 가소화됨을 알 수 있었다. incising은 활엽수재와 같이 투과성이 낮은 수종의 액체 암모니아 침투성을 높이는데 효과가 있을 것으로 기대하였으나 기대에 미치지 못하였다.



#### 4. 액체 암모니아의 처리시간에 따른 물리적 특성

##### 가. 가소성

두께 5mm 소나무는 액체 암모니아 처리시간이 4시간 이상이면 거의 같은 수준의 높은 가소성을 나타냈다. 이에 반해 두께 5mm 밤나무는 대체로 휨가공이 어려웠는데 액체 암모니아 4, 6, 8시간에서는 매우 낮은 가소성을 보였으나 24시간에서는 약간 증가하였으나 충분한 정도는 아니었다.

##### 나. 열전달계수

소나무의 열전달계수는 처리시간이 길어질수록 두께 5와 10mm 모두 증가하는 경향을 보였으나 두께 5mm 밤나무는 오히려 감소하거나 거의 변하지 않았다. 밤나무는 액체 암모니아가 충분히 침투되지 않아 목재 성질에 변화가 일어나지 않았기 때문에 휨가공성도 낮고 열전달계수도 변화하지 않은 것 같다. 추후 실험에 의해 액체 암모니아 처리시간이 길수록 밀도가 증가한다는 것이 증명되었기 때문에 소나무의 열전달계수 증가는 해석될 수 있었다.

##### 다. 흡습성

밤나무 5mm의 함수율은 처리시간에 상관없이 일정하다. 이는 처리시간 24시간까지 액체 암모니아가 잘 침투하지 않았음을 의미한다. 소나무 5mm는 액체 암모니아 처리재의 함수율이 무처리재 보다 모두 높았으나 처리시간에 따른 함수율 증가는 분명하지 않았다. 처리시간을 4시간 이상 더 연장하여도 액체 암모니아의 침투량이 더 이상 늘어나지 않는다는 것으로 유추할 수 있다. 소나무 10mm에서는 kerf 시편이 그렇지 않은 시편보다 함수율이 높았는데 이는 전자의 표면적이 kerf때문에 후자보다 넓어졌기 때문으로 설명할 수 있다.

## 5. 증기처리제와 액체 암모니아 처리제의 휩가공성 비교

### 가. 활엽수재 (밤나무와 플라타너스)

두께 5mm 밤나무를 12시간 액체 암모니아 처리제의 곡률반경이 증기처리 8시간하고 비슷하였다. 두께 10mm 경우도 암모니아 처리는 거의 휘지 않았으나 증기처리는 곡률반경을 13.4cm까지 얻을 수 있었다. 이는 시편에 암모니아 충분히 침투하지 못했기 때문으로 밤나무는 증기처리가 더 효과 있다고 할 수 있다.

플라타너스 증기처리제는 휩가공 중에 모두 부러졌다. 증기처리에 의해 플라타너스 강도가 약해졌기 때문이다. 경험으로 볼 때 플라타너스 건조제는 어느 정도 단단하나 젖으면 강도가 매우 약해진다. 암모니아 처리제도 대부분 휘는 도중에 부러졌다. 따라서 플라타너스는 휩가공이 어려운 수종이라고 볼 수 있다. 그래도 액체 암모니아 처리제의 가공성이 증기처리제보다 높았다. 밤나무와 플라타너스 모두 incising 효과는 없었다.

### 나. 침엽수 (더그라스퍼, 낙엽송, 라디에타파인, 리기테타)

증기처리 침엽수재는 낙엽송만 제외하고 부러지거나 거의 휘어지지 않았다. 침엽수재 5mm의 암모니아처리의 휩가공성은 매우 좋았다. 더그라스퍼, 낙엽송, 라디에타파인은 시편 5개중 1-2개를 제외하고 시편의 양단을 마주 닿게 만들 수 있었다.

두께 10mm 리기테타 암모니아 처리제의 경우 incising 시편은 모두 어느 정도 휘어졌으나 incising을 하지 않은 시편은 모두 인장파괴가 발생하였다.

