

발간등록번호

11-1541000-001480-01

국산 간벌 소경재를 이용한 한옥건축용
다중접착접합부재의 개발

(Development of multi-layer glued members used for
construction of Korean-style houses by utilizing thinned
domestic small logs)

주관기관: 경민산업(주)

농림수산식품부

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업 (*자유공모과제*)의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업 (*자유공모과제*)의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “국산 간벌 소경재를 이용한 한옥건축용 다중접착접합부재의 개발” 과제의
보고서로 제출합니다.

2012년 6월 30일

주관연구기관명 : 경민산업(주)

주관연구책임자 : 이 경 호

세부연구책임자 : 이 경 호

연 구 원 : 정 재 홍

위탁연구기관명 : 전남대학교

위탁연구책임자 : 정 우 양

협동연구기관명 : 충남대학교

협동연구책임자 : 장 상 식

요 약 문

I. 제 목: 국산 간벌 소경재를 이용한 한옥건축용 다중접착접합부재의 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

이 연구는 현재 산속에 버려지거나 칩이나 펠릿, 연료 등과 같이 부가가치가 낮은 용도로만 사용되고 있는 국산 소경 간벌재를 보다 고부가가치의 용도인 한옥 건축자재용 다중접착접합부재로 개발하기 위하여 수행하였다. 이 연구를 통하여 개발된 국산 소경재를 사용한 다중접착접합부재는 대단면 목구조 특히 한옥건축용 기둥과 보와 같은 구조용재로 사용될 수 있으며 이를 통하여 국산 간벌재의 경제적 가치를 높이고 간벌목의 탄소수명을 연장시키며 국산재로 만들어지는 우수한 품질의 한옥건축자재를 공급할 수 있는 시스템을 갖추고자 한다.

III. 연구개발 내용 및 범위

이 연구에서는 국산 소경재의 최적 제재기술을 개발하고 소경각재의 최적 건조기술을 개발하며 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 기술과 소경각재를 가로 및 세로방향으로 접착 접합하여 기둥 및 보로 사용할 수 있는 다중접착접합부재를 개발하였다. 개발된 다중접착접합부재의 허용압축응력과 허용휨응력을 측정하였으며 핑거조인트 소경각재의 허용휨응력도 측정하였다. 이를 통하여 다중접착접합부재 기둥과 보를 설계하는 기술을 개발하였으며 기둥과 보 사이의 접합부를 다양한 형태와 종류로 개발하고 그 전단성능과 회전모멘트 저항성능을 평가하였다.

IV. 연구개발결과

이 연구개발의 결과로 낙엽송, 편백 및 잣나무 소경재를 활용하여 소경각재를 생산하였고 두꺼운 소경각재 사이의 핑거조인트 기술을 개발하였으며 다시 이들을 사용하여 다중접착접합부재를 생산할 수 있는 기술을 개발하였다. 다중접착접합부재 기둥과 보 접합부를 다양한 형태 및 종류로 개발하였고 이들의 전단성능과 회전모멘트 저항성능을 측정하여 이 접합부들을 적용한 한옥구조의 설계에 활용할 수 있도록 하였다.

V. 연구 성과 및 성과활용 계획

이 연구의 성과는 일부 지적재산권을 출원하고 논문으로 발표하였으며 연구의 결과는 경민산업(주)를 통하여 산업화 및 실용화할 계획이다.

SUMMARY

(영문요약문)

This research has been performed to use domestic small logs for value-added products and usage such as multi-layer glued members used as structural members for Korean-style houses rather than using them for low-value products such as chips, pallets and fire wood. Through this research, technology to produce multi-layer glued members from domestic thinned small logs will be developed. Such multi-layer glued members can be used as columns and beams for heavy timber construction such as Korean-style houses. This research may contribute to increase the economic values of domestic thinned small logs, to prolong carbon life of domestic lumbers, and to supply structural lumber having high quality and produced from domestic small logs.

In this research, the optimum sawing and drying technology for domestic small logs has been developed and the technology to produce finger joints with thick small square lumbers also has been developed. The technology to produce multi-layer glued members by using small square lumbers has been developed, which can be used as columns and beams for Korean-style houses. The allowable compressive and bending stresses for developed multi-layer glued members have been evaluated. The technology for structural design of columns and beams by using multi-layer glued members also has been developed. Various type of connections between multi-layer glued column and beam members have been developed and their stiffness, strength and moment-resisting properties were evaluated.

The results of this research can be used to design the Korean-style houses and to supply structural members for construction of Korean-style houses.

CONTENTS

(영 문 목 차)

Chapter 1 Introduction

Chapter 2 Current domestic and foreign status of technology development

Chapter 3 Contents and results of research

Item 1 Research topic 1: Development and industrialization of multi-layer glued members for Korean-style houses by using domestic thinned small logs

1. The 1st year's topic: Development of sawing and drying technology for domestic thinned small logs, and multi-layer glued column and beam members

(1) Scope

(2) Materials

(3) Development of the optimum sawing technology for domestic thinned small logs

(4) Development of the optimum drying technology for small square lumbers sawn from domestic thinned small logs

(5) Development of multi-layer glued columns by using domestic thinned small logs

(6) Development of multi-layer glued beams by using domestic thinned small logs

(7) Standard dimensions for multi-layer glued members produced from domestic small square lumbers

(8) Discussion on the glues traditionally used for Korean-style houses

1-A. Contracted topic: Evaluation of adhesive and environmental properties of multi-layer glued members

(1) Scope

(2) Materials and method

(3) Test results

2. The 2nd year's topic: Development of connection and strengthening technology for multi-layer glued members

(1) Scope

(2) Test materials

- (3) Development of connection technology between multi-layer glued columns and beams
- (4) Development of connections between empty multi-layer glued members
- (5) Development of strengthening technology for multi-layer glued members
- (6) Quality increase of finger joints between thick small square lumbers
- (7) Development of multi-layer glued members by using small Korean nut pine logs
- (8) Analysis of the economical efficiency for between multi-layer glued members

Item 2 Cooperative research: Evaluation of strength properties of multi-layer glued members produced from domestic thinned small logs

1. The 1st year's topic: Evaluation of compressive and bending properties of multi-layer glued columns and beams produced from domestic thinned small logs

- (1) Scope
- (2) Materials and method
- (3) Test results
- (4) Discussions

2. The 2nd year's topic: Evaluation of the strength properties of connections between multi-layer glued members

- (1) Scope
- (2) Materials and method
- (3) Test results
- (4) Discussions

Chapter 4 Achievement of the research objectives and contribution to the related field

Chapter 5 Outcomes of the research and plans for utilization of the outcomes

Chapter 6 Foreign scientific and technological information collected during the research

Chapter 7 References

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 세부과제: 국산 소경 간벌재를 이용한 한옥건축용 다중접착접합부재의 개발 및 실용화

1. 1차년도 연구과제: 국산 소경 간벌재의 제재 및 건조기술과 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 개발

가. 개발 내용 및 범위

나. 시험재료

다. 국산 소경 간벌재의 최적 제재기술 개발

라. 국산 소경 간벌재로부터 제재된 소경각재의 최적 건조기술 개발

마. 국산 소경각재를 이용한 다중접착접합 기둥부재의 개발

바. 국산 소경각재를 이용한 다중접착접합 보 부재의 개발

사. 국산 소경각재를 이용한 다중접착접합부재의 표준 치수

아. 한옥건축에 사용되던 우리나라 전통 접착제에 대한 고찰

1-A. 위탁과제: 다중접착접합부재의 접착성능 평가 및 친환경성 평가

가. 연구개발 내용 및 범위

나. 재료 및 방법

다. 시험 결과

2. 2차년도 연구과제: 다중접착접합부재의 접합 및 보강기술 개발

가. 개발 내용 및 범위

나. 시험재료

다. 다중접착접합 기둥과 보 사이의 접합기술 개발

라. 중공다중접착접합부재 접합부의 개발

마. 다중접착접합부재의 보강기술 개발

바. 소경각재 핑거조인트의 품질 향상

사. 잣나무 소경재를 사용한 다중접착접합부재의 개발

아. 다중접착접합부재의 경제성 분석

제 2절 협동과제: 국산 소경 간벌재를 이용한 다중접착접합부재의 강도 성능 평가

1. 1차년도 연구과제: 소경각재 및 다중접착접합부재의 기동 압축강도 및 휨 강도 평가

가. 개발 내용 및 범위

나. 재료 및 방법

다. 시험 결과

라. 연구결과의 검토 및 분석

2. 2차년도 연구과제: 다중접착접합부재 접합부의 성능 평가

가. 개발 내용 및 범위

나. 재료 및 방법

다. 시험 결과

라. 연구결과의 검토 및 분석

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 연구개발과제의 개요

우리나라에 현대식 목조건축이 보급되고 20년 이상이 경과한 현 시점에서 일반인들의 목조건축에 대한 인식이 개선되어 목조건축 시장이 크게 확대되어 왔다. 특히 재작년부터 시작된 세계적인 경제위기 속에서 우리나라도 경제위기를 겪었으며 이로 인하여 전체적인 건축경기가 위축되어 주거용 건축호수가 크게 감소하였으나 목조건축은 오히려 재작년 및 작년에 크게 증가하여 연간 5,000세대 정도의 건축에서 10,000세대 이상으로 증가되는 현상을 나타내었다. 이는 우리나라 사람들의 목조건축에 대한 관심과 환경 및 인체친화형 주거에 대한 선호도를 나타내는 것이며 이러한 현상은 앞으로도 계속 지속될 것으로 예상된다.

우리나라 정부도 전 세계적인 에너지 절약과 급격한 기후변화의 지연 또는 차단이라는 명제에 발맞추어 저탄소 녹색성장을 미래의 성장 방향으로 정하고 모든 분야에서 이에 적합한 방향을 설정하여 추진하고 있다. 우리나라에서 전체 에너지의 1/3 이상이 건축물을 통하여 소모되고 있기 때문에 국가 차원의 에너지 절약과 저탄소 녹색성장을 달성하기 위해서는 건축물의 에너지 절감이 필수적인 요소라고 할 수 있다. 이를 위하여 정부에서는 높은 단열성능을 지닌 그린홈 건축을 장려하며 탄소제로 주택의 건축을 권장하고 있다. 이와 더불어 정부와 지방자치단체들은 우리나라의 전통 주거형태인 한옥의 건축을 장려하고 있으며 이를 통하여 국민들의 문화적 자부심과 긍지를 일깨워주고 주거환경과 삶의 질 개선을 달성하고자 하고 있다. 이러한 한옥 건축은 주로 호남 및 영남지방을 중심으로 먼저 시작되었으며 다른 지방자치단체들도 이에 동참하거나 동참할 준비를 하고 있고 국토해양부에서도 신한옥 사업 추진을 통하여 한옥을 현대적으로 해석한 주거형태를 제시하고 이를 보급하기 위하여 노력하고 있다.

그러나 정부 및 지방자치단체의 한옥 장려정책은 현재까지는 그렇게 성공적이지 못하며 호남 및 영남지방을 중심으로 먼저 추진하였던 한옥건축 장려정책이 무분별한 수입목 및 생재 건축자재의 사용과 부재 사이의 접합방법의 문제 등으로 인하여 건축된 한옥 주택 부재가 뒤틀리거나 갈라지는 등 많은 하자들이 발생함으로써 오히려 한옥에 대한 신뢰도를 감소시키는 역효과를 나타내고 있다. 그동안 한옥의 현대화를 위하여 많은 연구들이 이루어져서 대청마루의 구조개선 및 밀폐, 내부 공간 배치의 현대화, 온돌구조의 개선, 문과 창문의 현대화, 화장실의 현대화 등 디자인 측면에서는 많은 진전을 이루었으나 가장 기본적인 한옥 건축부재에 대한 연구 개발이 소홀하였다. 대경 국산재의 부족으로 수입목이 사용되고 그나마 건조 및 마감이 제대로 이루어지지 않은 생재 상태의 제재목들이 그대로 사용됨으로써 건축 후 1년 이상의 시간 경과에 따라서 서서히 건조가 진행되며 사용 중인 건축물에서 뒤틀림이나 갈라짐 등의 많은 건조결함들이 나타나고 이로 인하여 건축물의 안전성, 내구성 및 마감품질에 치명적인 문제점을 드러내었다.

더군다나 일부 건축업체들은 일본의 precut 공법 및 자재를 도입하여 이것이 마치 신한옥 건축물인양 선전하며 주택을 건축하고 있는데 우리나라 문화유산의 핵심인 한옥 건축에서 이러한 일본 자재 및 공법의 수입은 어떠한 변명으로도 결코 정당화될 수 없는 처사라고 할 수 있다. 일부 지방자치단체들은 이러한 건축업체들과 연계하여 일본산 자재를 일본에서 가공하여 일본 공법으로 건축한 것을 한옥이라고 보급하고 있으며 오히려 이러한 건축을 장려하는

지방자치단체 및 기관들도 있는 실정이다. 이러한 현실 속에서 국토해양부의 신한옥사업단은 한옥 건축의 가장 큰 문제점 중의 하나인 국산 건축부재 개발에 대한 투자에 아직도 소극적이며 한옥 건축부재가 한옥의 품질에 미치는 영향에 대한 중요성을 아직 인식하지 못하고 있다.

한옥의 건축부재는 외형적인 웅장함을 나타내기 위하여 구조적으로 필요한 치수 이상의 큰 단면이 사용되고 있으며 이로 인하여 제재목 구조부재의 건조가 불가능하여 대부분의 경우에 생채 상태 그대로 사용되거나 단기간의 자연건조를 통하여 표면만 건조된 상태의 부재들이 사용되고 있다. 이러한 부재들은 건축된 상태에서 시간이 지나면 서서히 자연 건조되고 건조과정에서 부재의 수축이 방향에 따라서 서로 다르게 나타나기 때문에 뒤틀림, 갈라짐 등의 건조결합이 발생하며 이로 인하여 외형의 손상, 창이나 문 등의 개폐 불량, 건축 마감면의 뒤틀림 및 갈라짐, 전선이나 상하수도 배관의 눌림 등과 같은 하자들이 발생하게 된다.

생채 상태의 목재 건축자재를 사용한 건축물에서 생기는 이러한 하자들은 생채를 사용함으로써 생기는 필연적인 결과이지만 이로 인하여 한옥 자체에 대한 신뢰도가 떨어지는 결과가 초래되어 지방자치단체에서 장려금 및 보조금을 지급함에도 불구하고 오히려 일반인들이 한옥 건축을 기피하는 결과가 초래되고 있다. 이러한 문제는 한옥 건축에 건조된 건축자재를 사용하고 사용 중에도 건축부재의 건조 상태를 그대로 유지할 수 있는 방안을 강구하지 않으면 근본적인 해결을 기대하기 어렵다. 더군다나 우리나라 전통 문화의 핵심이라고 할 수 있는 한옥을 수입목, 수입 자재, 수입 기술 등과 같이 외국의 자재 및 기술에 의존하여 건축하는 것은 우리나라만의 문화에 대한 자부심과 긍지의 손상으로 나타날 수 있으며 이는 국가의 백년대계 측면에서도 결코 바람직하지 않다고 할 수 있다.

이 연구에서는 이러한 한옥 건축의 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 우리나라에서 생산되지만 현재 고부가가치의 용도가 개발되지 않아서 단순한 펠릿제조 또는 화목용으로 사용되고 있는 소경재를 사용하여 제재, 건조 및 접합하여 큰 단면의 부재를 생산하고 이를 사용하여 한옥 건축을 할 수 있는 방법과 기술을 개발하고자 한다. 현재 생산되고 있는 국산 간벌재는 지름이 120mm~180mm로서 비교적 작기 때문에 하나의 부재로 한옥 건축을 위한 기둥이나 보 부재(단면치수 150mmx150mm 이상)를 생산할 수는 없지만 작은 단면 부재(80mmx80mm 또는 98mmx90mm)를 제재, 건조 및 대패 마감하여 생산한 후 접착을 실시하여 150mmx150mm 이상의 치수를 갖는 부재로 생산하는 방법을 통하여 양질의 한옥 건축부재를 국산재로 공급할 수 있을 것으로 기대된다. 작은 단면의 부재는 건조가 용이하여 짧은 시간에 건조가 가능하며 접착과 철물 접합을 통하여 원하는 치수로 접합이 가능하고 건조된 부재를 사용함으로써 건조결합의 발생 가능성을 근본적으로 차단할 수 있는 이점이 있다.

우리나라의 대부분의 산림은 조림 후 3벌기령에서 4벌기령에 도달하게 되며 과거에 전국적인 조림정책을 통하여 심어졌던 많은 목재자원들이 이 경급에 해당하여 원자재의 공급에도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 특히 각 지방마다 낙엽송, 잣나무, 리기다 소나무, 편백 등과 같은 수종들의 간벌재가 다량 생산될 것으로 예상되며 이러한 간벌재들은 현재 특별한 소비시장이 없어서 저가의 칩으로 가공되어 MDF나 PB 공장의 원자재로 공급되거나 연료용 펠릿 제조에 사용되고 있는 실정이다. 따라서 이 연구를 통하여 이러한 간벌재들의 고부가가치 용도를 개발함으로써 간벌재 생산에도 경제성을 부여할 수 있고 이를 통하여 간벌이 촉진됨으로써 남아있는 산림의 형질 개선에도 도움이 될 것으로 판단된다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

과거에는 주로 목재를 제재목으로만 사용하였으나 최근 10 ~ 15년 사이에 국내에서도 접착제 및 접착기술이 많이 발전하면서 집성재 또는 집성목의 사용이 증가하고 있다. 집성재는 작은 치수의 제재목(층재)를 각각 제재, 건조, 대패마감 및 접착하여 보다 큰 치수의 부재로 만들어서 사용하는 부재를 의미한다. 이러한 집성재의 제조 시에 각각의 층재에 대한 등급 구분을 하고 집성재를 제조할 때에 층재의 등급을 고려하여 층재 배치를 조정함으로써 구조성능을 향상시킨 제품을 구조용 집성재로 분류한다. 국내의 구조용 집성재 산업은 KS F 3021(구조용 집성재) 표준이 제정되면서 최근 10년 사이에 비약적인 발전을 거듭하였다.

초기에는 대부분의 구조용 집성재가 외국으로부터 수입되거나 또는 외국에서 수입된 목재들을 사용하여 구조용 집성재를 제조하였으나 점차 국산목재의 공급이 늘어나고 국산 목재를 사용한 건축물에 대한 수요가 증가하면서 국산재를 사용한 구조용 집성재의 제조도 점차 증가하고 있다. 국내에서 구조용 집성재를 제조하기 위한 층재의 등급구분과 집성재 제조용 접착제의 개발 그리고 구조용 집성재를 사용한 구조설계 기법 개발 등의 연구가 진행된 바 있으며 구조용 집성재의 내화성능을 평가하고 그 결과를 바탕으로 KS F 1611-3(건축 구조 부재의 내화성능 표준 - 제 3부: 구조용 집성재 보 및 기둥)이 제정됨으로써 구조용 집성재를 사용하여 다세대 고층 건축물을 건축할 수 있는 토대를 마련하였다.

이러한 구조용 집성재에 대한 연구는 국내보다는 미국, 일본, 캐나다, 유럽 등의 외국에서 더욱 활발하게 이루어져 왔다. 특히 미국이나 유럽의 경우에는 1950년대부터 구조용 집성재에 대한 연구 및 실용화가 이루어져 왔으며 체육관, 박물관, 경기장, 전시장 등의 대규모 건물들이 구조용 집성재로 건축되고 있다. 구조용 집성재 건축물에 대한 연구는 크게 집성부재 자체에 대한 연구와 부재와 부재 사이의 접합부에 대한 연구로 구분될 수 있다. 구조용 집성재는 주로 대규모 건축물에 사용되기 때문에 구조설계 측면에서 상자형 구조보다는 기둥-보 구조의 관점에서 설계가 이루어져야 한다. 기둥-보 구조에서 수직 하중은 보 및 기둥을 통하여 위에서 아래로 전달되며 수평하중은 기둥과 보 사이의 접합부의 모멘트저항 성능을 통하여 지지된다. 따라서 기둥-보 구조에서는 기둥이나 보 부재 자체의 강도 또는 강성도 중요하지만 수평하중 지지를 위해서는 회전 모멘트에 대하여 강한 저항성능을 지닌 접합부의 개발이 필수적인 사항이라고 할 수 있다. 과거에는 집성재 부재 자체에 대한 연구가 많이 이루어졌지만 최근에 들어서는 연구 및 기술개발의 초점이 점차 접합부로 옮겨지고 있으며 강성접합부의 개발을 최종 목표로 많은 연구들이 이루어지고 있다.

최근 전 세계적으로 대단면 목구조에 대한 연구는 거의 전체 연구의 2/3 정도가 접합부에 대한 연구 그 중에서도 특히 강성접합부의 개발에 집중되어 있다. 그러나 목재 자체가 그렇게 강도가 높지 못하며 특히 섬유직각방향 압축이나 인장에 대한 저항력이 매우 취약하기 때문에 아무리 철판이나 철판으로 보강을 하더라도 실질적으로 철판구조와 같이 강성접합부를 만들기는 매우 어려운 실정이다. 우리나라에서도 최근에 대단면 목구조에 대한 연구는 접합부에 대한 연구로 초점이 옮겨지고 있으며 이러한 연구의 결과를 바탕으로 KS F 9008(구조용 집성재의 접합부 시공표준)이 제정되기도 하였다. 국내에서는 이러한 KS 표준의 제정과 함께 구조용 집성재를 사용한 기둥-보 구조의 구조설계기술을 반영한 건축구조기준(KBC 2009)이 국토해양부 고시로 제정되었으며 또한 대단면 목구조의 시공표준을 포함하는 건축공사표준시방서가 2012년에 새롭게 개정되기도 하였다.

이상에서 언급된 구조용 집성재는 지름이 크게 자란 성숙재로부터 제재된 목재 층재들을 사용하여 제조되는 구조부재로서 층재의 등급구분부터 층재의 배치, 집성재의 종류, 등급 및 허용응력 등이 모두 표준화되어 있다. 따라서 국내에서 생산되는 대경재들은 제재, 건조, 마감 및 등급구분을 거쳐서 구조용 집성재 제조를 위한 층재로 충분히 사용될 수 있다. 그러나 이러한 구조용 집성재 제조를 위한 층재로 가공하기가 어려운 국산 소경재들의 경우에는 아직까지 뚜렷한 용도나 가공기술 등이 개발되고 있지 않은 실정이다. 국산 소경재를 고부가가치로 활용할 수 있는 용도나 기술이 개발되지 않은 상태에서 현재 소경재들은 주로 MDF, PB 또는 펄프용 칩 생산에 사용되거나 연료용 펠릿 생산 또는 화목 등과 같이 저부가가치의 용도에 주로 사용되고 있는 실정이다.

목재자원을 가장 효율적으로 사용하기 위해서는 원목을 그대로 또는 제재목과 같은 1차 가공 상태로 사용하고 그 사용수명기간이 다 되고 원목 또는 제재목 상태로 재활용하기가 어려운 경우에 칩으로 가공되어 MDF 또는 PB로 활용되고 그 이후에 숯으로 가공하여 사용하거나 연료용으로 사용하는 것이 바람직한 목재자원의 순환 사이클이라고 할 수 있다. 이러한 목재자원의 선순환 사이클을 따라서 목재가 사용될 때에 또한 목재 내에 저장된 탄소도 오랜 시간동안 그대로 저장될 수 있기 때문에 탄소수명이 길어지고 이를 통하여 목재자원의 탄소저장능력을 인정받을 수가 있게 될 것이다. 이러한 목재자원의 선순환구조 측면에서도 소경재를 바로 칩이나 연료용으로 사용하는 것은 바람직하지 못하며 이러한 용도로 소경재를 사용하게 되면 목재에 저장된 탄소가 바로 공기 중으로 방출됨으로써 우리나라 정부 및 전 세계적인 이산화탄소 방출량 감소를 위한 노력에도 역행하는 처사가 될 것이다.

미국의 경우에는 미국임산물연구소를 중심으로 20여년전부터 소경재를 고부가가치 용도의 건축용으로 활용하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구가 이루어진 배경도 위에서 언급한 바와 같이 비록 소경 간벌재일지라도 소중한 목재자원을 보다 고부가가치의 용도로 활용하고자 하는 목적에 바탕을 두고 있다. 미국임산물연구소의 소경재 활용을 위한 연구는 주로 소경재를 가공하지 않고 둥근 원목 상태로 활용하는 것에 초점을 맞추었으며 소경재를 이와 같이 원목 상태로 활용하는 용도는 토목용재가 주를 이루고 건축용재로서는 상당히 제한적이라고 할 수 있다. 일본의 경우에도 소경재를 토목용재로 활용하는 연구가 20여년전부터 이루어져 왔으며 소경재를 원주가공한 후 방부처리를 하여 울타리, 조정 및 토목용으로 활용하는 연구가 광범위하게 이루어졌다. 특히 토목용 중에서 사방공사나 하천의 제방이나 토사유출 방지댐, 흙 무너짐 방지댐 등의 용도로 해당 지역에서 생산된 간벌재를 사용하는 기술이 개발되고 실용화된 바 있다. 이러한 일본의 연구 결과는 우리나라에도 그대로 수입되어 국립산림과학원을 중심으로 국산 간벌재를 토목용으로 사용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 소경재의 용도로서 토목용 목재는 연료용보다는 낫지만 그래도 고부가가치 용도라고 하기에는 미흡하며 건축용 구조부재로 활용하는 것이 부가가치 측면이나 목재의 탄소저장성능 연장 측면 등에서 훨씬 더 유리할 것으로 생각된다.

국내외적으로 환경과 그린정책에 대한 관심이 증가하면서 정부당국, 기업 및 소비자들도 저탄소녹색 성장과 관련된 기술개발에 많은 관심을 가지고 있다. 국산 간벌재를 고부가가치 용도의 한옥건축용 구조부재로 이용하고자 하는 이 연구는 국내의 산림 관련 연구자들 및 당국자들 그리고 민간인들에게도 많은 관심을 받고 있다. 많은 사람들이 국산 목재를 한옥건축용 자재로 개발하여야 한다는 대명제에는 찬성하지만 각론으로 들어가면 여전히 많은 논란이 있는 것이 사실이다. 여전히 접착목재 제품을 한옥 건축자재로 사용하는 것에 대해서 부정적인 의견을 가진 사람들이 있는 것도 사실이지만 이러한 접착목재 제품들을 사용하지 않고는 한옥 건축용 자재의 품질 향상과 사용 중의 하자 발생 방지는 사실상 불가능하다고 할 수 있다. 그동안 목재 건조를 위한 많은 연구들이 이루어지고 큰 단면치수를 갖는 제재목을

건조하고자 하는 연구들이 다양하게 이루어졌지만 아직까지 대단면의 제재목을 큰 결함 없이 내부까지 완전하게 건조시킬 수 있는 기술은 개발되지 못했으며 일부 연구에서 약간의 진척을 보이기는 하였지만 부재의 건조에 너무 과다한 비용과 노력이 들어가기 때문에 전혀 실용성이 없는 실정이다.

비록 문화재적인 가치가 있는 전통 한옥건축물의 경우에는 문화재적인 가치 보존의 차원에서 과거에 사용되었던 것과 같이 접착하지 않은 제재목 부재를 사용하는 것이 마땅하지만 그렇지 않고 일반인들이 생활하기 위한 목적으로 건축하는 한옥이라면 굳이 많은 하자 발생이 예상되는 제재목 부재 사용만을 고집하기 보다는 고품질의 접착목재 제품을 사용함으로써 경제적이고 높은 품질의 한옥을 건축하여 보급하는 것이 한옥시장 확대의 지름길이 될 것이다. 한옥을 일반 주거용 주택의 범주로 본다면 아파트나 기타 다른 공법의 단독주택들과 경쟁하여 시장을 확보하여야 할 것이다. 이러한 시장 확보를 위해서는 한옥 건축에 경쟁력이 확보되어야 하며 한옥 건축의 경쟁력은 경제성과 품질의 두 가지 측면에서 바라보아야 할 것이다. 과거에는 애국심을 이용하여 국산품 또는 우리나라의 전통이나 문화 등의 이름으로 소비자들의 선택을 받을 수 있었지만 이제는 이러한 애국심을 이용하는 전략은 더 이상 소비자들에게 선택을 받을 수 없는 시대가 되었다. 일단 가격과 품질 측면에서 경쟁력이 있어야 소비자들의 선택을 받을 수 있으며 아무리 좋은 품질의 제품이라고 하더라도 가격이 비싸면 소비자들의 선택의 폭은 상당히 제한될 수밖에 없을 것이다. 그러한 의미에서 새롭게 개발되는 부재들은 고품질의 추구하고 함께 가격경쟁력의 확보도 고려되어야 할 것이다.

이 연구는 현재 저부가가치의 칩이나 연료용으로만 사용되고 있는 국산 소경재를 원자재로 사용함으로써 일단 제품의 가격경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 생각되며 이들을 접착 집성하여 구조용 집성재와 유사한 강도 및 품질의 제품을 생산함으로써 품질 측면에서도 결코 뒤떨어지지 않는 제품의 생산기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 구조용 집성재는 두께 50mm 미만의 층재들을 사용하는데 비하여 이 연구에서는 두께 80~100mm의 소경각재를 사용하여야 하므로 이들 사이의 길이이음에 사용되는 핑거조인트의 품질 및 강도 향상이 이루어져야 할 것이다. 이 연구의 결과를 잘 활용하면 소경 간벌재를 원자재로 사용함으로써 가격경쟁력을 높이고 소경각재를 원목 상태로 사용하지 않고 각재의 형태로 사용함으로써 보다 다양한 용도의 건축물에 활용할 수 있게 됨으로써 시장을 확대할 수 있으며 표면 품질 및 강도 성능이 구조용 집성재와 유사하게 됨으로써 고품질 경제적인 가격의 한옥 건축자재를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 세부과제: 국산 소경 간벌재를 이용한 한옥건축용 다중접착접합부재의 개발 및 실용화

1. 1차년도 연구과제: 국산 소경 간벌재의 제재 및 건조기술과 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 개발

가. 개발 내용 및 범위

이 연구에서는 국산 간벌재를 이용하여 제재, 건조 및 대패 마감을 한 소경각재를 생산하고 소경각재들의 나비 및 두께 방향 접착접합을 통하여 한옥건축에 사용할 수 있는 다중접착접합 기둥이나 보 부재를 생산할 수 있는 기술을 개발함으로써 국산 목재와 국내의 기술로 안전성과 내구성이 우수한 한옥 건축자재의 생산 및 공급이 가능해지도록 하여 한옥에 대한 신뢰도와 이미지 개선에 기여하고자 한다.

현재 KS F 3021(구조용 집성재)에 의하면 집성재를 제조하기 위하여 사용할 수 있는 층재의 두께는 50mm 미만으로 규정되어 있으며 실제로 통직한 부재를 만들기 위해서는 35mm 두께의 층재 그리고 만곡집성재를 제조하기 위해서는 19mm 두께의 층재가 가장 일반적으로 사용되고 있다. 층재의 두께가 증가할수록 접착층의 수가 적어져서 집성재 제조과정 상의 인건비 및 재료비 등을 절감하여 경제성이 향상되지만 반면에 층재 건조의 어려움, 건조결함 발생, 핑거조인트의 불량률 증가 등으로 인한 집성재 품질의 저하 가능성이 높아진다. 또한 집성재 제조를 위하여 사용되는 층재만을 만들기 위하여 별도의 치수로 제재목을 생산하게 되면 집성재의 사용량이 그렇게 많지 않기 때문에 대량생산이 어렵고 이로 인한 층재 생산 비용의 증가가 초래된다. 이러한 문제들 때문에 기존의 구조용 집성재는 일반적으로 층재를 별도로 생산하지 않고 대량생산이 가능한 구조용재(1종 구조재 또는 규격재) 중에서 선별하여 집성재 제조를 위한 층재로 사용하고 있다. 1종 구조재는 두께 38mm로 제조되는 것이 일반적이기 때문에 이 부재들 중에서 적절한 나비 및 강도를 갖는 것들을 선별하고 접착을 위하여 다시 한번 표면 대패마감을 실시하여 35mm 두께로 층재를 제조하여 사용하고 있다.

그러나 국산 소경 간벌재는 지름이 작기 때문에 기존의 집성재 제조를 위한 층재 치수를 적용할 경우에 1개의 원목을 제재하여 1개의 층재를 얻기도 힘들며 이와 같이 생산된 층재는 수율도 매우 낮고 제재, 건조, 취급 및 관리 등의 생산 비용의 과다로 경제성이 확보하기가 불가능할 것이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 1개의 소경 간벌재로부터 수심을 포함하여 최대치수로 제재할 수 있는 1개의 소경각재를 제재 및 건조하여 수율을 높이고 이 소경각재의 치수를 그대로 사용하여 집성 및 접착함으로써 부재 생산 비용을 줄이고자 한다. 이와 같이 소경 간벌재로부터 제재할 수 있는 최대 치수의 소경각재를 생산하여 그 치수 그대로 가로 및 세로 또는 길이 방향(핑거조인트)으로 접착 접합하여 생산된 부재를 다중접착접합부재로 정의하였다.

이 연구에서는 국내에서 쉽게 구할 수 있는 낙엽송 및 편백나무 소경 간벌재를 사용하여 한옥건축용 다중접착접합부재를 제조하기 위한 원자재인 수심을 포함하는 소경각재를 생산할 수 있는 최적의 제재 및 건조기술을 개발하고 이들 소경각재들을 접착하여 한옥 건축용 기둥으로 사용될 수 있는 다중접착접합 기둥 부재를 생산하는 기술을 개발하고자 하였다.

나. 시험재료

시험용 재료로는 국내에서 앞으로 많은 양이 생산될 것으로 예상되는 낙엽송과 한옥이 많이 건축되는 남부지방에서 생산되는 편백나무 간벌재를 사용하고자 한다. 현재 대부분의 간벌재는 경제성이 없기 때문에 산속에 버려지거나 또는 가장 부가가치가 낮은 화목, MDF나 PB 또는 펄프용 칩, 연료용 펠릿 등의 용도로 사용되고 있는 실정이다. 조림 후 20~30년 정도가 지난 이들 간벌재는 대부분 그림 A1-1에서 보는 바와 같이 3벌기령에 해당하는 흉고지름 120mm~180mm 정도의 목재로서 제재목으로 사용하기에는 지름이 작고, 마땅한 용도가 없으며, 제재수율도 낮아서 경제성이 없는 것으로 평가받고 있다. 그러나 이 연구에서 개발할 다중접착접합 부재용 원자재인 소경각재는 80mmx80mm, 90mmx90mm 및 100mmx100mm 부재로서 이들 소경 간벌재로부터 생산이 가능할 것으로 판단된다.



그림 A1-1 국산 소경 간벌재

국산 간벌목으로부터 제재, 건조 및 대패 마감된 소경각재로부터 다중접착접합부재를 생산하기 위하여 핑거조인트를 사용하여 소경각재의 길이이음을 만들고 길이이음 된 핑거조인트 소경각재를 가로 및 세로 방향으로 적층 접착하여 다중접착접합부재를 제조하였다. 소경각재의 길이이음을 위한 핑거조인트를 만들기 위하여 2개 부재의 끝면에 핑거를 가공하고 핑거끼리의 접합을 위하여 일본의 Oshika사에서 핑거조인트 전용 접착제로 개발한 resorcinol계 접착제인 DOORNOR DF-2000호를 수입하여 사용하였다. DOORNOR DF-2000호는 포름알데히드(formaldehyde)를 경화제로 사용하는 저점도의 2액 분리 도포형 접착제로서 접착제와 경화제가 혼합된 후 약 40초의 겔화시간을 갖는다. DF-2000 접착제는 점도 0.63Pa·s, 비중 1.164, pH 10.8 및 수지 고형분 함량 60.4%의 기본 물성을 지니고 있다. 압제 조건은 도포량 400~500g/m² 및 압제 압력 1.96~9.8MPa로서 핑거조인트를 만드는 2개의 부재 중 하나에는 접착제

를 도포하고 다른 하나에는 경화제를 도포한 후 5분 이내에 압력을 가하여 접합을 시키고 접합 후 15 시간 이상 양생을 시킨다.

핑거조인트 소경각재를 제조한 후 소경각재끼리 가로 접착을 실시하여 부재 제조에 필요한 나비를 확보한 후 이 부재들끼리 세로 방향으로 적층 접착하여 적절한 높이를 갖는 부재를 제조하였다. 가로 접착은 접착강도와 함께 가능하면 짧은 시간에 접착 및 양생이 이루어져야 하므로 단기간 접착용으로 일본 Oshika사에서 개발한 수성고분자 isocyanate 계 접착제인 PI Bond TP-111을 수입하여 사용하였다. TP-111 접착제는 점도 10Pa·s, pH 6.4, 고형분 함량 60% 등의 기본 물성을 지니고 있다. 압제 조건은 도포량 230~270g/m², 압제 압력 0.78~0.98MPa 및 압제 시간 30분으로서 접착제 혼합 및 도포 후 15분 이내에 압력을 가하고 압제 후 5일간 양생을 시킨다.

세로 접착은 접착강도가 우수한 구조용 집성재 제조용으로 일본 Oshika사에서 개발한 resorcinol 계 접착제인 DOORNOR D-40호를 수입하여 사용하였다. D-40 접착제는 점도 0.22~0.49Pa·s, 비중 1.13~1.15, pH 8~9 및 수지 고형분 함량 56~61%의 기본 물성을 지니고 있으며 접착제와 경화제를 혼합한 후 15~33분의 경화시간을 갖는다. 압제 조건은 도포량 250~350g/m², 압제 압력 0.98~1.08MPa 및 압제 시간 16~48시간으로서 접착제를 도포한 후 20분 이내에 압력을 가하여 접합을 시키고 접합 후 3일 이상 양생을 시킨다.

다. 국산 소경 간벌재의 최적 제재기술 개발

다중접착접합부재 생산용 원자재인 소경각재는 80mmx80mm~100mmx100mm의 부재로서 지름 120mm~180mm의 간벌재로부터 충분히 생산이 가능하다. 하나의 간벌재로부터 수심을 포함하는 하나의 정각재를 제재하고자 하며 제재 후에 나오는 죽데기는 화목, MDF나 PB 또는 펄프용 칩, 연료용 펠릿 등으로 가공이 가능하기 때문에 충분한 경제성이 있을 것으로 판단된다.

소경 간벌재로부터 소경각재를 제재하는데 있어서 가능하면 적은 시간과 인력으로 다중접착 접합부재 제조를 위한 원자재를 생산하기 위하여 그림 A1-2와 같은 방법으로 1개의 간벌목으로부터 수심을 포함하는 1개의 소경 정각재를 제재하는 기술을 개발하고자 한다. 그림 A1-2에서 (A)는 지름 120mm~139mm의 간벌재로부터 95mmx95mm 각재를 제재한 후 건조 및 대패 마감하여 최종 치수 80mmx80mm의 소경각재를 생산하는 방법이다. 그림 A1-2(B)는 지름 140mm~159mm의 간벌재로부터 105mmx105mm 각재를 제재한 후 건조 및 대패 마감하여 최종 치수 90mmx90mm의 소경각재를 생산하는 방법이다. 그림 A1-2(C)는 지름 160mm~179mm의 간벌재로부터 120mmx120mm 각재를 제재한 후 건조 및 대패 마감하여 최종 치수 100mmx100mm의 소경각재를 생산하는 방법이다. 그림 A1-2(D)는 지름 180mm 이상의 간벌재로부터 140mmx140mm 각재를 제재한 후 건조 및 대패 마감하여 최종 치수 120mmx120mm의 소경각재를 생산하는 방법이다.

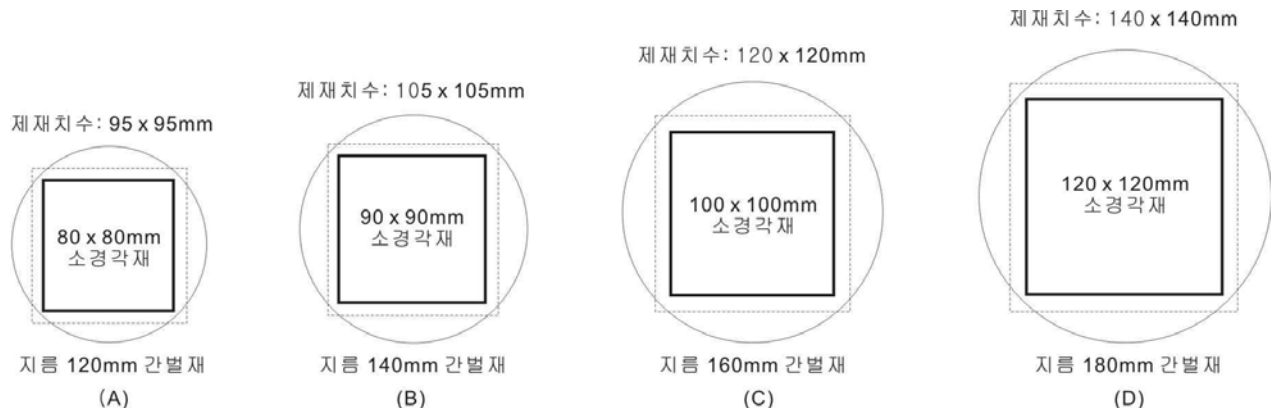


그림 A1-2 국산 소경 간벌재의 제재 방법

그림 A1-2의 방법을 적용하여 생산되는 제재목의 표준 모듈치수는 표 A1-1과 같이 정리할 수 있다. 표 A1-1에서 보는 바와 같이 다중접합부재 제조를 위한 원자재인 소경각재의 치수가 너무 다양하면 구분, 관리 및 취급이 어렵기 때문에 간벌재 원목의 지름을 20mm 단위로 구분하여 80mm, 90mm, 100mm 및 120mm 정각재의 4가지로 구분하였다. 표 A1-1에서 보면 각각의 원목 지름에 대하여 주어진 바와 같이 정각재를 제재하였을 경우에 제재수율이 56~80% 정도를 나타낼 것으로 예상되며 마감재 수율은 40~57%를 나타낼 것으로 예상되었다. 일반적인 제재목 마감재이 수율이 30~40%인 것을 감안하면 상당히 높은 수율을 나타낼 것으로 생각된다. 이는 1개의 원목에서 1개의 각재만을 제재함으로써 톱밥 및 대패밥으로 배출되는 양이 적기 때문인 것으로 판단되며 표 A1-1의 수율은 원목의 길이를 그대로 제재한다는 가정 하에서 계산된 것으로서 실제 상황에서는 양끝면을 깨끗하게 절단하게 되므로 표 A1-1의 값보다는 약 3~5% 정도 줄어든 것으로 예상된다.

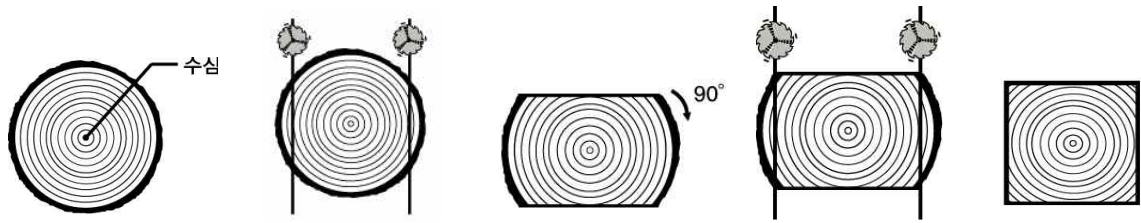
표 A1-1 간벌재 원목의 지름별 최적 제재치수

간벌재 원목의 지름(mm)	최적 제재치수			
	구분	모듈	치수(mm×mm)	수율(%)
∅120~∅139	제재	80D	95×95	59~80
	마감		80×80	42~57
∅140~∅159	제재	90D	105×105	56~72
	마감		90×90	41~53
∅160~∅180	제재	100D	120×120	57~72
	마감		100×100	40~50
∅190~∅220	제재	120D	140×140	62~77
	마감		120×120	46~57

간벌재 원목의 길이는 원목 생산 모듈 치수에 따라서 1.8m, 2.4m, 3.0m 및 3.6m로 하여 일반적으로 생산되는 원목의 길이에 맞추어서 동일 길이로 생산하는 것이 경제성 및 수율을 높이는 길이 될 것이다. 소경 간벌재는 대경재와 달리 원목이 조금만 휘어도 제재면이 원목을 벗어날 가능성이 많기 때문에 소경각재 생산을 위한 간벌재 원목 선별 시에 휨이나 비틀림 등의 변형이 심한 원목은 배제하여야 한다. 또한 간벌재 원목은 미성숙재인 수심 주변의 유령목이 많이 포함되기 때문에 변형이 크게 발생할 가능성이 있으며 목재의 특성상 가능하면 수심을 중심으로 대칭을 이루어야 변형의 발생 가능성이 낮아지기 때문에 원목의 선별 시에도 가능하면 단면이 원형을 이루며 수심의 위치가 정중앙 부근에 위치한 것을 고르는 것이 바람직할 것이다.

그림 A1-2와 같은 소경각재를 제재하기 위하여 기존의 대경재를 제재하는 방법을 적용하여 원목을 90도씩 회전시키면서 1면씩 차례대로 제재하는 경우에 소경재는 미성숙재인 유령목의 양이 많고 여러 가지 성장 응력이 내부에 존재하는 경우가 많기 때문에 제재과정 중에 비틀림 등의 발생 가능성이 높을 것으로 예상된다. 특히 낙엽송의 경우에는 섬유경사가 크고 나선목리를 갖는 경우가 많아서 비틀림의 발생 가능성이 더욱 높을 것으로 예상된다. 원목을 돌려가면서 1면씩 차례대로 제재하는 경우에 대경재는 1면에서 여러 개의 제재목을 생산할 수 있지만 간벌재의 경우에는 1면에 1회 제재를 하고 다른 면으로 돌려서 제재하여야 하기 때문에 생산성도 매우 낮을 것으로 생각된다.