## 6. 증기처리재와 액체 암모니아 처리재의 복원성 비교

### 가. 평형함수율

벚나무와 자작나무 증기처리재의 평형함수율은 액체 암모니아 처리재보다 증습전과 증습후 모두 낮았다. 이는 고온으로 증기처리하므로써 목재가 열화하여 흡습성 손실이 일어난 때문으로 볼 수 있다. 만일 증기처리로 추출물이 제거되었다면 평형함수율이 더 높아지는 것이 정상일 텐데 추출물 제거로 인한 평형함수율 증가보다는 열화에 의해 흡습성 손실이 더 큰 것으로 보인다.

### 나. 증습에 의한 복원성

액체 암모니아 처리 오동나무, 오리나무, 은사시나무의 늘어난 원주는 5mm미만으로 매우 안정되었으며, 그밖에 느티나무, 벚나무, 자작나무 암모니아 처리재의 늘어난 길이도 18mm이하로 적었다. 그러나 증기처리 자작나무와 벚나무는 각각 25.6, 46.8mm로 같은 수종 액체 암모니아 처리재에 비해 각각 약 4배, 1.5배되었다.

### 다. 이력현상

흡습되었던 액체 암모니아 처리재는 건조 후에 거의 제자리로 돌아와 원래 모습을 갖추었다. 한편 증기처리재도 어느 정도 복원되었으나 원래 자리로 돌아오진 못하였다.

## 7. 액체 암모니아 처리재의 치수 및 물리적 성질 변화 (소나무와 은사시나무)

### 가. 평형함수율

높은 함수율일 때 소나무와 은사시나무 모두 암모니아 처리재의 평형함수율이 무처리보다 높았으나 낮은 함수율로 건조시킨 후에는 차이가 거의 없었

다. 두 수종 모두 처리시간(4시간과 18시간)에 따른 평형 함수율 차이는 거의 없었다. 이는 4시간이상 처리하여도 액체 암모니아의 침투량 증가는 거의 없다는 것을 의미한다.

#### 나. 치수변화

액체 암모니아처리에 따른 소나무와 은사시나무의 치수변화형태는 비슷하였다. 섬유방향 변화는 거의 없었으며 섬유직각방향은 처리시간이 길수록 더 많이 줄어들었다. 평형함수율이 처리시간에 따라 별 차이가 없는 것에 반해 치수변화는 차이를 나타냈다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 액체 암모니아가 목재에 충분히 침투하는 시간은 소나무와 은사시나무 같이 투과율이 좋은 수종은 4시간이면 족하나 액체 암모니아에 의해 목재의 구성물질 들의 화학적 변화와 재배치가 일어나는데는 더 많은 시간이 필요하다.

18시간 처리재의 두께는 무처리에 비해 소나무는 약 3%, 은사시나무는 약 4%감소하였으며 길이는 이보다 커서 소나무는 5.2%, 은사시나무는 6.6% 수축하였다.

#### 다. 상대적 유전율과 열전달계수

상대적 유전율과 열전달계수 모두 소나무가 은사시나무보다 높았다. 동일 수종에서 상대적 유전율은 액체 암모니아처리 4시간은 무처리와 비슷하나 18시간은 현격히 떨어졌다. 유전율은 목재의 함수율을 측정하는데 중요한 인자이므로 암모니아 처리재의 함수율을 측정하기 위해서는 보정이 필요함을 알 수 있다.

소나무의 열전달계수는 무처리, 4시간 처리, 18시간 처리 순으로 높았으나 은사시나무는 4시간 처리가 가장 낮고 무처리와 18시간 처리가 같은 값을 나타냈다. 이러한 수종간 차이의 원인은 밝혀지지 않았으나 액체 암모니아처리

에 의해 열전달계수가 변함을 알 수 있었다.

#### 라. 초음파 전달속도와 동탄성계수

소나무와 은사시나무 모두 액체 암모니아 처리시간이 증가함에 따라 초음파 전달속도는 감소하고 밀도는 증가하는데 동탄성계수는 밀도에는 비례하지만 초음파 전달속도에는 제곱에 비례하므로 액체 암모니아 처리시간이 증가함에 따라 동탄성계수가 감소하였다. 이 같은 감소경향은 소나무 보다 은사시나무가 더욱 현저하다.