따라서 제재 과정 중에 비틀림의 발생을 최소화하고 생산성을 높이기 위해서는 기존의 대경재에 적용하던 방법대로 1면씩 차례대로 제재하기보다는 마주보는 양면을 동시에 제재하는 방법을 적용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 그림 A1-3과 같이 마주보는 양 면을 동시에 제재하는 방법을 적용한다면 적은 단계와 빠른 시간 내에 정확한 제재가 가능하기 때문에 그림 A1-2의 소경각재 생산에 효율성과 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 이 기술을 적용하면 그림 A1-3과 같이 마주보는 양 측면을 동시에 평행하게 제재(그림 A1-3(B))하고 목재를 90도 회전(그림 A1-3(C))시켜서 다시 마주보는 양 측면을 동시에 앞에서 제재한 면에 직각이 되도록 제재(그림 A1-3(D))함으로써 2번의 제재만으로 수심을 포함하는 소경 정각재(그림 A1-3(E))를 생산할 수 있다. 이러한 방법으로 간벌재의 제재를 실시하면 하나의 소경각재를 생산하는데 2번의 제재와 1번의 90도 회전 및 1번의 원위치로의 이동이 필요하다. 기존의 방법대로 1면씩 돌아가면서 제재하는 경우에는 4번의 제재와 3회의 90도 회전 및 3회의 원위치로의 이동이 필요하다. 따라서 그림 A1-3의 방법을 적용하면 기존의 제재 방법에 비하여 1/2~1/3 정도로 공정을 간소화할 수 있기 때문에 최소의 공정과 시간으로 가장 정확한 치수 및 형태의 소경각재를 생산할 수 있을 것으로 생각된다. 그림 A1-3과 같은 제재 방법을 적용하는 경우에도 소경각재의 제재 및 건조 후에 내부 응력의 불균형으로 인한 변형의 발생을 최소화하기 위해서는 가능하면 수심이 소경각재 횡단면의 정중앙에 위치하도록 할 필요가 있다.



A) 간벌 소경재 B) 양면 제재 C) 90도 회전 D) 양면 제재 E) 소경 정각재

그림 A1-3 양면 제재를 통한 소경 정각재의 생산

국산 소경 간벌재로부터 그림 A1-2 및 A1-3의 방법으로 소경각재를 생산함으로써 원목의 제재수율을 최대화할 수 있고 소경각재를 생산하고 남은 죽데기는 칩이나 펠릿으로 가공하여 MDF, PB 또는 펄프 생산용 원자재나 연료용으로 사용함으로써 재료의 효율적 사용 및 경제성 향상이 가능할 것으로 생각된다. 소경 간벌재를 그림 A1-3의 방법으로 제재하는 것은 기존의 제재기로는 불가능하며 양면을 동시에 제재할 수 있도록 거리 조절이 가능한 2개의 제재용 톱날을 장착하고 목재의 90도 회전이 가능하며 제재용 원목의 모양에 맞추어서 길이 방향으로 정확한 제재가 가능하도록 2개의 레이저를 장착한 스퀘어링톱(squaring saw)이 필요하다. 이러한 목적의 특수 제재기계를 설계, 제작 및 구입하기 위하여 일본의 제재기 생산업체에 의뢰하였다.

이 연구에서 필요한 소경각재 및 다중접착접합부재 시험편을 만들기 위하여 인천 지역의 제재소를 통하여 그림 A1-1과 같이 지름 120~180mm 정도의 국산 낙엽송 및 편백 간벌재 원목을 구입하였다. 구입한 원목을 지름 별로 구분하여 제재치수를 결정한 후 그림 A1-4와 같이 제재기에 원목을 투입하였으며 그림 A1-5와 같이 90도로 회전시키면서 제재를 실시하였다.



그림 A1-4 원목 투입



그림 A1-5 제재

제재라인에서 생산된 소경각재는 이후에 건조 및 대패가공 공정을 거쳐서 다중접착접합부재 생산을 위한 자재로 생산되었다. 다중접착접합부재 생산을 위하여 사용될 원자재로서의 소경각재를 선별하기 위하여 적용되는 소경각재의 품질기준은 구조용 집성재 제조를 위하여 적용

되는 육안 식별 층재의 품질 기준인 KS F 3021의 표 2(육안 식별 층재의 품질 기준)로부터 표 A1-2와 같은 기준을 작성하여 적용하였다.

표 A1-2 소경각재의 육안 식별을 위한 품질 기준

구분	품질 기준			
	1등급	2등급	3등급	4등급
최대 용이 지름비	17% 이하	25% 이하	33% 이하	50% 이하
섬유주행경사	1:16 이하	1:14 이하	1:12 이하	1: 8 이하
씩음	없을 것			
갈라짐	경미할 것			
변색	경미할 것			
경사결	경미할 것			
등근모	나비가 단면치수의 1/4 이내이고 인접한 2모서리에는 없을 것			
그 밖의 결점	극히 경미할 것			

표 A1-2의 품질 기준을 적용하여 이 연구의 시험편 제작을 위하여 사용된 소경각재의 등급을 구분한 결과는 표 A1-3과 같다.

표 A1-3 이 연구에서 사용된 소경각재의 등급 구분 결과

수종	구분	등급별 각재의 수				합계
		1등급	2등급	3등급	4등급	
낙엽송	수(개)	26	52	51	9	138
	비율(%)	18.8	37.7	37.0	6.5	100
편백	수(개)	11	64	22	0	97
	비율(%)	11.3	66.0	22.7	0	100
합계	수(개)	37	116	73	9	235
	비율(%)	15.7	49.4	31.1	3.8	100

소경 간벌재에서 제재된 소경각재들은 대부분 원목의 성장방향과 동일한 방향으로 제재되었기 때문에 섬유주행경사는 1등급의 기준인 1:16 이하에 해당하였다. 썩음이 있는 것이나 변색이나 경사결이 심한 것도 선택에서 제외하였다. 소경 간벌재의 특성상 등근모가 일부 포함되었으나 등근모의 크기가 크지 않은 경우에는 강도에 큰 영향을 주지 않고 다중접합부재의 표면에 노출되지 않는다면 소경각재의 품질로서 문제가 없는 것으로 판단되어 등근모의 나비가 단면 치수의 1/4 이내이고 4모서리 중에서 인접한 2모서리에만 등근모가 없으면 사용하도록

하였다. 이 연구에 사용된 소경각재들에 대하여 표 A1-2의 기준을 적용하여 등급구분을 실시한 결과 표 A1-3에서 보는 바와 같이 낙엽송은 2등급과 3등급이 비슷한 비율로 많이 나왔으며 1등급도 전체 수의 약 1/5에 해당하였다. 낙엽송은 2등급 및 3등급이 많았지만 1등급에서 4등급까지 골고루 분포한 반면 편백 소경각재는 2등급이 전체의 2/3를 차지하였으며 1등급과 3등급은 비교적 적은 양이 생산되었으며 4등급은 나타나지 않았다. 낙엽송 소경각재는 비교적 큰 용이가 군데군데 분포한 반면 편백 소경각재는 작은 용이가 전체적으로 골고루 분포되어 있는 외형상의 특징을 나타내었다.

라. 국산 소경 간벌재로부터 제재된 소경각재의 최적 건조기술 개발

제재된 소경각재를 함수율 12% 정도로 건조하여 대패 마감한 후 접착접합을 통하여 다중접착접합부재를 생산하기 위하여 건조결함은 적게 생기면서 가장 적은 에너지로 가장 빨리 건조할 수 있는 기술의 개발이 필요한 실정이다. 소경 정각재의 두께 및 나비는 80~100mm로서 일반적으로 많이 사용되는 건조목재의 두께(50mm 이하)보다 두껍고 나비는 작기 때문에 일반목재의 건조와는 다른 건조스케줄이 적용되어야 할 것으로 판단된다. 여러 가지 건조방법 중에서 이러한 소경각재에 대해서는 고온고습건조 방법이 적합할 것으로 판단되며 건조로 내에서의 소경각재 적재방법, 스티커의 간격 및 두께, 전처리 방법, 온도 조절, 풍속 조절, 습도 조절 방법과 함께 최적의 건조스케줄을 개발하고 건조된 소경각재의 건조 품질(함수율 및 건조결함 발생 정도)을 평가하고자 한다.

소경각재의 건조를 위하여 참여기업인 경민산업(주)에서 보유하고 있는 고온고습건조시설을 사용하였으며 가장 빠른 시간 내에 최소의 에너지를 사용하고 건조결함을 최소화하며 목표 함수율을 12% 이하로 할 수 있는 방법을 찾는 것을 목표로 하였다. 국산 소경 간벌재로부터 제재된 소경각재를 여러 차례 시험건조하면서 건조결함 발생 정도를 측정하여 다음에 적용할 건조스케줄을 조정하여 국산 소경각재에 가장 적합한 건조스케줄을 찾아나갔다. 소경각재의 건조를 위하여 제재소에서 제재된 소경각재를 건조시설로 운반한 후 자재를 내리고 바로 소경각재의 함수율을 전기수분계로 측정하였으며 그림 A1-6과 같이 잔적을 실시하였다.



그림 A1-6 건조를 위한 잔적



그림 A1-7 건조로 내에 입고

소경각재는 층과 층 사이에 잔적을 하여 8~9층까지 쌓고 건조로 내에는 그림 A1-7과 같이 층으로 쌓은 소경각재를 2단으로 올려서 설치하였으며 건조중 목재의 변형을 최소화하기 위하여 목재의 상단에는 무거운 무게의 철판을 올려놓았다. 건조로는 그림 A1-8과 같이 미리 설정된 건조스케줄에 따라서 자동으로 조정되었으며 그림 A1-9는 건조 중에 건조로 내부에 위치한 소경각재의 모습을 보여주고 있다.

1	10.00	0.00	0.00	0	36	94	40	0000	0시간
2	24.00	0.00	0.00	120	85	0	50	0000	0시간
3	24.00	0.00	0.00	100	80	0	50	1000	0시간
4	24.00	0.00	0.00	90	80	0	50	1000	0시간
5	72.00	0.00	0.00	90	80	0	40	1000	0시간
6	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0000	0시간
7	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0000	0시간
8	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0000	0시간
9	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0000	0시간
10	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0000	0시간
11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0000	0시간
12	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0000	0시간

그림 A1-8 건조스케줄



그림 A1-9 건조 중 건조로 내부의 소경각재

그림 A1-10은 건조 완료 후 건조로 내부의 소경각재를 보여주고 있으며 건조 완료 후에는 바로 목재를 건조로로부터 빼내어 전기수분계를 사용하여 건조 후 최종 함수율을 측정하였다 (그림 A1-11).

그림 A1-10 건조 후 건조로 내의 소경각재



그림 A1-11 건조 후 함수율 측정

소경각재에 적용된 기본적인 건조단계는 다음과 같이 4단계로 구성되었다.

- ① 증자 또는 증습처리(steaming)
- ② 건구온도 120℃ 및 습구온도 90℃에서의 고온건조

- ③ 건구온도 100℃ 및 습구온도 70℃에서의 중온건조
- ④ 건구온도 80℃ 및 습구온도 60℃에서의 저온건조
- ⑤ 상온에서 3일간 양생

총 5회의 건조시험을 실시하였으며 각각의 건조시험 시에 적용되었던 건조스케줄은 표 A1-4와 같다.

표 A1-4 소경각재의 건조시험에 적용된 건조스케줄

구 분	건조온도 건구/습구	1차 건조	2차 건조	3차 건조	4차 건조	5차 건조
증 습	96℃/96℃	6시간	12시간	12시간	12시간	12시간
고온건조	120℃/90℃	24시간	12시간	48시간	36시간	36시간
중온건조	100℃/70℃	120시간	120시간	72시간	36시간	24시간
저온건조	80℃/60℃	24시간	24시간	24시간	24시간	24시간
양 생	상 온	72시간	72시간	72시간	72시간	72시간
건조시간 합 계		174시간	168시간	156시간	108시간	96시간

1차 및 2차 건조시험 시에는 소경각재를 늦가을에 제재한 후 열기건조를 시작하기 전에 잔적하여 상온에서 3주 정도 상온건조하면서 표면 할렬과 뒤틀림 등의 결함이 열기건조 전에 이미 발생한 것으로 관찰되었다. 또한 건조 후에도 건조 결함이 많이 발생하였으며 특히 할렬이 크고 길게 발생하여 시험용으로 사용하지 못하는 목재가 다수 나타났다. 이러한 건조결함 발생의 정도와 빈도를 줄이기 위하여 2차, 3차, 4차 및 5차 건조시험에서 건조스케줄을 표 4에서 보는 바와 같이 조정하였다. 3차 건조부터는 소경각재를 제재한 후 가능하면 빨리 잔적하여 열기건조를 실시함으로써 자연건조 상태에서 발생하는 결함을 최소화하고자 하였다. 이와 같이 함으로써 3차 건조에서는 건조 표면할렬 및 뒤틀림 등의 건조결함 발생이 1차 및 2차 건조 때에 비하여 30~40% 정도 감소한 것으로 나타났다. 따라서 열기건조 전에 소경각재를 잔적 후 일정 기간 자연건조하는 것은 목재 표면의 함수율을 일정하게 유지하는데는 도움이 되겠지만 바람과 햇볕에 의한 표면 할렬과 뒤틀림 등의 건조결함 발생이 증가하는 결과를 나타냄으로써 전체적인 건조효율 측면에서는 결코 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

표 A1-4와 같은 조건으로 5회의 건조시험을 실시한 결과 최종적으로 다음과 같은 5차 건조 시의 건조스케줄이 건조시간, 에너지 사용, 건조결함 발생, 건조 후 함수율 등의 측면에서 국산 간벌재로부터 제재된 소경각재의 건조를 위하여 가장 적합한 것으로 나타났다.

- ① 96℃에서 12시간 동안 증습처리
- ② 건구온도 120℃ 및 습구온도 90℃에서 36시간 동안 고온건조
- ③ 건구온도 100℃ 및 습구온도 70℃에서 24시간 동안 중온건조
- ④ 건구온도 80℃ 및 습구온도 60℃에서 24시간 동안 저온건조
- ⑤ 상온에서 3일 동안 양생

표 A4의 5차 건조스케줄을 적용하여 건조된 소경각재의 함수율 변동 및 치수 변화는 표 A1-5와 같았다.

표 A1-5 소경각재의 5차 건조시험 전후의 함수율 및 치수 변화

기본통계치	함수율(%)		폭(mm)		비고 주요결함
	건조 전	건조 후	건조 전	건조 후	
평균치	28	12.6	97.7	95.1	경미한 갈라짐
최대치	36	18.5	100.6	98.2	
최소치	25	7.5	94.8	92.2	
표준편차	4.04	2.01	1.38	1.45	




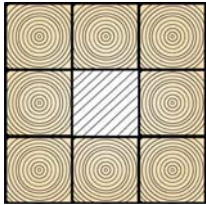
겨울에 들어설 무렵 벌채된 목재를 사용하였기 때문에 제재 후의 함수율이 28%로서 그렇게 높지는 않았으며 건조과정을 통하여 12.6%까지 함수율이 감소하였다. 건조를 전후하여 목재의 단면 치수는 2.5% 정도 감소하는 것으로 나타났으며 건조결함은 일부 목재에서 경미한 수준의 갈라짐(할렬)이 나타났으나 사용하기에 어려울 정도는 아닌 것으로 판단되었다.

마. 국산 소경각재를 이용한 다중접착접합 기둥부재의 개발

소경각재를 가로 및 세로로 접착 접합하여 다중접착접합 기둥부재를 만들기 위하여 1차 접착제로서 이소시아네이트 계열의 접착제 그리고 2차 접착제로서 페놀-리솔시놀-포름알데히드 계열의 접착제를 일본 오시카사로부터 수입하여 사용하였다. 접착제의 도포량은 1차 및 2차 각각 250~300g/m²로 하였으며 압착 압력은 100kgf/cm², 그리고 압착 시간은 1차 4시간 및 2차 22시간으로 설정하였다. 마감 치수 80mm, 90mm 및 100mm의 소경각재를 사용하여 가로 및 세로로 2개, 3개 및 4개씩 적층하여 다양한 조합의 기둥을 만들 수 있을 것으로 생각된다. 2x2에서부터 4x4까지 다양한 조합이 가능하며 기둥부재를 만들기 위해서는 가로 및 세로의 적층수가 동일한 것을 기본으로 하지만 필요에 따라서 가로와 세로 사이에 1개 정도의 적층 수 차이는 가능할 것으로 생각된다. 예를 들면 80mm 소경각재를 사용하여 2x2(80D2), 2x3(80D3), 3x3(80T3), 3x4(80T4), 4x4(80Q4) 등의 조합을 만들 수 있으며 90mm 및 100mm

소경각재를 사용해서도 동일한 조합으로 90D2, 90D3, 90T3, 90T4, 90Q4, 100D2, 100D3, 100T3, 100T4, 100Q4 등의 조합을 만들 수 있다. 이 연구에서는 기둥부재로서의 성능 시험을 위하여 표 A1-6과 같이 4개의 조합으로 2가지 수종을 사용하여 총 20개의 다중접착접합 기둥부재를 제작하였다. 모든 기둥부재는 길이를 3m로 제작하였다.

표 A1-6 기둥압축시험에 사용된 다중접착접합 기둥부재의 종류

기호	구성	규격	수량
80D2		편 백 3000×160×160 낙엽송 3000×160×160	2 3
90D2		편 백 3000×180×180 낙엽송 3000×180×180	2 3
80T3		편 백 3000×240×240 낙엽송 3000×240×240	2 3
80T3E		편 백 3000×240×240 낙엽송 3000×240×240	2 3

다중접착접합부재를 나타내는 기호 중에서 가장 왼쪽의 숫자인 80, 90, 100 등은 소경각재의 단면치수를 나타내고 두 번째 영문기호인 S, D, T, Q 등은 가로방향으로 적층된 소경각재의 숫자로서 1개(Single), 2개(Double), 3개(Triple) 및 4개(Quadruple)를 나타내는 영문의 약자이며 3번째 숫자인 2, 3, 4 등은 세로방향으로 적층된 소경각재의 숫자를 나타내고 가장 오른쪽의 영문 E가 붙은 것은 이 부재의 정중앙 부분이 비어 있음을 의미한다.

다중접착접합 부재를 제조하기 위하여 그림 A1-12와 같이 건조된 소경각재에 대하여 1차로 4면 대패마감을 하였으며 양끝의 길이 절단을 실시하였다. 다중접착접합부재 제조용 소경각재들의 등급을 결정하기 위하여 육안 등급 구분과 아울러 일본에서 제작된 초음파 시험 장비를 이용하여 그림 A1-13과 같이 비파괴시험을 실시하였다. 이 초음파 비파괴시험 장비의 측정 결과는 그림 A1-14에서 보는 바와 같이 모니터 상에 나타나며 질량(그림 A1-14에서 17.40kg), 탄성계수 예측값(그림 A1-14에서는 9GPa, L-90도 같은 의미) 및 주파수(그림 A1-14에서 805.6Hz)로 주어진다. 일반적으로 초음파 시험 장비의 측정 결과가 목재 내에서 초음파의 음

속으로 주어지기 때문에 이들과 비교하기 위하여 목재의 길이와 측정 주파수로 음속을 계산할 수 있다. 예를 들어서 그림 A1-14의 경우에 목재의 길이는 2.7m이고 주파수는 805.6Hz이므로 이는 1초에 목재 길이를 805.6회 왕복하는 속도에 해당된다. 따라서 그림 A1-14의 측정 결과는 음속 $(2.7 \times 2 \times 805.6) \text{m/sec} = 4,350 \text{m/sec}$ 에 해당된다.



그림 A1-12 소경각재의 대패 마감



그림 A1-13 소경각재의 비파괴시험



그림 A1-14 초음파 시험 장비 모니터

등급 구분된 소경각재들에 등급을 표시한 후 다중접합부재의 등급 배치 계획에 따라서 가로 방향으로 부재를 배치하고 그림 A1-15와 같이 접착제를 도포하여 1차 접착을 실시하였다. 1차 접착 완료 후 세로방향으로 접착을 실시하기 위하여 표면에 유출된 접착제를 제거하고 접착면을 평활하게 할 수 있도록 그림 A1-16과 같이 2차 대패마감을 실시하였다.



그림 A1-15 1차 접착을 위한 접착제 도포



그림 A1-16 1차 접착 후 2차 대패마감

가로방향으로 접착한 후 2차 대패마감이 된 부재들에 세로방향의 2차 접착을 위한 접착제를 도포한 후 그림 A1-17과 같이 2차 접착을 실시하였으며 2차 접착까지 완료된 부재들은 그림 A1-18과 같이 3차 대패마감을 실시하고 양끝의 길이 절단을 함으로써 다중접착접합부재를 제작하였다.



그림 A1-17 2차 접착을 위한 압제



그림 A1-18 3차 대패마감







바. 국산 소경각재를 이용한 다중접착접합 보 부재의 개발

소경각재를 가로 및 세로로 접착 접합하여 다중접착접합 보 부재를 만들기 위하여 기둥부재의 경우와 마찬가지로 일본의 오시카사로부터 수입된 이소시아네이트 계열의 접착제 및 레소시놀 계열의 접착제를 사용하였으며 접착제의 도포량, 압제 압력 및 압제 시간은 기둥부재의 경우와 동일한 조건을 적용하였다. 마감 치수 80mm, 90mm 및 100mm의 소경각재를 사용하여 가로방향으로 1~3개를 적층하고 세로방향으로 2~6개를 적층하여 다양한 조합 및 치수의 보 부재를 만들 수 있을 것이다. 예를 들면 80mm 소경각재에 대하여 가로방향으로 1개의 부재만 사용하고 세로방향으로 2개(80S2) 또는 3개(80S3)를 적층할 수 있으며 가로방향으로 2개의 부재를 적층하고 세로방향으로 3개(80D3), 4개(80D4), 5개(80D5), 6개(80D6) 등의 조합을 만

들 수 있으며 가로방향으로 3개를 적층하고 세로방향으로 4개(80T4, 80T4E), 5개(80T5, 80T5E), 6개(80T6, 80T6E) 등의 조합을 만들 수 있다. 90mm 및 100mm 소경각재를 사용해서도 80mm 소경각재의 경우와 동일하게 90S2, 90S3, 90D3, 90D4, 90D5, 90D6, 90T4, 90T4E, 90T5, 90T5E, 90T6, 90T6E, 100S2, 100S3, 100D3, 100D4, 100D5, 100D6, 100T4, 100T4E, 100T5, 100T5E, 100T6, 100T6E 등의 조합을 구성할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 보 부재로서의 성능 시험을 위하여 표 A1-7, A1-8 및 A1-9와 같이 18개의 조합으로 낙엽송을 사용하여 총 40개의 다중접착접합 보 부재를 제작하였다. 모든 보 부재는 길이를 4m로 제작하였다.

표 A1-7 80mm 소경각재를 사용한 휨 시험용 낙엽송 다중접착접합 보 부재의 종류

기호	구성	등급 배치	규격	수량
80S2		4등급 1등급	4000×160×80	3
80S3		3등급 4등급 1등급	4000×240×80	3
80D3		3등급 3등급 2등급	4000×240×160	3
80D4		2등급 4등급 3등급 2등급	4000×320×160	3
80D5		1등급 2등급 3등급 2등급 1등급	4000×400×160	1
80D6		1등급 2등급 3등급 2등급 2등급 1등급	4000×480×160	1

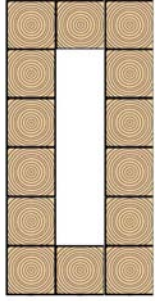
80T6E		110L 90L 80L 80L 90L 110L	4000×480×240	1
-------	-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------	--------------	---

표 A1-8 90mm 소경각재를 사용한 휨 시험용 낙엽송 다중접착접합 보 부재의 종류







기호	구성	등급 배치	규격	수량
90S2		100L 90L	4000×180×90	3
90S3		110L 100L 100L	4000×270×90	3
90D3		125L 90L 100L	4000×270×180	3
90D4		110L 90L 90L 100L	4000×360×180	3
90D5		100L 80L 80L 80L 100L	4000×450×180	1
90D6		100L 100L 90L 90L 100L 100L	4000×540×180	1

표 A1-9 100mm 소경각재를 사용한 휨 시험용 낙엽송 다중접착접합 보 부재의 종류






기호	구성	등급 배치	규격	수량
100S2		110L 100L	4000×200×100	3
100S3		110L 100L 100L	4000×300×100	3
100D3		110L 90L 110L	4000×300×200	3
100D4		110L 90L 90L 110L	4000×400×200	1
100D5		110L 90L 90L 90L 110L	4000×500×200	1

표 A1-6의 기둥부재를 만들기 위해서는 길이 3m의 소경각재만이 필요하므로 소경각재의 길이이음 없이 단일부재로 사용이 가능하였으나 표 A1-7, A1-8 및 A1-9의 보 부재를 만들기 위해서는 4m 길이의 소경각재가 필요하며 단일부재로 4m 길이의 소경각재를 구할 수가 없기 때문에 핑거조인트를 통하여 길이이음을 한 핑거조인트 소경각재를 사용하여야 한다. 기존의 집성재용 핑거조인트 가공 기계는 두께 35mm의 층재를 사용하기 위한 설비이기 때문에 두께 80mm, 90mm 및 100mm의 소경각재에는 그대로 사용하기 불가능하다. 이를 위하여 소경각재의 핑거조인트 가공을 위한 칼날을 새로 만들었으며 핑거조인트 가공 기계의 여러 가지 치수 및 압력 설정도 소경각재의 두께에 맞추어 새롭게 조정하였다.

핑거조인트 소경각재의 강도성능과 단일 소경각재의 강도성능을 비교 평가하기 위하여 휨 시험을 실시하기 위한 핑거조인트 소경각재 시험편을 제작하였다. 핑거조인트 소경각재의 길이는 2.7m로 제작하였으며 핑거조인트가 정중앙에 위치되도록 시험편을 제작하였다. 핑거조인트의 형상 및 치수는 그림 A1-19와 같이 핑거 길이 20mm, 핑거 높이 6mm, 핑거끝 높이 1mm 및 핑거끝 틈 4mm로 하였으며 두 부재 사이에 접착면이 형성되는 핑거 경사면의 경사각은 섬유방향(부재의 길이방향)에 대하여 7.125도를 나타내었다.

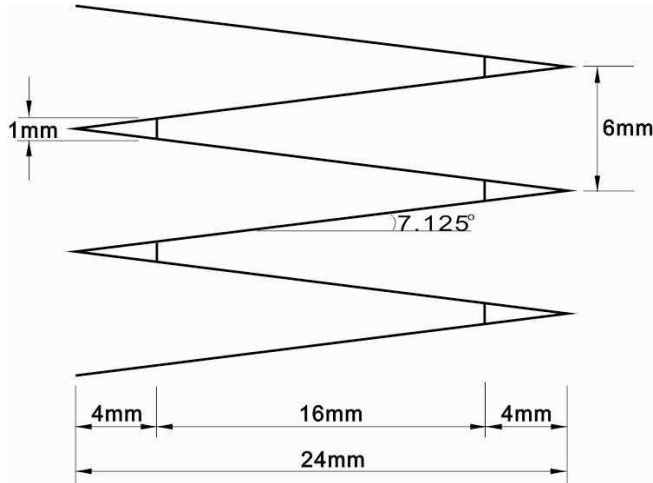


그림 A1-19 핑거조인트의 형상 및 치수

핑거조인트 소경각재를 만들기 위하여 소경각재를 1.5m 길이로 절단하고 핑거조인트 기계를 사용하여 한쪽 끝에 핑거를 가공하고 그림 A1-20과 같이 핑거 부위에 접착제를 도포한 후 그림 A1-21과 같이 1초 동안 압착하여 양생하고 길이 절단을 하여 그림 A1-22와 같이 시험용 핑거조인트 소경각재를 제조하였다.



그림 A1-20 핑거에 접착제 도포

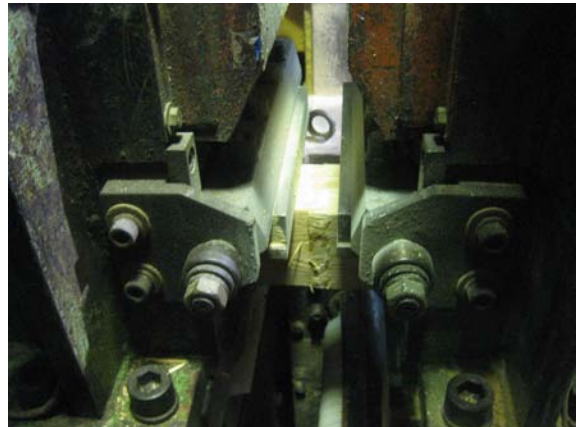


그림 A1-21 핑거 압착

핑거조인트 소경각재를 만들기 위하여 일본에서 수입된 PVAC 계열의 접착제를 사용하였으며 접착제의 도포량은 $250\sim 300\text{g/m}^2$ 로 하였고 압착 압력은 170kgf/cm^2 , 그리고 압착 시간은 1초로 설정하였다. 1초 동안 압착을 실시한 후 압력을 해제하였을 때에 핑거부분이 뒤로 밀려 나오는 현상이 관찰되었고 이를 감안하여 핑거끝 틈이 2mm가 되도록 압력을 조정하였으며 압력을 해제한 후에 핑거가 서로 2mm 밀려나와서 핑거끝 틈이 4mm가 되도록 하였다.



그림 A1-22 핑거조인트 소경각재 휨 시험편

다중접착접합 보 부재를 제작하기 위하여 다중접착접합 기둥부재의 제조 시와 동일하게 소경각재의 대패마감 및 길이절단을 하고 초음파 비파괴 등급구분을 실시하였으며 그림 A1-23 및 A1-24와 같이 핑거조인트 소경각재를 제조하였다.



그림 A1-23 핑거조인트 소경각재



그림 A1-24 핑거조인트 소경각재

제조된 핑거조인트 소경각재를 가로 및 세로방향으로 접착하여 다중접착접합 보 부재를 제조하기 위하여 부재의 4면에 대하여 2차 대패마감을 실시하였다. 2차 대패마감된 핑거조인트 소경각재를 사용한 다중접착접합 보 부재의 제조 공정은 기둥 부재의 제조 공정과 동일하게 가로방향 1차 접착, 3차 대패마감, 세로 방향 2차 접착, 4차 대패마감, 길이 절단 등의 순서로 진행되었다. 핑거조인트 소경각재를 사용하여 다중접착접합부재를 제조할 경우에 핑거조인트 부분이 아무래도 이음이 없는 부위보다 강도성능이 낮기 때문에 부재 내의 인접 층에서 핑거조인트 부위가 서로 너무 가깝게 위치하면 부재의 강도 감소가 심하게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 동일 부재 내의 인접 층에서 핑거조인트 이음 부위 사이의 간격을 구조용 집성재 규격인 KS F 3021의 인접한 층에서 핑거조인트 사이의 간격 요건을 참고하여 휨 부재에서는 150mm 이상으로 설정하였고 기둥부재에서는 인접한 층에서 핑거조인트가 동일 단면에 나타나지 않도록 기준을 정하였다.

사. 국산 소경각재를 이용한 다중접착접합부재의 표준 치수

소경각재를 가로 및 세로로 접착 접합하여 다중접착접합 기둥 및 보 부재를 만들기 때문에 다중접착접합부재의 표준 치수는 표 A1-1에 수록된 소경각재의 기본 치수인 80mm, 90mm, 100mm 및 120mm를 기준으로 하여 그 배수로 표현할 수 있다. 표 A1-1의 기본 치수는 원자재인 국산 간벌목의 지름을 고려하여 최소한의 가공공정을 통하여 생산할 수 있는 최대의 단면치수를 나타내는 것이므로 국산 간벌목의 이용 효율을 극대화시킬 수 있다. 따라서 이러한 효율적 이용의 장점을 최대한 살리기 위해서는 다중접착접합부재의 치수가 소경각재의 기본 치수의 배수가 되는 것이 가장 바람직할 것이다.

다중접착접합 기둥 부재는 단면이 정사각형인 것이 부재의 강도 성능 측면에서 가장 효율적이므로 표 A1-6에 주어진 치수들을 포함하여 표 A1-10에 주어진 바와 같은 표준치수를 사용할 수 있다.

표 A1-10 다중접착접합 기둥 부재의 표준 치수

(단위: mm)

소경각재 단면 치수	적층수	다중접착접합 기둥 부재의 표준 치수
80 x 80	2	160 x 160
	3	240 x 240
	4	320 x 320
90 x 90	2	180 x 180
	3	270 x 270
	4	360 x 360
100 x 100	2	200 x 200
	3	300 x 300
120 x 120	2	240 x 240
	3	360 x 360

다중접착접합 보 부재는 기둥의 두께와 보의 나비가 같아야 하므로 기둥의 단면 치수에 따라서 사용되는 소경각재의 단면 치수의 배수가 되어야 할 것이다. 따라서 다중접착접합 보 부재의 표준 치수는 표 A1-7 A1-8 및 A1-9에 주어진 치수들을 포함하여 표 A1-11에 주어진 바와 같이 제시할 수 있다.

표 A1-11 다중접착접합 보 부재의 표준 치수

(단위: mm)

기둥의 치수	소경각재의 치수	수평 적층수	수직 적층수	다중접착접합 보 부재의 표준 치수
160 x 160	80 x 80	2	3	160 x 240
			4	160 x 320
			5	160 x 400
180 x 180	90 x 90	2	3	180 x 270
			4	180 x 360
			5	180 x 450
200 x 200	100 x 100	2	3	200 x 300
			4	200 x 400
			5	200 x 500
240 x 240	80 x 80	3	4	240 x 320
			5	240 x 400
			6	240 x 480
	120 x 120	2	3	240 x 360
			4	240 x 480
			5	240 x 600
270 x 270	90 x 90	3	4	270 x 360
			5	270 x 450
			6	270 x 540
300 x 300	100 x 100	3	4	300 x 400
			5	300 x 500
			6	300 x 600
320 x 320	80 x 80	4	5	320 x 400
			6	320 x 480
			7	320 x 560
360 x 360	90 x 90	4	5	360 x 450
			6	360 x 540
			7	360 x 630
	120 x 120	3	4	360 x 480
			5	360 x 600
			6	360 x 720

아. 한옥건축에 사용되던 우리나라 전통 접착제에 대한 고찰

우리나라에서는 전통적으로 한옥건축에 필요한 접착접합부를 만들기 위하여 자연재료들로부터 채취 및 가공된 접착제를 사용하여 왔다. 예를 들면 동물의 뼈와 가죽 등으로부터 제조되는 아교 접착제, 옷나무 추출물로부터 제조되는 옷 접착제, 쌀이나 보리 등의 곡물로부터 제조되는 식물성 접착제 등을 들 수 있다. 이러한 접착제들은 대부분 자연재료로부터 추출 및 제조되는 것들이기 때문에 화학물질이 첨가되지 않아서 환경호르몬이나 환경유해물질이 방출되지 않는 장점이 있지만 내수성이 약하고 접착강도가 떨어지며 공장 등에서 접착부재를 공업적으로 생산하는 용도로 사용하기에는 가사용 시간이 짧거나 압채 시간이 지나치게 많이 소요되는 단점들이 있다.

경민산업(주)에서 참여하고 국립문화재연구소에서 발간한 “송례문 손상 목부재 재활용 방안 연구” 보고서에 따르면 송례문 화재로 인하여 손상된 목재 구조부재들을 재활용하기 위한 목적으로 손상 부위를 절단하고 절단된 부위를 접착제로 접합하기 위하여 여러 가지 접착제를 사용하여 시험한 결과 우리나라의 천연접착제인 옷은 접착력이 현저하게 낮아서 보수 보강의 용도로 활용할 수 없는 것으로 결론을 내리고 있다. 동물 접착제인 아교나 곡물 접착제의 경우 접착력이 현저하게 낮으며 내수성도 거의 없어서 다중접착접합부재와 같이 하중을 지지하여야 하는 구조부재의 제조에는 사용할 수 없을 것으로 판단된다.

다중접착접합부재는 유령목을 포함하는 소경각재의 길이이음, 가로 및 세로 방향 접착을 통하여 부재가 제조되고 부재의 접착 접합부가 기둥 및 보로서의 부재의 강도 성능을 나타내는데 결정적인 영향을 줄 것으로 예상되기 때문에 접착제의 우수한 접착 성능이 매우 필수적인 사항이다. 또한 구조용 부재들은 건축 중에 직접 우수에 노출되기 쉬우며 건축물의 완공 후에도 지면이나 기초로부터 가까운 부위, 외기에 노출되는 부위, 건물 내에서 화장실, 다용도실, 부엌 등과 같이 수분의 영향을 받기 쉬운 부위 등과 같이 수분 변화가 심한 환경에 노출될 수 있다. 우리나라는 4계절의 변화가 뚜렷하고 여름에는 고온다습하며 겨울에는 저온건조(난방을 실시하는 실내에서는 고온 건조)한 조건이기 때문에 건축물의 구조부재들이 상당히 심한 함수율의 계절적 변동에 노출되는 실정이다. 따라서 한옥 건축용 구조부재를 제조하기 위하여 사용되는 접착제는 함수율의 계절적 변동과 건축 중 또는 건축 후의 수분 노출에 저항할 수 있도록 내수성을 지녀야 하며 하중과 모멘트를 저항할 수 있는 접착강도를 지니고 있어야 한다.

이러한 요인들을 검토한 결과 우리나라의 전통 천연접착제가 환경적으로는 유해물질 배출이 거의 없지만 그 외의 내수성 및 접착 성능 측면에서는 매우 불리하기 때문에 다중접착접합부재의 제조에 사용할 수 없다는 결론에 도달하였다.

1-A. 위탁과제: 다중접착접합부재의 접착성능 평가 및 친환경성 평가

가. 연구개발 내용 및 범위

다중접착접합부재는 두꺼운 소경각재를 가로 및 세로방향으로 적층 접착하여 제조되는 부재이기 때문에 접착층의 접착성능이 전체적인 강도성능에 미치는 영향이 매우 클 것으로 예상된다. 이 연구에서는 KS F 3021에 주어진 구조용 집성재의 접착성능 평가 방법인 블록전단성능 평가를 통하여 접합부의 접착성능을 평가하고자 하였다.

최근에는 건물의 실내에 노출되는 건축재료 및 가구 등으로부터 방출되는 여러 가지 환경호르몬과 환경 유해물질로 인한 알레르기 및 호흡기 질환이 증가하면서 사람들의 실내 공기질에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이 연구에서 개발하고자 하는 다중접착접합부재의 경우에도 접착제가 주된 접합재료로 사용되고 있기 때문에 접착제로부터 방출되는 포름알데히드에 사람들이 민감하게 반응할 수밖에 없는 실정이다. 따라서 이 연구를 통하여 다중접착접합부재의 제조를 위하여 사용되는 접착제와 이 접착제에 의하여 접합된 부재를 통하여 실내로 방출되는 포름알데히드의 방산량을 측정하여 실내공기질 오염 가능성을 평가하고 실내공기질 오염의 정도가 심할 경우에는 이에 대한 대비책을 세우고자 한다.

나. 재료 및 방법

(1) 시험재료

(가) 목재

다중접착접합 부재를 제조하기 위하여 사용된 것과 동일하게 낙엽송과 편백 소경 간벌재로부터 제재된 소경각재를 시험용 목재로 사용하였다.

(나) 접착제

다중접착접합 부재를 제조하기 위하여 사용된 접착제와 동일하게 일본 Oshika사로부터 수입된 PRF(Phenol Resorcinol Formaldehyde) 계열 접착제와 Isocyanate 계열 접착제 2종을 사용하였다. 접착제를 구성하는 재료들의 비율은 접착제 제조사에서 권장하는 비율대로 표 A1-2 및 A1-13과 같이 구성하였다.

표 A1-12 PRF계 접착제 사용 비율

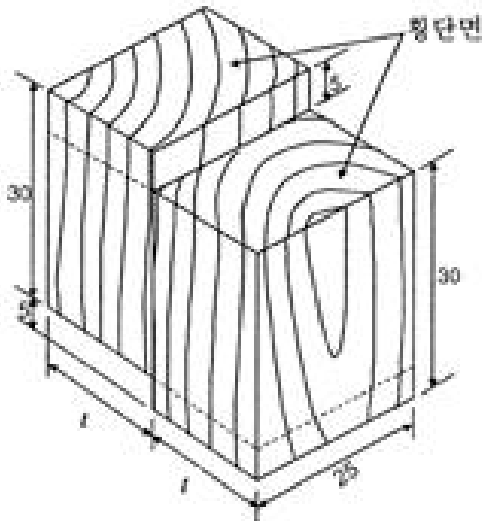
PRF계 접착제	주제	경화제	HOT
		100	15

표 A1-13 Isocyanate계 접착제 사용 비율

Isocyanate계 접착제	주제	경화제
	100	15

(다) 블록전단 성능 측정용 시험편

다중접착접합부재 접착층의 접착성능 평가를 위한 블록전단 성능 측정용 시험편은 KS F 3021(구조용 집성재)에 주어진 블록전단 시험 방법을 적용하여 그림 A1- 25와 같은 시험편을 제작하였다. 그림 A1-25(a)에서 시험편의 상하부에 튀어나온 부분은 그림 A1-25(b)에서 보는 바와 같이 5mm 두께의 섬유판을 덧대어 시험편을 제작하였다. KS F 3021에서도 블록전단 시험편의 상하부에 튀어나온 부분은 다른 목재조각을 덧대어 만들 수 있도록 허용하고 있다.



(a) KS F 3021의 시험편 모양 및 치수

(b) 실제 시험편 모양

그림 A1-25 접착성능 측정을 위한 블록전단 시험편

(라) 포름알데히드 방산량 측정용 시험편

다중접착접합부재의 포름알데히드 방산량을 측정하기 위하여 먼저 접착제만을 사용하여 방산량을 측정하고 다음으로 다중접착접합부재를 제조하였을 때의 방산량을 평가하기 위하여 접착층이 포함된 다중접착접합부재에 대한 방산량 측정을 실시하였다. 접착제만을 사용한 방산량 측정을 위한 시험편은 표 A1-14 및 A1-15와 같이 접착제 제조사의 권장 기준에 따라서 재료들을 혼합하여 제조하였다.

표 A1-14 PRF계 접착제 조성 비율(Oshika사 권장 사용 기준)






단 위	주제	경화제	HOT
비 율 (주제의 무게에 대한 백분율, %)	100	15	8
			

표 A1-15 Isocyanate계 접착제 조성 비율(Oshika사 권장 사용 기준)

단 위	주제	경화제
비 율 (주제의 무게에 대한 백분율, %)	100	15
		

접착제 시험편을 제작하기 위하여 그림 A1-26 및 A1-27에서 보는 바와 같이 표 A1-14 및 A1-15의 재료들을 균일하게 섞은 후 미리 무게를 단 유리 또는 스테인리스 접시 위에 접시 무게의 20% 이상에 해당하는 무게만큼의 시료를 달아 옮기고 톱니 모양의 약수저/흙손을 이용해 전체 면적에 걸쳐 시료를 균일하게 도포하였다. 시험편의 무게는 $(300 \pm 50) \text{g/m}^2$ 로 제작하고 전체적인 제작 시간이 5분을 넘지 않도록 하였다.



그림 A1-26 유리접시에 접착제 도포

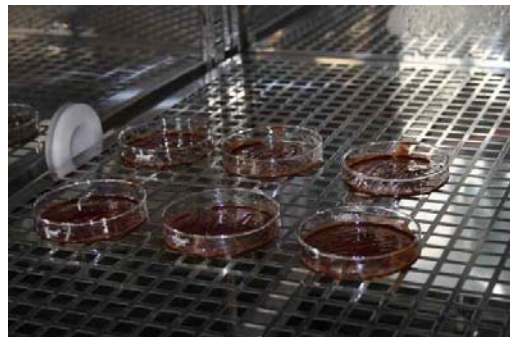


그림 A1-27 접착제의 경화

표 A1-14 및 A1-15와 같이 조성된 접착제를 사용하여 낙엽송과 편백 소경각재 접합부 시험편을 제작하였으며 시험편 제조조건은 다중접착접합부재 제조조건과 동일하게 도포량 250~300g/m², 압착 압력 170kgf/cm² 및 압착 시간 8시간을 적용하였다. 제작된 시험편의 모양은 낙엽송과 편백에 대하여 각각 그림 A1-28 및 A1-29와 같으며 시험편의 크기는 나비 (50±1) mm, 길이 (150±1)mm 및 높이 (3±0.1)mm로 제작하였으며 시험편 중앙에 가로 및 세로로 접착층이 포함되도록 하였다.



그림 A1-28 낙엽송 접합부재 시험편



그림 A1-29 편백 접합부재 시험편

(2) 시험 방법

(가) 블록전단 시험 방법

블록전단 시험편을 접착층에 전단하중이 전달될 수 있도록 제작된 시험 보조도구에 설치하고 2mm/min의 속도로 하중을 가하여 최대 하중을 측정하였으며 시험편의 전단 강도는 식 (A1-1)에 의하여 계산하였다.

$$\text{전단강도}(N/mm^2) = \frac{\text{최대하중}(N)}{\text{전단면적}(mm^2)} \quad \text{-----} \quad (A1-1)$$

시험편의 전단 면적이 25mmx25mm가 되도록 제작하였으나 정확한 면적 측정을 위하여 매 시험편마다 전단면적을 디지털캘리퍼스로 0.01mm의 정밀도로 측정하였다. KS F 3021에 따르면 구조용 집성재에 대한 전단 강도와 목파율 합격 기준은 표 A1-16과 같으며 다중접착접합부재에 대한 기준은 없지만 구조용 집성재에 대한 기준인 표 A1-16의 값을 적용하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 접착층의 목파율 계산은 육안으로 파괴된 시험편의 단면을 확인하여 10% 단위로 구분하였다.