#### 8. 수종별 최소곡률반경과 최대인장변형률

인장변형률은 곡률반경을 측정하여 계산할 수 있다. 침엽수재의 최대인장변형률은 수종간 큰 차이 없이 10-12%였다. 그러나 활엽수재는 수종간 큰 차이를 보였는데 비중이 낮은 오동나무가 평균 18.9%로 가장 컸으며 그 다음으로 비중이 낮은 은사시나무가 평균 11.9%였다.

활엽수 중에는 굴참나무와 밤나무가 가장 휘는데 힘이 많이 들었다. 특히 굴참나무는 휨가공에 하나도 성공하지 못했다. 플라타너스의 최대인장변형률은 평균 4.9%로 밤나무보다 낮았는데 그 이유는 플라타너스는 젖어 있을 때 매우 낮은 강도를 나타내기 때문에 조금만 힘을 주어도 인장할열이 발생하였다. 그 밖의 느티나무, 벚나무, 오리나무, 자작나무는 최대인장변형률 8~11%의 비슷한 값을 나타냈다.

생재비중과 평균인장변형률의 관계는 비중 0.4이하에서는 비중이 낮아질수록 평균인장변형률이 뚜렷이 증가했으나 비중 0.4이상에서는 비중에 따른 경향이 없고 대부분 5-10%선에 걸쳐있다.

## 9. 2×2cm<sup>4</sup> 소나무 각재의 휨가공

### 가. 곡률반경 및 인장변형율

실험에서 얻은 소나무재의 최대인장변형율은 12.5%였다. 소나무재를 휨가공할 때 인장파괴가 일어나지 않게 하려면 최대인장변형율이 12.5%를 넘지 않도록 하여야 한다. 20mm가 넘는 각재는 kerf를 만들어 압축저항을 줄여야 한다. 각재 두께와 만들하고자하는 곡률반경에 따라 kerf의 깊이를 조절하여야 한다. 이를 구하는 식을 만들었으며 식에 따라 편리하게 사용할 수 있는 표를 만들었다. 각재 두께가 클수록 내측곡률반경이 작을수록 kerf 깊이는 깊어져야만 표면의 인장파괴를 막을 수 있다.

## 10. 휨가공 숯 만들기

공기정화를 위한 장식품으로 사용되는 숯을 암모니아 휨곡가공 시편으로 탄화시켜 만들었다. 수탄율은 리기테다와 라디에타 파인은 평균 22%정도, 밤나무는 22-26% 였다. 모두 탄화가 잘 되었으나 얇은 시편이기 때문에 강도가 낮아 취급에 어려움이 있었다.

## 11. 액체 암모니아 처리재를 이용한 작품 제작

오리나무와 파닥의 액체 암모니아 휨가공 소재를 이용하여 가구를 비롯하여 몇 가지 작품을 만들어 전시회를 갖었다. 전시회 기간 중 가구디자이너 등 관계자들이 참관하여 액체 암모니아 휨가공 소재에 지대한 관심을 보였다. 본 연구를 통해 인위적이긴 하지만 자연스럽게 흰 모양을 자유자재로 연출할 수 있음을 확인하였다. 이러한 휨가공 소재의 이용은 디자인의 새로운 영역을 확장시키는 데 큰 도움이 될 것이다.

## 제14절 결 론

목재를 다루는 사람들은 목재의 가소성을 높여 원하는 형태로 휘 수 있는 기술을 개발하기 위해 많은 노력을 경주해 왔다. 증기처리로 가소화하는 방법은 오래 전부터 사용하던 기술로 쉽지만 원하는 만큼의 효과를 얻지 못하였다. 여러 가지 화학처리 방법 중 액체 암모니아 처리법이 목재의 가소성을 가장 높인다고 알려져 있다. 본 연구에서는 액체 암모니아 처리장치와 처리기술을 개발하였으며, 여러 국산 수종을 액체 암모니아로 가소화시켜 물리적 성질변화를 조사하여 증기처리재와 비교하였으며, 액체 암모니아 휩소재를 이용하여 작품을 제작 전시하였다. 본 연구 결과에서 얻은 결론은 아래와 같다.