표 A1-16 블록 전단 시험의 전단 강도 및 목파율 합격 기준

수 중 군	전단 강도 (N/mm ²)	목파율(%)
낙엽송, 편백	7.1	65

(나) 포름알데히드 방산량 시험 방법

접착제 및 접합부재의 포름알데히드 방산량 측정을 위하여 KS M 1998의 제 9항에 제시된 데시케이터법을 적용하였다. 데시케이터 내에 증류수를 넣고 그 위에 시험편이 물에 닿지 않도록 설치하여 24시간이 경과한 후 시험편으로부터 방산된 포름알데히드가 녹아있는 증류수에 대하여 분광분도계로 흡광도를 측정하여 포름알데히드의 농도를 측정하였다. 데시케이터 내에 접착제 시험편 및 접합부재 시험편을 상호 닿지 않도록 배치하고 데시케이터 내에 배치되는 시험편의 총 노출 면적이 1,800cm²가 되도록 시험편의 개수를 조정하였다.

시험편의 포름알데히드 방산량은 식 (A1-2)에 따라서 계산하였으며 계산을 위하여 필요한 용액 제조방법 및 계수 측정방법은 아래와 같다.

$$G = H \times (A_d - A_b) \times 1,800 / S \text{ ----- (A1-2)}$$

여기서, G : 시험편의 포름알데히드 농도(mg/ℓ)

F : 포름알데히드 표준용액에 대한 검정곡선의 기울기(mg/ℓ)

A_d : 시험편을 넣은 데시케이터 내 용액의 흡광도

A_b : 포름알데히드 바탕시험 용액의 흡광도

S : 시험편의 표면적 (cm²)

① 포름알데히드 표준용액에 대한 검정곡선의 기울기(F) 측정

㉞ 표준원액의 제조

1000ml 부피의 플라스크에 37% 농도의 포름알데히드 용액 1ml를 넣고 탈염수 또는 이와 동등한 순도의 물을 1000ml 눈금까지 가하여 희석함으로써 표준용액을 제조하였다.

㉟ 표준원액의 포름알데히드 농도

50ml의 삼각 플라스크에 포름알데히드 표준원액 5ml, 0.005mol/ℓ 농도의 아이오딘(I) 용액 20ml 및 5mol/ℓ 농도의 수산화칼륨(KOH) 용액 1ml를 넣고 마개를 닫아 차광한 상태에서 15분간 실온에 방치하였다. 이와 병행하여 탈염수 또는 이와 동등한 순도의 물 5ml를 같은 방법으로 조작하여 바탕 시험용액으로 사용하였다. 그림 A1-30 및 A1-31과 같이 포름알데히드 표준원액 및 바탕 시험용액에 대하여 각각 2.5mol/ℓ 농도의 황산 용액 2ml를 서서히 가하여 다시 마개를 닫고 5분간 상온에서 방치한 후 뷰렛을 사용하여 0.01mol/ℓ 농도의 싸이오황산나트륨(Na₂S₂O₃) 용액으로 적정하였다.

표준원액 1ml 중의 포름알데히드 농도는 식 (3)에 따라서 계산한다.

$$\text{포름알데히드 농도}(mg/ml) = \frac{0.1501 \times (B - S) \times F}{5} \text{ ----- (A1-3)}$$

- 여기서, B : 바탕 시험 용액의 적정량(ml)
- S : 포름알데히드 표준원액의 적정량(ml)
- F : 싸이오황산나트륨 용액의 농도계수



그림 A1-30 표준원액의 적정



그림 A1-31 바탕 시험 용액의 적정

㉔ 표준용액의 제조

적당한 부피의 플라스크를 선택하여 탈염수 또는 이와 동등한 순도의 물로 희석한 용액 1000ml 중에 포름알데히드 3mg이 함유될 수 있도록 계산된 표준원액의 양을 채취하여 부피 플라스크에 넣고 희석하여 표준용액을 조제하였다.

㉕ 검정곡선의 작성

검정곡선을 작성하기 위하여 포름알데히드 표준용액을 피펫으로 0ml, 5ml, 10ml, 20ml, 50ml, 및 100ml를 채취하여 100ml 부피의 플라스크에 각각 넣은 후 탈염수 또는 이와 동등한 순도의 물을 눈금까지 채운 것을 검정곡선 작성을 위한 포름알데히드 용액으로 하였다. 각각의 검정곡선 작성용 용액에서 25ml를 나누어 아세틸-아세톤 흡광 광도법에 의하여 측정한 후 그림 A1-32와 같이 포름알데히드 양과 흡광도와와의 관계를 나타내는 그래프를 작성하고 이 그래프의 기울기를 계산하여 F 값으로 하였다.

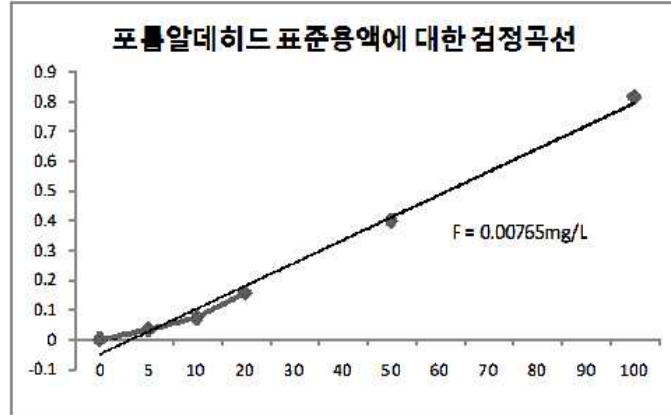


그림 A1-32 포름알데히드 표준용액에 대한 검정곡선의 기울기

② 시험편을 넣은 데시케이터 내 용액의 흡광도(A_d) 측정

물로 충분히 세척하고 건조시킨 데시케이터 및 유리 결정 그릇(그림 A1-33)을 2개 이상 준비하고 각 유리 결정 그릇에 $(300 \pm 1) \text{ml}$ 의 증류수를 넣고, 데시케이터의 중앙 하단에 놓는다. 데시케이터 내의 유리 결정 그릇 위에 스테인리스 그물망을 깔고 그 위에 시험편 지지대 및 포름알데히드 방산량 측정용 시험편(그림 A1-34)을 배치한 후(그림 A1-35) 데시케이터를 $(20 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ 로 유지되는 항온실에 설치(그림 A1-36)하여 데시케이터의 뚜껑을 닫고 방출 실험을 개시하였다. 다른 하나의 데시케이터에는 시험편을 넣지 않은 채로 준비하여 포름알데히드 바탕 농도 측정에 사용하였다.



그림 A1-33 유리 결정 그릇



그림 A1-34 시험편 지지대



(a) 목재 시편 설치 데시케이터



(b) 접착제 시편 설치 데시케이터

그림 A1-35 데시케이터 내에 시험편 설치



그림 A1-36 항온실 내에 데시케이터 설치

그림 A1-36과 같은 상태에서 24시간±10분 동안 방치함으로써 포름알데히드 방출 시험을 실시하였으며 데시케이터 내에 들어있는 유리 포집 그릇의 포름알데히드를 흡수한 물을 시험용 용액으로 사용하였다. 시험 시작 후 24시간이 경과하면 우선 이 용액을 충분히 혼합하였으며 100ml 부피의 삼각플라스크를 이 시험용 용액으로 세척하고 이 용액으로 채워서 마개를 닫았다. 시험용 용액 중의 포름알데히드 농도는 다음과 같이 아세틸-아세톤 흡광 광도법에 의하여 측정하였다. 포름알데히드를 포집한 증류수 25ml를 100ml 부피의 삼각플라스크에 넣고 아세틸아세톤-아세트산암모늄 용액 25ml를 첨가한 후 마개를 막고 혼합하였다. 이 삼각 플라스크를 (65±2)℃의 물속에서 10분간 가온(그림 A1-37)한 후 실온이 될 때까지 차광한 상태에서 식히고, 식은 용액을 흡수 셀(그림 A1-38)에 넣어 물을 대조로 해서 파장 412nm에서 분광 광도계로 흡광도를 측정(그림 A1-39)하였다.



그림 A1-38 삼각플라스크 가운



그림 A1-39 흡수 셀(큐벳)



그림 A1-40 분광광도계(Libra s22)

③ 포름알데히드 방산량에 따른 환경 등급

데시케이티법을 통해 측정된 포름알데히드 방산량에 대한 측정결과는 표 A1-17의 기준값에 따라서 4가지의 등급으로 나눌 수 있다.

표 A1-17 포름알데히드 방산량에 따른 환경 등급

등급	방산량		허용기준(한국)	허용기준(세계)
	평균값	최대값		
SE ₀ 등급	0.3mg/ℓ 이하	0.4mg/ℓ 이하	○	○
E ₀ 등급	0.5mg/ℓ 이하	0.7mg/ℓ 이하	○	○
E ₁ 등급	1.5mg/ℓ 이하	2.1mg/ℓ 이하	○	×
E ₂ 등급	1.5mg/ℓ 초과	2.1mg/ℓ 초과	×	×

다. 시험 결과

(1) 블록전단 성능

다중접착접합부재 접착층에 대한 블록전단 성능 시험은 낙엽송에 대하여 PRF계 접착제 및 Isocyanate계 접착제의 두 가지로 제작된 시험편에 대한 시험을 실시하였으며 편백에 대하여 Isocyanate 계 접착제로 제작된 시험편에 대한 시험을 실시하였다. 블록 전단시험은 모든 종류에 대하여 각각 20반복을 실시하였으며 그 결과는 표 A1-18과 같다. 다중접착접합부재를 구성하는 소경각재는 수심을 중심에 함유하는 상하좌우 대칭형의 정각재로서 나비 방향이나 춤(높이) 방향 접착층 사이에 나뭇결 방향의 차이가 발생하지 않는다. 따라서 KS F 3021에 주어진 바와 같이 나비 방향과 춤 방향의 두 가지 시험편을 제작하지 않고 한 가지 시험편만을 제작하여 블록전단 시험을 실시하였다.

표 A1-18 다중접착접합부재 접착층의 전단성능

수종	접착제	전단성능(N/mm ²)	
		측정값(평균)	기준값
낙엽송	PRF 계	12.27	7.1
낙엽송	Isocyanate계	12.0	
편백	Isocysnate계	12.0	

표 A1-18에서 보는 바와 같이 각 종류의 시험편 사이에 전단강도는 큰 차이가 없었으며 모든 시험편이 기준값인 7.1N/mm² 이상의 전단강도를 나타내었다. PRF계 접착제와 Isocyanate 계 접착제는 유사한 전단강도를 나타내었으며 낙엽송 접합부재와 편백 접합부재의 전단강도도 비슷한 값을 나타내었다.

(2) 포름알데히드 방산량

(가) 접착제 자체의 포름알데히드 방산량

접착제 자체만으로 만든 시험편의 포름알데히드 방산량은 PRF계 접착제는 0.82mg/ℓ 그리고 Isocyanate계 접착제는 0.0004mg/ℓ 를 나타내었다. 포름알데히드 방산량에 따른 환경 등급은 PRF계 접착제는 E₁ 등급, Isocyanate계 접착제 SE₀ 등급으로 나타났다.

포름알데히드 방산량 저감 방안을 찾기 위해 접착제를 구성하는 재료들의 조성 비율을 달리하여 실험을 진행하였다. Isocyanate계 접착제는 포름알데히드 방산량이 극미량이기 때문에 판단하기 어렵지만, PRF계 접착제의 경우에는 주제의 비가 경화제에 비해 증가함에 따라 포름알데히드 방산량이 감소되는 것으로 나타났다. 접착제의 조성 비율 차이에 따른 포름알데히드 방산량 측정 결과는 표 A1-19 및 A1-20과 같다.

표 A1-19 PRF계 접착제의 조성 비율 차이에 따른 포름알데히드 방산량

구분	주제 76%	주제 79%	주제 81% (Oshika사 권장 기준)	주제 83%
주제	73.8	86.1	100	110.7
경화제	15	15	15	15
HOT	8	8	8	8
결과(mg/ℓ)	1.42	1.32	0.82	0.67
환경등급	E ₁ 등급	E ₁ 등급	E ₁ 등급	E ₁ 등급

표 A1-20 Isocyanate계 접착제의 조성 비율 차이에 따른 포름알데히드 방산량

구분	주제 84%	주제 86%	주제 87% (Oshika사 권장 기준)	주제 89%
주제	80.5	92	100	115
경화제	15	15	15	15
결과(mg/ℓ)	0.0039	0.0047	0.0004	0.0002
환경등급	SE ₀ 등급	SE ₀ 등급	SE ₀ 등급	SE ₀ 등급

표 A1-19 및 A1-20의 시험결과를 그래프로 나타내면 각각 그림 A1-41 및 A1-42와 같다.

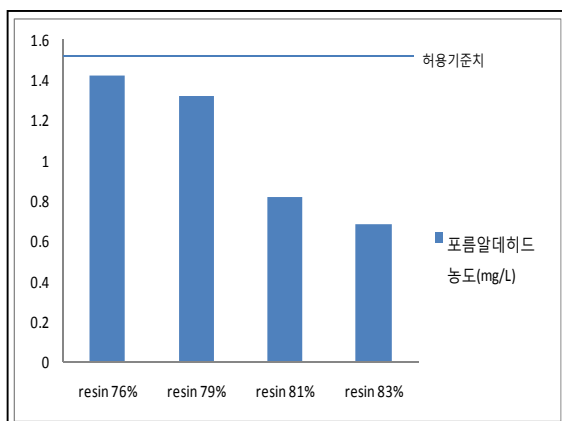


그림 A1-41 PRF계 접착제의 조성비율에 따른 포름알데히드 방산량의 변화

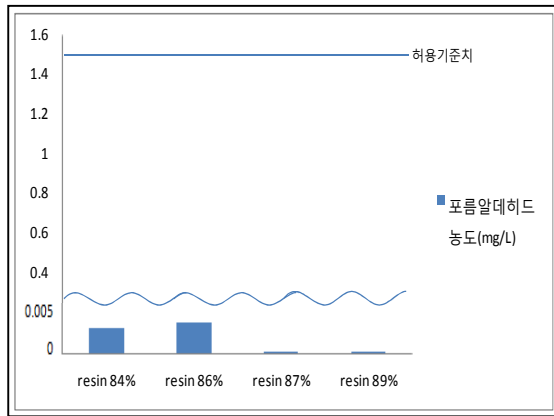


그림 A1-42 IsocyanaterP 접착제의 조성비율에 따른 포름알데히드 방산량의 변화

(나) 다중접착접합부재의 포름알데히드 방산량

PRF계 접착제의 경우에 접착제 자체는 포름알데히드 방산량이 0.82mg/ℓ로서 환경 등급 E₁을 나타내었으며 세계 기준인 E₀급에는 미치지 못하는 수준이다. 하지만 PRF계 접착제를 사용하여 제작한 다중접착접합부재의 포름알데히드 방산량 측정 결과는 표 A1-21에 주어진 바와 같이 평균값이 0.00133mg/ℓ이고 최대값이 0.00146mg/ℓ로서 환경등급이 SE₀를 나타내었다.

표 A1-21 PRF계 접착제를 사용한 낙엽송 다중접착접합부재의 포름알데히드 방산량 (Oshika사 기준 81%)

구분	Test1	Test2	Test3	평균	환경등급
포름알데히드 방산량(mg/ℓ)	0.00121	0.00146	0.00132	0.00133	SE ₀

Isocyanate계 접착제는 접착제 자체의 포름알데히드 방산량이 극소량이었으며, 또한 Isocyanate계 접착제를 사용한 다중접착접합부재의 포름알데히드 방산량도 표 A1-22에 주어진 바와 같이 극소량으로서 환경등급 SE₀를 나타내었다.

표 A1-22 Isocyanate계 접착제를 사용한 낙엽송 다중접착접합부재의 포름알데히드 방산량 (Oshika사 기준 87%)

구분	Test1	Test2	Test3	평균	환경등급
포름알데히드 방산량(mg/ℓ)	0.00053	0.00051	0.00061	0.00055	SE ₀

2. 2차년도 연구과제: 다중접착접합부재의 접합 및 보강기술 개발

가. 개발 내용 및 범위

이 연구에서 개발된 다중접착접합부재를 한옥 건축용 기둥 및 보로 사용하기 위해서는 길이가 짧은 부재뿐만 아니라 길이가 3.6m 이상의 긴 부재들도 사용되어야 한다. 길이가 짧은 부재의 경우에는 소경원목으로부터 생산되는 소경각재 자체의 길이로 충분하기 때문에 길이이음을 하지 않고 그대로 접착하여 부재를 제조할 수 있다. 그러나 기둥이나 보 중에서 길이가 3.6m 이상인 부재의 경우에는 하나의 소경각재 길이로 제조하기에 어려움이 있기 때문에 핑거조인트를 통한 길이이음을 한 소경각재들을 사용하여야 한다. 이와 같이 핑거조인트 소경각재로 제조된 다중접착접합부재의 강도 성능은 핑거조인트 소경각재의 강도 성능에 영향을 받게 될 것이며 핑거조인트 소경각재의 강도 성능은 소경각재 자체보다는 오히려 핑거조인트의 품질에 따라서 좌우될 것이다. 이 연구에서는 핑거조인트 소경각재의 압축 및 휨 성능을 평가하고자 하며 기존의 구조용 집성재 생산라인에 포함되어 있던 35mm 두께의 층재에 대한 핑거조인트에서 두께 80~100mm의 소경각재에 적용할 수 있는 핑거조인트 방법을 개발하고 이를 적용하여 생산된 핑거조인트 소경각재의 성능을 평가하고자 한다.

다중접착접합부재가 한옥의 기둥이나 보로 사용되기 위해서는 부재 자체의 강도성능뿐만 아니라 기둥과 보 사이의 접합부가 개발되고 그 성능이 평가되어야 한다. 한옥건축에 사용될 수 있는 기둥과 보 사이의 접합부는 다양한 모양이나 형식이 있을 수 있으며 이들 중에서 다중접착접합부재에 적합한 접합부를 개발하고 그 전단성능과 모멘트 저항성능을 평가하고자 한다. 한옥에 작용하는 하중은 고정하중, 활하중, 적설하중 등의 수직하중과 풍하중, 지진하중 등의 수평하중으로 구분할 수 있다. 수직하중은 지구의 중심을 향하여 작용하는 하중으로서 건축물의 가장 윗부분에서 시작하여 점차 아래로 하중을 전달하며 최종적으로 기초구조를 통하여 지반으로 하중을 전달 및 분산시킴으로써 수직하중 하에서 건축물이 안전하게 그 용도에 맞도록 사용될 수 있다. 수직하중은 건축물 상부의 지붕구조를 통해서 지붕구조를 지지하는 보로 하중을 전달하고 보에 전달된 하중은 휨에 의하여 지지되며 보의 양끝을 지지하는 기둥에 하중을 전달하게 된다. 보에 전달된 하중이 기둥으로 전달되는 과정에서 보와 기둥 사이의 접합부에는 전단력이 작용하게 되며 접합부가 과도한 변형이 발생되지 않으면서 이 전단력을 안전하게 지지하여야 한다.

수평하중은 지표면에 평행한 방향으로 작용하는 하중으로서 건축물을 옆으로 쓰러트리는 힘을 작용시킨다. 이러한 수평하중 하에서 기둥-보 구조의 건축물이 안전하기 위해서는 기둥과 보 사이의 접합부가 회전모멘트에 대해서 저항력을 나타낼 수 있도록 충분한 강성을 지녀야 한다. 강성이 부족한 접합부는 수평하중에 의하여 작용하는 회전모멘트에 의하여 접합부가 회전을 하게 되고 접합부가 회전하면 아무리 기둥이나 보 부재가 튼튼하더라도 건축물이 옆으로 쓰러지게 될 것이다. 따라서 다중접착접합부재가 기둥-보 구조의 한옥 건축에 사용되기 위해서는 반드시 기둥과 보 사이의 올바른 접합방법이 개발되어야 하며 이들 접합부에 대한 전단 및 모멘트저항성능이 올바르게 평가되고 이러한 측정값이 한옥의 구조설계에 반영되어야 한다. 이 연구에서는 다중접착접합부재를 한옥 건축의 기둥과 보 부재로 사용할 수 있도록 기둥과

보 사이의 다양한 접합부를 개발하고 이들 접합부에 대한 전단성능 및 모멘트저항성능을 평가하고자 한다.

나. 시험재료

시험용 재료로는 국내에서 현재 가장 많은 양이 생산되고 있는 낙엽송과 잣나무 간벌목을 사용하고자 한다. 원래 계획은 소나무 간벌목도 사용하여 부재 개발을 하고자 하였으나 연구를 추진하면서 소나무 간벌목은 생산량도 적고 구하기도 어려운 실정을 알게 됨으로써 최종적으로 소나무 간벌목은 사용하지 않기로 하였다. 1차년도와 마찬가지로 조림 후 20~30년 정도가 지나서 흉고지름이 120mm~150mm 정도에 달하는 간벌재들 중에서 길이 1.8m 이상의 직선재를 선별하여 사용하였다. 이들 선별된 간벌재로부터 다중접착접합부재 생산을 위한 원자재로 수심을 포함하며 단면치수가 80mmx80mm인 소경각재를 제재하여 건조 및 대패마감하였다.

간벌재로부터 제재, 건조 및 대패 마감된 소경각재로부터 다중접착접합부재를 생산하기 위하여 핑거조인트를 사용하여 소경각재의 길이이음을 만들고 길이이음 된 핑거조인트 소경각재를 가로 및 세로 방향으로 적층 접착하여 다중접착접합부재를 제조하였다. 소경각재의 길이이음을 위한 핑거조인트를 만들기 위하여 2개 부재의 끝면에 핑거를 가공하고 핑거끼리의 접합을 위하여 일본의 Oshika사에서 핑거조인트 전용 접착제로 개발한 resorcinol계 접착제인 DOORNOR DF-2000호를 수입하여 사용하였다. DOORNOR DF-2000호는 포름알데히드(formaldehyde)를 경화제로 사용하는 저점도의 2액 분리 도포형 접착제로서 접착제와 경화제가 혼합된 후 약 40초의 겔화시간을 갖는다. DF-2000 접착제는 점도 $0.63\text{Pa}\cdot\text{s}$, 비중 1.164, pH 10.8 및 수지 고형분 함량 60.4%의 기본 물성을 지니고 있다. 압제 조건은 도포량 $400\sim 500\text{g}/\text{m}^2$ 및 압제 압력 $1.96\sim 9.8\text{MPa}$ 로서 핑거조인트를 만드는 2개의 부재 중 하나에는 접착제를 도포하고 다른 하나에는 경화제를 도포한 후 5분 이내에 압력을 가하여 접합을 시키고 접합 후 15 시간 이상 양생을 시킨다.

핑거조인트 소경각재를 제조한 후 소경각재끼리 가로 접착을 실시하여 부재 제조에 필요한 나비를 확보한 후 이 부재들끼리 세로 방향으로 적층 접착하여 적절한 높이를 갖는 부재를 제조하였다. 가로 접착은 접착강도와 함께 가능하면 짧은 시간에 접착 및 양생이 이루어져야 하므로 단기간 접착용으로 일본 Oshika사에서 개발한 수성고분자 isocyanate 계 접착제인 PI Bond TP-111을 수입하여 사용하였다. TP-111 접착제는 점도 $10\text{Pa}\cdot\text{s}$, pH 6.4, 고형분 함량 60% 등의 기본 물성은 지니고 있다. 압제 조건은 도포량 $230\sim 270\text{g}/\text{m}^2$, 압제 압력 $0.78\sim 0.98\text{MPa}$ 및 압제 시간 30분으로서 접착제 혼합 및 도포 후 15분 이내에 압력을 가하고 압제 후 5일간 양생을 시킨다.

세로 접착은 접착강도가 우수한 구조용 집성재 제조용으로 일본 Oshika사에서 개발한 resorcinol 계 접착제인 DOORNOR D-40호를 수입하여 사용하였다. D-40 접착제는 점도 $0.22\sim 0.49\text{Pa}\cdot\text{s}$, 비중 1.13~1.15, pH 8~9 및 수지 고형분 함량 56~61%의 기본 물성을 지니고 있으며 접착제와 경화제를 혼합한 후 15~33분의 겔화시간을 갖는다. 압제 조건은 도포량 $250\sim 350\text{g}/\text{m}^2$, 압제 압력 $0.98\sim 1.08\text{MPa}$ 및 압제 시간 16~48시간으로서 접착제를 도포한 후 20

분 이내에 압력을 가하여 접합을 시키고 접합 후 3일 이상 양생을 시킨다.

기둥과 보 사이의 접합부를 만들기 위하여 KS D 3503(일반 구조용 압연 강재)의 SS400과 동등 이상의 품질을 갖는 두께 6mm의 철판을 사용하였다. 접합부에서 목재와 철판 사이의 접합을 위하여 사용하는 조임쇠로는 KS F 4514(목구조용 철물)에 적합한 볼트, 래그나사못, 드리프트 핀 등을 사용하였다.

다. 다중접착접합 기둥과 보 사이의 접합기술 개발

다중접착접합부재 기둥과 보 사이의 접합부를 사용되는 철물의 기능에 따라서 철물의 인장강도로 저항하는 인장형 접합부와 철물의 전단저항을 주로 활용하는 전단형 접합부로 구분하고 기존의 한옥 건축에 활용되던 전통 장부 접합부를 대조구로 사용하였다. 인장형 접합부는 주로 긴 막대형 철물을 기둥과 보 부재에 삽입한 후 철물로 고정하는 철물 인장형 접합부와 에폭시 수지로 접착하여 고정하는 접착 인장형 접합부로 구분하였다. 접합부의 종류는 접합철물의 기능과 모양, 주로 작용하는 응력 또는 하중의 종류, 장부접합의 적용 여부 및 접합부의 기능 개선 등에 따라서 그림 A2-1과 같은 기호로 나타내었다.

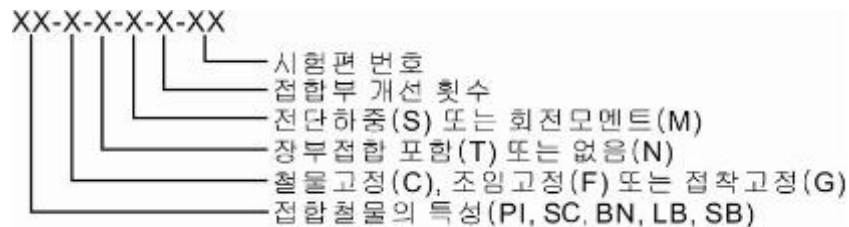


그림 A2-1 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 기호

이 연구에서 개발된 접합부의 종류 및 형태별 기호를 요약하면 표 A2-1과 같다. 이 연구에서 개발된 접합부는 표 A2-1에서 보는 바와 같이 전단하중 저항 접합부 시험편이 9가지 그리고 회전모멘트 저항 접합부 시험편이 4가지 종류이다. 접합철물의 주 기능으로 본 분류는 인장형과 전단형의 두 가지 종류이며 고정방법에 따라서는 철물 고정과 접착고정의 2가지로 분류할 수 있다. 사용된 접합철물의 종류는 총 7가지 종류이며 각 종류별로 장부접합을 병행한 경우와 장부접합이 없는 경우로 구분할 수 있다. 이 연구에서는 표 A2-1에 주어진 총 13가지 종류의 접합부 종류에 대하여 각각 2개의 시험편을 제작하여 시험을 실시하였으며 2개의 시험편의 측정치의 평균을 해당 접합부의 강도로 계산하였다.

표 A2-1 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 종류

기능	고정방법	접합철물	장부접합	저항하중	접합부 기호
인장형	철물고정(C)	파이프(PI)	없음(N)	전단하중(S)	PI-C-N-S
			있음(T)	전단하중(S)	PI-C-T-S
		볼트-너트(BN)	있음(T)	전단하중(S)	BN-C-T-S
			없음(N)	회전모멘트(M)	BN-C-N-M
	조임고정(F)	래그볼트(LB)	있음(T)	전단하중(S)	LB-F-T-S
			없음(N)	회전모멘트(M)	LB-F-N-M
	접착고정(G)	철근(SB)	있음(T)	전단하중(S)	SB-G-T-S
			없음(N)	회전모멘트(M)	SB-G-N-M
전단형	철물고정(C)	삼입형 십자철관(SC)	없음(N)	전단하중(S)	SC-C-N-S
			있음(T)	전단하중(S)	SC-C-T-S
			있음(T)	회전모멘트(M)	SC-C-T-M
		부착형 안장철관(SH)	없음(N)	전단하중(S)	SH-C-N-S
	부착형 받이철관(SE)	없음(N)	전단하중(S)	SE-C-N-S	
	장부맞춤(N)	없음	있음(T)	전단하중(S)	WC-N-T-S

(1) 인장형 접합부

인장형 접합부는 철물의 높은 인장강도를 이용하여 접합부를 구성하는 방법으로서 주변에서 쉽게 구할 수 있는 재료로서 쇠파이프 또는 긴 볼트를 사용하는 접합부를 개발하였다. 따라서 인장형 접합부는 사용하는 철물의 종류에 따라서 파이프를 삼입하는 파이프 인장형 접합부와 볼트를 삼입하는 볼트-너트 인장형 접합부로 구분하였다.

(가) 파이프 인장형 접합부

파이프를 삼입하는 접합부는 파이프를 목재부재 내에 삼입 후 강철 핀으로 고정하였으며 장부가 없는 파이프 인장형 접합부(PI-C-N-S)와 장부가 있는 파이프-장부 인장형 접합부(PI-C-T-S)로 구분할 수 있다. 파이프 인장형 접합부(PI-C-N-S)는 그림 A2-2에서 보는 바와 같이 목재부재의 윗면과 밑면으로부터 50mm 떨어진 위치에 지름 30mm의 구멍을 뚫고 지름 27mm, 길이 500mm 및 두께 3.4mm의 쇠파이프를 삼입하였다. 쇠파이프를 고정하기 위하여 각각의 쇠파이프에 그림 A2-2에 주어진 바와 같은 위치에 지름 12mm의 구멍 5개를 뚫고 지름 12mm 및 길이 120mm의 강철핀을 삼입하였다. 그림 A2-2의 접합부는 1차로 만들어진 파이프 인장형 접합부로서 2개의 시험편을 제작하였으므로 각각 PI-C-N-S-1-1 및 PI-C-N-S-1-2의 기호를 부여하였다.

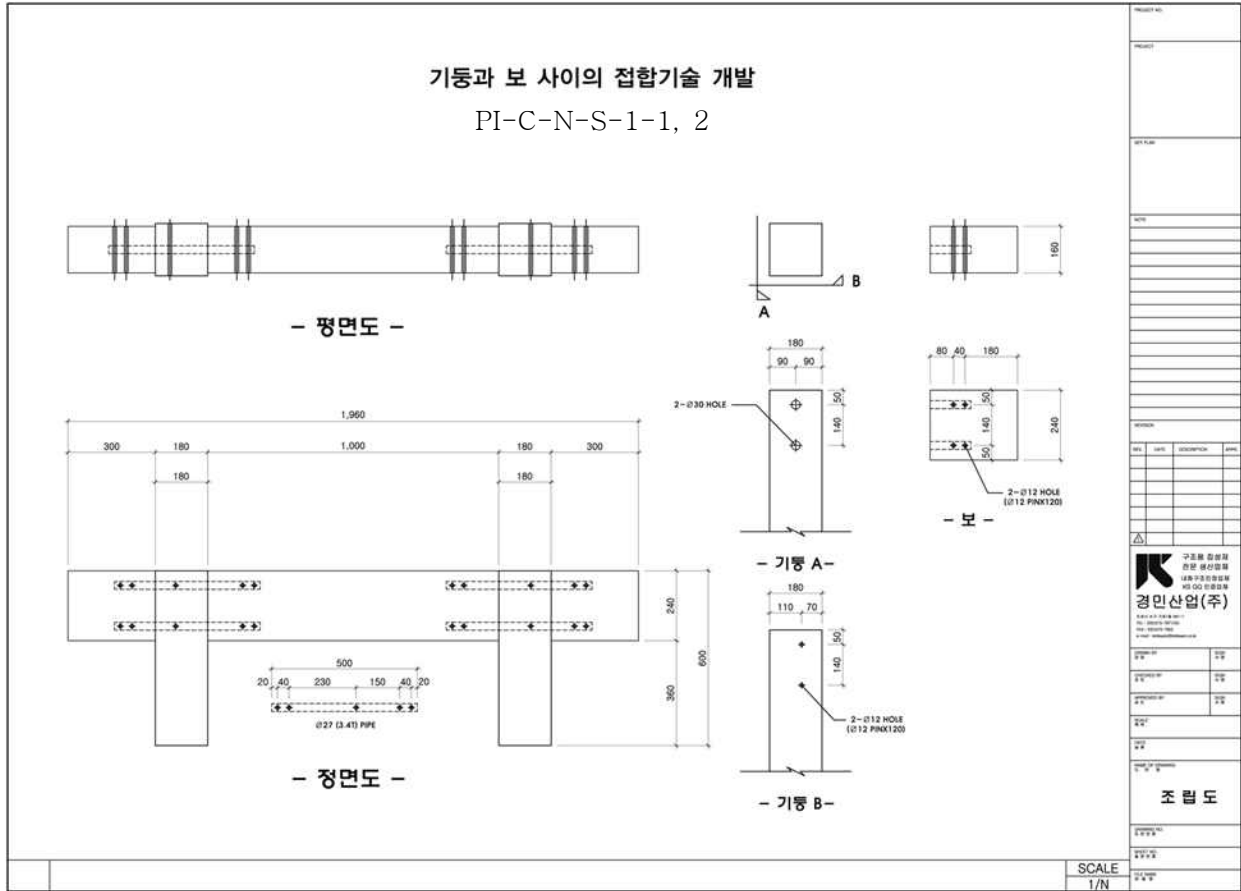


그림 A2-2 파이프 인장형 접합부(PI-C-N-S)

그림 A2-2의 파이프 인장형 접합부(PI-C-N-S)에 전단하중이 작용하면 그림 A2-3에서 보는 바와 같이 접합부에 삽입된 2개의 쇠파이프가 휨에 의하여 모든 전단하중을 지지하여야 하기 때문에 전단하중에 대한 저항력이 생각보다 우수하지는 않을 것으로 예상되었다.



그림 A2-3 PI-C-N-S 접합부의 전단변형

이러한 문제를 개선하기 위하여 쇠파이프에 장부접합을 병행하여 접합부를 구성한다면 전단하중에 대하여 쇠파이프의 휨강도에 장부부분의 섬유직각방향 압축강도가 더하여져서 저항을

나타냄으로써 좀더 전단강도가 우수한 접합부가 가능할 것으로 예상되었다. 따라서 이 연구에서는 그림 A2-2의 PI-C-N-S 접합부에 장부접합을 병행하여 설치함으로써 그림 A2-4와 같은 파이프-장부 인장형 접합부(PI-C-T-S)를 개발하였다. 그림 A2-4의 파이프-장부 인장형 접합부에서 장부의 크기는 길이 30mm, 나비 60mm 및 높이 140mm로 하였고 장부는 보 부재의 상부 중앙에 설치하였다.

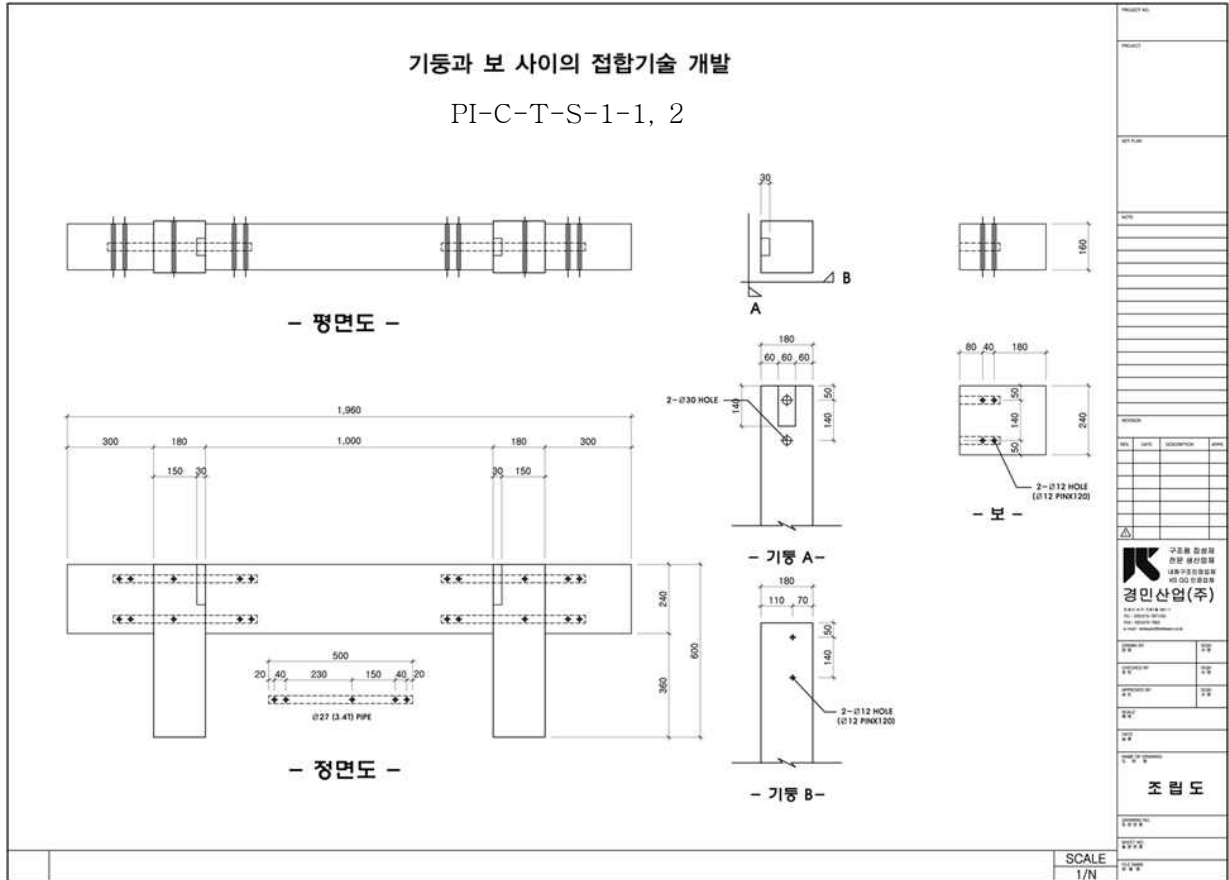


그림 A2-4 파이프-장부 인장I형 접합부(PI-C-T-S-1)

그림 A2-4의 파이프-장부 인장형 접합부는 전단하중 하에서 쇠파이프의 휨강도에 장부의 섬유직각방향 압축강도가 더해져서 전단하중을 지지하지만 전단하중에 대한 저항력을 좀 더 향상시키기 위하여 쇠파이프의 아래쪽에 래그나사못을 설치하면 전단하중 하에서 쇠파이프가 휘는 것을 래그나사못이 방지할 수 있을 것으로 예상되었다. 그림 A2-5에서 보는 바와 같이 전단하중 하에서 쇠파이프가 꺾이기 쉬운 지점인 장부 바로 앞에 지름 10mm의 구멍을 뚫고 지름 10mm에 길이 155mm의 래그나사못을 설치한 개선된 파이프-장부 인장II형 접합부(PI-C-T-S-2)를 개발하였다.

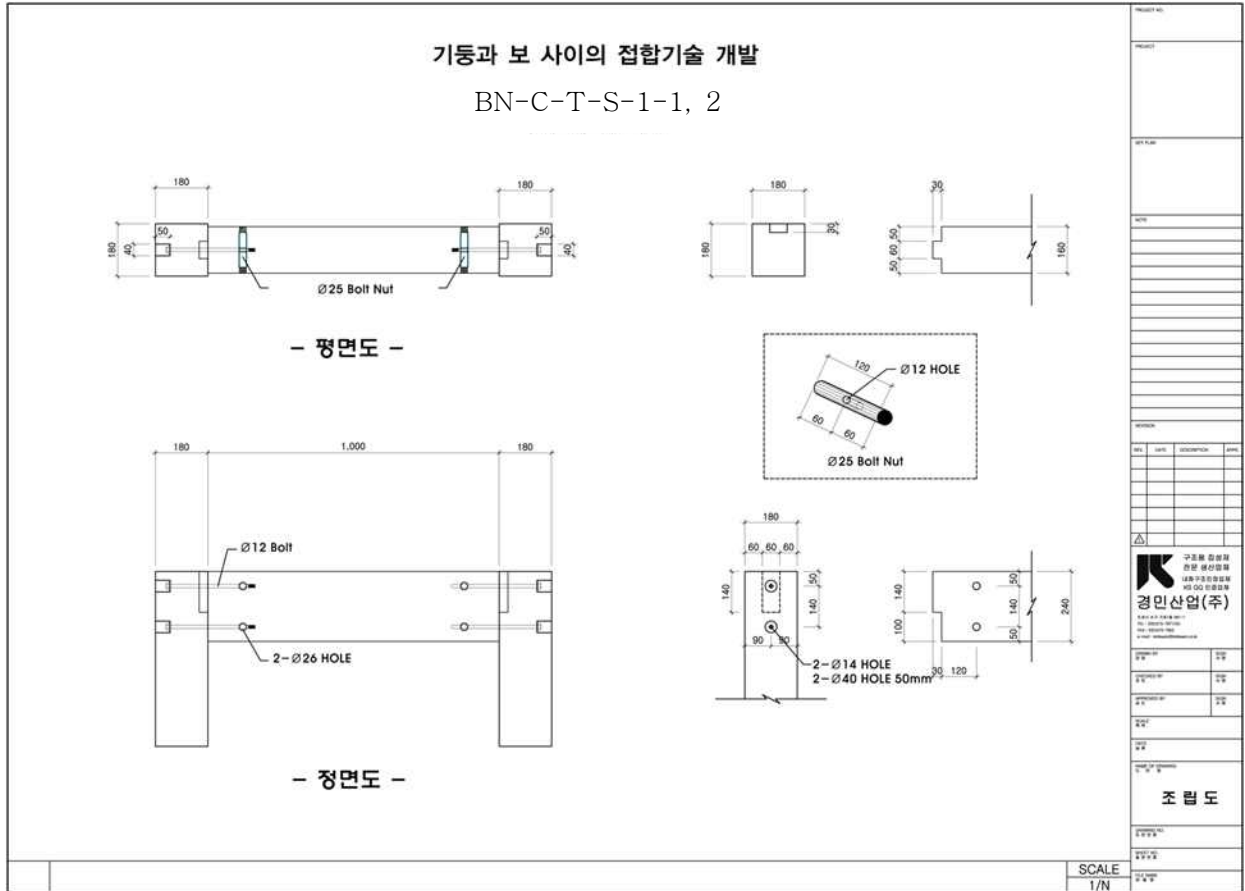


그림 A2-6 볼트-너트 인장형 접합부(BN-C-T-S)

그림 A2-6의 도면에 따라서 가공된 접합부의 모양은 그림 A2-7 및 A2-8과 같다. 그림 A2-7에서 보면 보 부재의 상부 중앙에 가공되어 있는 장부를 볼 수 있고 기둥과 보 부재에 삽입되는 2개의 긴 막대형 볼트와 볼트의 끝 부분을 잡아주는 볼트-너트를 볼 수 있다. 모든 접합철물이 삽입되고 조여진 상태의 접합부 전단시험편은 그림 A2-8과 같다.



그림 A2-7 볼트-너트 접합부의 구성

삽입하였다. 볼트-너트의 삽입은 전단시험 접합부와 동일한 방법으로 실시하였으며 볼트머리는 시험편 제작의 편리를 고려하여 기둥에 삽입하지 않고 노출시키는 것으로 하였다. 긴 막대형 볼트를 삽입하기 위한 구멍은 그림 A2-10과 같이 긴 길이의 구멍을 뚫기 위한 보조 장치를 장착한 천공기를 사용하였으며 그림 A2-11은 접합부를 구성하는 철물들의 배치를 나타내고 있다.



그림 A2-10 볼트 삽입을 위한 구멍뚫기



그림 A2-11 회전모멘트 저항 볼트-너트 접합부의 구성

(다) 래그볼트 인장형 접합부

긴 막대형 래그볼트를 돌려서 삽입하여 고정시키는 래그볼트 인장형 접합부(LB-F-T-S)는 그림 A2-12에서 보는 바와 같이 개발하였다. 그림 A2-12에서 보는 바와 같이 보 부재의 상하면으로부터 각각 50mm 떨어진 위치에 지름 15mm의 구멍을 뚫고 지름 15mm에 총길이 480mm의 래그볼트를 돌려서 삽입하였으며 접합부의 전단저항을 향상시키기 위하여 장부를 함께 가공하였으며 장부의 크기는 길이30mm, 나비 60mm 및 높이 140mm로서 보부재의 상단 중앙에 설치하였다. LB-F-T-S 접합부를 가공하기 위하여 그림 A2-13에서 보는 바와 같이 긴 길이의 구멍을 뚫기 위한 보조 장치를 장착한 천공기를 사용하였으며 하나의 구멍은 장부의 중간에 다른 하나의 구멍은 장부 밑에 뚫어서 래그볼트를 삽입하였다. 접합부 구성을 위하여 가공된 부재들과 래그볼트의 모양은 그림 A2-14와 같으며 래그볼트를 구멍에 돌려서 삽입하기 위하여 그림 A2-15와 같이 래그볼트 전용 지그를 장착한 랜치를 사용하였다.