1. 본 연구에서 제작한 외형규격  $1560 \times 480 \times 660\text{mm}^3$ 의 액체 암모니아 냉동처리장치는 비록 고급으로 제작되지 않았지만 목재의 액체 암모니아 처리에 효과적이었다.
2. 액체 암모니아 인출은 매우 어려운 작업이나 특별한 장치 없이 드라이아이스와 아세톤만을 이용하여 고압 액체 암모니아를 대기압 액체 상태로 뽑아내는 기술을 개발하였다.
3. 증기전처리는 목재에 대한 액체 암모니아 투과성을 높이는데 별 효과가 없었다.
4. 전처리로서 마이크로파 가열 휩가공은 액체 암모니아 처리재의 휩가공성에 비하면 매우 작기 때문에 효과가 없었다.
5. incising은 밤나무와 같이 투과성이 나쁜 수종의 액체 암모니아 투과성을 높이는데 효과가 없었다.
6. 두께 5mm의 침엽수재의 액체 암모니아 처리시간은 4시간 이상이면 충분하

였다.

7. 밤나무는 꺾가공이 어려운 수종으로 액체 암모니아 처리보다 증기처리가 더 효과 있었다. 플라타너스 액체 암모니아 처리재의 가공성은 증기처리재보다 높았으나 가공시에 많은 시편이 부러져 꺾가공에는 적당하지 않았다.
8. 증기처리재의 평형함수율은 액체 암모니아 처리재보다 항상 낮았다.
9. 직경 130mm 원으로 꺾가공된 활엽수 증기처리재를 흡습시켰을 때 늘어난 원주 길이는 액체 암모니아 처리재에 비해 1.5내지 4배 길었다. 또 건조된 후에 액체 암모니아 처리 원형 가공재는 흡습전 상태로 되돌아오나 증기처리재는 일정정도 영구변형되었다.
10. 높은 함수율일 때 소나무와 은사시나무 액체 암모니아 처리재의 평형함수율은 무처리보다 높았으나 낮은 함수율에서는 차이가 거의 없었으며, 처리시간(4시간과 18시간)에 따른 차이는 거의 없었다.
11. 액체 암모니아처리에 의해 소나무와 은사시나무 시편의 섬유방향길이는 거의 변하지 않았으나 섬유직각방향은 처리시간이 길수록 더 많이 줄어들었다. 18시간 처리 후 소나무는 3.0~5.2%, 은사시나무는 4.0~6.6% 감소하였다.
12. 상대적 유전율은 액체 암모니아 처리시간이 길수록 떨어졌다.
13. 열전달계수는 소나무는 처리시간이 길수록 증가하였으나, 은사시나무는 일정한 경향을 나타내지 않았다.
14. 소나무와 은사시나무 모두 액체 암모니아 처리시간이 증가함에 따라 초음파 전달속도는 감소하고 밀도는 증가하였으며 따라서 동탄성계수는 감소하였다. 이 같은 감소경향은 소나무 보다 은사시나무가 더욱 현저하다.
15. 액체 암모니아 처리 침엽수재의 최대인장변형율은 수종간 큰 차이 없이 10~12%로 가소성이 매우 높았다. 그러나 활엽수재는 수종간 큰 차이를 보였는데 비중이 낮은 오동나무가 평균 18.9%로 가장 컸으며 플라타너스가



4.9%로 가장 낮았다.

16. 암모니아 처리 헝가공재로 장식용 숯을 만들 수 있었다.

17. 오리나무와 파닥의 액체 암모니아 헝가공 소재를 이용하여 가구를 비롯하여 몇 가지 작품을 만들어 전시회를 개최하여 호평을 받았다.

## 제15절 참고문헌

- Antti, A.L. 1992. Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction. *Forest Products Journal* 42(6):49-54
- Antti, A.L. 1995. Microwave drying of pine and spruce. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53:333-338
- Arato, I. . 1975. Wood treatment with ammonia. (1). Changes in wood characteristics. *Faipar* 25: 9: 274-281
- Bach, L. . 1974. Rheological properties of Beech wood in the ammonia-plasticized state. *Materials Science and Engineering* 15: 2/3: 211-220
- Coles, RW. JCF. Walker. 1978. Induced shrinkage and structural reorganisation in ammonia-treated wood of Corsican pine. *Wood and Fiber* 10: 1: 39-57
- Davidson, RW. WG. Baumgardt. 1970. Plasticizing wood with ammonia - a progress report. *For Prod J* 20(3): 19-25.
- Erin'sh, PP. IF. Kul'kevitsa. 1981. Studies on the nature of wood deformation with various plasticizing methods. 1. Plasticizing with water and liquid ammonia. *Khimiya Drevesiny* No. 3: 90-95
- Erin'sh, PP. IF. Kul'kevitsa. 1981. Studies on the nature of wood deformation with various plasticizing methods. 2. Plasticizing with ammonia at 20 deg C and in aqueous solution. *Khimiya Drevesiny* No. 5: 13-21