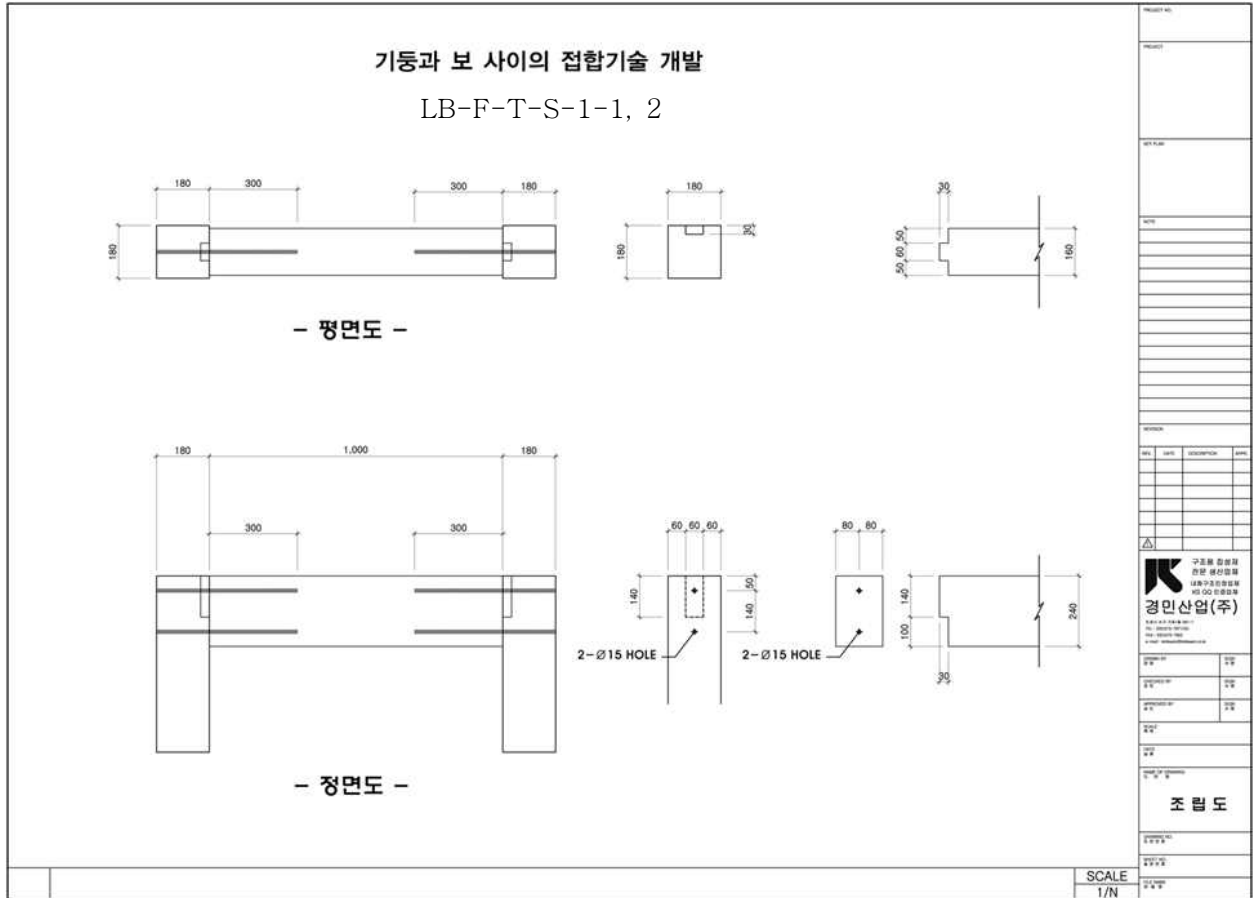


그림 A2-12 접착 래그볼트 인장형 접합부(LB-F-T-S)



그림 A2-13 목재부재에 긴 구멍 뚫기



그림 A2-14 래그볼트 접합부의 구성



그림 A2-15 래그볼트의 삽입



그림 A2-16 래그볼트 삽입 후 남은 부분

그림 A-15에서 보면 래그볼트를 삽입하기 전에 먼저 기둥과 보 부재의 장부를 정확하게 맞춘 후 래그볼트를 설치하는 동안 부재들이 움직이지 않도록 묶어서 고정하고 래그볼트를 돌려서 미리 뚫려진 구멍에 삽입하였다. 완성된 래그볼트 접합부의 모양은 그림 A2-16과 같으며 그림 A2-16에서 보면 래그볼트 삽입 후에 래그볼트를 렌치에 고정시킨 부분이 남게 되는데 이 부분은 나중에 절단 또는 연마하여 제거할 수 있다.

래그볼트 인장형 접합부를 적용한 모멘트저항시험용 시험편(LB-F-N-M)은 그림 A2-17과 같이 개발하였다. 그림 A2-17에서 보는 바와 같이 래그볼트 접합부에 회전모멘트에 대한 저항력을 증가시키기 위하여 접합부 중심에 지름 22mm의 구멍을 뚫고 지름 20mm에 길이 240mm의 이형철근을 삽입하였다. 래그볼트의 삽입은 전단시험 접합부와 동일한 방법으로 실시하였으며 래그볼트를 돌려서 삽입 후 남는 부분은 추후에 절단 또는 연마하여 제거할 수 있다. 래그볼트 접합부를 구성하는 철물들의 배치는 그림 18과 같으며 래그볼트는 그림 19와 같이 기둥과 보 부재를 단단하게 고정시킨 후 구멍을 뚫고 전용지그를 장착한 렌치로 돌려서 삽입하였다.

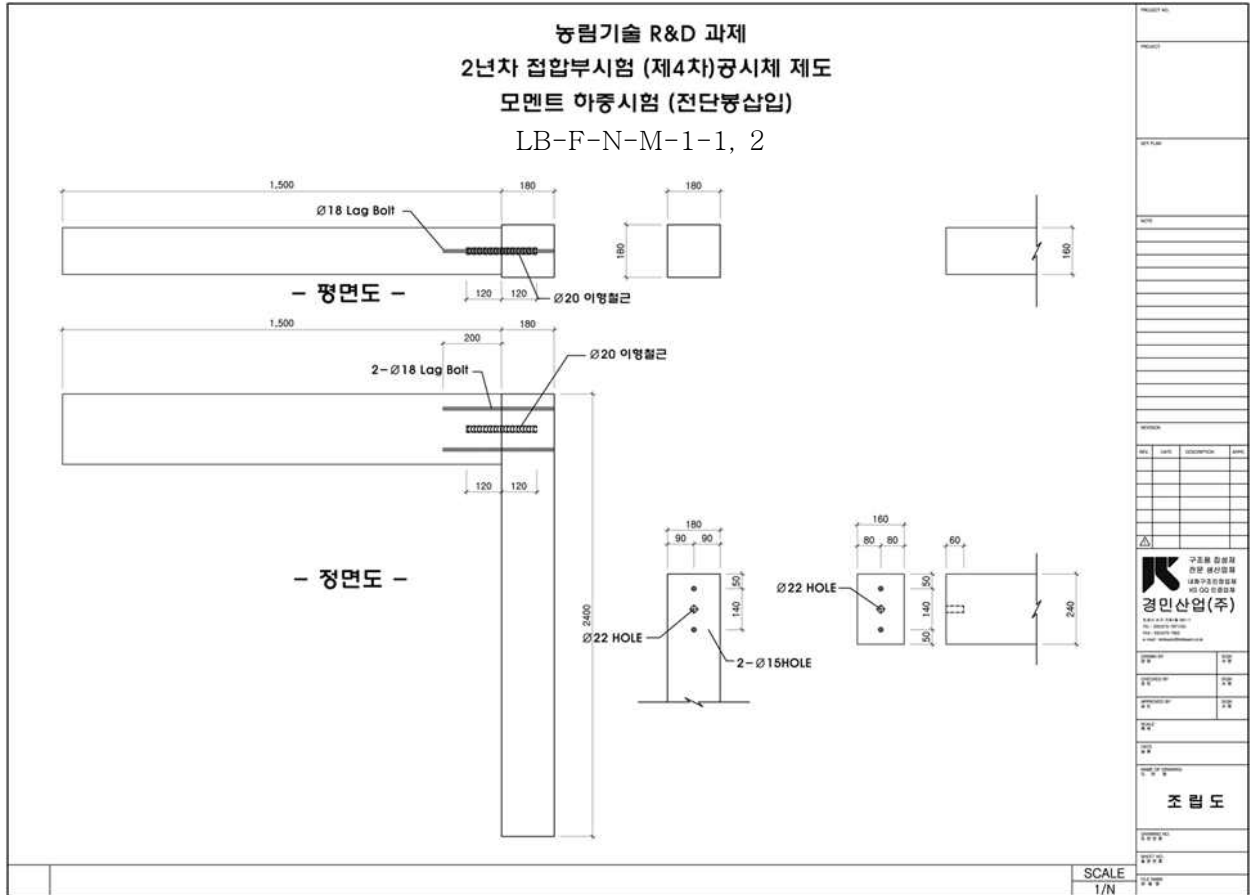


그림 A2-17 접착 래그볼트 인장형 접합부 회전모멘트 저항 시험편(LB-F-N-M)



그림 A2-18 래그볼트 접합부의 구성



그림 A2-19 래그볼트의 삽입

(라) 철근접착 인장형 접합부

긴 철근을 삽입하고 접착하여 고정시키는 철근접착 인장형 접합부(SB-G-T-S)는 그림 A2-20에서 보는 바와 같이 개발하였다. 그림 A2-20에서 보는 바와 같이 보 부재의 상하면으로부터 각각 50mm 떨어진 위치에 지름 24mm의 구멍을 뚫고 지름 22mm에 총길이 480mm의

철근을 삽입하였다. 철근 삽입을 위한 구멍의 양 끝에서 50mm 지점에 측면으로부터 지름 8mm의 구멍을 뚫고 한쪽 구멍에서 2액형 에폭시 수지를 가압하여 반대쪽 구멍으로 접착제가 흘러나올 때까지 주입하였다. 먼저 기둥과 보 부재의 장부를 정확하게 맞춘 후 철근을 삽입하고 접착제를 주입하는 동안 부재들이 움직이지 않도록 묶어서 고정하고 접착제를 주입하였다. 접착제 주입이 완료된 후 접착제 주입을 위하여 뚫었던 구멍은 나무못으로 막고 접착제 주입 후 3일간 상온에서 양생을 실시하였다. 접합부에는 전단저항을 향상시키기 위하여 장부를 함께 가공하였으며 장부의 크기는 길이30mm, 나비 60mm 및 높이 140mm로서 보부재의 상단 중앙에 설치하였다. SB-G-T-S 접합부를 가공하기 위하여 긴 길이의 구멍을 뚫기 위한 보조 장치를 장착한 천공기를 사용하였으며 하나의 구멍은 장부의 중간에 다른 하나의 구멍은 장부 밑에 뚫어서 철근을 삽입하였다.

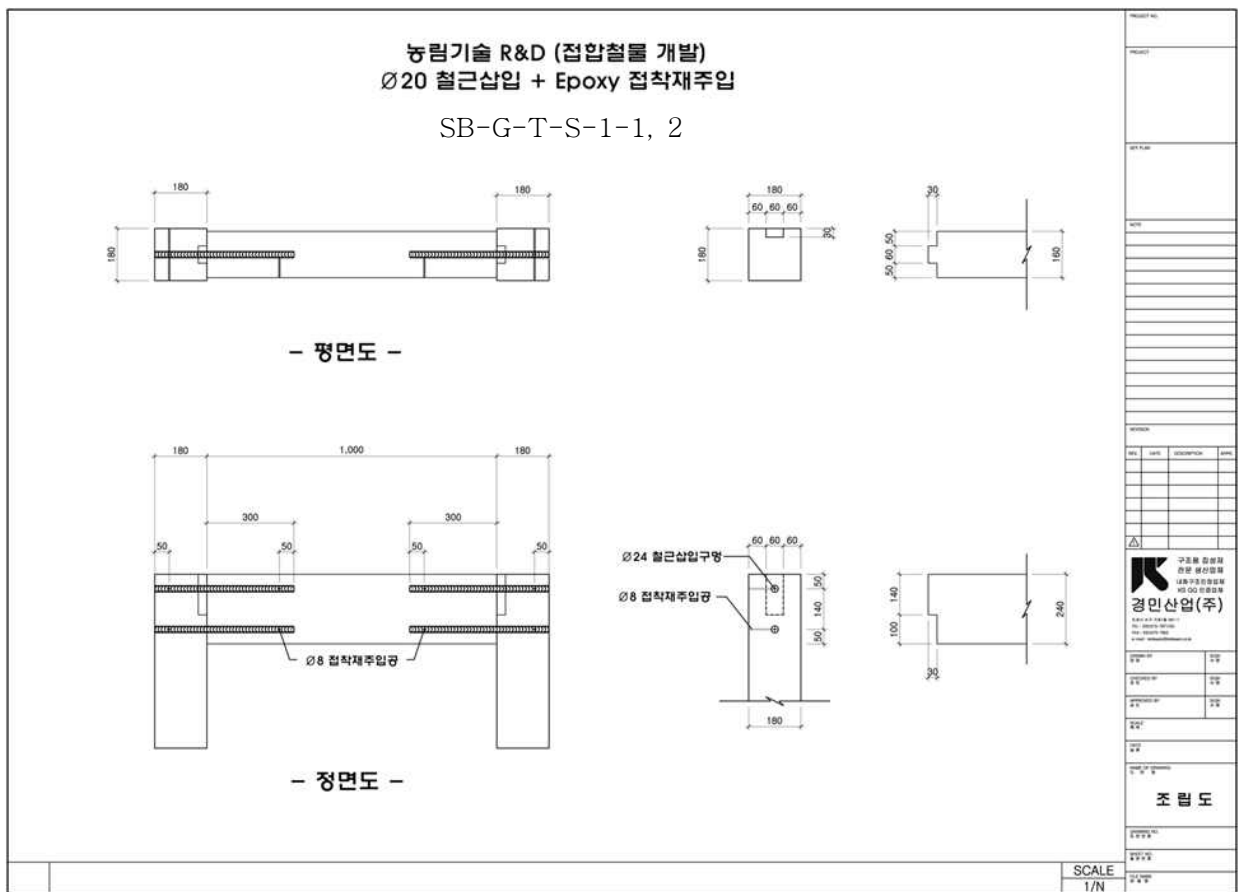


그림 A2-20 철근접착 인장형 접합부(SB-G-T-S)

접합부 구성을 위하여 가공된 부재들과 철근의 모양은 그림 A2-21과 같으며 2액형 에폭시 접착제를 주입하기 위하여 사용된 도구는 그림 A2-22에서 보는 바와 같다. 완성된 철근접착 접합부의 모양은 그림 A2-23과 같으며 그림 A2-23에서 보면 철근 삽입 후에 접착제를 주입하는 동안 부재들이 움직이지 않도록 임시로 고정하기 위하여 사용된 묶음띠를 볼 수 있는데 이 띠는 접착제의 양생기간이 지난 후 접착제가 완전히 굳은 다음에 제거하였다.



그림 A2-21 철근접착 접합부의 구성부분



그림 A2-22 2액형 에폭시수지 주입 도구



그림 A2-23 완성된 철근접착 접합부

철근접착 인장형 접합부를 적용한 모멘트저항시험용 시험편(SB-G-N-M)은 그림 A2-24와 같이 개발하였다. 그림 A2-24에서 보는 바와 같이 철근을 삽입하기 위하여 보의 상하면으로부터 각각 50mm 떨어진 위치에 지름 22mm의 구멍을 뚫고 지름 20mm에 길이 380mm의 이형철근을 삽입하였으며 철근 삽입 후 에폭시수지를 주입하기 위하여 지름 8mm의 구멍을 철근 삽입용 구멍에 직각방향으로 뚫었다. 2액형 에폭시수지는 주입장치를 이용하여 한쪽구멍에서 가압하여 반대쪽 구멍으로 수지가 흘러넘칠 때까지 주입하였다.

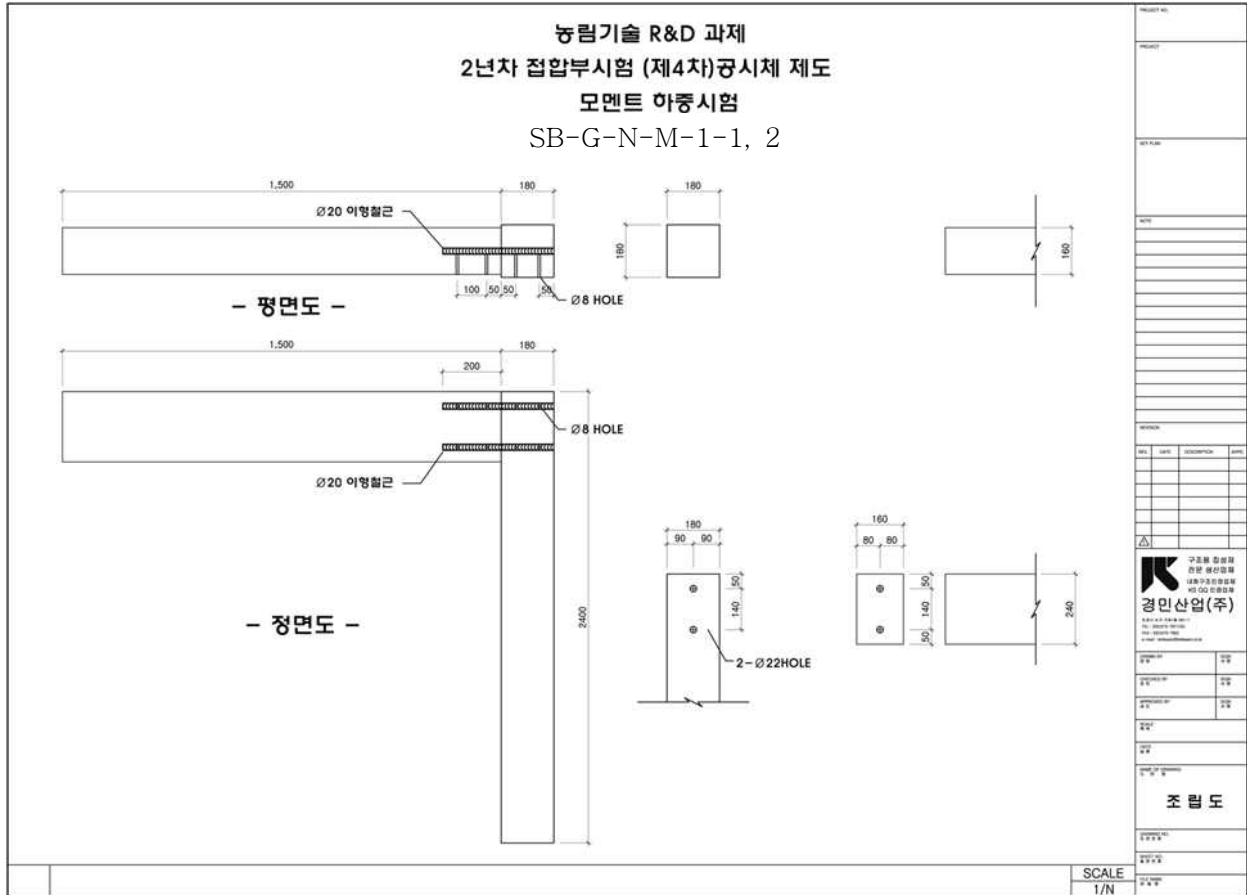


그림 A2-24 철근접착 인장형 접합부 회전모멘트 시험편(SB-G-N-M)

(2) 전단형 접합부

전단형 접합부는 철판과 목재가 함께 전단하중을 지지할 수 있도록 넓은 철판을 목재부재 내에 삽입한 형태의 접합부로서 KS D 3503의 SS400에 적합한 두께 6mm의 철판을 사용하여 철물을 제작하였다. 전단형 접합부는 사용하는 철물의 종류에 따라서 철판을 십자형으로 교차하여 목재 기둥과 보 부재의 중앙에 삽입하는 십자철판 전단형 접합부, 보 부재를 받치는 안장쇠가 용접된 철판을 부착하는 형태의 안장철판 전단형 접합부 그리고 전단하중을 지지할 수 있는 받침쇠가 기둥부재에 삽입될 수 있도록 제작된 철판을 부착하는 형태의 받이철판 전단형 접합부 등으로 구분하였다.

(가) 십자철판 전단형 접합부

철판을 십자형으로 교차하여 삽입하는 접합부는 철판을 삽입 후 강철 핀으로 고정하였으며 장부가 없는 십자철판 전단형 접합부(SC-C-N-S)와 장부가 있는 십자철판-장부 전단형 접합부(SC-C-T-S)로 구분할 수 있다. 십자철판 전단형 접합부(SC-C-N-S)는 그림 A2-25에서 보는 바와 같이 목재 기둥과 보 부재의 중앙부에 열십자형으로 홈을 파고 철판을 삽입하는 형태의 접합부로서 한쪽 날개와 접합되는 보 부재에 지름 10mm에 길이 155mm의 드리프트핀을 3개씩 사용하여 고정하였으며 철판과 기둥 사이는 동일한 드리프트핀을 2개씩 사용하여 고정하였다.

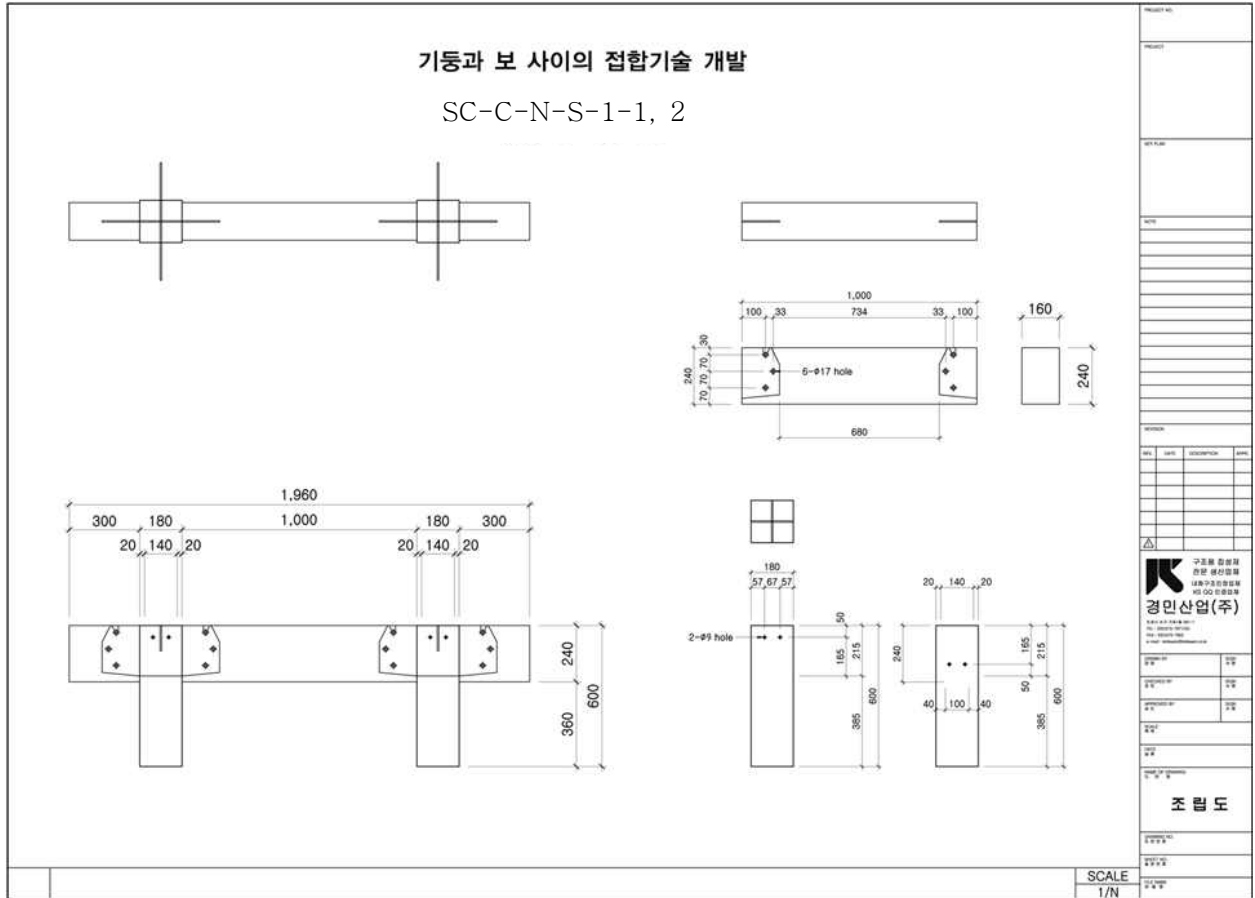


그림 A2-25 십자철관 전단형 접합부(SC-C-N-S)

십자철관 전단형 접합부(SC-C-N-S)는 그림 A2-26에서 보는 바와 같이 기둥에 열십자형으로 삽입되어 좌우측 날개에 각각 1개씩의 드리프트핀으로 고정되며 보를 한쪽 날개에 삽입한 후 3개의 드리프트핀으로 고정된다. 완성된 십자철관 전단형 접합부 전단시험편은 그림 A2-27과 같다.



그림 A2-26 십자철관 접합부의 구성



그림 A2-27 십자철관 전단형 접합부 시험편

이러한 문제를 개선하기 위하여 십자철판에 장부접합을 병행하여 접합부를 구성한다면 전단 하중에 대하여 철판의 전단강도에 목재 장부부분의 섬유직각방향 압축강도가 더하여져서 저항을 나타냄으로써 좀 더 전단강도가 우수한 접합부가 가능할 것으로 예상되었다. 따라서 이 연구에서는 그림 A2-25의 SC-C-N-S 접합부에 장부접합을 병행하여 설치함으로써 그림 A2-29와 같은 십자철판-장부 전단형 접합부(SC-C-T-S)를 개발하였다. 그림 A2-29의 십자철판-장부 전단형 접합부에서 장부의 크기는 길이 30mm, 나비 90mm 및 높이 140mm로 하였고 장부는 보 부재의 상부 중앙에 설치하였다. 그림 A2-30은 십자철판-장부 전단형 접합부의 구성요소들을 보여주고 있으며 완성된 전단시험용 접합부 시험편은 앞의 그림 A2-27과 같은 외형을 가지고 있다.

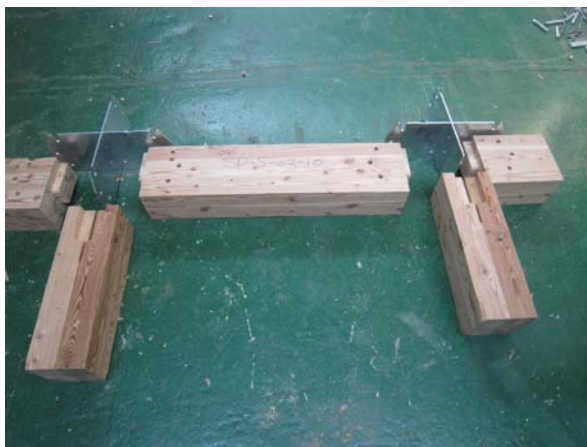


그림 A2-30 십자철판-장부 접합부의 구성

십자철판-장부 전단형 접합부를 적용한 모멘트저항시험용 시험편(SC-C-T-M)은 그림 A2-31과 같이 개발하였다. 그림 A2-31에서 보는 바와 같이 십자철판을 삽입하기 위하여 기둥과 보의 중앙에 열십자형의 홈을 파고 철판을 삽입한 다음 드리프트핀으로 고정하였다. 회전모멘트 시험편을 만들기 위하여 장부를 가공할 때에 장부의 위와 아래가 동일한 치수인 경우보다는 장부의 위쪽을 넓게 가공하고 아래로 갈수록 좁아지도록 가공함으로써 접합부의 조립이 쉽고 편하게 조립될 수 있도록 하였다. 철판을 고정하기 위한 드리프트핀의 설치에 앞의 전단시험편의 경우와 동일하게 기둥에 2개의 드리프트핀 그리고 한쪽 보에 3개의 드리프트핀을 설치하였다.

그림 A2-32(a)는 십자철판-장부 접합부 회전모멘트 저항 시험편의 구성요소들을 보여주고 있으며 완성된 시험편의 형태는 그림 A2-32(b)와 같다. 그림 A2-3s(b)에서 기둥-보 접합부 시험편의 보 부재 위에 덧댄 목재와 보 부재의 반대편 기둥에 덧댄 목재는 시험기에 정확하게 맞추어서 장착하기 위하여 임시로 설치한 덧댄목이다.

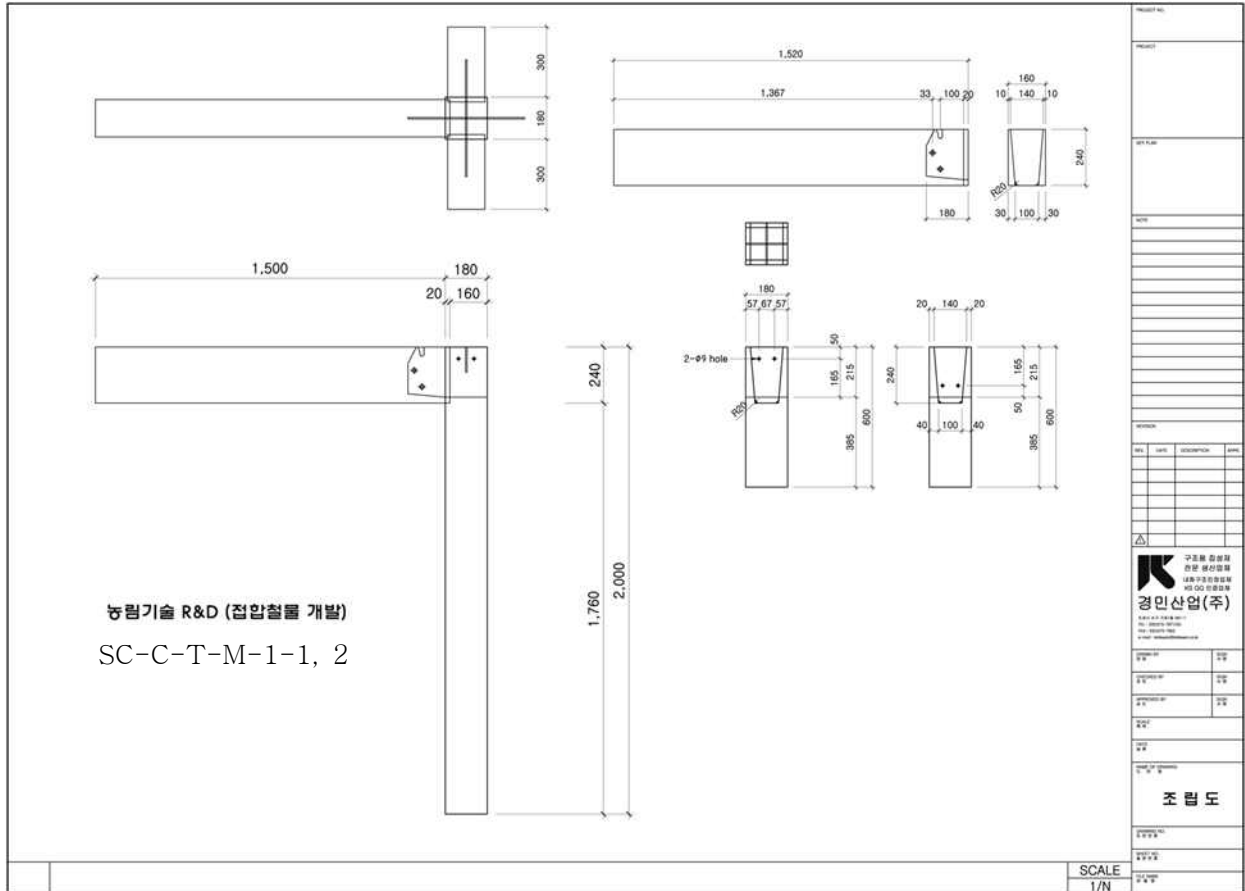


그림 A2-31 십자철판-장부 접합부 회전모멘트 저항 시험편(SC-C-T-M)



(a) 시험편의 구성



(b) 시험편의 형태

그림 A2-32 십자철판-장부 접합부 회전모멘트 저항 시험편의 구성 및 형태

(나) 안장철판 전단형 접합부

보 부재를 받치는 안장쇠를 밑면에 용접한 철판을 기둥에 부착하고 철판을 보에 삽입하는 접합부는 철판을 삽입 후 드리프트핀으로 고정하였다. 안장철판 전단형 접합부는 안장쇠가 달

린 철판을 기둥부재에 먼저 래그나사못이나 볼트 등으로 부착한 후에 날개를 보 부재에 삽입하는 형태이기 때문에 장부가 함께 설치될 수 없다. 안장철판 전단형 접합부(SH-C-N-S)는 그림 A2-33에서 보는 바와 같이 목재 기둥에 안장쇠가 달린 철판을 부착하고 보 부재의 중앙부에 홈을 파고 철판을 삽입하는 형태의 접합부로서 철판과 접합되는 보 부재에 지름 10mm에 길이 155mm의 드리프트핀을 3개씩 사용하여 고정하였으며 철판과 기둥 사이는 지름 16mm의 볼트 2개씩을 사용하여 고정하였다.

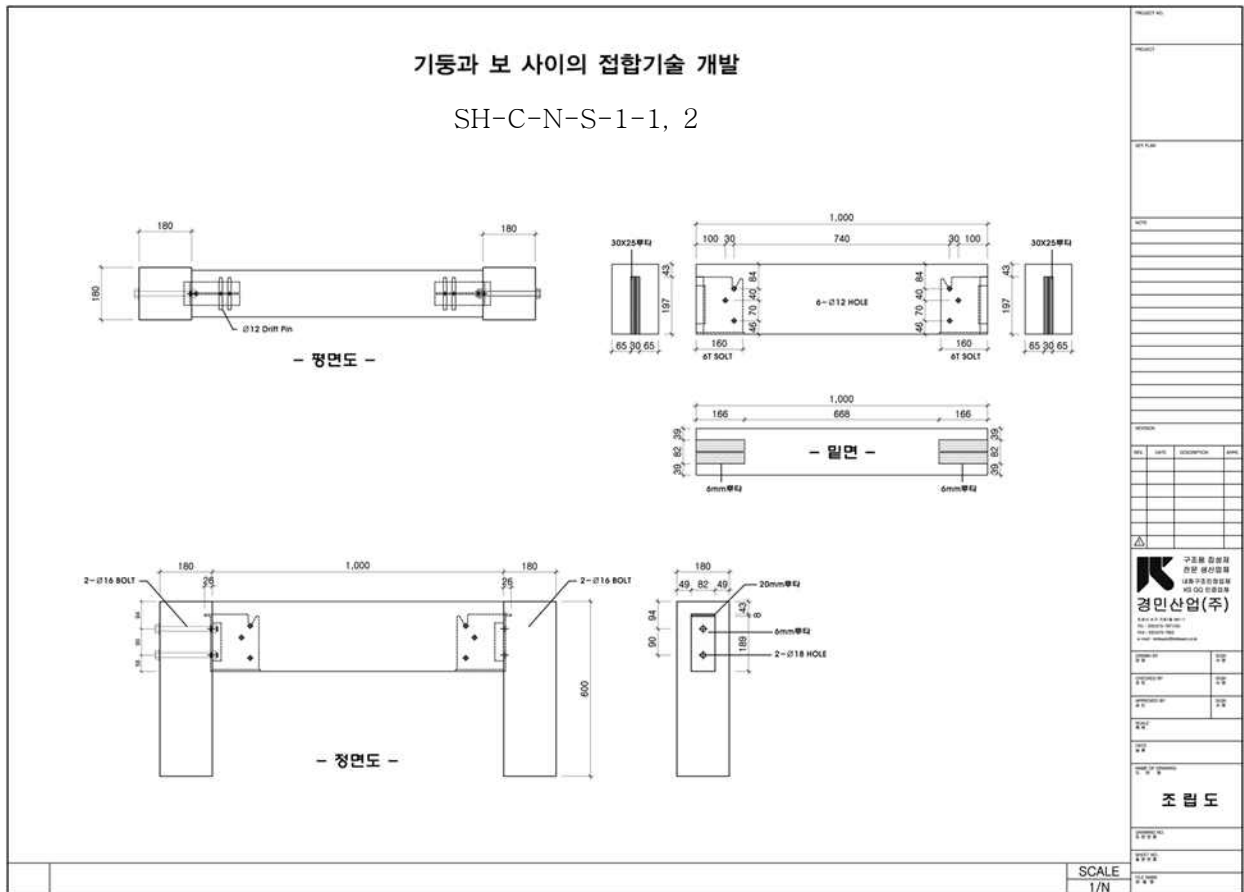


그림 A2-33 안장철판 전단형 접합부(SH-C-N-S)

안장철판 전단형 접합부(SH-C-N-S)는 그림 A2-33에서 보는 바와 같이 기둥에 철판을 부착하기 위하여 볼트구멍을 뚫고 철판을 볼트로 고정시킨 후 보의 끝면 중앙에 파인 홈에 철판을 삽입시킨 후 3개의 핀으로 고정시켜서 조립한다. 그림 A2-34는 안장철판 전단형 접합부의 구성요소들을 보여주고 있으며 완성된 전단시험편의 외형은 접합철물들이 목재 내부에 설치되기 때문에 앞에 언급된 다른 접합부 시험편들과 동일하다.



그림 A2-34 안장철판 접합부의 구성

(다) 받이철판 전단형 접합부

받이철판 전단형 접합부는 그림 A2-35와 같이 개발되었으며 그림 A2-35에서 보는 바와 같이 기둥부재에 삽입되어 전단하중을 지지할 수 있는 날개가 있는 철판을 기둥에 부착하고 철판은 보 부재의 중앙에 파인 홈에 삽입하여 3개의 드립트핀으로 고정하였다.

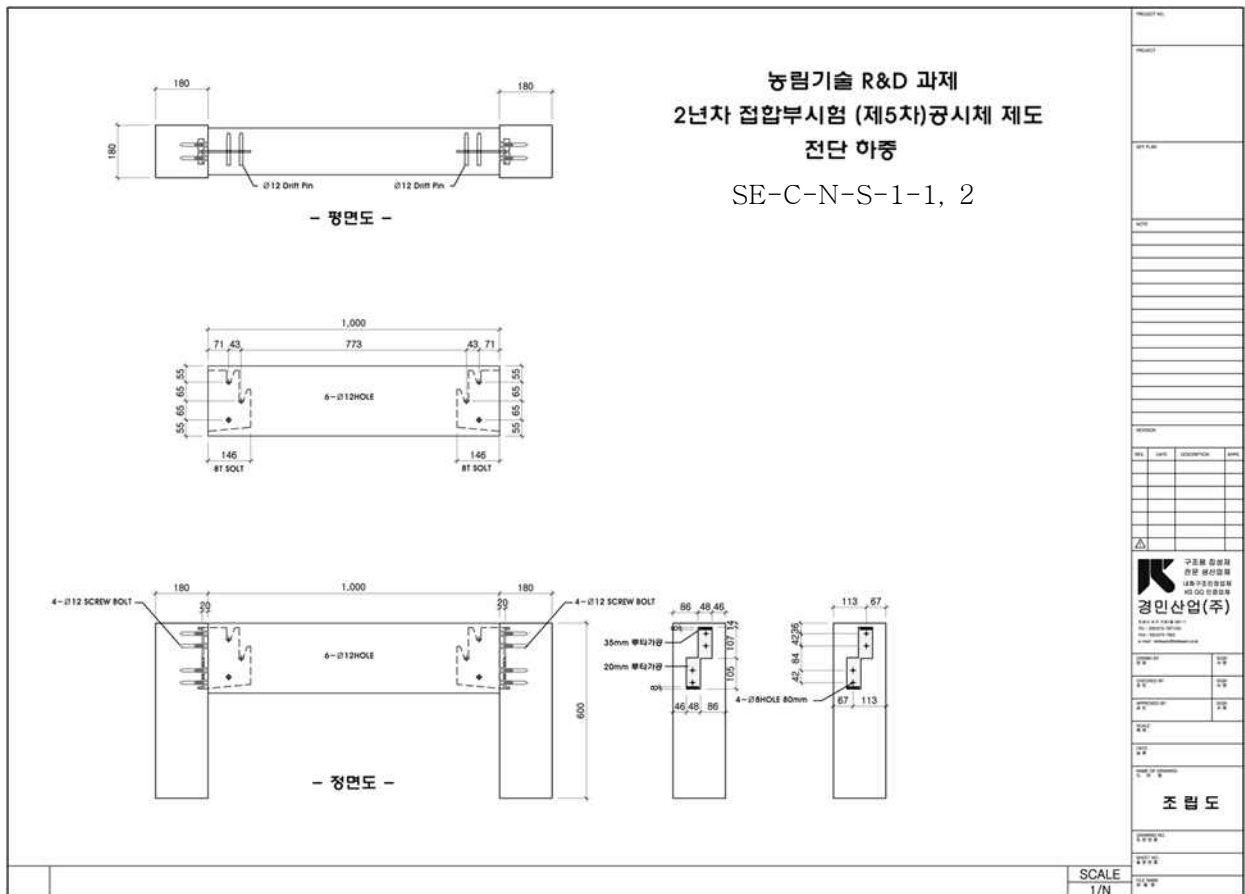


그림 A2-35 받이철판 전단형 접합부(SE-C-N-S)

반이철판 전단형 접합부는 기둥부재에 철판과 전단하중 받이 그리고 래그나사못이나 볼트를 설치할 수 있는 홈과 구멍을 파고 여기에 철판을 부착한 후에 날개를 보 부재에 삽입하는 형태로서 안장철판 접합부와 마찬가지로 장부가 함께 설치될 수 없다. 반이철판 전단형 접합부(SE-C-N-S)는 그림 A2-35에서 보는 바와 같이 목재 기둥에 전단하중 받이가 달린 철판을 부착하고 보 부재의 중앙부에 홈을 파고 철판을 삽입하는 형태의 접합부로서 철판과 접합되는 보 부재에 지름 10mm에 길이 155mm의 드리프트핀을 3개씩 사용하여 고정하였으며 철판과 기둥 사이는 지름 12mm에 길이 90mm의 래그나사못 4개를 사용하여 고정하였다.

그림 A2-36은 반이철판 전단형 접합부의 구성요소들을 보여주고 있으며 그림 A2-37은 4개의 래그나사못에 의하여 반이철판이 기둥에 부착되는 형태를 보여주고 있다. 완성된 반이철판 접합부 전단시험편의 모양은 그림 A2-38과 같다.



그림 A2-36 반이철판 접합부의 구성



그림 A2-37 기둥에 철판의 부착



그림 A2-38 완성된 반이철판 접합부 시험편

(라) 전통장부맞춤 전단형 접합부

이 연구에서 개발된 철물접합부의 성능과 비교하기 위하여 전통장부맞춤 전단형 접합부는 그림 A2-39와 같이 제작하였다. 그림 A2-39에서 보는 바와 같이 전통장부맞춤접합부는 보 부재에 주먹장을 가공하고 기둥부재에 홈을 가공하여 보를 기둥에 끼워서 맞추는 형태로 제작되었다. 접합부를 고정하기 위한 철물은 사용되지 않았다.

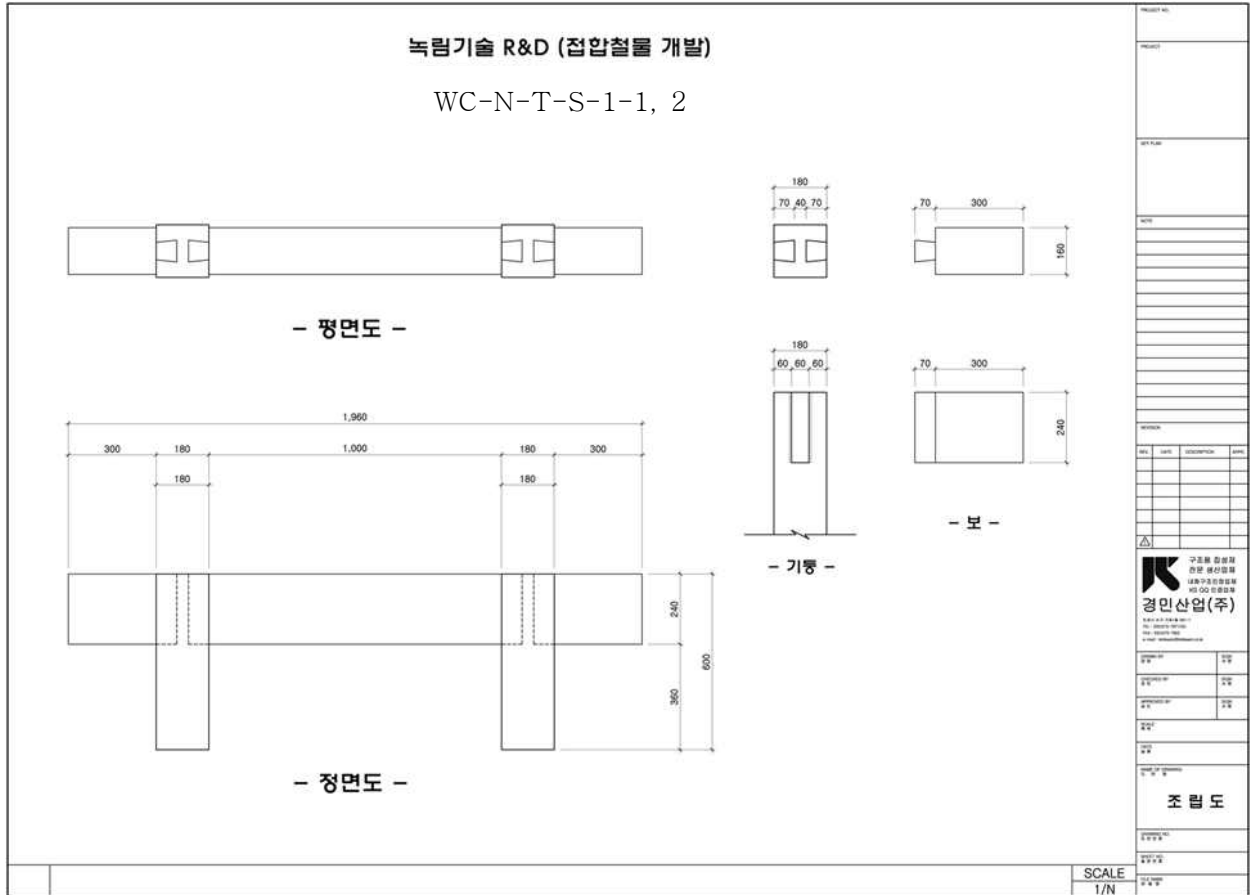


그림 A2-39 전통주먹장맞춤접합부(WC-N-T-S)

그림 A2-40은 전통주먹장맞춤접합부의 구성요소들을 보여주고 있으며 그림 A2-41은 주먹장부와 홈의 모양을 보여주고 있다.