- Erin'sh, PP. IF. Kul'kevitsa. 1987. Effect of treatment conditions on the process of plasticization of birch wood with ammonia. *Khimiya Drevesiny* No. 3: 93-96
- Erin'sh, PP. MK. Yakobson. 1973. Change in the physical properties of Birch wood under the influence of ammonia. *Khimiya Drevesiny* No. 14: 130-135
- Helinska Raczkowska L. J. Raczkowski. 1983. Effect of pretreatment with aqueous ammonia on the swelling pressure of wood. *Holztechnologie* 24: 4: 227-231
- Hillis, WE. . 1984. High temperature and chemical effects on wood stability. Part I. General considerations. *Wood Science and Technology* 18: 4: 281-293
- Kums, U. L. Kulins J. Vitolins. 1981. Studies of the bending of hardwood fibreboards plasticized with ammonia. *Raksti Latvijas Lauksaimniecibas Akademija* No. 185: 54-58.
- Labsky, O. . 1975. Plasticization of wood with ammonia: the possibilities of its use in the manufacture of utility and decorative objects. *Drevo* 30: 2: 45-47
- Labsky, O. M. Sochor. 1974. Pre-plasticization of wood with ammonia. *Drevo* 29: 5: 137-140
- Mariska, M. C. Skaar RW Davidson. 1969. Studies of the wood-anhydrous ammonia system. *Wood Science* 2(2):65-73.
- Mariska, M. C. Skaar RW Davidson. 1970. Water sorption 'overshoot' in ammonia-treated wood. *Wood Science* 2(4):232-237.
- Mergin, EP. NS. Akhero AD. Yukna TA. Darzin'sh 1975. Change in the

- composition of the gaseous mixture during the treatment of Alder wood with ammonia vapour. *Khimiya Drevesiny* No.1: 96-100
- Necesany, V. O. Labsky. 1973. Changes in structure of ammonia-treated Beech wood. *Drevarsky Vyskum* 18: 4: 225-234
- Ozolinya, I. . 1981. Surface protective treatment of wood and veneer with monomers. *Raksti Latvijas Lauksaimniecibas Akademija* No. 185: 45-47.
- Pajtik, J. J. Ladomersky D. Berackova. 1984. Possibilities in the plasticization of wood for fibreboard production. *Drevo* 39: 11: 327-331
- Parameswaran, N. E. Roffael. 1984. State of knowledge and results of studies on the effect of ammonia treatment on wood particles. *Holz als Roh und Werkstoff* 42: 9: 327-333
- Rocens, K. . 1976. The rheological properties of wood plasticised with ammonia. *Holztechnologie* 17: 1: 40-45
- Rotsens, KA. AV. Berzon YaK. Gulbis. 1983. Characteristic features of improved wood. Riga Latvian SSR; Zinatne : 207 pp.
- Schuerch, Conrad. 1964. Wood plasticization. *For Prod J* 14(9):377-381.
- Sharma, SN. CN. Pandey HC. Kanojia 1988. Wood bending by vapour phase ammonia plasticization. *Indian Forester* 114(11): 752-760
- Sharma, SN. NR. Das AS. Gulati DP. Kukreti 1979. Observations on bending of liquor ammonia plasticized wood. *Holzforschung und Holzverwertung* 31: 3: 61-67
- Solar, R. I. Melcer. 1978. Physicochemical and chemical changes of hornbeam wood lignin in the process of wood plasticization with