그림 A2-40 전통주먹장맞춤접합부의 구성



그림 A2-41 주먹장부 및 홈

라. 중공다중접착접합부재 접합부의 개발

한옥용 부재로서 사용하기에는 소경각재를 수평방향으로 2개 접착한 부재들이 적절하며 수평방향으로 3개 이상의 소경각재를 접착한 부재는 단면의 크기가 240mm 이상이 되기 때문에 적절하지 않을 것으로 판단된다. 중공부재는 가운데가 비어있는 부재이기 때문에 3개 이상의 부재가 가로 및 세로 방향으로 접합되어 있어야 하며 그래야 가운데에 들어가는 소경각재들을 생략하여 중공부재를 제작할 수 있다. 기둥을 중공부재로 하는 경우에는 소경각재 중에서 가장 작은 치수인 80mmx80mm 부재를 가로 및 세로방향으로 3개씩 총 9개 중에서 가운데 1개를 생략하여 8개의 부재로 제작하게 된다. 이러한 중공부재 기둥에 다중접착접합 보 부재를 연결하는 접합부를 개발하고자 하였다. 중공부재의 경우에 가운데가 비어있으므로 이 부분에 80mmx80mm의 각형 강관을 삽입하고 이 각형 강관에 볼트를 통하여 보를 부착시키는 접합부로서 보는 2개의 소경각재를 수평방향으로 접합시킨 부재로서 기둥부재보다 나비가 작으므로 보의 단면치수 그대로 30mm 깊이로 기둥에 장부로 박히도록 한 접합부(SS-C-T-S)를 그림 A2-42와 같이 개발하였다.

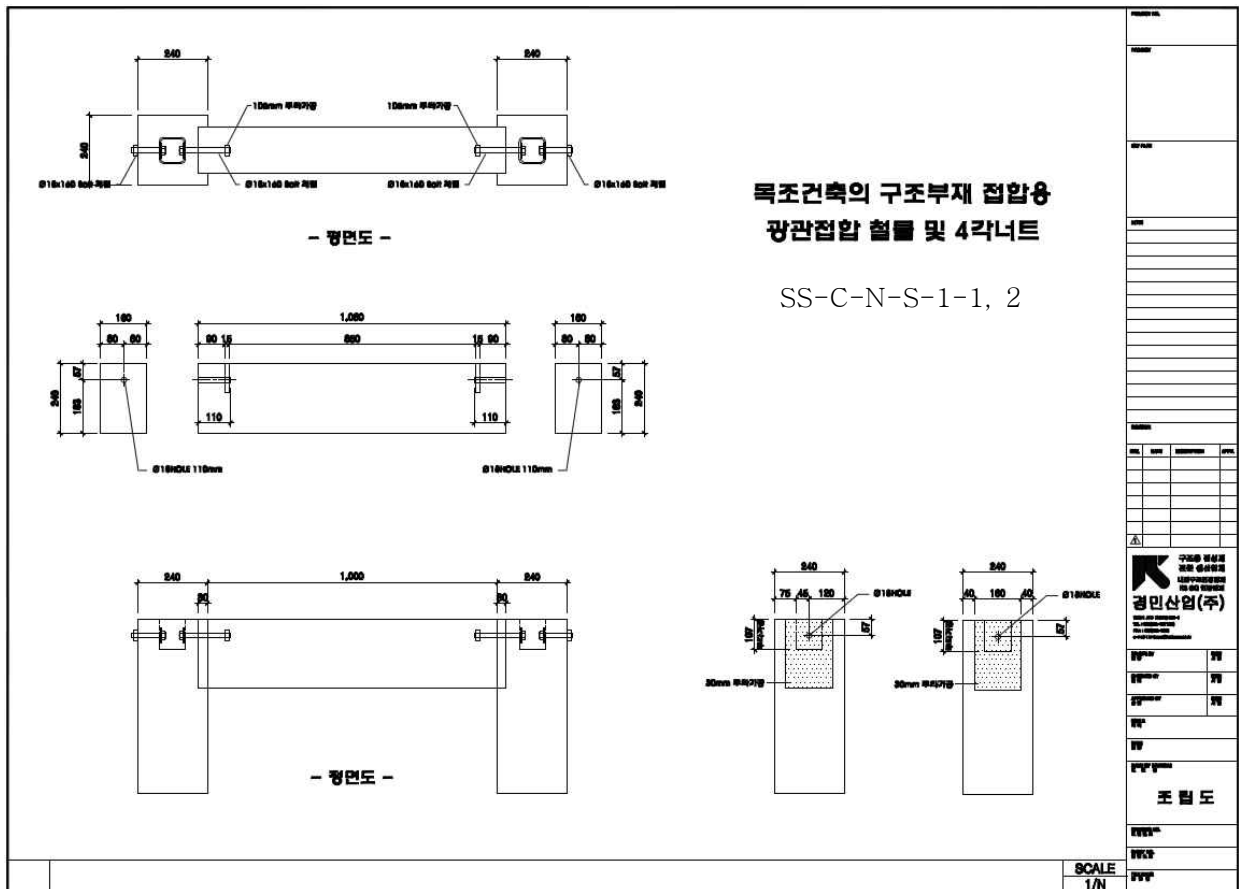


그림 A2-42 각형강관-장부 전단형 접합부(SS-C-T-S)



그림 A2-42-1 각형강관접합맞춤접합부의구성 그림 A2-42-2 완성된각형강관접합부시험편

각형강관-장부 전단형 접합부를 만들기 위하여 80mmx80mm 단면에 길이 100mm의 각형강관을 중공부재 기둥의 비어있는 중앙부에 삽입하고 위에서 57mm 지점에 지름 18mm의 볼트 구멍을 뚫는다. 보 부재에는 끝면에서 90mm 떨어진 지점에 두께 15mm에 90mmx90mm의 사각너트를 삽입할 수 있는 구멍을 뚫고 보의 윗면으로부터 57mm 아래쪽에 끝면으로부터 사각너트 부분까지 지름 18mm의 볼트구멍을 뚫는다. 먼저 보에 사각너트를 삽입하고 끝면으로부터 볼트를 삽입하여 볼트와 사각너트를 돌려서 결합시킨 후 기둥의 중공부분에 각형강관을 삽입하고 볼트의 반대쪽 끝부분을 기둥의 볼트구멍에 끼우면서 기둥 측면의 파인 장부 홈에 보를 정확하게 위치시키고 기둥 내의 각형강관을 통하여 중공부분으로 튀어나온 볼트 끝에 너트를 조여서 단단하게 결합시킨다.

마. 다중접착접합부재의 보강기술 개발

다중접착접합부재는 수심을 포함하는 소경각재를 가로 및 세로방향으로 접착시켜서 제조되는 부재이기 때문에 수심 주변의 유령목이 많이 포함되는 특징을 지닌다. 따라서 대경재로부터 제조되는 부재들에 비하여 유령목의 포함 비율이 높기 때문에 단면치수에 비하여 강도성능이 떨어지는 특징을 나타낸다. 특히 소경재에는 목재의 나비에 비하여 상대적으로 큰 치수의 용이들이 많이 포함되기 때문에 1차년도에 다중접착접합부재에 대한 압축 및 휨 시험에서 용이 주변에서 목재들이 먼저 파괴되어 전체적인 부재의 파괴로 이어지는 것이 많이 관찰되었다. 특히 휨 부재의 경우에는 가장 아래쪽에 위치하는 소경각재의 용이가 휨강도에 많은 영향을 미치게 되므로 이에 대한 보강이 필요할 것으로 생각된다.

이 연구에서는 다중접착접합 휨 부재에 대하여 가장 아래쪽에 위치하는 소경각재에 대하여 용이 주변을 보강하기 위하여 그림 A2-43(a)에서 보는 바와 같이 지름 9mm에 길이 160mm의 중목구조용 나사못을 큰 용이의 좌우측에 박았다. 그림 A2-43(b)은 휨 부재의 아래쪽 소경각재 표면에 나타나는 용이 주변에 나사못을 박아서 보강한 부재와 나사못을 박기 위하여 미리 구멍을 뚫고 나사못을 해당 구멍에 위치시킨 모습을 나타낸다.



(a) 천공 후 목재용 나사못 박기



(b) 나사못을 박기 위한 준비

그림 A2-43 다중접착접합부재의 보강

바. 소경각재 핑거조인트의 품질 향상

1차년도에 소경각재의 길이이음을 위하여 적용하였던 핑거조인트 기계, 가공공구 및 방법 등은 35mm 두께의 구조용 집성재 제조용 층재에 적용되던 것과 동일한 것을 적용하였다. 1차년도에 핑거조인트가 없는 소경각재와 핑거조인트가 포함된 소경각재에 대하여 휨 시험을 실시한 결과 핑거조인트가 있는 소경각재의 허용응력이 핑거조인트가 없는 소경각재의 허용응력에 비하여 약 1/2 정도의 낮은 값을 나타냄으로써 두꺼운 소경각재의 핑거조인트에 대한 품질 향상의 필요성이 대두되었다.

1차년도에 두꺼운 소경각재 핑거조인트를 제작하기 위하여 적용된 장비 및 조건은 두께 35mm의 구조용 집성재 층재에 적용되었던 것과 동일하였다. 그러나 35mm 두께의 층재에 적용하던 방법을 그대로 두꺼운 소경각재 핑거조인트에 적용하는 것은 표 A2-2와 같은 문제점이 있는 것으로 관찰되었다.

표 A2-2 핑거조인트 제작기술의 문제점 및 개선방안

구분	기존방법	문제점	개선방안	효과
핑거 절삭 방법	수직절삭	한 장씩 절삭하여 속도가 느리고 깨지는 부분이 생기며 뒷면에 긴 섬유들이 노출된다.	수평절삭	여러 장의 각재를 한번에 절삭하여 정확하고 깨지는 부분이 없으며 뒷면에 긴 섬유의 노출이 적다.
핑거 압체 방법	연속식 (기계식)	반복작업이 불가능하고 압체압력이 부족하여 핑거가 뒤로 밀려남(스프링백)	개별압체 (수동식)	반복작업이 가능하여 충분한 압체압력을 가할 수 있음
접착제 도포	자동 (기계식)	접착제 도포량의 임의 조절이 불가능함	개별도포 (수동식)	도포상태를 확인하며 균등하게 작업이 가능
접착성능 (C형 시험)	소경각재의 50%	허용응력이 매우 낮아짐	소경각재의 80%	허용응력이 높으며 미관이 양호함

핑거조인트 제조기술의 개선방안으로서 그림 A2-44와 같이 수직절삭을 수평절삭으로 바꾸고 핑거의 압체를 수동식으로 바꾸어서 반복작업이 가능하게 하였고 접착제 도포도 수동식으로 함으로써 접착제 도포량 및 도포상태의 임의 조절이 가능하도록 하였다. 이와 같이 함으로써 소경각재 허용응력의 50% 이하였던 핑거조인트 소경각재의 허용응력이 약 80% 수준 이상으로 향상되었다. 기존의 핑거조인트 기계들은 모두 두께 35mm의 표준 층재를 대상으로 작업조건이 설정된 상태로 제작된 것으로서 이 조건을 그대로 두꺼운 소경각재에 적용해서는 우수한 핑거조인트를 제작할 수 없는 것으로 생각된다. 따라서 이 연구에서는 두꺼운 소경각재에 대하여 수동식으로 작업을 하여 핑거조인트 제조조건을 조절하였으나 앞으로 산업화를 위해서는 두꺼운 소경각재에 적합한 작업조건을 갖춘 핑거조인트 제조시설의 개발도 필요할 것으로 판단된다.



그림 A2-44 핑거조인트 품질 향상을 위한 수평절삭 및 수동 작업

사. 잣나무 소경재를 사용한 다중접착접합부재의 개발

낙엽송 이외의 국산 간벌 소경재를 사용한 다중접착접합부재를 개발하기 위하여 현재 국내에서 간벌재 생산량이 많으면서 시중에서 구하기가 비교적 쉬운 수종으로 잣나무를 선택하였다. 잣나무 간벌재 생산업체로부터 잣나무 간벌재를 구입한 후 소경각재 생산에 적합한 지름 140mm~150mm의 직선부재들을 선별하였다. 1차년도에 개발된 제재방법을 적용하여 선별된 소경재에서 하나의 원목으로부터 수심을 포함하는 105mmx105mm 소경각재 제재목을 하나씩 제재하였다.

소경각재 제재목을 건조하기 위하여 1차년도에 가장 건조결함이 적고 효율적인 것으로 평가되었던 다음과 같은 건조스케줄을 적용하여 목표 함수율 12%로 건조하였다(그림 A2-45)

- ① 96℃에서 12시간 동안 증습처리
- ② 건구온도 120℃ 및 습구온도 90℃에서 36시간 동안 고온건조
- ③ 건구온도 100℃ 및 습구온도 70℃에서 24시간 동안 중온건조
- ④ 건구온도 80℃ 및 습구온도 60℃에서 24시간 동안 저온건조
- ⑤ 상온에서 3일 동안 양생



그림 A2-45 잣나무 소경각재의 건조를 위한 잔적 및 건조로 내부 투입



그림 A2-46 건조 직후의 잣나무 소경각재



그림 A2-47 핑거 수평절삭

소경 간벌재로부터 소경각재를 제재한 후 그림 A2-45와 같이 건조로에서 고온건조를 시키

며 그림 A2-46은 건조 직후에 건조로 내부에 있는 잣나무 소경각재를 보여주고 있다. 고온건조를 통해서 잣나무 소경각재로부터 많은 양의 수지가 분비되었음을 알 수 있고 건조된 목재는 4면 대패가공 후에 그림 A2-47과 같이 수평 핑거조인트 절삭을 실시하였다.

제재 후 건조된 소경각재들을 4면 대패가공을 통하여 최종 마감치수 90mmx90mm로 제작하여 다중접착접합부재 제조에 사용될 수 있는 총 319개의 잣나무 소경각재를 제작하였다. 잣나무 소경각재에 대하여 1차년도에 적용되었던 소경각재에 대한 등급별 품질 기준(표 A2-3)을 적용하여 등급 구분을 실시하였으며 그 결과를 1차년도에 실시하였던 낙엽송과 편백 소경각재에 대한 등급 구분 결과와 함께 표 A2-4에 수록하였다.

표 A2-3 소경각재의 육안 식별을 위한 품질 기준

구분	품질 기준			
	1등급	2등급	3등급	4등급
최대 용이 지름비	17% 이하	25% 이하	33% 이하	50% 이하
섬유주행경사	1:16 이하	1:14 이하	1:12 이하	1: 8 이하
썩음	없을 것			
갈라짐	경미할 것			
변색	경미할 것			
경사결	경미할 것			
등근모	나비가 단면치수의 1/4 이내이고 인접한 2모서리에는 없을 것			
그 밖의 결점	극히 경미할 것			

표 A2-4 국산 간벌 소경재로부터 생산된 소경각재의 등급 구분


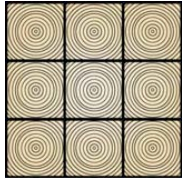

수종	구분	등급별 각재의 수				합계
		1등급	2등급	3등급	4등급	
낙엽송	수(개)	26	52	51	9	138
	비율(%)	18.8	37.7	37.0	6.5	100
편백	수(개)	11	64	22	0	97
	비율(%)	11.3	66.0	22.7	0.0	100
잣나무	수(개)	39	94	137	49	319
	비율(%)	12.2	29.5	42.9	15.4	100
합계	수(개)	76	210	210	58	554
	비율(%)	13.7	37.9	37.9	10.5	100

표 A2-4에서 보면 319개의 잣나무 소경각재 중에서 1등급이 39개(12.2%), 2등급이 94개(29.5%), 3등급이 137개(42.9%) 그리고 4등급이 49개(15.4%)로서 3등급이 가장 많았다. 잣나무

소경각재에 대한 등급 구분 결과를 1차년도와 2차년도의 낙엽송이나 편백에 대한 등급 구분 결과와 비교해 보면 낙엽송은 2등급과 3등급이 거의 같은 비율로 가장 많이 나왔으며 편백은 2등급이 가장 많이 나온 것에 비하여 잣나무의 등급이 전체적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 잣나무 소경각재에는 비교적 큰 용이가 많았으며 용이들이 일정한 간격으로 모여서 나타남으로써 등급을 떨어트리는 중요한 요인이 되었다.









1차년도와 동일한 방법으로 잣나무 소경각재를 가로 및 세로방향으로 접착 집합하여 다중접착접합부재를 제조하였으며 1차 접착제로서 이소시아네이트 계열의 접착제 그리고 2차 접착제로서 페놀-리솔시놀-포름알데히드 계열의 접착제를 일본 오시카사로부터 수입하여 사용하였다. 접착제의 도포량, 압체시간, 양생기간 등은 1차년도에 적용하였던 것과 동일한 조건을 적용하였으며 접착이 완료된 부재는 최종적으로 4면 대패마감을 실시하였다. 잣나무 소경각재를 사용하여 생산할 수 있는 기둥부재들은 소경각재들을 가로 및 세로방향으로 각각 2~4층까지 적층이 가능하며 이러한 조합을 통하여 2x2(90D2), 2x3(90D3), 3x3(90T3), 3x4(90T4), 4x4(90Q4) 등의 조합을 만들 수 있다. 이 연구에서는 기둥부재로서의 성능 시험을 위하여 표 A2-5와 같이 90D2, 90T3 및 90T3E의 3개의 조합으로 총 6개의 다중접착접합 기둥부재를 제작하였다. 모든 기둥부재는 길이를 3m로 제작하였다.

표 A2-5 잣나무 소경각재를 사용하여 제조된 다중접착접합 기둥부재의 종류

기호	구성	규격	수량
90D2		잣나무 3000×180×180	2
90T3		잣나무 3000×270×270	2
90T3E		잣나무 3000×270×270	2

잣나무 소경각재를 사용하여 생산할 수 있는 보 부재들은 소경각재들을 가로방향으로 2~3층 적층하고 세로방향으로 2~5층 적층하여 다양한 조합의 부재들을 제조할 수 있으며 이 연구에서는 2x2(90D2), 2x3(90D3), 2x4(90D4), 2x5(90D5), 3x3(90T3), 3x3(90T3E), 3x4(90T4E), 3x5(90T5E) 등의 조합으로 총 16개의 휨 시험편을 제작하였다. 모든 휨 부재들은 길이를 3.6m로 제작하였으며 이 연구에서 제작된 잣나무 소경각재를 사용한 다중접착접합 휨 부재의 종류는 표 A2-6과 같다.

표 A2-6 90mm 소경각재를 사용한 휨 시험용 낙엽송 다중접착접합 보 부재의 종류

기호	구성	등급 배치	규격	수량
90D2		4등급 1등급	잣나무 3600×180×180	2
90D3		3등급 3등급 2등급	잣나무 3600×270×180	2
90D4		2등급	잣나무 3600×360×180	2
		4등급		
		3등급		
		2등급		
90D5		1등급	잣나무 3600×450×180	2
		2등급		
		3등급		
		2등급		
		1등급		
90T3		3등급	잣나무 3600×270×270	2
		3등급		
		2등급		
90T3E		3등급 3등급 2등급	잣나무 3600×270×180	2
90T4E		2등급 4등급 3등급 2등급	잣나무 3600×360×180	2
90T5E		1등급 2등급 3등급 2등급 1등급	잣나무 3600×450×180	2

아. 다중접착접합부재의 경제성 분석

다중접착접합부재를 실제 한옥 건축에 사용할 수 있도록 하기 위해서는 무엇보다도 부재 생산에 있어서 다른 경쟁 대상이 되는 부재들에 비하여 경제성이 있어야 한다. 실제 한옥 건축에 사용되는 제재목은 생재상태로 사용되고 건축 후 건물을 사용하는 중에 갈라지거나 뒤틀리는 건조결함이 크게 나타나기 때문에 선별, 제재, 건조, 선별, 대패가공, 접착, 대패마감 등의

공정을 거치는 다중접착접합부재와 단순히 가격만 비교하기에는 무리가 있다. 다중접착접합부재와 품질이나 외형 그리고 건조결합 발생 등의 측면에서 비교 가능한 제품으로는 구조용 집성재를 들 수 있다. 일부 문화재적 가치가 있는 건축물을 제외하고 일반 주거용 한옥의 경우에는 생재 제재목보다 구조용 집성재를 사용하는 것이 품질 측면에서 가장 바람직하지만 아직까지 한옥 건축에서 구조용 집성재의 사용이 그렇게 많지 않은 주요 요인 중의 하나로 구조용 집성재의 높은 가격을 들 수 있다.

따라서 다중접착접합부재가 구조용 집성재에 비하여 경제성이 있다면 품질이나 외형 등이 구조용 집성재와 매우 유사하기 때문에 일반 주거용 한옥 건축용 재료로 많은 선택을 받을 가능성이 매우 높다. 따라서 이 연구에서는 다중접착접합부재의 생산에 필요한 비용과 구조용 집성재의 생산에 필요한 비용을 비교하여 그 경제성을 평가하였다.

다중접착접합부재 생산의 경제성 분석과 일반 구조용 집성재 생산 비용과의 비교 결과는 표 2-6과 같다. 다중접착접합부재를 생산하기 위해서는 소경각재를 생산하기 위한 소경 간벌재의 조달이 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 원자재인 소경 간벌재의 조달이 쉽지 않으면 아무리 품질이 좋고 경제성이 있어도 실제 생산과 한옥 건축에의 적용이 불가능하기 때문이다. 이 연구의 과정에서 아직 본격적인 제품 생산 단계가 아니고 연구 단계이기 때문에 원자재를 시험용으로 소량만 구하다보니 원자재인 소경 간벌재의 조달이 가장 어려운 부분 중의 하나였다. 대부분의 간벌재가 칩이나 펠릿 생산용으로 대량 거래가 이루어지기 때문에 소량으로 직선부재만을 선별하여 구입하는 것이 사실상 거의 불가능하였다. 아마도 이러한 문제는 이 연구의 결과가 사업화되어 본격적인 제품 생산에 들어가고 한 번에 대량으로 원자재의 주문이 가능해지면 해결이 가능하겠지만 그 전까지는 해결이 매우 힘든 것이 현실이다.

표 A2-6을 보면 다중접착접합부재를 생산하기 위하여 소경 간벌재를 직접 조달하는 경우가 가장 경제적이었으며 칩 용재로 판매되는 자재들 중에서 선별하여 원자재를 구입하는 경우는 좀 더 많은 비용이 필요하였다. 소경재를 직접 조달하는 경우에 소경 원목의 단가는 1m^3 에 75,000원으로서 가장 저렴하였으며 이 원목들을 소경각재로 제재하면 약 50%의 수율을 얻을 수 있고 소경각재 제재목의 단가는 원목단가의 약 2배인 151,000원/ m^3 가 된다. 소경각재를 건조, 선별 및 대패가공하면 최종 수율은 약 20%가 나오며 단가는 759,000원/ m^3 가 된다. 여기에 건조경비 90,000원/ m^3 와 접착, 압착, 대패가공 등의 가공경비 300,000원/ m^3 와 가타 부가 경비 150,000원/ m^3 를 더하면 다중접착접합부재를 생산하는데 소요되는 총 경비는 1,299,000원/ m^3 가 된다. 만약에 원자재인 소경 간벌재를 칩 용재 중에서 선별하여 구입하는 경우에는 칩용 원목의 단가가 80,000원/ m^3 이고 선별에 들어가는 비용이 96,000원/ m^3 이며 소경각재로 제재하면 수율이 약 50%로서 단가가 192,000원/ m^3 로 증가된다. 소경각재를 건조, 선별 및 대패가공하면 최종 수율은 약 20%가 나오며 단가는 960,000원/ m^3 가 된다. 나머지 건조, 접착, 가공 및 기타 경비는 동일하다고 보면 칩 용재로부터 선별하여 원자재를 구입하는 경우의 다중접착접합부재 생산에 소요되는 총 경비는 1,500,000원/ m^3 가 되어 직접 원자재를 조달하는 경우에 비하여 생산 비용이 약 15% 이상 증가하게 된다.

이러한 다중접착접합부재의 생산단가는 구조용 집성재의 생산단가인 1,800,000원/ m^3 에 비하여 원자재 직접조달의 경우에는 약 28% 그리고 칩 용재로부터 선별하여 원자재를 구입하는 경우에는 약 17% 더 저렴할 것으로 분석되었다. 다중접착접합부재나 구조용 집성재는 모두

제재, 건조, 대패가공, 선별(등급 구분), 접착, 압착, 대패마감 등의 비슷한 공정을 거쳐서 생산되며 사용되는 접착제의 종류 및 양도 비슷하기 때문에 결국 원자재를 어떻게 더 싸고 원활하게 확보하느냐 하는 것이 다중접착접합부재의 사업화 성공의 가장 중요한 열쇠라고 할 수 있다. 오늘날과 같은 저탄소 녹색성장이 한 나라 또는 전 세계의 중요한 과제가 되는 시대에는 탄소를 저장하는 목재자원을 가능하면 오랜 기간 동안 목재 상태로 사용하여야 공기 중의 이산화탄소를 줄이는데 도움이 된다는 측면에서도 소경 간벌재를 바로 칩이나 연료용으로 사용하는 것은 결코 바람직하지 못하다. 소중한 목재자원을 가능하면 목재 상태로 오래 사용하여 탄소를 공기 중으로 방출하지 않고 목재 내에 저장해 둬으로써 목재의 탄소수명을 연장하는 것이 가장 바람직하고 가장 경제적인 환경정책이라는 점을 생각한다면 정부 차원에서도 소경 간벌재를 좀 더 부가가치가 높고 오래 목재 상태로 사용할 수 있는 다중접착접합부재 생산용 원자재로 공급할 수 있도록 하는 정책적인 배려가 필요한 시점이다.

표 2-6 다중접착접합부재 생산의 경제성 비교

구 분	소경재 직접 조달	칩용재에서 선별	구조용 집성재
원목단가	₩75,000/m ³ (253/才)	₩80,000/ton (칩용소재) ₩120,000/ton (선별) ₩96,000/m ³ (생재비중 0.8)	
제재목단가	₩151,800/m ³ (수율 50%)	₩192,000/m ³ (수율50%)	₩450,000/M3 (판재)
가공수율(20%)	₩759,000/m ³	₩960,000/m ³	
건 조 비	₩90,000/m ³	₩90,000/m ³	
다중접착접합 목재가공비	₩300,000/m ³	₩300,000/m ³	
기타경비	₩150,000/m ³	₩150,000/m ³	₩1,800,000/m ³
계	₩1,299,000/m ³ (72%)	₩1,500,000/m ³ (83%)	₩1,800,000/m ³ (100%)

제 2절 협동과제: 국산 소경 간벌재를 이용한 다중접착접합부재의 강도 성능 평가

1. 1차년도 연구과제: 소경각재 및 다중접착접합부재의 기둥 압축강도 및 휨 강도 평가

가. 개발 내용 및 범위

다중접착접합부재는 구조용 집성재와 달리 유평목이 주를 이루는 소경 간벌재로부터 채취된 소경각재를 원자재로 사용하여 가로 및 세로 방향으로 접착하여 만들어지는 구조용 재료이다. 소경목을 효율적으로 이용하기 위하여 소경각재는 수심을 단면의 중심에 두고 상하좌우가 대칭이 되도록 정사각형의 단면을 갖는 정각재로 채취하게 되며 이로 인하여 수심 주변의 유평목이 그대로 다중접착접합부재에도 포함됨으로써 성숙재를 주로 사용하는 구조용 집성재보다 낮은 강도성능을 나타낼 것으로 예상되었다. 따라서 다중접착접합부재를 한옥건축용 기둥 및 보 부재로 사용하기 위해서는 한옥의 기둥과 보로서 사용될 때에 이들 부재에 작용하는 하중을 충분히 견딜 수 있는 정도의 강도성능이 지니고 있는지에 대한 명확한 평가가 선행되어야 할 것이다. 주택은 누구에게나 가족의 생명과 재산을 보호하는 제일의 자산으로서의 가치를 지니고 있기 때문에 안전성과 내구성이 확보되지 않는 재료를 구조용재로 사용하는 것은 매우 위험한 결과를 초래할 수 있다.

이 연구에서는 국산 소경 간벌재로부터 생산되는 소경각재를 원자재로 사용한 다중접착접합부재의 강도성능을 정확하게 평가하고자 하며 이를 위하여 다중접착접합부재를 제조하는 원자재로 사용되는 소경각재의 압축강도와 휨강도를 측정하여 이들로부터 다중접착접합 기둥 및 보 부재를 제조하는 경우에 예상되는 강도성능을 이론적으로 예측하고 실제 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도와 보 부재의 휨 강도를 평가하여 이들 예측치를 검증하고자 한다. 이러한 과정을 통하여 실제로 모든 종류와 형태, 치수의 다중접착접합부재들을 직접 만들어서 시험해 보지 않아도 예상되는 강도 성능을 비교적 정확하게 예측하는 방법을 개발함으로써 앞으로 다양한 간벌재 수종들로부터 채취된 소경각재를 이용하는 경우에도 일일이 다중접착접합부재에 대한 강도 시험을 하지 않고 소경각재에 대한 시험만으로도 이들 부재의 강도성능을 예측하는데 활용할 수 있도록 하고자 한다.

나. 재료 및 방법

(1) 시험재료

(가) 수종

시험용 목재는 국내에서 간벌재로 별채된 흉고지름 120~180mm 정도의 낙엽송(*Larix leptolepis*)과 편백(*Chamaecyparis obtusa*)을 공시수종으로 사용하였다.

(나) 접착제

다중접착접합 부재를 제조하기 위하여 사용된 접착제와 동일하게 일본 Oshika사로부터 수입된 PRF(Phenol Resorcinol Formaldehyde)계 접착제와 Isocyanate계 접착제 2종을 사용하였다. 접착제를 구성하는 재료들의 혼합 비율은 세부 및 위탁과제의 경우와 마찬가지로 접착제 제조사에서 권장하는 비율대로 구성하였다.

(다) 소경각재 시험편

다중접착접합부재 제조용 원자재인 소경각재의 압축강도와 휨 강도 성능을 평가하기 위하여 80mmx80mm, 90mmx90mm 및 100mmx100mm 단면의 낙엽송 소경각재와 80mmx80mm 단면의 편백 소경각재를 2.7m 길이로 제작하였다. 모든 소경각재들은 참여기업인 경민산업(주)를 통하여 인천 소재의 제재소로부터 제재된 상태로 구입하여 경민산업(주)의 고온건조 시설을 이용하여 목표 함수율 12%로 건조하고 대패 및 몰딩 설비를 이용하여 최종 마감치수로 가공하였다.

(라) 핑거조인트 소경각재 시험편

다중접착접합부재 중에서 기둥 부재는 길이가 3m 이하로서 소경각재의 길이이음을 하지 않아도 단일부재로 충분히 제조할 수 있으나 보 부재는 길이가 4m로서 단일부재로 사용하기가 어렵기 때문에 핑거조인트를 통하여 길이를 연장해서 사용하여야 한다. 그리고 실제로 다중접착접합부재를 한옥건축용 구조부재로 사용하는 경우에도 기둥은 비교적 길이가 짧지만 보 부재는 길게 사용하며 소경각재에서 큰 웅이나 할렐 등의 결함을 제거하기 위하여 길이를 절단하는 경우에는 짧은 소경각재를 효율적으로 사용하기 위해서는 기둥 부재라도 핑거조인트를 한 소경각재로 제조하여야 한다. 일반적으로 두께가 얇은 목재의 경우에는 핑거조인트 부재의 강도가 단일부재의 강도에 비하여 90% 정도의 값을 나타내지만 두께가 두꺼워질수록 강도비가 낮아지는 경향을 나타낸다. 따라서 다중접착접합부재의 제조를 위하여 사용되는 소경각재는 두께가 80mm 이상으로서 두껍기 때문에 핑거조인트를 하는 경우에 강도가 상당히 낮아질 가능성이 있다.

핑거조인트 소경각재의 휨강도를 평가하기 위하여 이 연구에서는 낙엽송을 사용하여 핑거조인트가 중앙부에 들어간 2.7m 길이의 핑거조인트 소경각재를 90mmx90mm 및 100mmx100mm 단면으로 제작하였다.

이 연구에 사용된 소경각재 및 핑거조인트 소경각재 시험편의 종류, 수종, 치수 및 수는 표 B1-1과 같다. 표 B1-1에 주어진 바와 같이 이 연구에서 소경각재의 강도성능 평가를 위하여 사용된 소경각재 시험편의 총수는 253개였고 핑거조인트 소경각재의 총수는 58개였다.

표 B1-1 소경각재 시험편의 종류, 수종, 치수 및 수

수종	단면치수 (mmxmm)	길이(m)	핑거조인트 유무	시험편의 수	시험 항목
낙엽송	80x80	2.5	무	70	압축
낙엽송	80x80	2.7	무	68	휨
편백	80x80	2.5	무	49	압축
편백	80x80	2.7	무	48	휨
낙엽송	90x90	2.7	유	29	휨
낙엽송	100x100	2.7	유	29	휨
합계				293	

(마) 다중접착접합부재 시험편

다중접착접합부재의 휨강도 및 압축강도를 실제로 평가하기 위하여 다양한 단면치수의 보부재 및 기둥 부재를 제작하였으며 그 수종, 종류, 치수 등은 표 B1-2와 같다. 이 연구에서 사용된 다중접착접합부재 시험편은 총 60개로서 기둥으로서의 압축 시험에 20개 그리고 보로서의 휨 시험에 40개가 사용되었으며 편백 시험편이 10개 그리고 낙엽송 시험편이 50개 제작되었다. 기둥 압축시험에는 낙엽송과 편백이 모두 사용되었으나 휨 시험에는 낙엽송 시험편만이 사용되었다. 편백은 국내에서 생산 지역이 남부지방으로 편중되어 있고 생산시기도 늦가을 짧은 기간 동안에 소량만 생산되고 있기 때문에 시험편용 목재 구입하기에도 어려움이 있었다. 따라서 편백을 사용한 다중접착접합부재는 기둥으로서의 압축시험용 시험편만을 제작하였다.

표 B1-2 다중접착접합부재 시험편의 종류, 수종, 치수 및 수

기호 ⁽¹⁾	수종	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	핑거조인트 유무	시험편의 수	시험 항목
L80D2	낙엽송	160x160	2.5	무	3	압축
C80D2	편백	160x160	2.5	무	3	압축
L90D2	낙엽송	180x180	2.5	무	3	압축
C90D2	편백	180x180	2.5	무	3	압축
L80T3	낙엽송	240x240	2.5	무	2	압축
C80T3	편백	240x240	2.5	무	2	압축
L80T3E	낙엽송	240x240	2.5	무	2	압축
C80T3E	편백	240x240	2.5	무	2	압축
L80S2	낙엽송	80x160	4	유	3	휨
L80S3	낙엽송	80x240	4	유	3	휨
L80D3	낙엽송	160x240	4	유	3	휨
L80D4	낙엽송	160x320	4	유	3	휨
L80D5	낙엽송	160x400	4	유	1	휨
L80D6	낙엽송	160x480	4	유	1	휨
L80T6E	낙엽송	240x480	4	유	2	휨
L90S2	낙엽송	90x180	4	유	3	휨
L90S3	낙엽송	90x270	4	유	3	휨
L90D3	낙엽송	180x270	4	유	3	휨
L90D4	낙엽송	180x360	4	유	3	휨
L90D5	낙엽송	180x450	4	유	1	휨
L90D6	낙엽송	180x540	4	유	1	휨
L100S2	낙엽송	100x200	4	유	3	휨
L100S3	낙엽송	100x300	4	유	3	휨
L100D3	낙엽송	200x300	4	유	3	휨
L100D4	낙엽송	200x400	4	유	1	휨
L100D5	낙엽송	200x500	4	유	1	휨
합계					60	

비고 ⁽¹⁾ 제일 왼쪽의 영문은 수종(L-낙엽송, C-편백)을 의미하고 나머지 영문 및 숫자는 표 C6 및 C7에 주어진 기호를 의미한다.

(2) 시험방법

(가) 압축시험

목재의 압축시험 방법에는 무결점 소시험편에 대한 압축시험 방법(KS F 2206)과 실대재의 압축시험 방법(ASTM D 198)이 있다. 실대재의 압축시험 방법은 아직까지 KS 표준으로는 제정되어 있지 않지만 실제로 결함을 포함하고 있는 상태로 사용되는 실대재의 압축강도를 측정한다는 측면에서 무결점 소시험편에 대한 압축 시험방법보다는 더 실제 상황에 근접한 시험 방법이라고 할 수 있다. 무결점 소시험편에 대한 시험결과로부터 허용응력을 산출하기 위해서는 실대재에 포함되는 결점들이 부재의 압축강도에 미치는 영향을 고려하여 시험결과를 조정하여야 한다. 이러한 결점에 대한 조정은 지금까지의 많은 연구 및 시험결과에 근거하여 여러 가지 결점의 포함 정도와 압축강도 사이의 상관관계로부터 조정계수를 구하게 된다. 비록 결점의 영향을 이전의 많은 연구들로부터 얻어진 결과에 근거하여 평가하게 되지만 여전히 결점을 포함하고 있는 부재의 실제 압축강도와는 상관없이 이론적인 분석에 의하여 허용응력을 산출한다는 측면에서 약점을 지니고 있다.

그러나 실대재의 압축강도 시험은 실제로 결점을 포함하고 있는 부재를 그대로 사용하여 결점을 포함한 압축강도를 측정하는 것이기 때문에 이론적으로 결점의 영향을 반영하는 것보다는 훨씬 더 현실 상황에 근접한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 이유로 이 연구에서는 아직까지 국내의 KS 표준이 제정되어 있지는 않지만 ASTM D 198에 따라서 실대재의 압축강도 시험을 실시하였다.

먼저 소경각재의 압축강도를 측정하기 위하여 그림 B1-1과 같이 2.5m 길이의 소경각재를 충남대학교 환경소재공학과 그린건축연구실에서 보유하고 있는 100톤 용량의 압축강도 시험기에 설치하고 시험 중에 발생할 수 있는 시험편의 좌굴을 방지하기 위하여 그림 B1-1에서 보는 바와 같이 시험편의 길이를 따라서 500mm 간격으로 시험편의 4면을 측면에서 지지하는 지지대를 설치하였다. 그림 B1-1과 같이 시험을 실시함으로써 시험편에서 좌굴의 요소는 배제하고 결점의 영향은 포함되어 있는 압축강도를 측정할 수 있다.

소경각재를 가로 및 세로 방향으로 접착하여 제조된 다중접착접합 기둥 부재를 실제 건축물의 기둥으로 사용하는 경우에 대한 압축강도를 시험하고자 하는 경우에는 그림 B1-1과 같은 좌굴 방지 지지대를 설치하면 오히려 실제 상황과 다른 결과를 얻게 될 것이다. 따라서 다중접착접합 기둥 부재의 압축시험은 그림 B1-2와 같이 측면 지지대 없이 좌굴의 영향까지 포함된 상태로 시험을 실시하였다. 기둥부재 중에서 단면 치수가 160mmx160mm인 경우에는 100톤 용량의 시험기로 시험편이 파괴될 때까지 시험이 가능하였으나 180mmx180mm 단면의 시험편과 240mmx240mm 단면의 시험편은 100톤 용량으로 파괴될 때까지 시험이 불가능하여 이들 부재는 서울의 국립산림과학원 목구조연구실에서 보유하고 있는 200톤 용량의 기둥 압축시험기를 이용하여 시험을 실시하였다.



그림 B1-1 소경각재 실대재의 압축시험 그림 B1-2 다중접착접합 기둥 부재의 압축시험

그림 B1-1 및 B1-2의 기둥 압축시험에서 기둥의 변형을 측정하기 위하여 시험편에서 마주 보는 양면에 라인형 LVDT를 부착하여 시험 중에 변형을 연속적으로 측정하였으며 2개의 LVDT 변형값의 평균을 부재의 변형으로 하였다. 시험편의 탄성계수, 비례한도 응력 및 압축강도는 각각 식 (B1-1), (B1-2) 및 (B1-3)에 의하여 계산하였다.

$$E = \frac{P_p L}{A \Delta_p} \text{ ----- (B1-1)}$$

$$\sigma_{cpl} = \frac{P_p}{A} \text{ ----- (B1-2)}$$

$$\sigma_{cmax} = \frac{P_{max}}{A} \text{ ----- (B1-3)}$$

- 여기서, E: 탄성계수(N/mm²)
- P_p: 비례한도 하중(N)
- L: 시험편의 길이(mm)
- A: 시험편의 단면적(mm²)
- Δ_p: 비례한도 변형(mm)
- σ_{cpl}: 비례한도 응력(N/mm²)
- σ_{cmax}: 압축강도(N/mm²)
- P_{max}: 최대하중(N)

(나) 휨 시험

목재의 휨 시험 방법에는 무결점 소시험편의 휨 시험 방법(KS F 2208)과 실대재의 휨 시험

방법(KS F 2150)이 있다. 압축강도 시험의 경우와 마찬가지로 무결점 소시험편에 대한 휨 시험 결과에는 결점의 영향이 반영되어 있지 않기 때문에 결점의 크기 및 분포와 휨 강도 사이의 상관관계 분석을 통하여 얻어진 조정계수를 적용하여 허용응력을 산출하여야 한다. 비록 결점의 영향에 대한 조정계수가 과거 오랜 동안의 연구 결과가 반영되어 있는 것이기는 하지만 그래도 이론적 분석에 근거한 것이기 때문에 실제로 결점을 포함하고 있는 목재의 강도와는 오차가 있을 수밖에 없다. 따라서 가능하면 실제 사용되는 목재와 동일하게 결점을 그대로 포함하고 있는 목재에 대한 휨 시험을 통하여 휨 강도를 측정한다면 결점의 영향이 포함되어 있는 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다. KS F 2150(구조용 실대재의 휨 시험 방법)는 이러한 목적을 위하여 해당 등급의 목재에 허용되는 수준의 결점들을 포함하며 실제 건축에 사용되는 치수의 구조용 목재에 대한 휨 시험 방법을 다루고 있다.

KS F 2208의 소시험편에 대한 휨 시험은 그림 B1-3와 같이 중앙 집중하중 방식으로 실시되며 KS F 2150의 실대재에 대한 휨 시험은 그림 B1-4와 같이 1/3점 하중 방식으로 실시된다. 그림 B1-3의 중앙 집중하중 방식에서는 부재의 전체 구간에 걸쳐서 전단력이 발생하기 때문에 휨 강도의 측정에서 전단력의 영향을 피할 수 없으며 이러한 전단력의 영향은 짧고 높이가 높은 부재일수록 심하게 나타날 것이다. 그러나 그림 B1-4의 1/3점 하중 방식은 중앙의 2개의 하중점 사이에서 전단력이 작용하지 않기 때문에 전단력의 영향을 배제한 순수한 휨 모멘트의 영향만을 고려한 휨 강도를 얻을 수 있는 장점이 있다.

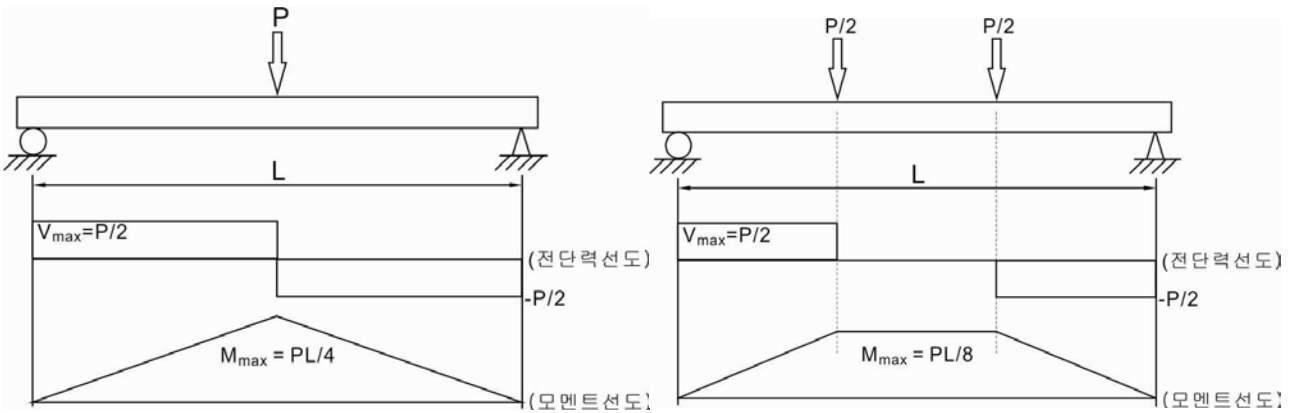


그림 B1-3 중앙집중하중 휨 시험

그림 B1-4 1/3점 하중 휨 시험

그림 B1-4와 같은 1/3점 하중 휨 시험에서 MOE 및 MOR은 식 (B1-4) 및 (B1-5)에 의하여 계산된다.

$$MOE(N/mm^2) = \frac{7P_p L^3}{36 \Delta_p b h^3} \text{ ----- (B1-4)}$$

$$MOR(N/mm^2) = \frac{P_{max} L}{b h^2} \text{ ----- (B1-5)}$$

여기서, P_p : 비례한도 하중(N)

- L: 시험편의 길이(mm)
- Δ_p : 비례한도 변형(mm)
- b: 시험편의 나비(mm)
- h: 시험편의 높이(mm)
- P_{max} : 최대하중(N)

(다) 소경각재의 비파괴시험

비파괴시험 방법은 목재를 직접 파괴시키지 않고도 목재의 강도를 어느 정도 정확하게 예측할 수 있다는 장점이 있다. 비파괴시험 방법으로는 육안 등급 구분 방법, 작은 응력을 가하는 비파괴시험 방법, 초음파(ultrasonic wave)를 이용하는 비파괴시험 방법, 응력파(stress wave)를 이용하는 비파괴시험 방법, 진동을 이용하는 비파괴시험 방법, X선을 이용하는 비파괴시험 방법 등을 들 수 있다. 이들 중에서 현재 실용화되어 있는 방법으로는 작은 응력을 가하는 방법 및 초음파와 응력파를 가하는 방법을 들 수 있다. 육안등급 구분 방법은 목재의 표면에 분포하는 결점의 크기, 위치, 수 등을 검사하여 등급을 결정하는 방법으로서 이 연구에서는 세부과제에서 적용하였던 것과 동일한 표 B1-3과 같은 기준을 적용하여 육안 등급 구분을 실시하였다.

표 B1-3 소경각재의 육안 식별을 위한 품질 기준

구분	품질 기준			
	1등급	2등급	3등급	4등급
최대 용이 지름비	17% 이하	25% 이하	33% 이하	50% 이하
섬유주행경사	1:16 이하	1:14 이하	1:12 이하	1: 8 이하
썩음	없을 것			
갈라짐	경미할 것			
변색	경미할 것			
경사결	경미할 것			
둥근모	나비가 단면치수의 1/4 이내이고 인접한 2모서리에는 없을 것			
그 밖의 결점	극히 경미할 것			

작은 응력을 가하는 방법은 목재의 탄성한계 이내의 작은 하중을 가하면서 변형을 측정하여 하중과 변형의 관계로부터 MOE를 계산하고 MOE와 MOR이 비례하는 관계를 이용하여 목재의 MOR를 예측하는 방법이다. 이 연구에서는 휨 시험을 실시하면서 탄성한계에서의 하중과 변형을 측정하여 MOE를 계산하고 파괴시의 MOR를 계산하여 이들 두 가지 측정값 사이의 관계를 조사하였다.

초음파를 이용하는 비파괴시험 방법은 그림 B1-5에서 보는 바와 같이 초음파 발생 장치(그림 B1-5(A))와 연결된 초음파 전달 센서(그림 B1-5(B))를 통하여 목재에 초음파를 전달시키고

목재에 전달된 초음파가 해당 목재를 가로질러서 반대쪽 끝면에 도달하는 것을 반대쪽 끝면에 부착된 초음파 센서(그림 B1-5(C))가 감지하여 초음파가 목재 부재를 가로지르는데 걸린 시간을 측정하여 목재의 길이를 초음파 전달 시간으로 나누어 줌으로써 목재 내부에서 전달되는 초음파의 속도를 측정하는 방법이다. 이 연구에서는 영국 C.N.S. Electronics 사에서 제작된 초음파 비파괴시험 장비인 Ultrasonic Tester BP-5를 사용하였다.



(A) 콘트롤 박스 (B) 초음파 전달 센서 (C) 초음파 감지 센서

그림 B1-5 초음파를 이용하는 비파괴시험 장비(Ultrasonic Tester BP-5)

응력파를 이용하는 비파괴시험 방법은 그림 B1-6에서 보는 바와 같이 응력파 센서가 내장된 망치(그림 B1-6(B))를 사용하여 목재의 한쪽 끝을 치면 그 충격에 의하여 응력파가 발생하면서 그 시간이 콘트롤 박스에 기억되고 응력파는 목재를 가로질러서 반대쪽 끝면으로 전달되며 반대쪽 끝면에 설치된 응력파 감지센서(그림 B1-6(C))를 통하여 응력파 도달시간이 측정되어 목재부재의 길이를 앞에서 측정된 응력파 발생시간과 응력파가 반대쪽에 도달한 시간 사이의 값으로 나누어 줌으로써 목재 내부에서 전달되는 응력파의 속도를 측정하는 방법이다. 이 연구에서는 미국 Metriguard사의 응력파 비파괴시험 장비인 Stress Wave Timer 239A를 사용하였다.

일반적으로 목재의 MOE는 식 (B1-6)와 같이 목재 내에서의 음 전달 속도의 제곱에 목재의 밀도를 곱한 값과 같다고 알려져 있다.

$$MOE = V^2 \rho \text{ ----- (B1-6)}$$

여기서, V: 목재 내에서 음의 속도

ρ: 목재의 밀도



(A) 콘크롤 박스 (B) 초음파 센서가 내장된 망치 (C) 초음파 감지 센서

그림 B1-6 응력파를 이용하는 비파괴시험 장비(Stress Wave Timer 239A)

(라) 밀도 및 함수율 측정 방법

소경각재의 압축 및 휨 시험을 실시한 직후 각 시험편들의 밀도 및 함수율을 측정하기 위하여 소경각재의 양 끝면으로부터 100mm 이상 떨어진 지점에서 결점이 없는 부분을 골라서 단면치수 그대로 20mm의 길이로 시험편을 채취하였다. 동일한 시험편을 사용하여 목재의 밀도는 KS F 2198(목재의 밀도 및 비중 측정 방법)에 따라서 측정하고 함수율은 KS F 2199(목재의 함수율 측정 방법)에 따라서 측정하였다. 시험편을 채취한 다음 즉시 디지털 버니어캘리퍼스를 사용하여 채취된 시험편들의 가로, 세로 및 길이를 0.01mm의 정밀도로 측정하고 기건 질량을 0.01g의 정밀도로 측정한 다음 목재의 질량을 부피로 나누어서 기건밀도(kg/m^3)를 계산하였다. 무게 측정을 마친 시험편들을 $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ 로 유지되는 건조기 내에 넣고 함량에 도달할 때까지 건조한 후 함량에 도달한 시험편은 데시케이터에 넣어서 상온에 도달할 때까지 식히고 그 질량을 0.01g의 정밀도로 측정하여 전건질량으로 한다. 기건질량에서 전건질량을 뺀 값이 목재 내에 존재하는 수분의 질량이며 이를 전건질량으로 나누고 100을 곱하여 함수율을 % 단위로 계산하였다.

다. 시험 결과

(1) 소경각재의 강도성능

(가) 소경각재의 압축강도

소경각재의 실대재 압축강도 시험 전에 표 B1-3의 기준에 따라서 육안 등급 구분을 실시하였으며 각 수종 및 등급별 탄성계수 및 압축강도는 표 B1-4 및 그림 B1-7(낙엽송) 및 B1-8(편백)과 같다.

표 B1-4 소경각재의 육안 등급별 탄성계수 및 압축강도

수종	육안 등급	수(개)	탄성계수(GPa)	압축강도(MPa)
낙엽송	1	13(18.6%)	12.0	40
	2	21(30.0%)	11.1	38
	3	27(38.6%)	10.8	37
	4	9(12.9%)	10.6	36
소계		70(100%)		
편백	1	2(4.1%)	17.3	52
	2	32(65.3%)	14.6	47
	3	15(30.6%)	13.4	45
소계		49(100%)		
합계		119		

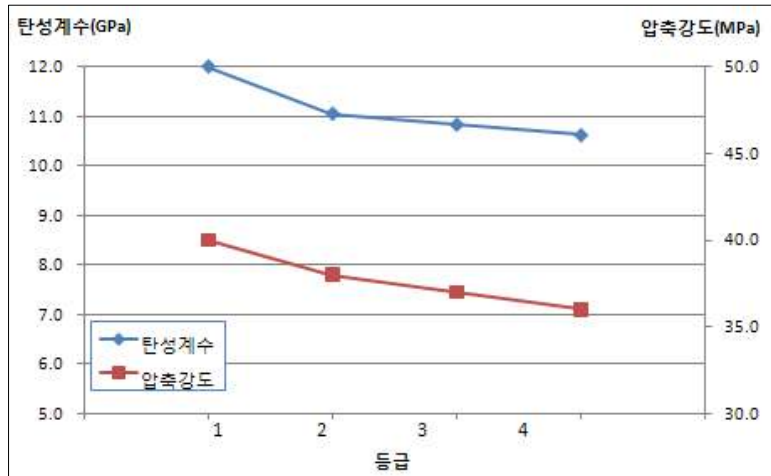


그림 B1-7 낙엽송 80mmx80mm 소경각재의 육안 등급별 탄성계수 및 압축강도

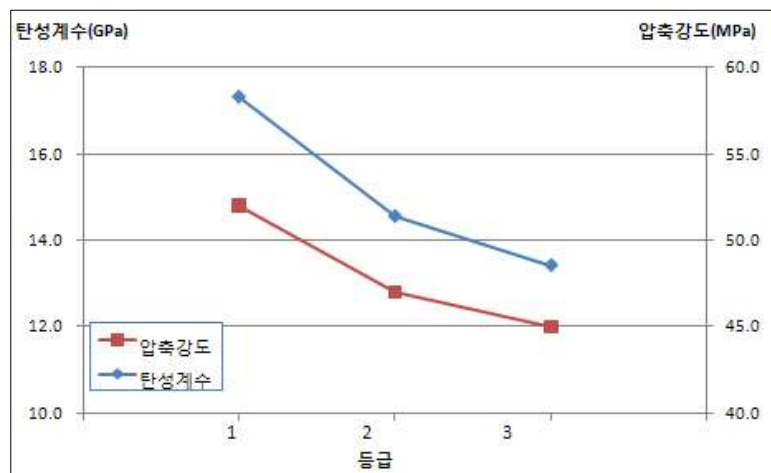


그림 B1-8 편백 80mmx80mm 소경각재의 육안 등급별 탄성계수 및 압축강도

표 B1-4에서 보면 시험편으로 사용된 소경각재 중에서 낙엽송은 1, 2, 3 및 4등급이 각각 18.6%, 30%, 38.6% 및 12.9%를 나타내었으며 편백은 1, 2 및 3등급이 각각 4.1%, 65.3% 및 30.6%를 나타내었다. 낙엽송 소경각재는 편백보다 비교적 큰 용이가 존재하였으며 이로 인하여 등급이 편백보다 낮게 판정되었고 편백의 경우에는 작은 용이가 전면에 비교적 골고루 분포하였으며 4등급에 해당하는 부재는 관찰되지 않았다. 표 B1-4 및 그림 B1-7과 B1-8에서 보면 낙엽송과 편백 모두에서 육안 등급이 높을수록 탄성계수 및 압축강도가 높은 경향을 나타내었으며 동일 등급의 경우에는 편백이 낙엽송보다 높은 탄성계수 및 압축강도를 나타내었다.

낙엽송 시험편의 평균 밀도 및 함수율은 각각 $494\text{kg/m}^3(0.494\text{g/cm}^3)$ 및 11.1%를 나타내었으며 편백 시험편의 경우에는 각각 $478\text{kg/m}^3(0.478\text{g/cm}^3)$ 및 12.7%를 나타내었다. 편백의 밀도가 낙엽송보다 약간 높은 값을 나타내었으며 함수율은 모든 시험편에서 15% 이하를 나타내었다. 낙엽송에서 밀도와 탄성계수 사이의 관계는 그림 B1-9와 같이 비례하는 관계를 나타내었으나 상관계수는 그렇게 높지 않았다. 낙엽송의 압축강도도 밀도와 비례하는 관계를 나타내었으나 상관계수는 더 낮은 값을 나타내었다. 편백 소경각재에서 밀도와 탄성계수 및 압축강도 사이의 관계도 이와 유사한 경향을 나타내었다.

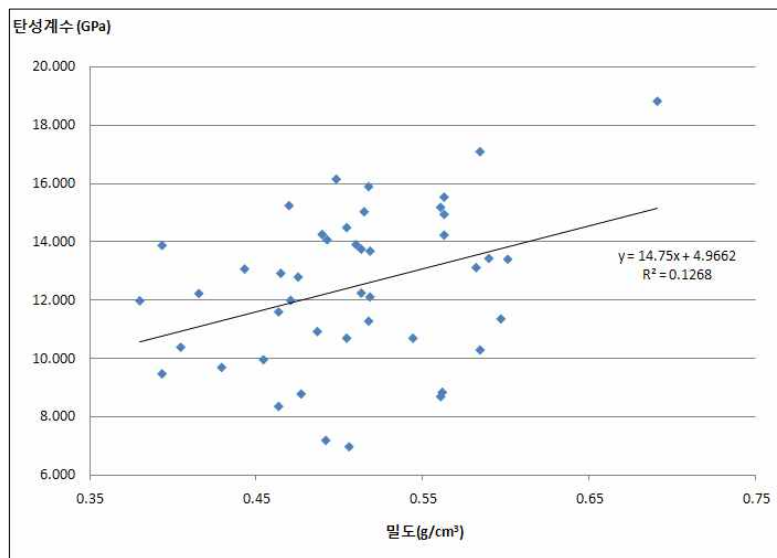


그림 B1-9 낙엽송 소경각재에서 밀도와 압축 탄성계수의 관계

그림 B1-10 및 B1-11은 각각 낙엽송 및 편백 소경각재에서 탄성계수와 압축강도 사이의 관계를 나타내는 그래프이다. 낙엽송과 편백 모두 탄성계수와 압축강도 사이에는 비례하는 관계를 나타내었으나 상관계수는 낙엽송에서 더 높은 값을 나타내었다.

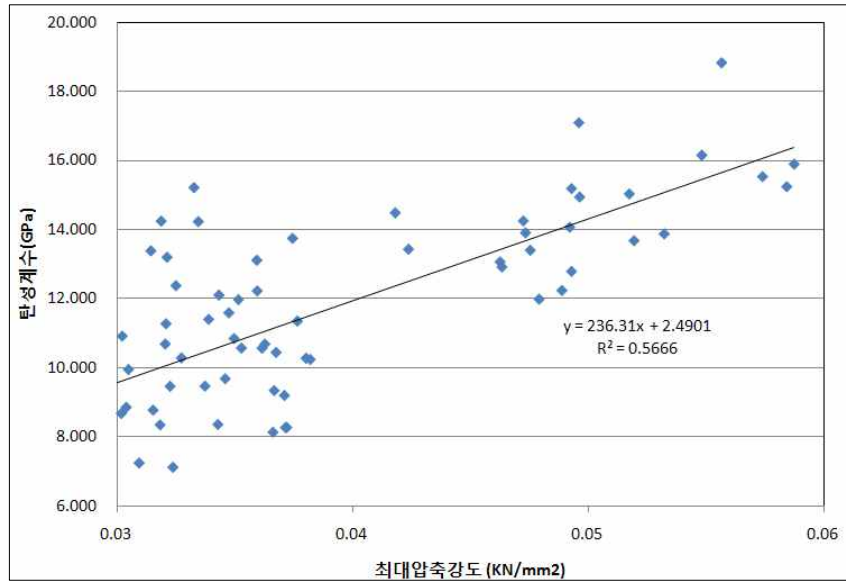


그림 B1-10 낙엽송 소경각재에서 탄성계수와 압축강도 사이의 관계

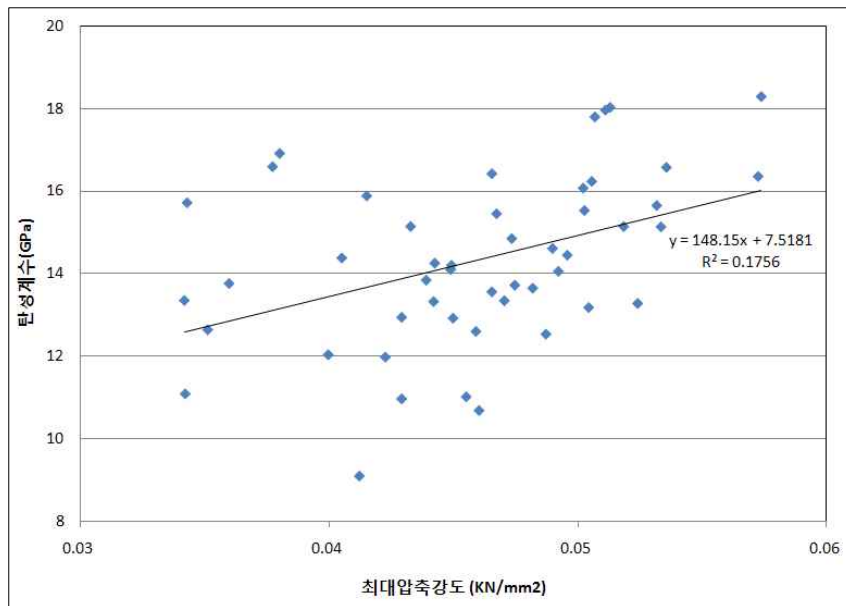


그림 B1-11 편백 소경각재에서 탄성계수와 압축강도 사이의 관계

그림 B1-12는 편백에서 응력파의 속도와 탄성계수 사이의 관계를 나타내고 있으며 초음파의 속도도 탄성계수와 사이의 이와 유사한 관계를 나타내고 있다. 그림 B1-13은 편백 소경각재에서 초음파의 속도와 압축강도 사이의 관계를 나타내고 있으며 그림 B1-12에 비하여 매우 낮은 상관계수를 나타내고 있으며 낙엽송에서도 이와 유사하게 낮은 상관관계를 나타내고 있다. 그림 B1-12 및 B1-13으로부터 응력파 또는 초음파의 속도는 탄성계수와는 비교적 양호한 상관관계를 나타내고 있으나 압축강도와는 매우 낮은 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

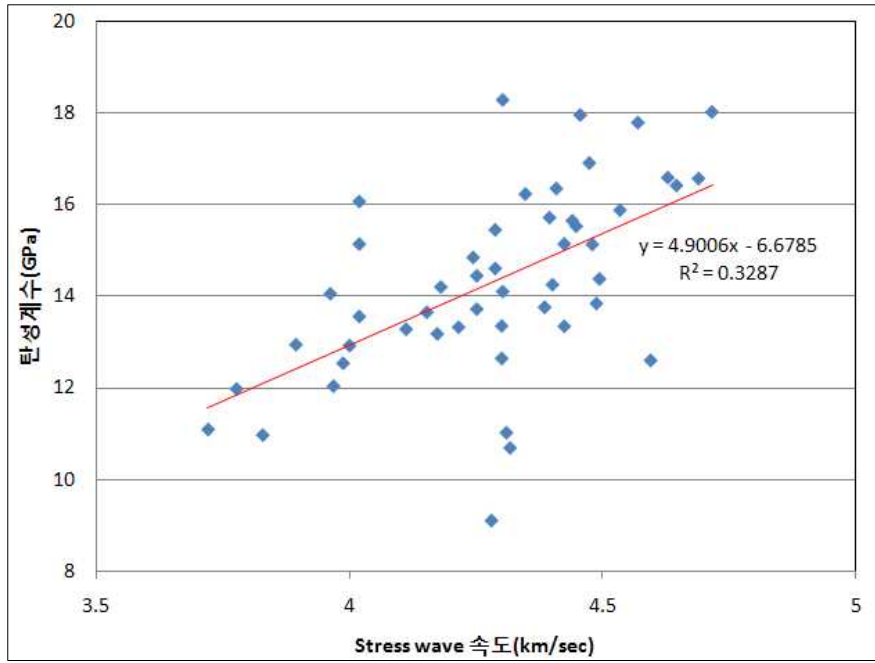


그림 B1-12 편백 소경각재에서 응력파의 속도와 탄성계수 사이의 관계

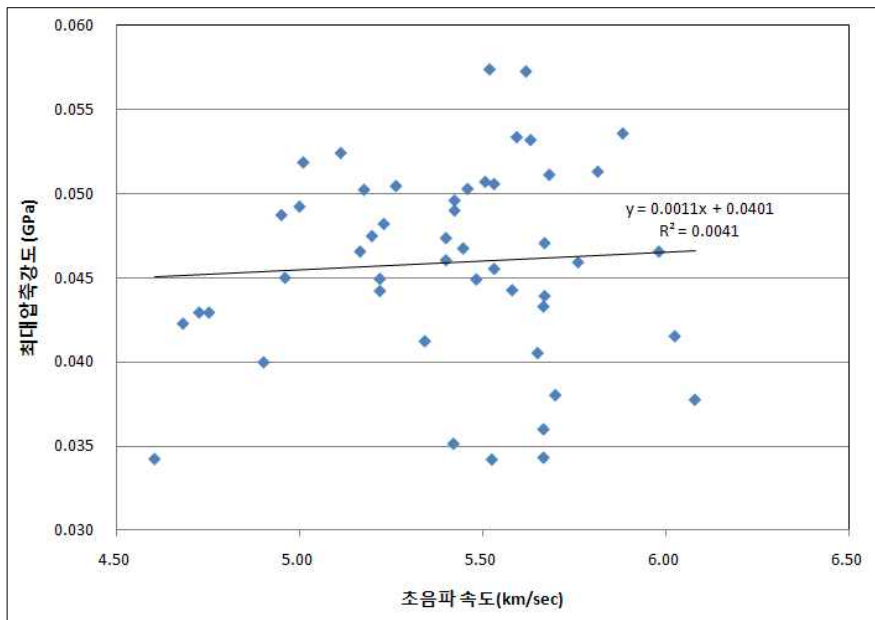


그림 B1-13 편백에서 초음파의 속도와 압축강도 사이의 관계

그림 B1-14는 낙엽송 소경각재에서 응력파의 속도와 초음파의 속도 사이의 상관관계를 나타내고 있으며 비록 응력파의 속도가 초음파의 속도보다 조금 낮기는 하지만 이들 사이에는 매우 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

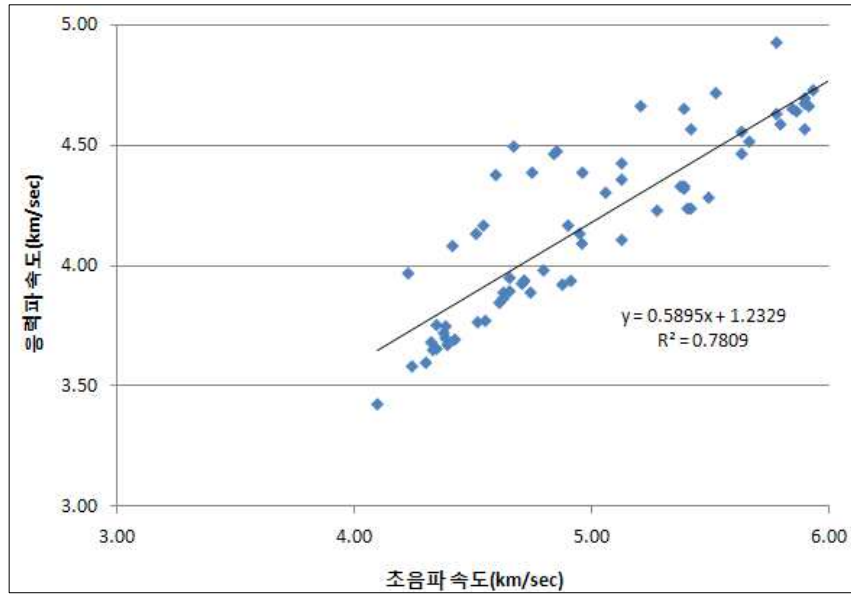


그림 B1-14 낙엽송 소경각재에서 초음파 속도와 응력파 속도 사이의 관계

(나) 압축하중 하에서 소경각재의 파괴

소경각재의 실대재 압축시험에서 나타나는 파괴의 형태를 관찰한 결과 그림 B1-15, B1-16 B1-17 및 B1-18에서 보는 바와 같이 큰 웅이 또는 모인 웅이 주변에서 목재가 파괴되는 형태를 나타내었다. 큰 웅이나 모인 웅이 주변에서는 웅이의 형태를 따라서 섬유가 경사지게 배열되거나 또는 웅이로 인한 섬유의 불연속이 나타나기 때문에 섬유경사각이 클수록 목재의 강도가 감소하므로 섬유경사를 따라서 파괴가 일어나거나 섬유의 불연속 지점에서 응력 집중이 발생하여 파괴가 초래될 가능성이 매우 높다. 그림 B1-15에서 B1-18까지에서 보면 이러한 현상들이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 여러 가지 목재의 결점 중에서 강도에 가장 영향이 큰 결점을 한 가지 꼽는다면 웅이를 들 수 있으며 육안으로 등급 구분을 실시하는 경우에 웅이의 크기와 위치 그리고 모인 웅이 여부 등을 판단하여 등급을 구분하면 비교적 정확하게 강도 등급 구분이 이루어질 수 있을 것이다.



그림 B1-15 편백에서 모인 웅이 주변의 파괴



그림 B1-16 낙엽송에서 웅이 주변의 파괴



그림 B1-17 낙엽송에서 용이 주변의 파괴 그림 B1-18 낙엽송에서 모인 용이 주변의 파괴

목재 내에 건조 등의 가공 공정을 거치면서 이미 할열이 있는 경우에 그림 B1-19처럼 할열의 끝 부분에 응력이 집중되면서 거기서부터 파괴가 발생하는 경우도 있지만 그림 B1-20에서 보는 바와 같이 할열이 있음에도 불구하고 이와는 상관없이 압축파괴가 발생하는 경우도 종종 관찰되었다. 따라서 할열은 어느 정도 크기 이상이 되지 않으면 목재의 압축강도에는 그렇게 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단되며 따라서 할열의 크기와 위치 등을 육안 등급 구분의 중요 인자로 보기는 어려울 것으로 판단된다. 다만 할열의 존재 여부는 이 부분이 다중접착접합부재의 표면에 노출되는 경우에 외관상의 문제가 발생할 수 있으며 할열 부분이 외부에 노출되지 않도록 내부에 위치시킬 수 있다면 어느 정도의 할열은 크게 문제될 것은 없는 것으로 보인다.



그림 B1-19 할열 끝 부분에서의 파괴

그림 B1-20 할열과 관계없는 압축파괴

목재가 압축응력을 받으면 섬유방향과 45도 경사진 방향으로 최대 전단응력이 작용하며 접

선단면의 경우에는 섬유가 나무결을 따라서 경사진 상태로 배열되어 있기 때문에 이 경사면을 따라서 전단파괴가 발생할 가능성이 높다. 따라서 전단강도가 약한 목재의 경우에는 그림 B1-21에서 보는 바와 같이 접선단면에서 45도의 경사각으로 전단파괴가 발생하게 된다. 그러나 그림 B1-22에서 보는 바와 같이 방사단면에서는 섬유가 나무결을 따라서 길이 방향에 평행하게 배열되므로 45도 경사의 전단응력에 의한 파괴보다는 섬유와 섬유가 서로 눌러서 파괴되는 압착파괴가 일어나게 된다.



그림 B1-21 접선단면에서 45도 경사의 압축파괴



그림 B1-22 방사단면에서 섬유 직각방향의 파괴

(다) 소경각재의 휨 강도

소경각재의 실대재 휨강도 시험 전에 표 B1-2의 기준에 따라서 육안 등급 구분을 실시하였으며 각 수종 및 등급별 MOE 및 MOR은 표 B1-5 및 그림 B1-23(낙엽송) 및 B1-24(편백)와 같다.

표 B1-5 소경각재의 육안 등급별 MOE 및 MOR

수종	육안 등급	수(개)	MOE(GPa)	MOR(MPa)
낙엽송	1	13(19.1%)	10.3	49
	2	30(44.1%)	9.5	47
	3	21(30.9%)	9.3	46
	4	4(5.9%)	9.2	45
소계		68(100%)		
편백	1	8(16.7%)	9.9	57
	2	33(68.8%)	9.2	55
	3	7(14.5%)	8.9	55
소계		48(100%)		
합계		116		

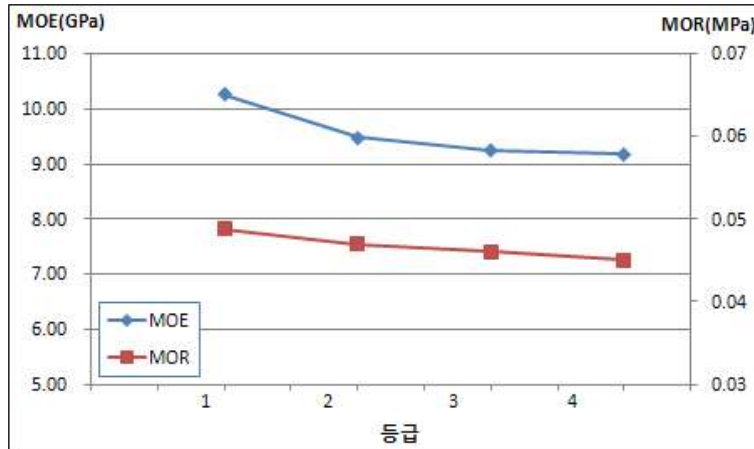


그림 B1-23 낙엽송 80mmx80mm 소경각재의 육안 등급별 MOE 및 MOR

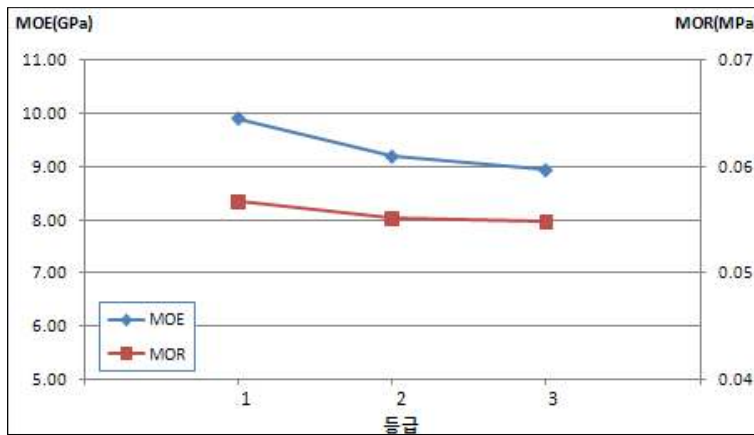


그림 B1-24 편백 80mmx80mm 소경각재의 육안 등급별 MOE 및 MOR

표 B1-5에서 보면 시험편으로 사용된 소경각재 중에서 낙엽송은 1, 2, 3 및 4등급이 각각 19.1%, 44.1%, 30.9% 및 5.9%를 나타내었으며 편백은 1, 2 및 3등급이 각각 16.7%, 68.8% 및 14.5%를 나타내었다. 압축시험용 소경각재의 경우와 비슷하게 낙엽송 소경각재는 편백보다 비교적 큰 용이가 존재하였으며 이로 인하여 등급이 편백보다 낮게 판정되었고 편백의 경우에는 작은 용이가 전면에 비교적 골고루 분포하였으며 4등급에 해당하는 부재는 관찰되지 않았다. 표 B1-5 및 그림 B1-23과 B1-24에서 보면 낙엽송과 편백 모두에서 육안 등급이 높을수록 탄성계수 및 압축강도가 높은 경향을 나타내었고 동일 등급의 경우에는 편백이 낙엽송보다 높은 탄성계수 및 압축강도를 나타내었으며 이러한 경향은 앞의 압축시험용 소경각재의 경우와 동일하였다.

낙엽송 및 편백 시험편에서 밀도와 탄성계수 또는 압축강도 사이의 관계는 앞의 압축시험용 소경각재의 경우와 유사하게 상호 비례하는 관계를 나타내었으나 상관계수는 그렇게 높지 않았다.

그림 B1-25는 낙엽송과 편백 소경각재에서 탄성계수와 압축강도 사이의 관계를 나타내는

그래프이다. 탄성계수와 압축강도 사이에는 비례하는 관계를 나타내었으나 상관계수는 비교적 높은 값을 나타내어 응력 등급 구분에 의한 비파괴시험 방법의 적용 가능성이 높음을 알 수 있다. 비례한도 이하의 작은 휨 하중을 소경각재에 가하여 하중과 함께 변형을 측정하고 이 측정값들로부터 MOE를 계산하고 MOE와 MOR이 비례하는 관계에 있으므로 MOE값을 사용하여 등급을 구분하면 비교적 정확하게 소경각재의 휨 강도에 의한 등급 구분이 이루어질 수 있을 것이다. 그림 B1-25에서 보면 MOE 값이 5GPa 이하에서부터 15GPa 이상까지 분포하므로 MOE 값을 기초자료로 하여 E15(15GPa 이상), E13(13GPa 이상, 15GPa 미만), E11(11GPa 이상, 13GPa 미만), E9(9GPa 이상, 11GPa 미만), E7(7GPa 이상, 9GPa 미만), E5(5GPa 이상, 7GPa 미만) 및 LOW(5GPa 미만) 등의 7단계 등급으로 구분하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 이러한 방법에 근거하여 분류된 소경각재의 등급을 이용하여 기둥용 또는 보용 다중접착접합부재의 제조 시에 소경각재의 배치 방법을 다양하게 구성하여 목적에 적합한 부재의 제조가 가능할 것이며 이를 통하여 강도가 높은 소경각재 및 강도가 낮은 소경각재의 효율적인 이용이 가능할 것으로 생각된다.

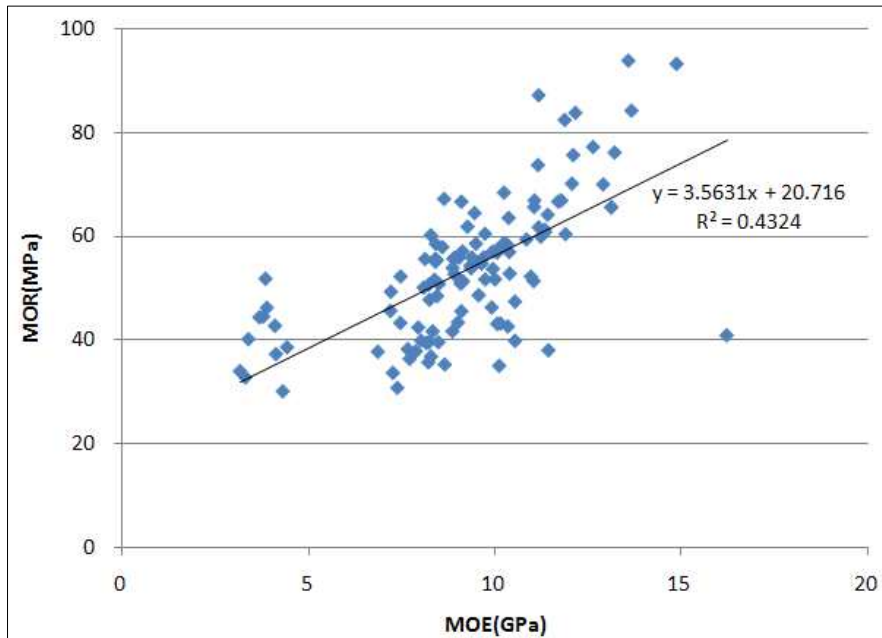


그림 B1-25 낙엽송 및 편백 소경각재에서 MOE 및 MOR 사이의 관계

그림 B1-26은 편백 소경각재에서 응력파의 전달 속도와 MOE 사이의 관계를 나타내고 있으며 비록 상관계수가 그렇게 높지는 않지만 이들 사이에 비례하는 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 B1-27은 편백 소경각재에서 초음파의 전달 속도와 MOE 사이의 관계를 나타내고 있으며 응력파의 경우보다 상관계수가 더 낮게 나타났다. 낙엽송의 경우에는 응력파와 초음파의 음속과 부재의 휨탄성계수 사이에는 그림 B1-26 및 B1-27과 매우 유사하게 상호 낮은 상관계수로 비례하는 관계를 나타내었다.

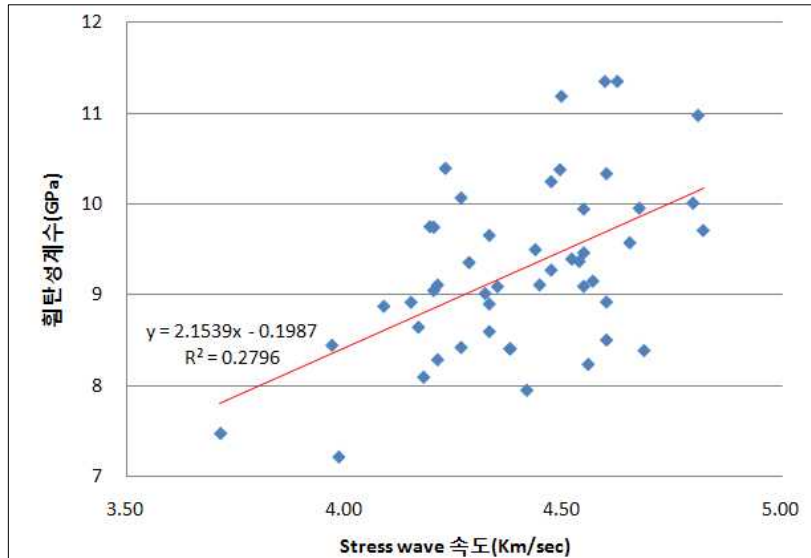


그림 B1-26 편백 소경각재에서 응력파의 속도와 MOE 사이의 관계

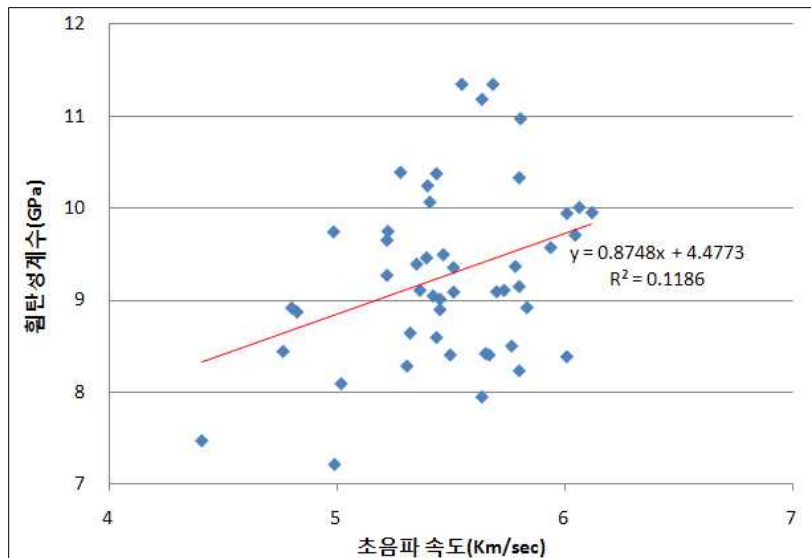


그림 B1-27 편백 소경각재에서 초음파의 속도와 MOE 사이의 관계

(라) 소경각재의 비파괴 등급 구분

앞의 소경각재에 대한 휨 시험 결과로부터 소경각재의 MOE에 근거하여 비파괴 등급을 LOW, E5, E7, E9, E11, E13 및 E15의 7등급으로 구분하는 것이 합리적인 것으로 제시하였다. 그림 B1-26 및 B1-27에서 보면 비록 응력파와 초음파의 속도와 MOE와의 상관계수가 높지는 않지만 목재 내의 음 전달 속도를 이용하여 간단하게 MOE를 예측하고 소경각재의 MOE와 MOR 사이의 관계로부터 등급별 휨강도를 결정하는 방법이 가능할 것으로 생각된다. 응력파 또는 초음파의 목재 내 전달 속도에 따른 등급을 구분하면 탄성계수에 따른 등급 구분과 동일하게 LOW(응력파 3.5km/sec 미만, 초음파 3.5km/sec 미만), E5(응력파 3.5km/sec 이상 및 4.0km/sec 미만, 초음파 3.5km/sec 이상 및 4.0km/sec 미만), E7(응력파 4.0km/sec 이상 및 4.5km/sec 미만, 초음파 4.0km/sec 이상 및 4.5km/sec 미만), E9(응력파 4.5km/sec 이상 및

5.0km/sec 미만, 초음파 4.5km/sec 이상 및 5.1km/sec 미만), E11(응력과 5.0km/sec 이상 및 5.5km/sec 미만, 초음파 5.1km/sec 이상 및 5.8km/sec 미만), E13(응력과 5.5km/sec 이상 및 6.0km/sec 미만, 초음파 5.8km/sec 이상 및 6.5km/sec 미만) 그리고 E15(응력과 6.0km/sec 이상, 초음파 6.5km/sec 이상)와 같이 7등급으로 구분하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

응력과 및 초음파의 전달속도에 따른 등급 구분은 기둥부재에도 휨 부재와 동일한 등급을 적용할 수 있을 것으로 판단되며 이 연구에서 실시된 소경각재의 휨 시험 및 압축시험 결과에 근거하여 산출된 각 등급별 휨 탄성계수, 휨강도, 압축 탄성계수 및 압축강도는 낙엽송 및 편백에 대하여 각각 표 B1-6 및 B1-7에 주어진 바와 같다. 표 B1-6 및 B1-7을 보면 일반적으로 편백의 강도가 낙엽송보다 높은 것으로 나타났으며 LOW 및 E5 등급은 강도성능이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

표 B1-6 낙엽송 소경각재의 등급별 판정 기준 및 기계적 성질

비파괴 등급	응력 등급 기준(MOE)	응력과 등급 기준(km/s)	초음파 등급 기준(km/s)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	허용휨응력 (MPa) ⁽¹⁾	탄성계수 (GPa)	압축강도 (MPa)	허용압축응력 (MPa) ⁽²⁾
LOW	5 미만	2.9 미만	2.8 미만	3.8	25.3	3.5	3.2	19.1	3.3
E5	5 이상 7 미만	2.9 이상 3.3 미만	2.8 이상 3.6 미만	6.9	38.0	5.9	6.9	23.1	5.6
E7	7 이상 9 미만	3.3 이상 3.8 미만	3.6 이상 4.4 미만	8.1	40.4	7.0	8.2	31.3	7.7
E9	9 이상 11 미만	3.8 이상 4.3 미만	4.4 이상 5.2 미만	10.2	47.8	10.5	10.2	32.1	12.4
E11	11 이상 13 미만	4.3 이상 4.7 미만	5.2 이상 6.0 미만	12.1	49.8	11.5	12.1	34.8	13.8
E13	13 이상 15 미만	4.7 이상 5.2 미만	6.0 이상 6.8 미만	13.8	52.9	13.4	13.8	37.8	15.4
E15	15 이상	5.2 이상	6.8 미만	16.6	54.0	16.1	16.1	43.1	18.2

비 ⁽¹⁾ 허용휨응력은 표 C10의 계수를 적용하여 MOR 시험결과의 5% 하한값에 1/2.1을 곱하여 계산한 것이다.

⁽²⁾ 허용압축응력은 표 C10의 계수를 적용하여 압축강도 시험결과의 5% 하한값에 1/1.9를 곱하여 계산한 것이다.

표 B1-7 편백 소경각재의 등급별 판정 기준 및 기계적 성질

비파괴 등급	응력 등급 기준(MOE)	응력과 등급 기준(km/s)	초음파 등급 기준(km/s)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	허용휨응력 (MPa) ⁽¹⁾	탄성계수 (GPa)	압축강도 (MPa)	허용압축응력 (MPa) ⁽²⁾
LOW	5 미만	2.9 미만	2.8 미만	3.3	24.5	7.4	4.2	20.4	6.8
E5	5 이상 7 미만	2.9 이상 3.3 미만	2.8 이상 3.6 미만	5.9	35.5	12.1	6.1	27.5	11.4
E7	7 이상 9 미만	3.3 이상 3.8 미만	3.6 이상 4.4 미만	8.4	44.2	14.5	8.7	34.3	14.6
E9	9 이상 11 미만	3.8 이상 4.3 미만	4.4 이상 5.2 미만	9.7	45.4	15.6	10.2	43.3	16.1
E11	11 이상 13 미만	4.3 이상 4.7 미만	5.2 이상 6.0 미만	11.3	41.3	16.3	12.2	42.2	16.5
E13	13 이상 15 미만	4.7 이상 5.2 미만	6.0 이상 6.8 미만	14.2	47.8	17.4	13.9	45.6	18.3
E15	15 이상	5.2 이상	6.8 미만	15.9	46.9	17.5	16.4	48.4	19.8

비 ⁽¹⁾ 허용휨응력은 표 C10의 계수를 적용하여 MOR 시험결과의 5% 하한값에 1/2.1을 곱하여 계산한 것이다.

⁽²⁾ 허용압축응력은 표 C10의 계수를 적용하여 압축강도 시험결과의 5% 하한값에 1/1.9를 곱하여 계산한 것이다.

(마) 휨 하중 하에서 소경각재의 파괴

목재는 휨 하중 하에서 그림 B1-28과 같이 처짐이 발생하며 처진 부분의 하단에는 최대 인장응력이 발생하며 상단에는 최대 압축응력이 생기게 된다. 대부분의 경우에 휨 하중 하에서 목재는 최대 인장응력이 발생하는 처짐 부위 하단에서부터 파괴가 이루어지며 특히 이 부위에 웅이나 섬유경사가 존재하는 경우에는 그림 B1-29에서 보는 바와 같이 섬유경사를 따라서 인장 및 전단파괴가 발생할 가능성이 매우 높다. 휨 부재에서도 큰 웅이 또는 모인 웅이 주변에서는 웅이의 모양을 따라서 섬유가 경사지게 배열되거나 웅이로 인한 섬유의 불연속이 나타나기 때문에 이 부분에서 섬유에 경사진 인장이나 전단 또는 응력 집중에 의한 파괴가 발생하게 될 것이다.



그림 B1-28 휨 하중 하에서 소경각재의 처짐



그림 B1-29 섬유경사를 따라서 발생한 파괴

그림 B1-30에서 B1-33까지는 용이 주변에서의 다양한 파괴 형태를 보여주고 있다. 큰 용이가 인장응력이 작용하는 하단부에 존재하거나 그림 B1-30 및 B1-33에서 보는 바와 같이 용이가 인접하여 모여 있음으로써 그 주변을 따라서 섬유경사가 크게 나타나는 경우에는 용이가 강도에 미치는 영향이 더욱 큰 것으로 관찰되었다.



그림 B1-30 모인 용이 주변의 휨 파괴



그림 B1-31 큰 용이 주변의 휨 파괴



그림 B1-32 큰 용이 주변의 휨 파괴



그림 B1-33 모인 용이 주변의 휨 파괴

휨 강도에 할렬이 미치는 영향이 제한적이기는 하지만 그림 C34 및 C35에서 보는 바와 같이 큰 할렬이 하단부 근처에 존재하는 경우에는 이 할렬 부위로부터 휨 파괴가 진행되는 것이 관찰되었다.