- ammonia water solution. Cellulose Chemistry and Technology 12: 5: 615-619
- Varga, F. H. Foldi. 1989. Softening of wood by ammonia treatment. Acta Facultatis Ligniensis : 67-69.
- Wienhaus, O. G. Kuhne H. Pecina G. Szoka 1978. Chemical modification of wood particles for the purpose of improving the properties of wood-based materials. Holztechnologie 19: 4: 224-231
- Zielonka, P. et al. 1997. The comparison of experimental and theoretical temperature distribution during microwave wood heating. Holz als Roh- und Werkstoff 55:395-398
- Zoldners, YuA. EE. Changa. 1981. Effect of organic solvents on the swelling of wood cell walls in styrene. Khimiya Drevesiny No. 5: 30-34
- 강호양. 1998. 침·활엽수재의 Microwave 건조곡선 예측. 목재공학회지 26(4):34-42
- 강호양. 2001. 단척 통나무와 선반가공목의 마이크로웨이브-진공 건조. 목재공학회지 49(4):인쇄중
- 소원택, 정희석. 1990. 양버즘나무의 소재 및 집성곡목제조에 관한 연구(I)-증자에 의한 소재휩가공성-. 목재공학 18(2):8-15.
- 소원택, 채정기. 1995. 국산재 곡목가구 제조를 위한 Microwave-heating System 활용에 관한 연구(I)-Microwave-heating에 의한 아까시나무의 소재휩가공특성-. 목재공학 23(3):73-81.
- 소원택. 1997. 국산재 곡목가구 제조를 위한 Microwave-heating System 활용에 관한 연구(II)-Microwave-heating에 의한 서어나무의 소재 휩가공 특성-. 목재공학 25(2):52-60.

# 부 록

# 여 백

부록 1. 여러 수종의 복원력 비교

시 편	함수율(%)			늘어난 길이 (mm)
	증습 전	증습 후	차이	
오동나무-암1	9.8%	15.7%	5.9%	3
오동나무-암2	9.9%	14.7%	4.8%	2
오동나무-암3	10.1%	15.2%	5.2%	4
오동나무-암4	10.1%	14.8%	4.8%	3
오동나무-암5	9.9%	14.7%	4.8%	0
느티나무-암1	10.1%	15.5%	5.4%	6
느티나무-암2	10.2%	15.8%	5.6%	13
느티나무-암3	10.3%	15.5%	5.2%	5
느티나무-암4	10.4%	15.9%	5.5%	17
느티나무-암5	10.2%	16.0%	5.8%	15
은사시나무-암1	10.1%	15.2%	5.1%	4
은사시나무-암2	10.0%	16.1%	6.0%	5
은사시나무-암3	10.1%	15.3%	5.2%	6
은사시나무-암4	10.8%	16.4%	5.7%	4
은사시나무-암5	10.1%	15.0%	4.9%	0
자작나무-암1	10.5%	17.3%	6.9%	18
자작나무-암2	10.7%	16.4%	5.7%	20
자작나무-암3	10.7%	16.6%	5.9%	10
자작나무-암4	10.6%	16.7%	6.2%	25
자작나무-암5	10.7%	17.2%	6.5%	17
벚나무-암1	10.7%	16.2%	5.5%	12
벚나무-암2	10.9%	16.2%	5.3%	25
벚나무-암3	10.9%	15.8%	4.9%	11
벚나무-암4	10.8%	16.0%	5.2%	8
벚나무-암5	10.7%	16.0%	5.3%	5



부록 1. 여러 수종의 복원력 비교 (계속)

시편	함수율(%)			늘어난 길이 (mm)
	증습 전	증습 후	차이	
오리나무-암1	10.9%	16.1%	5.2%	0
오리나무-암2	11.2%	16.0%	4.8%	0
오리나무-암3	10.7%	16.0%	5.3%	3
오리나무-암4	10.9%	16.1%	5.2%	2
오리나무-암5				
밤나무-암1	11.4%	17.5%	6.1%	-3
밤나무-암2	11.2%	17.3%	6.1%	-3
밤나무-암3	11.4%	17.4%	6.0%	1
밤나무-암4				
밤나무-암5				
벚나무-중1	9.3%	15.4%	6.1%	53
벚나무-중2	9.2%	15.1%	6.0%	45
벚나무-중3	9.3%	15.1%	5.9%	42
벚나무-중4	9.2%	14.6%	5.4%	44
벚나무-중5	9.1%	14.7%	5.6%	50
자작나무-중1	9.9%	16.1%	6.2%	22
자작나무-중2	9.8%	16.1%	6.3%	29
자작나무-중3	9.8%	16.0%	6.3%	22
자작나무-중4	9.7%	15.8%	6.2%	27
자작나무-중5	9.8%	15.9%	6.1%	28