그림 B1-34 할렬 주변의 휨 파괴



그림 B1-35 할렬의 끝 부분에서 시작된 휨 파괴

그림 B1-36은 목재 내에 존재하는 꺾질박이로 인한 휨 파괴를 보여주고 있으며 그림 B1-37은 목재 내에 포함된 죽은 용이로 인한 휨 파괴를 보여주고 있다. 그림 B1-36의 꺾질박이나 B1-37의 죽은 용이는 목재 내에 존재하면서 주변의 목재 조직들과 연결되어 있지 않고 끊어져 있기 때문에 그 주변에서 섬유연속이 발생하고 그로 인한 응력집중 때문에 큰 응력이 작용함으로써 이 부분에서 파괴가 발생하게 된다.



그림 B1-36 꺾질박이로 인한 휨 파괴



그림 B1-37 죽은 용이로 인한 휨 파괴

그림 B1-38은 특별히 큰 결점이 존재하지 않는 경우에 먼저 인장에 의하여 하부가 파괴되고 이어서 전단에 의하여 경사지게 파괴가 진행되다가 하부의 파괴로 인하여 중립축이 올라가면서 최종적으로 상부까지 인장에 의하여 파괴된 형태를 보여준다. 그림 B1-39는 하부의 인

장파괴가 중간에 전단으로 진행되지 않고 상부까지 그대로 인장파괴가 진행된 형태를 보여주고 있다.



그림 B1-38 인장-전단-인장에 의한 파괴형태



그림 B1-39 인장에 의한 파괴 형태

이상의 휨 하중에 의한 파괴 형태를 관찰한 결과 압축의 경우와 마찬가지로 용이의 영향이 가장 큰 것으로 판단되며 꺾질박이나 죽은 용이와 같이 섬유가 불연속되는 결점의 경우에는 다중접착접합부재 제조를 위하여 사용하지 않거나 또는 절단하여 결점을 제거하고 핑거조인트를 통하여 길이이음을 하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

(바) 핑거조인트 소경각재의 휨 강도

일반적으로 국산 소경 간벌재는 길이가 1.8m에서 3m 사이로 별채되기 때문에 길이 3m 이상의 다중접착접합부재를 제작하기 위해서는 길이이음을 하여야 한다. 구조용 집성재에서는 층재의 길이이음을 위하여 핑거조인트가 널리 사용되고 있으며 핑거조인트 층재의 경우에 단일 부재 층재 강도의 약 80% 이상을 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 구조용 집성재의 층재 두께는 일반적으로 35mm 이하로서 얇은 목재의 핑거조인트는 상당한 강도성능을 나타내는 것으로 알려져 있으나 이 연구에서 다중접착접합부재 제조를 위하여 사용되는 소경각재와 같이 80mm 이상의 두꺼운 목재의 경우에는 핑거조인트 부재의 강도가 단일 부재에 비하여 상당히 떨어지는 것으로 알려져 있다.

비록 두꺼운 목재의 핑거조인트가 상당한 강도 감소가 나타나지만 한옥건축용 보의 경우에는 길이 3m 이상의 부재도 사용하여야 하기 때문에 한옥건축용 다중접착접합부재를 만들기 위해서는 핑거조인트 소경각재를 사용하지 않으면 안되는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 핑거조인트가 중앙부에 들어간 소경각재를 제작하여 휨 성능을 평가하고 단일부재와의 비교를 통하여 휨성능 감소 정도를 판단하고자 한다. 이를 통하여 핑거조인트 소경각재를 사용하여 제조된 다중접착접합 보의 휨 강도가 어느 정도 감소하는지도 예측하고자 한다.

핑거조인트 소경각재에 대하여 응력파를 이용한 비파괴시험을 실시하여 등급을 구분한 후 휨 파괴시험을 실시하였으며 핑거조인트 소경각재의 휨 시험 결과 및 표 B1-11의 계수를 적용하여 계산된 허용휨응력은 표 B1-8과 같다.

표 B1-8 핑거조인트 소경각재의 휨 시험 결과

수종	단면 치수 (mmxmm)	응력과 비파괴 등급	MOE (GPa)	MOR (MPa)	허용휨탄성계수 (GPa)	허용휨강도 (MPa)
낙엽송	90x90	E5	10.3	25.4	5	12.1
		E7	11.2	25.7	7	12.2
		E9	12.5	27.1	9	12.9
		E11	14.2	28.3	11	13.5
	100x100	LOW	7.6	14.1	5	6.7
		E5	8.1	16.2	7	7.7
		E7	11.2	16.5	9	7.9
		E9	12.2	17.9	11	8.5
		E11	13.4	19.0	13	9.0

핑거조인트 소경각재에 대한 휨 시험은 편백 소경각재를 시중에서 구입하기가 어려워서 낙엽송만을 사용하였으며 단면치수 90mmx90mm와 100mmx100mm의 두 가지에 대하여 핑거조인트 소경각재를 제조하여 휨 시험을 실시하였다. 표 B1-7에서 보면 핑거조인트 소경각재의 응력과에 의한 비파괴 응력 등급과 MOE 및 MOR이 비교적 좋은 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 핑거조인트 소경각재의 경우에는 중간에 핑거조인트가 들어감으로써 다른 결점들의 영향보다도 핑거조인트의 영향이 가장 크게 나타났으며 거의 모든 부재에서 휨 하중에 의한 핑거조인트의 파괴가 나타났다. 응력과에 의한 등급 구분이 파괴시험의 결과와 잘 일치하는 이유도 결점이 단순하게 핑거조인트 하나로 모아짐으로써 여러 가지 결점들의 영향이 나타나는 단일 부재에 비하여 상관관계가 좋게 나타나는 것으로 생각된다.

전체적으로 보았을 때에 90mmx90mm 부재보다 100mmx100mm 부재의 MOE 및 MOR이 감소함으로써 부재 두께가 증가할수록 핑거조인트의 강도가 감소함을 알 수 있었다. 90mmx90mm 핑거조인트 소경각재의 평균 MOE 및 MOR은 각각 12.1GPa 및 27.3MPa를 나타내었으며 100mmx100mm 핑거조인트 소경각재의 평균 MOE 및 MOR은 각각 11.7GPa 및 18.1MPa를 나타내었다. 낙엽송 단일부재 소경각재에 대한 휨 시험 결과(표 B1-5)를 보면 MOE 및 MOR의 평균값이 각각 9.6GPa 및 47.0MPa를 나타내었으므로 핑거조인트에 의하여 MOE는 감소하지 않았으나 MOR은 90mmx90mm 및 100mmx100mm 부재에 대하여 각각 42% 및 61.5% 감소함으로써 핑거조인트가 있는 부재의 경우에 없는 부재에 비하여 휨 강도가 약 절반 이하로 감소할 것으로 예상되었다. 표 B1-6와 B1-8을 비교해 보면 각 등급별로 MOE는 핑거조인트 부재가 핑거조인트가 없는 소경각재와 비슷하거나 오히려 높은 값을 나타냄을 알 수 있다. MOR은 90mmx90mm 부재의 경우에는 핑거조인트 부재가 핑거조인트가 없는 소경각재에 비하여 약 절반 정도 감소된 값을 나타내었으며 100mmx100mm 부재의 경우에는 핑거조인트 부재가 핑거조인트가 없는 소경각재에 비하여 약 1/3 정도의 값을 나타내었다.

(사) 휨 하중 하에서 핑거조인트 소경각재의 파괴

휨 하중 하에서 핑거조인트 소경각재는 그림 B1-40 ~ B1-45에서 보는 바와 같이 거의 대부분이 핑거조인트 부분에서의 파괴로 진행되었다. 그림 B1-40은 핑거조인트의 하부가 인장응력에 의하여 빠지면서 파괴가 되는 형태를 보여주고 있으며 그림 B1-41은 핑거 부분이 인장응력에 의하여 파괴되는 형태를 보여주고 있다.

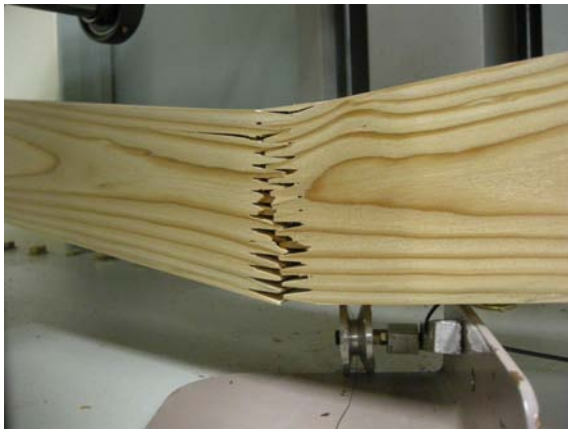


그림 B1-40 핑거의 이탈에 의한 인장 파괴



그림 B1-41 핑거의 인장응력에 의한 부러짐

그림 B1-42는 인장응력에 의하여 핑거조인트의 하부가 빠지다가 핑거 부분의 경사각을 따라서 전단으로 파괴가 진행되는 형태를 보여주고 있으며 그림 B1-43은 핑거 부분에서 시작된 파괴가 부재의 중립축을 따라서 전단 파괴로 진행되는 형태를 보여주고 있다.



그림 B1-42 핑거의 인장 및 전단에 의한 파괴



그림 B1-43 전단에 의한 파괴

핑거조인트의 파괴는 대부분은 그림 B1-44 및 B1-45에서 보는 바와 같이 핑거 부분이 인장응력에 의하여 부러지거나(그림 B1-44) 접착층이 분리되어 핑거가 빠지거나(그림 B1-45) 또는 두 가지가 복합된 형태로 진행되었다.



그림 B1-44 인장응력에 의한 핑거의 부러짐 그림 B1-45 접착층의 분리에 의한 핑거의 빠짐

핑거조인트 소경각재는 거의 대부분이 핑거조인트에서 파괴가 발생하였지만 일부 부재의 경우에 매우 큰 용이(그림 B1-46)나 섬유경사 또는 꺾질박이(그림 B1-47) 등의 큰 결점이 있는 경우에는 그 결점 부분에서 파괴가 발생하기도 하였다. 따라서 큰 용이, 꺾질박이, 심한 섬유경사 등의 결점은 핑거조인트보다도 부재의 휨 강도에 더욱 심각한 손실을 초래할 수 있으므로 이러한 부재들은 사용하지 않거나 또는 결점을 제거하고 핑거조인트를 통하여 길이를 이어서 사용하는 것이 바람직할 것이다.



그림 B1-46 큰 용이 주변의 파괴

그림 B1-47 꺾질박이 및 섬유경사를 따라 파괴

(2) 다중접착접합 부재의 강도 성능

(가) 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도

다중접착접합 기둥 부재의 압축강도 시험 결과는 표 B1-9와 같다. 앞의 표 B1-4의 소경각재에 대한 압축 시험 결과를 보면 낙엽송은 탄성계수 및 압축강도가 각각 11.1Gpa 및 34.6MPa를 나타내었으며 편백은 탄성계수 및 압축강도가 각각 14.3GPa 및 46.6MPa를 나타내었다. 표 B1-9의 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도 시험 결과를 소경각재의 압축강도와 비

교해 보면 낙엽송의 경우에 탄성계수는 조금 감소하였으나 압축강도는 거의 비슷한 값을 나타내었고 편백의 경우에는 탄성계수와 압축강도 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 시험 결과는 다중접착접합 기둥 부재의 파괴 형태와 매우 유사한 관계가 있는 것으로 판단된다. 소경각재 기둥은 압축시험을 실시할 때에 좌굴이 발생하지 않도록 4면을 모두 500mm 간격으로 측면 지지하면서 압축시험을 실시하였기 때문에 소경각재의 압축강도는 좌굴의 요소는 배제되고 결점의 영향만이 고려된 값이다. 그러나 다중접착접합 기둥 부재의 경우에는 측면을 지지하지 않고 자유롭게 좌굴이 발생할 수 있도록 한 상태에서 시험을 실시하였기 때문에 목재 자체의 결점의 영향과 함께 좌굴의 영향까지 포함되어 있는 것이 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도이다. 따라서 결점의 영향만 포함된 소경각재의 압축강도보다 좌굴의 영향까지 함께 포함된 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도가 더 낮을 것으로 예상할 수 있다.

편백의 경우에는 이러한 예상대로 소경각재의 압축강도보다 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도가 더 낮은 값을 나타내었다. 이는 예상대로 좌굴이 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도에 영향을 미쳤음을 나타내는 것이라고 할 수 있다. 그러나 낙엽송의 경우에는 소경각재나 다중접착접합부재나 거의 비슷한 압축강도를 나타냄으로써 다중접착접합부재에서도 좌굴의 영향보다는 결점의 영향이 더욱 컸음을 알 수 있다. 실제로 압축시험에서 파괴된 다중접착접합 부재의 모습을 보면 낙엽송의 경우에는 큰 웅이 등의 주변에서 파괴가 많이 이루어졌음을 알 수 있었고 편백의 경우에는 좌굴에 의하여 휘어 들어간 한쪽 측면에 작은 압착 파괴 형태(목재 표면에 가느다란 실금의 형태로 나타남)가 많이 나타남을 관찰할 수 있었다.

표 B1-9 다중접착접합 기둥 부재의 압축시험 결과

수종	기호	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	비례한도 응력 (MPa)	탄성계수 (GPa)	압축강도 (MPa)
낙엽송	L80D2	160x160	2.5	24.3	9.4	35.4
	L90D2	180x180	2.5	23.7	8.4	34.5
	L80T3 ⁽¹⁾	240x240	2.5	23.5	8.1	34.1
	L80T3E	240x240	2.5	22.0	7.8	33.8
편백	C80D2	160x160	2.5	27.6	9.4	34.3
	C90D2	180x180	2.5	26.4	8.4	34.6
	C80T3 ⁽¹⁾	240x240	2.5	25.1	8.9	34.1
	C80T3E	240x240	2.5	24.9	8.2	33.6

주 ⁽¹⁾ 240mmx240mm 단면의 낙엽송과 편백 다중접착접합 기둥 부재는 압축강도 시험기의 최대하중인 200톤의 하중에서도 파괴가 발생하지 않았다.

(나) 압축하중 하에서 다중접착접합 부재의 파괴

압축하중 하에서 낙엽송 다중접착접합 기둥 부재의 파괴 형태는 그림 B1-48 ~ B1-59까지에서 보는 바와 같다. 큰 웅이를 포함하고 있는 부재의 경우에는 웅이 주변의 섬유경사를 따

라서 파괴가 진행되었으며 모인 웅이가 있는 부재의 경우에도 비슷한 파괴 형태를 나타내었다. 그림 B1-48 ~ B1-51까지의 파괴 형태는 단면치수가 작은 160mmx160mm 부재에서 나타난 형태로서 그림 B1-48은 모인 웅이 주변의 파괴 형태, 그림 B1-49는 큰 웅이 주변의 파괴 형태, 그림 B1-50은 웅이 주변 섬유경사를 따라서 진행된 파괴 형태 그리고 그림 B1-51은 좌굴에 의하여 부러진 파괴 형태를 보여주고 있다.



그림 B1-48 모인 웅이 주변의 파괴



그림 B1-49 큰 웅이 주변의 파괴



그림 B1-50 섬유경사를 따라서 진행된 파괴



그림 B1-51 좌굴에 의하여 부러진 파괴

그림 B1-52 ~ B1-55까지의 파괴 형태는 단면치수가 비교적 작은 180mmx180mm 부재에서 나타난 형태로서 그림 B1-52 및 B1-53은 모인 웅이 주변의 파괴 형태, 그림 B1-54는 웅이

주변 섬유경사를 따라서 진행된 파괴 형태 그리고 그림 B1-55는 좌굴에 의하여 구부러진 표면에 작은 실금 형태로 나타나는 압착파괴 형태를 보여주고 있다.



그림 B1-52 모인 용이 주변의 파괴



그림 B1-53 모인 용이 주변의 파괴



그림 B1-54 용이 주변 섬유경사를 따라서 파괴



그림 B1-55 좌굴에 의하여 나타난 압착파괴

그림 B1-56과 B1-57은 가운데가 비어있는 중공 다중접착접합 부재인 L80T3E의 파괴 형태로서 용이 주변에서의 파괴 형태를 보여주고 있다. L80T3E 부재는 국립산림과학원에서 보유하고 있는 기둥 압축강도 시험기의 최대 용량인 거의 200톤 근처에서 파괴되었다.



그림 B1-56 모인 용이 주변에서의 파괴



그림 B1-57 용이 주변 섬유경사를 따라서 파괴

가장 큰 부재인 240mmx240mm 단면의 L80T3 부재는 200톤의 하중 하에서도 파괴되지 않았으며 그림 B1-58 및 B1-59에서 보는 바와 같이 표면에 압착파괴에 의한 작은 실금들이 가끔 나타나는 정도의 파괴를 나타내었다.



그림 B1-58 압착파괴에 의한 실금



그림 B1-59 압착파괴에 의한 실금

압축하중 하에서 편백 다중접착접합 기둥 부재의 파괴 형태는 그림 B1-60 ~ B1-65까지에서 보는 바와 같다. 큰 용이를 포함하고 있는 부재의 경우에는 용이 주변의 섬유경사를 따라서 파괴가 진행(그림 B1-60)되기도 하였지만 그림 B1-61에서 B1-65까지에서 보는 바와 같이 대부분의 편백 다중접착접합부재는 단면 치수에 상관없이 대부분의 부재에서 좌굴에 의한 파괴형태임을 나타내는 작은 실금들이 많이 나타나는 경향을 보여주었다. 그림 B1-60 및 B1-61은 160mmx160mm 단면의 부재에서 나타난 파괴 형태이며 그림 B1-62 및 B1-63은 180mmx180mm 단면의 부재, 그림 B1-64는 240mmx240mm 단면의 중공 부재 그리고 그림 B1-65는 240mmx240mm 단면 부재의 파괴 형태를 나타내고 있다. 편백의 경우에는 그림 B1-60에서 B1-65까지에서 보는 바와 같이 대부분의 부재에서 좌굴에 의한 압착파괴가 부재 표면에 실금의 형태로 나타났다.



그림 B1-60 용이 주변에서의 파괴



그림 B1-61 압착파괴에 의한 작은 실금들



그림 B1-62 압착파괴에 의한 작은 실금들



그림 B1-63 압착파괴에 의한 작은 실금들

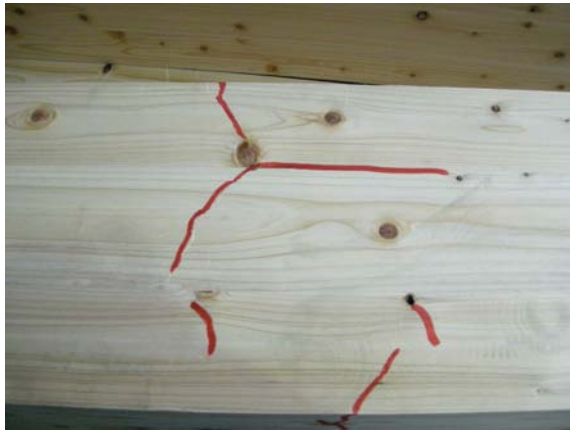


그림 B1-64 압착파괴에 의한 작은 실금들



그림 B1-65 압착파괴에 의한 작은 실금들

(다) 다중접착접합 보 부재의 휨 강도

다중접착접합 보 부재의 휨 강도 시험 결과는 표 B1-10과 같다. 앞의 표 B1-5의 소경각재에 대한 휨 시험 결과를 보면 MOE 및 MOR의 평균값이 각각 9.6GPa 및 47.0MPa을 나타내었으며 90mmx90mm 핑거조인트 소경각재의 평균 MOE 및 MOR은 각각 12.1GPa 및 27.3MPa, 그리고 100mmx100mm 핑거조인트 소경각재의 평균 MOE 및 MOR은 각각 11.7GPa 및 18.1MPa을 나타내었다.

표 B1-10의 다중접착접합 보 부재의 휨 강도 시험 결과를 소경각재의 휨 강도와 비교해 보면 낙엽송의 경우에 MOE는 부재 치수가 증가할수록 조금씩 감소하는 경향을 보였으며 MOR은 거의 절반 수준으로 감소하는 경향을 나타내었다. 다중접착접합 보 부재의 휨 강도와 핑거조인트 소경각재의 휨 강도를 비교해 보면 다중접착접합부재의 MOE는 단면이 작은 부재의 경우에는 비슷한 값을 나타내었으나 단면이 큰 부재의 경우에는 낮은 값을 나타내었다. 다중접착접합부재의 MOR은 90mmx90mm 단면의 핑거조인트 소경각재와는 비슷한 값을 나타내었으나 100mmx100mm 단면의 핑거조인트 소경각재보다는 높은 값을 나타내었다.

표 B1-10 다중접착접합 보 부재의 휨 시험 결과

수종	기호	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
낙엽송	L80S2	80x160	4	10.4	27.8
	L80S3	80x240	4	13.7	28.1
	L80D3	160x240	4	9.8	30.1
	L80D4	160x320	4	8.4	26.9
	L80D5	160x400	4	6.2	24.0
	L80D6	160x480	4	3.9	21.0
	L80T6E	240x480	4	3.7	24.1
	L90S2	90x180	4	8.7	25.5
	L90S3	90x270	4	8.7	20.5
	L90D3	180x270	4	9.2	26.9
	L90D4	180x360	4	5.8	18.5
	L90D5	180x450	4	4.0	17.2
	L90D6	180x540	4	3.1	21.4
	L100S2	100x200	4	9.1	24.8
	L100S3	100x300	4	8.7	23.2
	L100D3	200x300	4	8.2	22.8
	L100D4	200x400	4	5.7	23.7
	L100D5	200x500	4	3.7	23.5

다중접착접합 보 부재의 경우에는 많은 시험편들이 부재의 하단에 위치한 핑거조인트 부분에서 빠지거나 핑거가 끊어지면서 파괴가 시작되어 중간 접착층이나 핑거부분을 따라서 전단 파괴가 진행되는 형태를 나타내었다. 그러나 다중접착접합 보 부재의 하단에 위치한 소경각재에서 핑거조인트가 가장자리에 위치하는 경우에는 핑거조인트보다는 부재의 중앙 하단 부분이 인장에 의하여 파괴되는 경향을 나타내었다. 따라서 다중접착접합 보 부재의 경우에는 단일부재 소경각재의 휨 강도와 핑거조인트 소경각재의 휨 강도 사이에 중간값 정도를 나타낼 것으로 예상할 수 있다.

(라) 휨 하중 하에서 다중접착접합 부재의 파괴

휨 하중 하에서 낙엽송 다중접착접합 보 부재의 파괴 형태는 그림 B1-66 ~ B1-73까지에서 보는 바와 같다. 그림 B1-66 ~ B1-69까지는 핑거조인트 주변에서의 파괴 형태를 보여주고 있다. 그림 B1-66은 하단 각재의 핑거가 빠지면서 접착층을 타고 수평방향으로 전단파괴

가 진행되는 형태를 나타내며 그림 B1-67은 하단 각재의 핑거가 빠지면서 양 옆으로 경사지게 전단 파괴가 진행되는 형태를 보여주고 있다.



그림 B1-66 핑거 탈락 후 수평전단 파괴



그림 B1-67 핑거 탈락 후 경사 전단 파괴

그림 B1-68은 하단 각재의 핑거조인트에서 핑거가 인장응력에 의하여 부러지면서 파괴가 시작되어 이후에 전단에 의한 파괴 형태를 보여주고 있다. 그림 B1-69는 아래 위로 인접한 각재에서 핑거조인트의 간격이 너무 가깝게 위치하여 상하부의 핑거조인트 부분에서 인장응력에 의하여 핑거가 빠지거나 부러지면서 파괴된 형태를 나타낸다. 그림 B1-69를 볼 때에 상하로 인접한 각재에서 핑거조인트의 간격이 너무 가까운 경우에는 이로 인한 강도의 손실이 매우 크게 나타날 수 있음을 알 수 있다. 따라서 각재의 적층 접합을 하여 다중 접착접합부재를 제조할 때에 인접한 각재에서 핑거조인트의 최소 간격을 150mm 이상 유지할 수 있도록 주의하여야 할 것이다.



그림 B1-68 핑거가 부러진 후 전단 파괴



그림 B1-69 가깝게 인접한 핑거조인트의 파괴

그림 B1-70 ~ B1-73까지는 하부의 층재에서 핑거조인트가 부재의 중앙부에서 멀리 위치하는 경우에 핑거조인트가 아닌 다른 곳에서 시작되는 파괴의 형태를 보여주고 있다. 그림

B1-70은 하단 각재 내의 큰 웅이 주변의 섬유 경사로 인하여 인장 파괴가 시작되는 형태를 보여주고 있으며 그림 B1-71은 하단 각재의 하중점 아래 부근에서 인장파괴가 시작되어 전단파괴로 진행되는 형태를 나타내고 있다.



그림 B1-70 큰 웅이 주변에서의 파괴

그림 B1-71 하단 각재의 인장파괴 후 전단파괴

그림 B1-72는 부재 중간에서 전단에 의하여 파괴되는 형태를 보여주고 있으며 그림 B1-73은 부재 하단에서부터 경사진 전단파괴가 지그재그로 진행되는 형태를 나타내고 있다. 그림 B1-72의 경우에는 하단 각재의 인장에 의한 파괴 없이 부재의 중립 축 부근에서 전단 파괴가 진행되었으며 이는 접착층의 접착상태가 좋지 않았기 때문에 해당 접착층으로부터 전단파괴가 진행된 것으로 판단된다. 그림 B1-73은 인장쪽 최외층 섬유의 인장응력에 의한 파괴 직후부터 전단파괴가 지그재그로 진행되는 형태를 나타내고 있다.



그림 B1-72 중립축 부근에서의 전단파괴

그림 B1-73 지그재그로 진행되는 전단파괴

(3) 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 설계기술

(가) 소경각재의 압축시험 결과로부터 다중접착접합 기둥 부재의 허용응력 산출

다중접착접합부재를 제조하는 원자재인 소경각재에 대하여 많은 수의 실험체 압축시험을 실시하는 이유는 시험결과를 분석하여 임의의 다양한 단면 치수를 갖는 다중접착접합 기둥 부재의 허용응력 또는 허용하중을 예측하기 위한 것이다. 먼저 소경각재의 압축강도 시험 결과로부터 구한 압축강도에 대하여 2MPa 단위로 구간을 나누어서 각 구간에 속한 압축강도를 갖는 시험편의 수를 세어서 그림 B1-74과 같은 도수분포 막대그래프를 그린다. 이 도수분포 막대그래프의 분포 모양이 다양한 분포곡선과 유사할 수 있으나 이 연구에서 정규분포곡선으로 가정하여 도수분포 막대그래프에 해당하는 정규분포곡선을 구하고 이 정규분포곡선으로부터 5% 하한값을 식 (B1-7)에 의하여 계산하였다.

$$\sigma_{5\%} = \sigma_c - 1.645 \times sd \quad \text{----- (B1-7)}$$

여기서, $\sigma_{5\%}$: 압축강도의 5% 하한값(MPa)

σ_c : 압축강도의 평균값(MPa)

sd: 압축강도의 표준편차(MPa)

식 (B1-7)에 의하여 구한 5% 하한값에 안전을 고려한 여러 가지 조정계수를 곱하여 허용응력을 계산하게 된다. 우리나라에서는 아직까지 5% 하한값으로부터 허용응력을 산출할 수 있는 표준화된 방법이 정하여져 있지 않기 때문에 이 연구에서는 ASTM D 2915(Standard practise for evaluating allowable properties for grades of structural lumber)의 표 5를 적용하여 허용응력을 산출하였다. ASTM D 2915에 따르면 강도시험 결과로부터 허용응력을 산출하기 위해서는 안전계수와 함께 10년간의 누적된 하중작용기간(정상하중) 효과를 고려하여 표 B1-11과 같은 계수를 적용하도록 하고 있다.

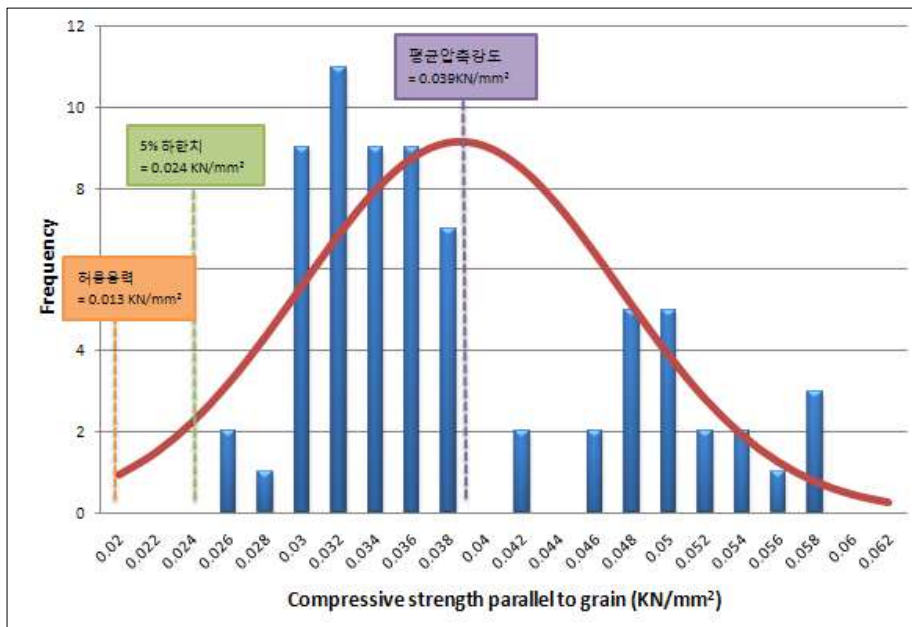


그림 B1-74 낙엽송 소경각재의 압축강도로부터 허용응력 산출

표 B1-11 ASTM D 2915에 따라서 허용응력 산출을 위하여 적용되는 계수

강도 성질	허용응력 산출을 위한 적용 계수
탄성계수	1
휨 강도(MOR)	1/2.1
인장강도	1/2.1
섬유방향 압축강도	1/1.9
전단강도	1/2.1
섬유 직각방향 압축강도	1/1.67

표 B1-11에 따라서 이 연구에서는 낙엽송 소경각재 압축강도의 5% 하한값에 (1/1.9)을 곱하여 그림 B1-74에 주어진 바와 같은 13MPa의 기준허용 압축응력을 산출하였다. 편백 소경각재의 압축강도 시험결과로부터는 그림 B1-75와 같이 허용응력을 산출하였다. 편백에 대해서도 낙엽송의 경우와 동일하게 정규분포곡선을 구한 다음 5% 하한값을 계산하였으며 여기에 (1/1.9)의 계수를 곱하여 19MPa의 기준허용 압축응력을 산출하였다.

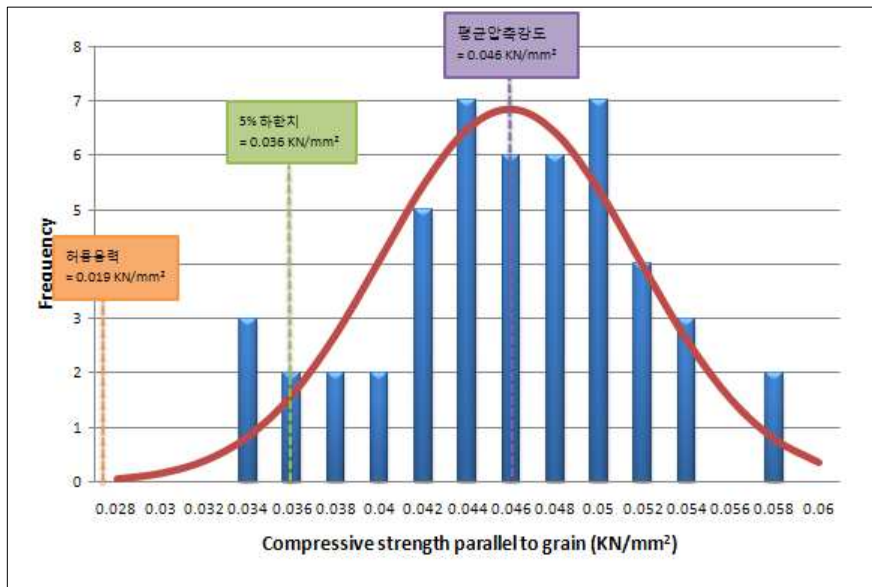


그림 B1-75 편백 소경각재의 압축강도로부터 허용응력 산출

낙엽송 다중접착접합 기둥 부재의 경우에는 13MPa의 기준허용응력을 사용하여 구조설계를 할 수 있으며 기둥 부재의 치수가 정해지면 해당 부재에 대한 기둥안정계수를 계산하여 기준허용 압축응력에 곱하면 구조설계에 사용할 수 있는 설계허용 압축응력을 구할 수 있다. 이렇게 산출된 설계허용 압축응력에 부재의 단면적을 곱하면 해당 부재에 대한 허용하중의 크기를

구할 수 있다. 다중접착접합 기둥 부재가 지지할 수 있는 최대 하중의 크기를 예측하기 위하여 소경각재의 압축강도 평균값에 이 연구에서 사용된 다중접착접합 기둥 부재들에 대한 기둥 안정계수를 곱하여 각 종류의 기둥 부재들에 대한 예측 최대하중을 계산하여 실제 압축강도 시험결과와 비교하였다. 낙엽송에 대한 허용하중, 예측 최대하중 및 실제 최대하중의 비교는 그림 B1-76과 같고 편백에 대한 비교는 그림 B1-77과 같다.

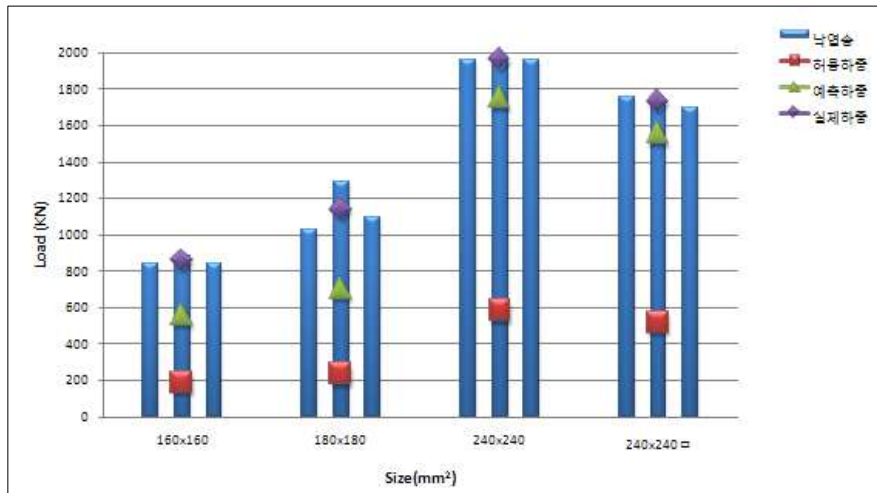


그림 B1-76 낙엽송 다중접착접합 기둥 부재에 대한 예측 하중과 실제하중의 비교

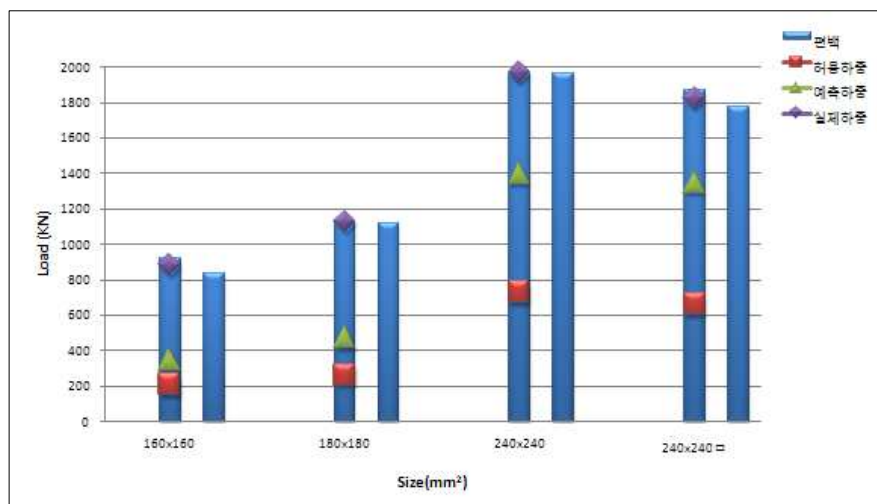


그림 B1-77 편백 다중접착접합 기둥 부재에 대한 예측 하중과 실제하중의 비교

그림 B1-76 및 B1-77에서 보는 바와 같이 각각의 기둥 부재들에 대한 허용하중의 크기는 실제 최대하중의 1/3 정도로서 매우 낮았으며 이는 허용응력을 산출하는 과정에서 안전을 위하여 5% 하한값을 구하고 여기에 다시 조정계수를 적용하였기 때문이다. 소경각재의 압축강도 평균값으로부터 산출한 예측 최대하중도 실제 최대하중보다 낮게 나왔으며 편백의 경우에는 그 차이가 더 크게 나타났다. 따라서 다중접착접합부재를 기둥으로 사용하는 경우에 구조

설계에 사용할 수 있는 기준허용 압축응력으로 앞에서 구한 13MPa(낙엽송) 및 19MPa(편백)을 사용할 수 있으며 부재의 치수가 결정되면 해당 부재에 대한 기둥안정계수를 구하여 곱하여 줌으로써 설계허용 압축응력을 구하고 여기에 부재의 단면적을 곱하면 해당 부재에 대한 허용 하중의 크기를 계산할 수 있다. 또한 소경각재의 압축강도 평균값인 39MPa(낙엽송) 및 46MPa(편백)에 해당 부재에 대한 기둥안정계수를 곱하면 그 부재가 기둥으로서 사용되었을 때에 지지할 수 있을 것으로 예상되는 최대하중의 크기를 계산할 수 있다.

기둥안정계수의 계산은 일반적인 구조설계 공식을 사용하여 할 수 있으며 예를 들어서 이 연구에서 사용되었던 240mmx240mm 단면에 길이 2.8m의 낙엽송 다중접착접합 기둥 부재에 대한 기둥안정계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{기준허용 압축응력}(F_c) = 13\text{MPa}$$

$$\text{탄성계수}(E) = 11.6\text{GPa}$$

$$\text{나비}(b) = 240\text{mm}$$

$$\text{길이}(L) = 2,800\text{mm}$$

$$\text{하중계수}(C_D) = 1(\text{바닥활하중으로 가정})$$

$$\text{습윤계수}(C_M) = \text{온도계수}(C_t) = \text{인사이징계수}(C_i) = 1$$

$$\text{좌굴길이계수}(K_e) = 1(\text{상하부 핀접합으로 가정})$$

$$K_{cE} = 0.3(\text{육안등급 구조재})$$

$$c = 0.8(\text{제재목})$$

$$\text{기둥의 유효길이}(L_e) = L = 2,800\text{mm}$$

$$\text{기둥의 세장비}(L_e/d) = 2,800/240 = 11.7$$

$$F_c^* = F_c = 13\text{MPa}$$

$$F_{cE} = \frac{K_{cE}E'}{(L_e/d)^2} = \frac{0.3 \times 11.6 \times 10^3 \text{ N/mm}^2}{(11.7)^2} = 25.422 \text{ N/mm}^2 = 25.422 \text{ MPa}$$

$$\frac{1 + (F_{cE}/F_c^*)}{2c} = \frac{1 + (25.422/13)}{2 \times 0.8} = 1.847$$

$$\text{기둥안정계수}(C_P) = 1.847 - \sqrt{1.847^2 - \frac{25.422/13}{0.8}} = 0.864$$

이 연구에서 사용된 다중접착접합 기둥 부재들에 대한 기둥안정계수를 계산한 결과는 표 B1-12와 같다.

표 B1-12 다중접착접합 기둥 부재들에 대한 기둥안정계수(C_P)

수종	기호	단면치수(mm×mm)	길이(m)	기둥안정계수(C _P)
낙엽송	L80D2	160×160	2.5	0.722
	L90D2	180×180	2.5	0.791
	L80T3 ⁽¹⁾	240×240	2.5	0.898
	L80T3E	240×240	2.5	0.898
편백	C80D2	160×160	2.5	0.664
	C90D2	180×180	2.5	0.743
	C80T3 ⁽¹⁾	240×240	2.5	0.874
	C80T3E	240×240	2.5	0.874

(나) 소경각재의 휨 시험 결과로부터 다중접착접합 보 부재의 허용응력 산출

다중접착접합부재를 제조하는 원자재인 소경각재에 대하여 많은 수의 실험재 휨 시험을 실시하는 이유는 시험결과를 분석하여 임의의 다양한 단면 치수를 갖는 다중접착접합 보 부재의 허용응력 또는 허용하중을 예측하기 위한 것이다. 먼저 소경각재의 휨 강도 시험 결과로부터 구한 휨 강도에 대하여 5MPa 단위로 구간을 나누어서 각 구간에 속한 휨 강도를 갖는 시험편의 수를 세어서 도수분포 막대그래프를 그린다. 이 도수분포 막대그래프의 분포 모양이 다양한 분포곡선과 유사할 수 있으나 이 연구에서 정규분포곡선으로 가정하여 도수분포 막대그래프에 해당하는 정규분포곡선을 구하고 이 정규분포곡선으로부터 5% 하한값을 식 (B1-7)에 의하여 계산하였다.

식 (B1-7)에 의하여 구한 5% 하한값에 표 B1-10에 따라서 (1/2.1)의 조정계수를 곱하여 기준허용 휨응력을 구하였다. 이 연구에서는 낙엽송 소경각재 휨 강도의 5% 하한값에 (1/2.1)을 곱하여 그림 B1-78에 주어진 바와 같은 12MPa의 기준허용 휨응력을 산출하였다. 편백 소경각재의 휨 강도 시험결과로부터는 그림 B1-78과 같이 허용응력을 산출하였다. 편백에 대해서도 낙엽송의 경우와 동일하게 그림 B1-79에 주어진 바와 같이 정규분포곡선을 구한 다음 5% 하한값을 계산하였으며 여기에 (1/2.1)의 계수를 곱하여 22MPa의 기준허용 휨응력을 산출하였다.

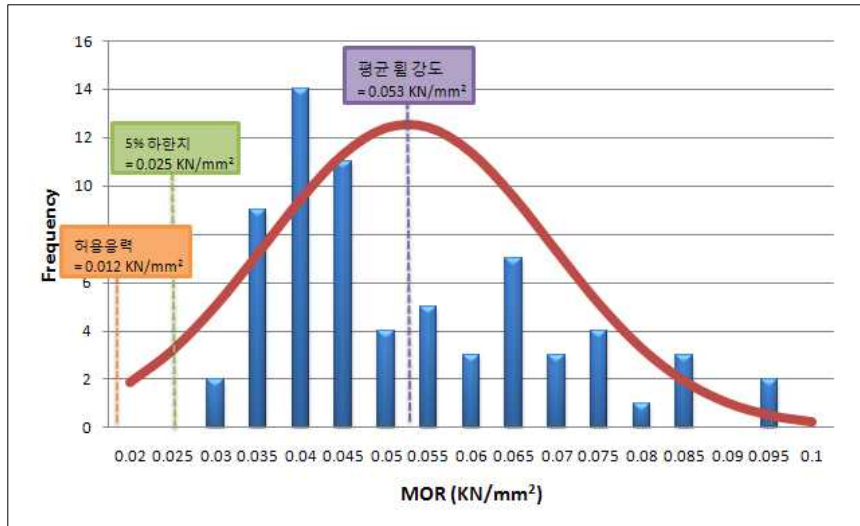


그림 B1-78 낙엽송 소경각재의 휨 강도로부터 허용응력 산출

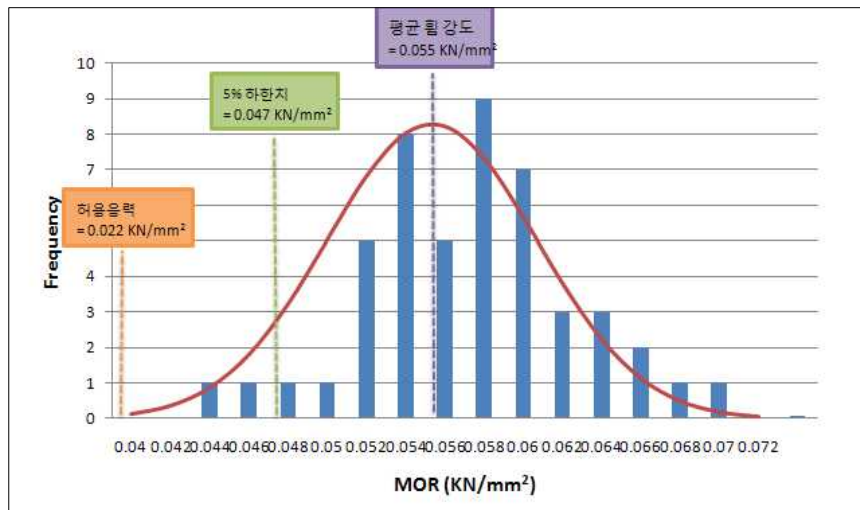


그림 B1-79 편백 소경각재의 휨 강도로부터 허용응력 산출

다중접착접합 보 부재는 기이가 2.5m인 기둥부재와는 달리 길이가 4m로서 길기 때문에 핑거조인트로 길이를 이음 핑거조인트 소경각재가 사용되었다. 따라서 핑거조인트가 없는 단일 부재 소경각재의 휨 시험 결과로부터 허용응력을 산출하기 보다는 핑거조인트 소경각재의 휨 시험 결과로부터 허용응력을 산출하는 것이 더 타당할 것으로 생각된다. 이 연구에서 실시하였던 낙엽송 핑거조인트 소경각재에 대한 휨 시험 결과에 대해서도 앞에서 소경각재의 허용응력 산출을 위하여 적용하였던 것과 동일한 방법을 적용하여 허용응력을 산출하면 그림 B1-80과 같이 6MPa의 허용응력을 얻을 수 있다.