부록 2. 소나무와 은사시나무 액체 암모니아처리 소재의 특성

시 편	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	유전율(%)	열전도도 (kcal/mhC)	초음파전달 속도(m/s)
소나무				
PN0-1	0.515	13	0.193	3614
PN0-2	0.517	13.5	0.207	3419
PN0-3	0.500	13.5	0.196	3446
PN0-4	0.496	13.5	0.181	3513
PN0-5	0.493	13	0.184	3415
PN4-1	0.542	14.5	0.199	3084
PN4-2	0.538	15.5	0.202	3254
PN4-3	0.522	11.5	0.174	3529
PN4-4	0.541	13.5	0.175	3329
PN4-5	0.526	12.5	0.178	3189
PN18-1	0.561	14.5	0.192	3163
PN18-2	0.555	12.5	0.191	3298
PN18-3	0.548	12.5	0.174	3224
PN18-4	0.547	12.5	0.182	3218
PN18-5	0.545	12	0.182	3118
은사시나무				
PL0-1	0.404	10.0	0.164	3966
PL0-2	0.394	9.0	0.155	4101
PL0-3	0.397	10.0	0.170	3915
PL0-4	0.331	5.0	0.125	3917
PL0-5	0.345	7.5	0.140	3944
PL4-1	0.429	9.0	0.147	3919
PL4-2	0.415	8.5	0.162	3787
PL4-3	0.409	8.5	0.158	3402
PL4-4	0.369	7.5	0.123	3733
PL4-5	0.385	8.5	0.141	3536
PL18-1	0.449	8.5	0.166	3609
PL18-2	0.441	9.0	0.158	3564
PL18-3	0.365	5.0	0.136	3819
PL18-4	0.380	4.5	0.136	3605
PL18-5	0.401	5.5	0.153	3302

부록 3. 소나무와 은사시나무 액체 암모니아처리 소재의 함수율 변화

시편번호	액체암모니아 처리 후	증습 후	건조 후
소나무			
PN0-1	10.8%	17.3%	5.5%
PN0-2	11.1%	17.8%	5.5%
PN0-3	11.1%	17.8%	5.5%
PN0-4	10.8%	17.8%	5.5%
PN0-5	10.5%	17.6%	5.4%
PN4-1	12.0%	19.4%	5.4%
PN4-2	12.3%	19.8%	5.3%
PN4-3	12.1%	19.9%	5.5%
PN4-4	12.4%	19.7%	5.7%
PN4-5	12.2%	19.6%	5.5%
PN18-1	11.8%	20.0%	5.5%
PN18-2	11.8%	20.1%	5.5%
PN18-3	11.8%	20.1%	5.5%
PN18-4	12.1%	20.0%	5.6%
PN18-5	11.9%	19.9%	5.4%
은사시나무			
PL0-1	11.3%	19.0%	4.9%
PL0-2	11.5%	19.6%	5.0%
PL0-3	11.4%	-	4.8%
PL0-4	11.2%	19.3%	4.6%
PL0-5	11.2%	19.3%	4.7%
PL4-1	12.1%	20.5%	4.9%
PL4-2	12.1%	20.9%	5.0%
PL4-3	12.6%	21.2%	4.9%
PL4-4	12.6%	21.4%	5.0%
PL4-5	12.5%	21.3%	4.9%
PL18-1	11.8%	21.0%	5.0%
PL18-2	12.6%	-	5.1%
PL18-3	12.1%	21.3%	4.9%
PL18-4	12.0%	21.3%	5.1%
PL18-5	12.0%	21.1%	5.0%

부록 4. 수종별 곡률반경과 인장변형율

수 종	시편두께 (mm)	최소곡률반경 (mm)	인장변형율(%)		
				평균	
침엽수	낙엽송-1	5.14	27.6	9.3	10.2
	낙엽송-2	5.28	27.6	9.6	
	낙엽송-3	5.65	27.8	10.2	
	더글라스퍼-1	4.57	22.3	10.3	10.8
	더글라스퍼-2	4.28	22.1	9.7	
	더글라스퍼-3	4.83	22.4	10.8	
	더글라스퍼-4	5.2	27.6	9.4	
	리기테다-1	5.92	33.0	9.0	11.8
	리기테다-2	5.23	27.6	9.5	
리기테다-3 (incising)	9.4	39.7	11.8		
활엽수	느티나무-1	5.61	27.8	10.1	10.1
	느티나무-2	5.7	32.9	8.7	
	느티나무-3	5.4	32.7	8.3	
	느티나무-4	5.28	32.6	8.1	
	느티나무-5	5.4	32.7	8.3	
	밤나무-1	5.77	42.9	6.7	6.7
	밤나무-2	5.66	42.8	6.6	
	벚나무-1	4.58	27.3	8.4	8.7
	벚나무-2	4.74	27.4	8.7	
	벚나무-3	4.37	27.2	8.0	
벚나무-4	4.01	27.0	7.4		

부록 4. 수종별 곡률반경과 인장변형율 (계속)

수 종	시편두께 (mm)	최소곡률반경 (mm)	인장변형율(%)		
			개별	평균	
활엽수	오동나무-1	4.45	22.3	10.4	18.9
	오동나무-2	4.58	22.5	10.9	
	오동나무-3	4.85	22.4	10.6	
	오동나무-4	4.67	22.3	10.5	
	오동나무-5	4.74	17.5	14.1	
	오리나무-1	4.62	16.8	10.9	10.6
	오리나무-2	4.9	16.8	10.4	
	오리나무-3	4.75	17.1	12.5	
	오리나무-4	4.68	17.0	11.5	
	은사시나무-1	4.93	27.3	8.3	11.9
	은사시나무-2	3.66	27.6	9.4	
	은사시나무-3	3.5	27.5	9.2	
	은사시나무-4	4.29	32.4	7.4	
	은사시나무-5	3.9	63.0	4.8	
	자작나무-1	4.53	52.7	5.0	8.6
	자작나무-2	5.19	25	10.4	
	자작나무-3	5.07	25	10.1	
	자작나무-4	4.77	30	8.0	
	플라타너스-1	6.04	60	5.0	4.9
	플라타너스-2	5.3	50	5.3	

부록 5. 소나무 각재 휨가공을 위한 kerf 깊이 자료

각재두께(D) (mm)	내측곡률반경 (r)(mm)	실제두께(d) mm	kerf 깊이(k) (mm)	인장변형율 ( $\epsilon$ )(%)
5	20	5	0	11.1%
5	30	5	0	7.7%
5	40	5	0	5.9%
5	50	5	0	4.8%
10	20	6	4	11.1%
10	30	8	2	11.1%
10	40	10	0	11.1%
10	50	10	0	9.1%
15	20	7	8	11.1%
15	30	10	5	12.5%
15	40	12	3	12.2%
15	50	14	1	12.1%
20	20	8	12	11.1%
20	30	11	9	12.4%
20	40	13	7	12.1%
20	50	15	5	12.0%
25	20	10	15	12.5%
25	30	12	13	12.2%
25	40	14	11	12.1%
25	50	16	9	11.9%

부록 5. 소나무 각재 휨가공을 위한 kerf 깊이 자료 (계속)

각재두께(D) (mm)	내측곡률반경 (r)(mm)	실제두께(d) mm	kerf 깊이(k) (mm)	인장변형율 ( $\epsilon$ )(%)
30	20	11	19	12.4%
30	30	13	17	12.1%
30	40	15	15	12.0%
30	50	17	13	11.9%
35	20	12	23	12.2%
35	30	14	21	12.1%
35	40	16	19	11.9%
35	50	18	17	11.8%
40	20	13	27	12.1%
40	30	15	25	12.0%
40	40	17	23	11.9%
40	50	20	20	12.5%
45	20	14	31	12.1%
45	30	16	29	11.9%
45	40	18	27	11.8%
45	50	21	24	12.4%
50	20	15	35	12.0%
50	30	17	33	11.9%
50	40	20	30	12.5%
50	50	22	28	12.4%