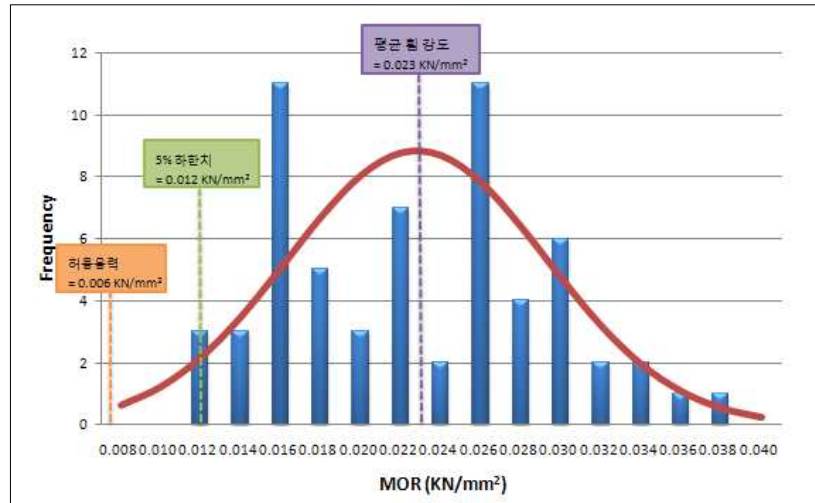


그림 B1-80 낙엽송 핑거조인트 소경각재의 휨 강도로부터 허용응력 산출

그림 B1-78과 B1-80을 비교하면 낙엽송에서 핑거조인트 소경각재의 허용응력은 핑거조인트가 없는 단일부재 소경각재의 허용응력에 비하여 50% 정도의 값을 나타내고 있다. 따라서 핑거조인트가 들어간 소경각재의 허용응력은 핑거조인트가 없는 소경각재의 허용응력에 0.5의 계수를 곱하여 구할 수 있는 것으로 가정할 수 있다. 편백의 경우에는 간벌재 원목을 다량 구입할 수가 없어서 핑거조인트 소경각재에 대한 휨 시험이나 다중접착접합 보 부재에 대한 휨 시험을 실시할 수 없었기 때문에 이러한 가정을 편백에도 그대로 적용하여 편백 핑거조인트 소경각재에 대하여 11MPa의 허용응력을 산출하였다.

앞에서 산출한 낙엽송 소경각재 및 핑거조인트 소경각재에 대한 허용응력을 이용하여 이 연구에서 휨 시험을 실시하였던 다양한 치수의 다중접착접합 보 부재에 대한 허용하중 및 예측 최대하중을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{식 (B1-6)로부터 } F'_b(N/mm^2) = \frac{P_{\max}L}{bh^2}$$

$$\text{따라서 } P_{\max} = \frac{F'_b bh^2}{L} = \frac{F_b C_L bh^2}{L}$$

- 여기서, F_b : 기준허용 휨응력(MPa)
- C_L : 보안정계수
- F'_b : 설계허용 휨응력(MPa)

보안정계수의 계산은 일반적인 구조설계 공식을 사용하여 할 수 있으며 예를 들어서 이 연구에서 사용되었던 160mmx320mm 단면에 길이 3.9m의 낙엽송 다중접착접합 보 부재가 1/3점 하중을 지지하는 경우에 대한 보안정계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

- 소경각재의 기준허용 휨응력(F_b) = 12MPa
- 휨탄성계수(MOE) = 9.3GPa

$$\text{나비}(b) = 160\text{mm}$$

$$\text{높이}(d) = 320\text{mm}$$

$$\text{길이}(L_u) = 3,900\text{mm}$$

$$\text{하중계수}(C_D) = 1(\text{바닥활하중으로 가정})$$

$$\text{습윤계수}(C_M) = \text{온도계수}(C_t) = \text{인사이징계수}(C_i) = 1$$

$$\text{유효길이}(L_e) = 1.63(L_u) + 3d = 7,317\text{mm}$$

$$K_{bE} = 0.439(\text{육안등급 구조재})$$

$$\text{보의 세장비}(R_B) = \sqrt{\frac{L_e d}{b^2}} = \sqrt{\frac{7,317 \times 320}{160^2}} = 9.564$$

$$F_b^* = F_b = 12\text{MPa}$$

$$F_{bE} = \frac{K_{bE} E'}{(R_B)^2} = \frac{0.439 \times 9.3 \times 10^3 \text{ N/mm}^2}{(9.564)^2} = 44.634 \text{ N/mm}^2 = 44.634 \text{ MPa}$$

$$\frac{1 + (F_{bE}/F_b^*)}{1.9} = \frac{1 + (44.634/12)}{1.9} = 2.484$$

$$\text{보안정계수}(C_L) = 2.484 - \sqrt{2.484^2 - \frac{44.634/12}{0.95}} = 0.982$$

이 연구에서 사용된 다중접착접합 보 부재들에 대한 보안정계수를 계산한 결과는 표 B1-13와 같다. 표 B1-13의 보안정계수를 적용하여 소경각재의 허용응력 및 MOR 그리고 핑거조인트 소경각재의 허용응력 및 MOR로부터 이 연구에서 휨시험을 실시하였던 다양한 치수의 다중접착접합부재들에 대한 허용하중, 예측 최대하중 및 실제 최대하중을 비교한 결과는 그림 B1-81과 같다.

그림 B1-81에서 보면 핑거조인트 소경각재의 허용응력으로부터 산출한 허용하중의 크기가 가장 낮았으며 다음으로 소경각재의 허용응력으로부터 산출한 허용하중 그리고 핑거조인트 소경각재의 MOR로부터 산출한 허용하중 및 소경각재의 허용응력으로부터 산출한 허용하중의 순으로 높게 나타났다. 그림 B1-81에서 막대그래프는 해당 부재에 대한 실제 휨강도 시험으로부터 측정된 MOR을 나타낸다. 그림 B1-81에서 보면 핑거조인트 소경각재의 MOR로부터 계산한 예측 최대하중의 크기가 실제 시험을 통하여 측정된 최대하중의 크기와 비슷하거나 약간 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 다중접착접합 보 부재의 구조설계를 위하여 사용되는 허용응력은 소경각재보다는 핑거조인트 소경각재의 허용응력을 사용하는 것이 더 합리적이고 안전할 것으로 생각되며 해당 부재를 보로 사용하는 경우에 그 부재가 견딜 수 있을 것으로 예상되는 최대하중의 크기를 예측하기 위해서도 소경각재의 MOR보다는 핑거조인트 소경각재의 MOR를 적용하는 것이 더 정확할 것으로 판단된다.

표 B1-13 다중접착접합 보 부재들에 대한 보안정계수(C_L)

수종	기호	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	보안정계수 (C_L)
낙엽송	L80S2	80x160	3.9	0.956
	L80S3	80x240	3.9	0.896
	L80D3	160x240	3.9	0.988
	L80D4	160x320	3.9	0.982
	L80D5	160x400	3.9	0.975
	L80D6	160x480	3.9	0.966
	L80T6E	240x480	3.9	0.988
	L90S2	90x180	3.9	0.963
	L90S3	90x270	3.9	0.917
	L90D3	180x270	3.9	0.990
	L90D4	180x360	3.9	0.985
	L90D5	180x450	3.9	0.978
	L90D6	180x540	3.9	0.970
	L100S2	100x200	3.9	0.968
	L100S3	100x300	3.9	0.931
	L100D3	200x300	3.9	0.991
	L100D4	200x400	3.9	0.986
	L100D5	200x500	3.9	0.981

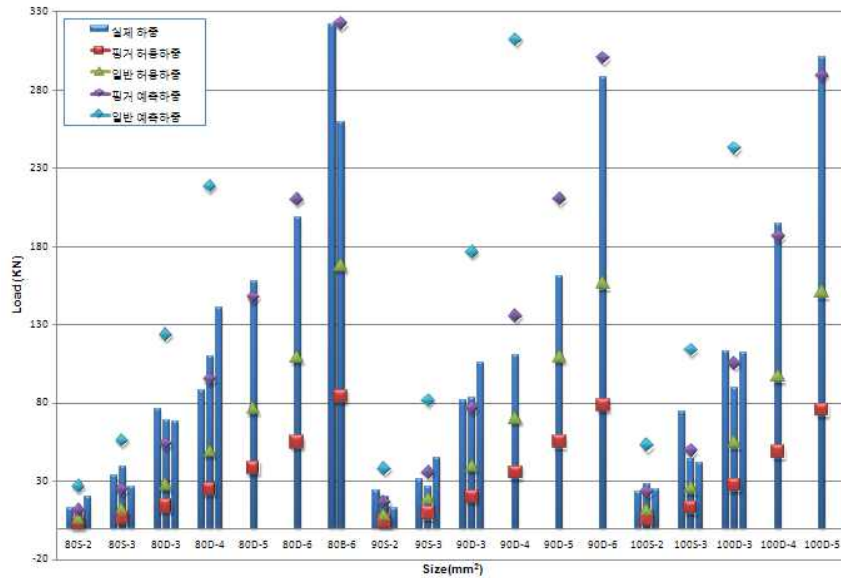


그림 B1-81 낙엽송 다중접착접합 보 부재에 대한 예측 하중과 실제하중의 비교

라. 1차년도 연구결과의 검토 및 분석

이 연구에서 다중접착접합 부재의 압축강도 시험 및 휨 강도 시험을 통하여 얻어진 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 낙엽송 소경각재에 대한 압축시험 결과 탄성계수는 가장 낮은 4등급이 10.6GPa로서 KS F 3020(침엽수 구조용재)에서 제시된 낙엽송류 3등급의 허용탄성계수 9.31GPa 보다는 높고 2등급의 허용탄성계수 10.78GPa보다는 낮은 값을 나타내었고 낙엽송 소경각재의 허용압축응력은 13MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용압축응력 8.8GPa보다 높은 값을 나타내었다. 따라서 낙엽송 소경각재의 압축강도는 KS F 3020 낙엽송류 1등급으로 사용하기에 부족함이 없으나 탄성계수가 2등급과 3등급의 사이에 해당되어 유효목이 많이 포함된 목재의 경우에는 하중 하에서 변형이 많이 발생함을 알 수 있다.
- 2) 편백 소경각재에 대한 압축시험 결과 탄성계수는 가장 낮은 3등급이 13.4GPa로서 KS F 3020(침엽수 구조용재)에서 제시된 낙엽송류 1등급의 허용탄성계수 12.25GPa 보다 높은 값을 나타내었고 편백 소경각재의 허용압축응력은 19MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용압축응력 8.8GPa보다 높은 값을 나타내었다. 따라서 편백 소경각재의 탄성계수 및 압축강도는 KS F 3020 낙엽송류 1등급으로 사용하기에 부족함이 없음을 알 수 있다.
- 3) 낙엽송 소경각재에 대한 휨시험 결과 허용휨응력은 12MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용휨응력 7.8GPa보다 높은 값을 나타내었으며 이로 미루어 낙엽송 소경각재의 휨강도는 KS F 3020의 낙엽송류 1등급으로 사용하기에 적합한 것으로 판단된다.
- 4) 편백 소경각재에 대한 휨시험 결과 허용휨응력은 22MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용휨응력 7.8GPa보다 높은 값을 나타내었으며 이로 미루어 편백 소경각재의 휨강도는 KS F 3020의 낙엽송류 1등급으로 사용하기에 적합한 것으로 판단된다.

- 5) 핑거조인트 낙엽송 소경각재에 대한 휨시험 결과 허용휨응력은 6MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용휨응력 7.8GPa보다 낮고 2등급의 허용휨응력 5.9MPa과 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 핑거조인트 낙엽송 소경각재의 휨강도는 핑거조인트가 없는 소경각재의 휨강도의 약 50% 정도를 나타내었으며 이 부재는 KS F 3020의 낙엽송류 2등급으로 사용하기에 적합한 것으로 판단된다.
- 6) 다중접착접합 기둥 부재의 허용응력은 낙엽송이 13MPa, 편백이 19MPa로서 KS F 3021의 구조용 집성재에 대한 허용응력과 비교해서도 가장 높은 등급의 집성재와 비슷한 수준으로서 다중접착접합부재를 한옥건축용 기둥으로 사용하여도 충분한 강도성능을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.
- 7) 다중접착접합 보 부재의 허용응력은 낙엽송이 12MPa, 편백이 22MPa로서 KS F 3021의 구조용 집성재에 대한 허용응력과 비교해서도 상당히 높은 수준(낙엽송은 12S-36B 등급과 동등, 편백은 최고 등급보다 우수)으로서 다중접착접합부재를 한옥건축용 보로 사용하여도 충분한 강도성능을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.
- 8) 다중접착접합 보 부재에는 핑거조인트가 들어있기 때문에 핑거조인트가 없는 소경각재의 허용응력을 적용하기 보다는 핑거조인트 소경각재의 허용응력을 적용하는 것이 합리적이며 이 경우에는 허용응력이 절반 정도로 감소되어 상당히 낮은 수준(낙엽송은 최하급 구조용 집성재와 동등, 편백은 12S-36B 등급과 동등)으로서 짧은 길이의 한옥건축용 보로 사용하는 데에 큰 문제는 없을 것으로 생각된다. 일반적으로 한옥에 사용되는 보의 길이가 3.6m 이하라는 점을 감안하면 핑거조인트 소경각재가 포함된 다중접착접합 보 부재는 한옥 건축에서 보 부재로 충분히 사용 가능할 것으로 판단된다.
- 9) 다중접착접합부재를 보다 효율적인 보 부재로 사용하기 위해서는 무엇보다도 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 이음에 대한 품질 향상이 필요할 것으로 판단된다.
- 10) 이를 위하여 당초 계획에는 없었던 것이지만 2차년도에 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 품질 향상에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 11) 1차년도에는 낙엽송과 편백 간벌목을 연구대상으로 정하였으나 편백은 남부지방의 일부에만 조림되어 있고 생산량이 적어서 간벌목을 구하기가 매우 어렵기 때문에 실제로 제품이 개발되더라도 원자재 부족으로 인하여 제품 공급이 불가능할 것으로 판단되므로 2차년도에는 연구대상 수종을 변경할 필요가 있을 것으로 생각된다.
- 12) 다중접착접합부재의 포름알데히드 방산량이 극히 적어서 실내 환경에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단되며 2차년도에는 포름알데히드 방산량 측정 등의 환경 관련 연구는 의미가 없는 것으로 판단된다.

2. 2차년도 연구과제: 다중접착접합부재 접합부의 성능 평가

가. 개발 내용 및 범위

1차년도에 국산 낙엽송과 편백을 사용한 다중접착접합부재를 개발하고 그 성능을 평가하였으며 2차년도에는 국산 잣나무 소경재를 사용한 다중접착접합부재를 개발하고 그 성능을 평가하고자 한다. 먼저 잣나무 소경각재 및 핑거조인트가 포함된 소경각재의 압축 및 휨 성능을 평가하여 이들로부터 생산되는 다중접착접합부재의 강도성능을 예측하는 기본 자료로 사용하고자 한다. 잣나무 소경각재로부터 생산된 다중접착접합 기둥과 보의 성능을 평가하고 소경각재의 강도 평가 자료로부터 예측된 값과 비교해 보고자 한다. 또한 1차년도에 취약점으로 지적되었던 핑거조인트 부분의 보강을 위하여 제조조건을 개선하고 개선된 조건으로 생산된 핑거조인트 소경각재의 강도 성능도 평가하고자 한다.

기둥-보 구조에서 구조성능을 나타내기 위하여 가장 중요한 부분은 부재 자체의 강도보다는 접합부의 성능이 더욱 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다. 아무리 부재 자체의 성능이 우수하다고 하더라도 접합부가 올바르게 제 성능을 나타내지 못한다면 하중 하에서 금방 무너지거나 과도한 변형이 발생하게 될 것이기 때문이다. 따라서 다중접착접합부재를 한옥의 기둥이나 보 부재로 사용하기 위해서는 다중접착접합부재 기둥과 보 사이의 접합부에 대한 형상, 철물 배치 등의 개발 및 강도성능의 평가가 이루어져야 한다. 이 연구에서는 세부과제에서 개발하는 다중접착접합부재 기둥과 보 사이의 전단접합부 및 회전모멘트저항 접합부의 전단성능 및 회전모멘트 저항 성능을 평가하고자 한다.

나. 재료 및 방법

(1) 시험재료

(가) 수종

시험용 목재는 국내에서 간벌재로 별채된 흉고지름 120~150mm 정도의 낙엽송(*Larix leptolepis*)과 잣나무(*Pinus koraiensis*)을 공시수종으로 사용하였다.

(나) 접착제

다중접착접합 부재를 제조하기 위하여 사용된 접착제와 동일하게 일본 Oshika사로부터 수입된 PRF(Phenol Resorcinol Formaldehyde)계 접착제와 Isocyanate계 접착제 2종을 사용하였다. 접착제를 구성하는 재료들의 혼합 비율은 세부 및 위탁과제의 경우와 마찬가지로 접착제 제조사에서 권장하는 비율대로 구성하였다.

(다) 소경각재 시험편

다중접착접합부재 제조용 원자재인 소경각재의 압축강도와 휨 강도 성능을 평가하기 위하여 80mmx80mm 단면의 낙엽송 소경각재와 90mmx90mm 단면의 잣나무 소경각재를 2.7m 길이로 제작하였다. 모든 소경각재들은 참여기업인 경민산업(주)를 통하여 인천 소재의 제재소로부터 제재된 상태로 구입하여 경민산업(주)의 고온건조 시설을 이용하여 목표 함수율 12%로

건조하고 대패 및 몰딩 설비를 이용하여 최종 마감치수로 가공하였다.

(라) 핑거조인트 소경각재 시험편

다중접착접합부재 중에서 기둥 부재는 길이가 3m 이하로서 소경각재의 길이이음을 하지 않아도 단일부재로 충분히 제조할 수 있으나 보 부재는 길이가 4m로서 단일부재로 사용하기가 어렵기 때문에 핑거조인트를 통하여 길이를 연장해서 사용하여야 한다. 그리고 실제로 다중접착접합부재를 한옥건축용 구조부재로 사용하는 경우에도 기둥은 비교적 길이가 짧지만 보 부재는 길게 사용하며 소경각재에서 큰 용이나 할열 등의 결함을 제거하기 위하여 길이를 절단하는 경우에는 짧은 소경각재를 효율적으로 사용하기 위해서는 기둥 부재라도 핑거조인트를 한 소경각재로 제조하여야 한다. 일반적으로 두께가 얇은 목재의 경우에는 핑거조인트 부재의 강도가 단일부재의 강도에 비하여 90% 정도의 값을 나타내지만 두께가 두꺼워질수록 강도비가 낮아지는 경향을 나타낸다. 따라서 다중접착접합부재의 제조를 위하여 사용되는 소경각재는 두께가 80mm 이상으로서 두껍기 때문에 핑거조인트를 하는 경우에 강도가 상당히 낮아질 가능성이 있다.

핑거조인트 소경각재의 휨강도를 평가하기 위하여 이 연구에서는 낙엽송을 사용하여 핑거조인트가 중앙부에 들어간 2.7m 길이의 핑거조인트 소경각재를 80mmx80mm 및 90mmx90mm 단면으로 제작하였으며 또한 잣나무를 사용하여 핑거조인트가 중앙부에 들어간 2.7m 길이의 핑거조인트 소경각재를 90mmx90mm 단면으로 제작하였다.

이 연구에 사용된 소경각재 및 핑거조인트 소경각재 시험편의 종류, 수종, 치수 및 수는 표 B2-1과 같다. 표 B2-1에 주어진 바와 같이 이 연구에서 소경각재의 강도성능 평가를 위하여 사용된 잣나무 소경각재 시험편의 총수는 319개였고 핑거조인트 소경각재의 총수는 낙엽송과 잣나무를 합하여 228개였다.

표 B1-1 소경각재 시험편의 종류, 수종, 치수 및 수

수종	단면치수 (mmxmm)	길이(m)	핑거조인트 유무	시험편의 수	시험 항목
낙엽송	80x80	2.7	유	19	휨
낙엽송	90x90	2.7	유	10	휨
잣나무	90x90	2.7	무	219	휨
잣나무	90x90	2.4	무	100	압축
잣나무	90x90	2.7	유	199	휨
합계				509	

(마) 다중접착접합부재 시험편

다중접착접합부재의 휨강도 및 압축강도를 실제로 평가하기 위하여 다양한 단면치수의 보

부재 및 기둥 부재를 제작하였으며 그 수종, 종류, 치수 등은 표 B2-2와 같다. 이 연구에서 사용된 다중접착접합부재 시험편은 총 22개로서 기둥으로서의 압축 시험에 6개 그리고 보로서의 휨 시험에 16개가 사용되었으며 22개 모두 잣나무 시험편이었다. 국산 간벌재로서 낙엽송과 편백에 대한 다중접착접합부재의 압축 및 휨 시험은 1차년도에 실시한 바 있다.

표 B2-2 다중접착접합부재 시험편의 종류, 수종, 치수 및 수

기호 ⁽¹⁾	수종	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	핑거조인트 유무	시험편의 수	시험 항목
P90D2	잣나무	180x180	2.4	무	2	압축
P90T3	잣나무	270x270	2.4	무	2	압축
P90T3E	잣나무	270x270	2.4	무	2	압축
P90D2	잣나무	180x180	3.6	유	2	휨
P90D3	잣나무	180x270	3.6	유	2	휨
P90D4	잣나무	180x360	3.6	유	2	휨
P90D5	잣나무	180x450	3.6	유	2	휨
P90T3	잣나무	270x270	3.6	유	2	휨
P90T3E	잣나무	270x270	3.6	유	2	휨
P90T4E	잣나무	270x360	3.6	유	2	휨
P90T5E	잣나무	270x450	3.6	유	2	휨
합계					22	

비고 ⁽¹⁾ 제일 왼쪽의 영문은 수종(P-잣나무)을 의미하고 나머지 영문 및 숫자는 표 B1-7 및 B1-8에 주어진 기호를 의미한다.

이 연구에서 사용되었던 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 단면의 예는 그림 B2-1 및 B2-1와 같다.



a) P90D2



b) P90T3



c) P90T3E

그림 B2-1 다중접착접합 기둥 부재



a) P90D3



b) P90T4E



c) P90T5E

그림 B2-2 다중접착접합 보 부재

(2) 시험방법

(가) 압축시험

목재의 압축시험 방법에는 무결점 소시험편에 대한 압축시험 방법(KS F 2206)과 실대재의 압축시험 방법(ASTM D 198)이 있다. 실대재의 압축시험 방법은 아직까지 KS 표준으로는 제정되어 있지 않지만 실제로 결함을 포함하고 있는 상태로 사용되는 실대재의 압축강도를 측정한다는 측면에서 무결점 소시험편에 대한 압축 시험방법보다는 더 실제 상황에 근접한 시험 방법이라고 할 수 있다. 소경각재 및 다중접착접합부재 기둥에 대해서 ASTM D 198에 따른 실대재 압축시험 방법을 적용하여 압축강도를 측정하였다. 실대재 압축시험 방법의 세부적인 사항은 1차년도에 적용하였던 방법과 동일하다.

먼저 잣나무 소경각재의 압축강도를 측정하기 위하여 그림 B2-3과 같이 2.4m 길이의 잣나무 소경각재를 충남대학교 환경소재공학과 그린건축연구실에서 보유하고 있는 100톤 용량의 압축강도 시험기에 설치하고 시험 중에 발생할 수 있는 시험편의 좌굴을 방지하기 위하여 그림 B2-3에서 보는 바와 같이 시험편의 길이를 따라서 500mm 간격으로 시험편의 4면을 측면에서 지지하는 지지대를 설치하였다. 그림 B2-3과 같이 시험을 실시함으로써 시험편에서 좌굴에 의한 파괴의 가능성을 배제하고 결점의 영향은 포함되어 있는 압축강도를 측정할 수 있다. 좌굴에 의한 파괴의 가능성은 실제 기둥에 있어서 기둥부재의 허용압축응력에 기둥안정계수를 적용하여 설계허용압축응력을 계산함으로써 고려해 준다.

소경각재를 가로 및 세로 방향으로 접착하여 제조된 다중접착접합 기둥 부재를 실제 건축물의 기둥으로 사용하는 경우에는 실제 건축물의 기둥에 기둥의 좌굴을 방지할 수 있는 버팀대들이 일정한 간격으로 설치되어 있는 경우가 거의 없고 자유롭게 좌굴이 발생할 수 있는 환경에서 사용된다. 따라서 다중접착접합 기둥부재에 대한 압축시험은 그림 B2-3과 같은 좌굴 방지 지지대를 설치하면 오히려 실제 상황과 다른 결과를 얻게 될 것이기 때문에 그림 B2-4와

같이 측면 지지대 없이 좌굴의 영향까지 포함된 상태로 시험을 실시하였다. 다중접착접합 기둥부재의 단면치수가 모두 180mmx180mm 이상이므로 충남대학교에서 보유하고 있는 100톤 용량의 시험기로는 파괴 시까지 시험이 불가능할 것으로 예상되어 서울의 국립산림과학원 목구조연구실에서 보유하고 있는 200톤 용량의 기둥 압축시험기를 이용하여 시험을 실시하였다.



그림 B2-3 소경각재 실대재의 압축시험

그림 B2-4 다중접착접합 기둥 부재의 압축시험

그림 B2-2 및 B2-4의 기둥 압축시험에서 기둥의 변형을 측정하기 위하여 시험편에서 마주 보는 양면에 라인형 LVDT를 부착하여 시험 중에 변형을 연속적으로 측정하였으며 2개의 LVDT 변형값의 평균을 부재의 변형으로 하였다. 시험편의 탄성계수, 비례한도 응력 및 압축 강도는 1차년도와 동일하게 각각 식 (B2-1), (B2-2) 및 (B2-3)에 의하여 계산하였다.

$$E = \frac{P_p L}{A \Delta_p} \text{ ----- (B2-1)}$$

$$\sigma_{cpl} = \frac{P_p}{A} \text{ ----- (B2-2)}$$

$$\sigma_{cmax} = \frac{P_{max}}{A} \text{ ----- (B2-3)}$$

- 여기서, E: 탄성계수(N/mm²)
 P_p: 비례한도 하중(N)
 L: 시험편의 길이(mm)
 A: 시험편의 단면적(mm²)
 Δ_p: 비례한도 변형(mm)
 σ_{cpl}: 비례한도 응력(N/mm²)

σ_{\max} : 압축강도(N/mm²)

P_{\max} : 최대하중(N)

(나) 휨 시험

목재의 휨 시험 방법에는 무결점 소시험편의 휨 시험 방법(KS F 2208)과 실대재의 휨 시험 방법(KS F 2150)이 있다. 압축강도 시험의 경우와 마찬가지로 무결점 소시험편에 대한 휨 시험 결과에는 결점의 영향이 반영되어 있지 않기 때문에 결점의 크기 및 분포와 휨 강도 사이의 상관관계 분석을 통하여 얻어진 조정계수를 적용하여 허용응력을 산출하여야 한다. 그러나 실제 사용되는 목재와 동일하게 결점을 그대로 포함하고 있는 목재에 대한 휨 시험을 통하여 휨 강도를 측정한다면 결점의 영향이 포함되어 있는 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다. KS F 2150(구조용 실대재의 휨 시험 방법)는 이러한 목적을 위하여 해당 등급의 목재에 허용되는 수준의 결점들을 포함하며 실제 건축에 사용되는 치수의 구조용 목재에 대한 휨 시험 방법을 다루고 있다.

KS F 2208의 소시험편에 대한 휨 시험은 그림 B2-5와 같이 중앙 집중하중 방식으로 실시되며 KS F 2150의 실대재에 대한 휨 시험은 그림 B2-6과 같이 1/3점 하중 방식으로 실시된다. 그림 B2-5의 중앙 집중하중 방식에서는 부재의 전체 구간에 걸쳐서 전단력이 발생하기 때문에 휨 강도의 측정에서 전단력의 영향을 피할 수 없으며 이러한 전단력의 영향은 짧고 높이가 높은 부재일수록 심하게 나타날 것이다. 그러나 그림 B2-6의 1/3점 하중 방식은 중앙의 2개의 하중점 사이에서 전단력이 작용하지 않기 때문에 전단력의 영향을 배제한 순수한 휨 모멘트의 영향만을 고려한 휨 강도를 얻을 수 있는 장점이 있다.

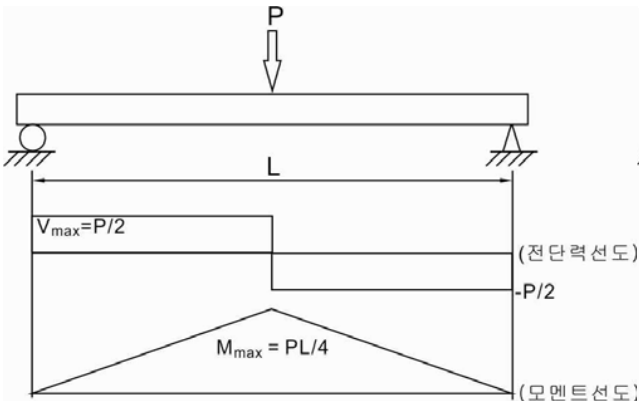


그림 B2-5 중앙집중하중 휨 시험

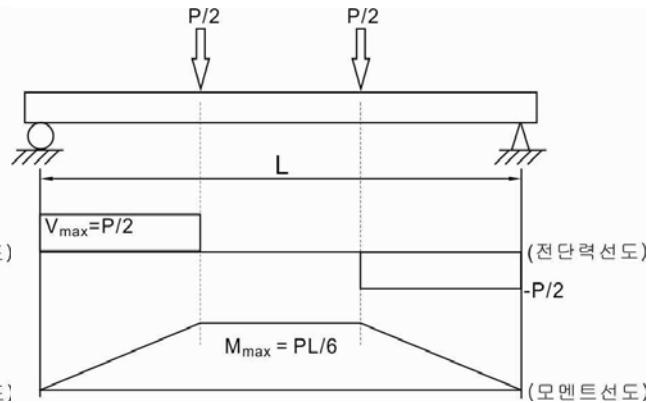


그림 B2-6 1/3점 하중 휨 시험

그림 B2-6과 같은 1/3점 하중 휨 시험에서 MOE 및 MOR은 1차년도와 동일하게 식 (B2-4) 및 (B2-5)에 의하여 계산하였다.

$$MOE(N/mm^2) = \frac{7P_p L^3}{36\Delta_p b h^3} \text{ ----- (B2-4)}$$

$$MOR(N/mm^2) = \frac{P_{max}L}{bh^2} \text{----- (B2-5)}$$

여기서, P_p: 비레한도 하중(N)

L: 시험편의 길이(mm)

Δ_p: 비레한도 변형(mm)

b: 시험편의 나비(mm)

h: 시험편의 높이(mm)

P_{max}: 최대하중(N)

(다) 소경각재의 비파괴시험

잣나무 소경각재에 대하여 1차년도와 동일하게 육안등급구분 및 작은 응력을 가하는 비파괴시험 방법, 초음파(ultrasonic wave)를 이용하는 비파괴시험 방법 및 응력파(stress wave)를 이용하는 비파괴시험 방법을 적용하여 비파괴시험을 실시하였다. 육안등급구분 방법은 목재의 표면에 분포하는 결점의 크기, 위치, 수 등을 검사하여 등급을 결정하는 방법으로서 이 연구에서는 세부과제에서 적용하였던 것과 동일한 표 B2-3과 같은 기준을 적용하여 육안등급구분을 실시하였다.

표 B2-3 소경각재의 육안 식별을 위한 품질 기준

구분	품질 기준			
	1등급	2등급	3등급	4등급
최대 용이 지름비	17% 이하	25% 이하	33% 이하	50% 이하
섬유주행경사	1:16 이하	1:14 이하	1:12 이하	1: 8 이하
썩음	없을 것			
갈라짐	경미할 것			
변색	경미할 것			
경사결	경미할 것			
둥근모	나비가 단면치수의 1/4 이내이고 인접한 2모서리에는 없을 것			
그 밖의 결점	극히 경미할 것			

작은 응력을 가하는 방법은 목재의 탄성한계 이내의 작은 하중을 가하면서 변형을 측정하여 하중과 변형의 관계로부터 MOE를 계산하고 MOE와 MOR이 비례하는 관계를 이용하여 목재의 MOR를 예측하는 방법이다. 이 연구에서는 잣나무 소경각재에 대한 휨 시험을 실시하면서 탄성한계에서의 하중과 변형을 측정하여 MOE를 계산하고 파괴시의 MOR를 계산하여 이들 두 가지 측정값 사이의 관계를 조사하였다.

초음파를 이용하는 비파괴시험 방법은 1차년도와 동일하게 영국 C.N.S. Electronics 사에서

제작된 초음파 비파괴시험 장비인 Ultrasonic Tester BP-5(그림 B2-7)를 사용하였다.



(A) 콘트롤 박스 (B) 초음파 전달 센서 (C) 초음파 감지 센서

그림 B2-7 초음파를 이용하는 비파괴시험 장비(Ultrasonic Tester BP-5)

응력파를 이용하는 비파괴시험 방법은 1차년도와 동일하게 그림 B2-8에서 보는 바와 같이 미국 Metriguard사의 응력파 비파괴시험 장비인 Stress Wave Timer 239A를 사용하였다.



(A) 콘크롤 박스 (B) 초음파 센서가 내장된 망치 (C) 초음파 감지 센서

그림 B2-8 응력파를 이용하는 비파괴시험 장비(Stress Wave Timer 239A)

일반적으로 목재의 MOE는 식 (B2-6)와 같이 목재 내에서의 음 전달 속도의 제곱에 목재의 밀도를 곱한 값과 같다고 알려져 있다.

$$MOE = V^2 \rho \text{ ----- (B2-6)}$$

여기서, V: 목재 내에서 음의 속도

ρ: 목재의 밀도

(라) 밀도 및 함수율 측정 방법

소경각재의 압축 및 휨 시험을 실시한 직후 각 시험편들의 밀도 및 함수율을 측정하기 위하여 소경각재의 양 끝면으로부터 100mm 이상 떨어진 지점에서 결점이 없는 부분을 골라서

단면치수 그대로 20mm의 길이로 시험편을 채취하였다. 동일한 시험편을 사용하여 목재의 밀도는 KS F 2198(목재의 밀도 및 비중 측정 방법)에 따라서 측정하고 함수율은 KS F 2199(목재의 함수율 측정 방법)에 따라서 측정하였다. 시험편을 채취한 다음 즉시 디지털 버니어캘리퍼스를 사용하여 채취된 시험편들의 가로, 세로 및 길이를 0.01mm의 정밀도로 측정하고 기건 질량을 0.01g의 정밀도로 측정한 다음 목재의 질량을 부피로 나누어서 기건밀도(kg/m³)를 계산하였다. 무게 측정을 마친 시험편들을 (103±2)°C로 유지되는 건조기 내에 넣고 항량에 도달할 때까지 건조한 후 항량에 도달한 시험편은 데시케이터에 넣어서 상온에 도달할 때까지 식히고 그 질량을 0.01g의 정밀도로 측정하여 전건질량으로 한다. 기건질량에서 전건질량을 뺀 값이 목재 내에 존재하는 수분의 질량이며 이를 전건질량으로 나누고 100을 곱하여 함수율을 % 단위로 계산하였다.

(마) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부에 대한 전단성능 시험

한옥과 같은 기둥-보 구조에서 기둥과 보 사이의 접합부는 상부로부터 전다로디는 수직하중에 의하여 접합부에 전달되는 전단하중을 효과적으로 지지하여 하부 구조로 전달하여야 한다. 기둥-보 구조에서 기둥과 보 사이의 접합부에 대한 전단성능 시험방법은 아직까지 표준규격이 만들어져 있지 않기 때문에 그림 B2-9과 같은 방법으로 시험을 실시하고자 한다.

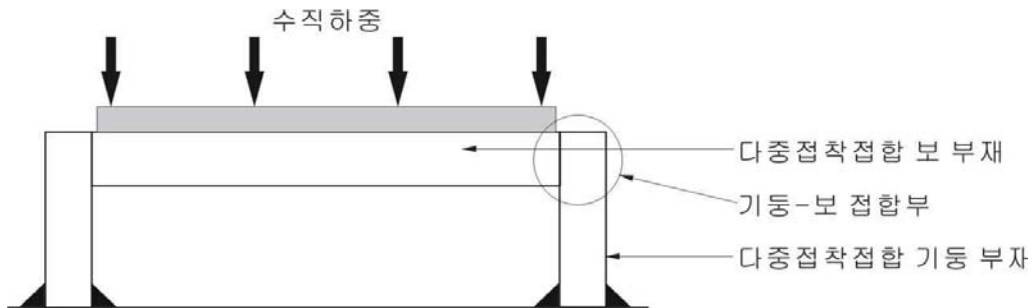


그림 B2-9 다중접착접합 기둥-보 접합부의 전단성능 시험 방법

다중접착접합부재 기둥을 900mm 간격으로 2개 세우고 그 사이에 다중접착접합부재 보를 걸치고 보의 양 끝에서 기둥과의 사이에 동일한 접합부를 구성한다. 상기 시험편을 평평한 바닥에 기둥이 옆으로 이동하지 못하도록 고정한 후 상부에서 보의 전체 길이에 걸쳐서 균일분포 수직하중을 가하면서 아래쪽의 변형량을 측정한다. 이 시험에서 얻어진 최대 전단하중을 2로 나누면 하나의 접합부가 지지할 수 있는 최대전단하중의 크기를 구할 수 있다.

일반적으로 한옥에서 하나의 기둥에 하중을 전달하는 부재들의 구성 및 각 부재들의 단위하중의 크기는 표 B2-4와 같다. 한옥에서 기둥과 기둥 사이의 간격을 3.6m로 가정하고 하나의 기둥에 하중을 작용시키는 영역을 3.6mx3.6m라고 가정한다면 하나의 기둥에 작용하는 하중의 크기는 약 93kN(약 9.5톤)이며 기둥의 양측면에서 보와 접합되어 기둥의 좌우측에 각각 1개씩의 접합부가 설치된다면 하나의 접합부가 지지하여야 하는 전단하중의 크기는 약 47kN(약 4.8톤)이 될 것이다.

표 B2-4 한옥에서 기둥에 하중을 전달시키는 부재들의 무게

부재	고정하중(N/m ²)	비고
기와	600	보통기와
보토	3,600	200mm 두께
적싱, 산자, 개판	1,000	200mm 두께
서까래	1,000	200mm 두께
보, 도리, 기타	1,000	
합계	7,200	

(바) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부에 대한 회전모멘트저항성능 시험

다중접착접합부재를 기둥과 보로 사용하는 한옥구조는 기본적으로 기둥-보 구조이며 기둥-보 구조의 특성 상 수평하중에 대한 저항력이 약할 것으로 예상된다. 우리나라가 지금까지는 지진 안전지대로 알려져 왔으나 지구촌에 대형지진들이 종종 발생하고 많은 재산 및 인명 피해가 발생하면서 우리나라도 이제는 지진 안전지대가 아니라는 인식이 널리 퍼졌고 정부에서도 내진설계 요건을 강화하여 단독주택에도 내진설계를 의무화하려는 움직임을 보이고 있다. 따라서 다중접착접합부재로 건축된 한옥구조에 대해서도 내진성능을 평가할 필요가 있으며 이 연구에서는 다양한 다중접착접합부재 기둥-보 접합부에 대한 회전모멘트저항성능을 그림 B2-10과 같이 측정하였다.

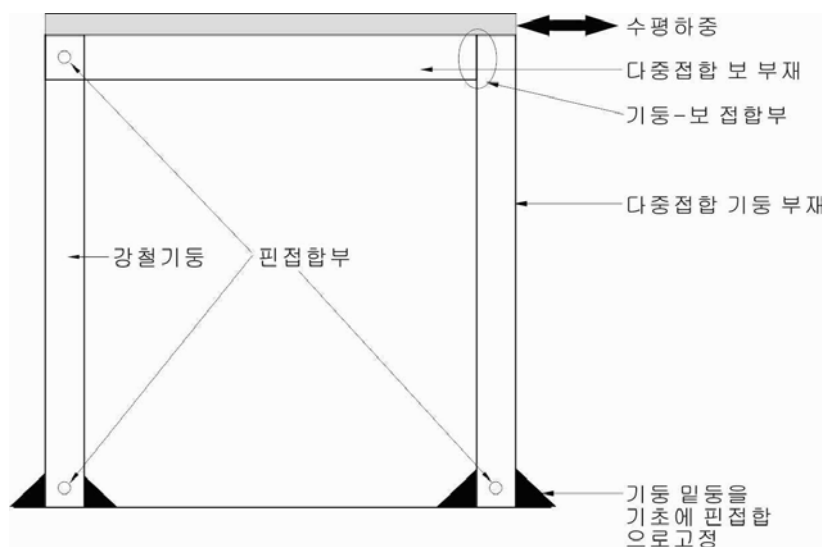


그림 B2-9 다중접착접합부재 기둥-보 구조에 대한 수평하중저항시험

접합부의 회전모멘트저항성능 시험 방법은 아직까지 표준 규격이 만들어져 있지 않기 때문

에 이 연구에서는 그림 B2-9와 같은 방법을 적용하여 회전모멘트저항성능을 평가하였다. 수평하중이 기둥-보 구조에 작용하면 기둥의 하부는 기초에 고정되어 있으므로 움직이지 않고 기둥의 상부가 보와 함께 수평방향으로 이동하게 된다. 이러한 수평하중에 의한 회전모멘트의 작용 하에서 기둥-보 접합부가 회전한다면 기둥 상부와 보가 수평방향으로 이동하게 되며 접합부의 강성이 충분하지 못하며 접합부에서 과다한 회전이 발생한다면 건축물 자체가 안전하지 않은 상태가 될 것이다. 이 때 만약에 기둥-보 접합부가 강성접합부로서 회전모멘트에 의하여 회전하지 않는다면 수평하중 하에서도 기둥-보 접합부는 직각상태를 유지할 것이며 건축물의 수평하중에 대한 저항력은 기둥과 보의 휨 성능에 의하여 결정될 것이다.

접합부의 회전모멘트저항시험에서 접합부에 작용하는 수평하중의 크기를 로드셀로 측정하고 수평하중 하에서의 접합부의 수평 이동거리를 LVDT에 의하여 측정하게 된다. 그러나 접합부의 회전모멘트저항성능은 접합부에 작용하는 모멘트의 크기에 대한 접합부의 회전각의 비로 구하여야 하므로 그림 B2-10에서 보는 바와 같이 하중은 모멘트로 전환하고 변형은 회전각으로 전환하여야 한다. 수평하중을 모멘트로 전환하기 위하여 식 (B2-7)과 같이 수평하중의 크기에 시험에 사용되는 기둥의 높이(2.4m)를 곱하여준다. 수평 변위를 접합부의 회전각으로 전환하기 위해서는 식 (B2-8)에 따라서 수평변위를 기둥의 높이로 나누고 그 값의 arctan을 계산하면 접합부의 회전각이 계산된다.

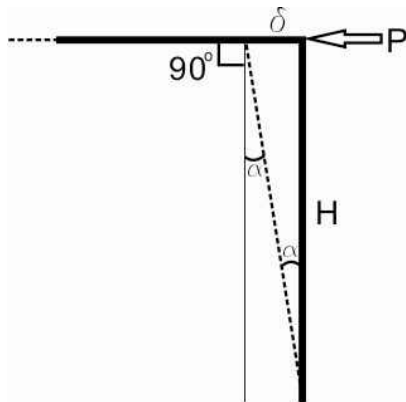


그림 B2-10 접합부의 회전각 계산

$$M = P \times h \text{ (Nm)} \text{ ----- (B2-7)}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\delta}{1,000h}\right) \text{ ----- (B2-8)}$$

- 여기서, M: 회전모멘트(Nm)
- P: 수평하중(N)
- δ: 수평 변위(mm)
- h: 기둥의 높이(m)
- α: 접합부의 회전각(degree)

접합부의 모멘트저항성능은 식 (B2-9)와 같이 작용 모멘트를 회전각으로 나누어줌으로써

계산할 수 있다.

$$R_m = \frac{M}{\alpha} \text{ (kN} \cdot \text{m/degree)} \text{ ----- (B2-9)}$$

여기서 R_m : 회전강성계수(kNm/degree)

식 (B2-9)에서 M 은 접합부에 가해지는 최대하중(kN 단위)의 1/3에 접합부를 구성하는 기둥의 높이(m 단위)를 곱하여 계산한다. 어느 접합부에 대한 회전강성계수가 알려져 있다면 이 접합부를 사용한 경우에 어느 정도까지 수평하중을 지지할 수 있는지를 예측할 수 있다. 아직까지 기둥-보 구조에서 접합부의 회전에 대하여 어느 정도의 회전까지 허용되는지에 대한 명확한 정의가 없기 때문에 접합부에 대한 허용회전각을 추정하여야 한다. 일반적으로 2.4m 높이의 전단벽에서 상부 벽체의 허용변위 한도를 50mm로 잡고 있는데 이를 회전각으로 계산하며 1.1935도가 되므로 대략적으로 1.2도 정도를 접합부의 허용회전각으로 설정하는 것이 타당할 것으로 생각되었다. 따라서 R_m 의 회전강성을 갖는 접합부가 지지할 수 있는 수평하중의 크기는 식 (B2-10)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{H \cdot allow} = \frac{1.2R_m}{h} \text{ ----- (B2-10)}$$

여기서 $P_{H \cdot allow}$: 허용수평하중(kN)

(사) 중공다중접착접합부재 접합부에 대한 강도 성능 평가

이 연구의 세부과제에서 개발된 중공다중접착접합부재 기둥-보 접합부에 대하여 그림 B2-9와 같은 방법으로 전단성능 시험을 실시하였다.

(아) 보강 다중접착접합부재의 휨 성능 평가

이 연구의 세부과제에서 개발된 보강 다중접착접합 보 부재에 대하여 그림 B2-6과 같은 방법으로 휨 성능을 평가하였다.

다. 시험 결과

(1) 잣나무 소경각재의 강도성능

(가) 잣나무 소경각재의 압축강도

잣나무 소경각재의 실대재 압축강도 시험 전에 표 B2-3의 기준에 따라서 육안 등급 구분을 실시하였으며 각 등급별 탄성계수 및 압축강도는 표 B2-4에 1차년도에의 낙엽송 및 편백 시험결과와 함께 수록하였다. 잣나무 소경각재에 대한 압축시험 결과는 그림 B2-10과 같다.

표 B2-4 소경각재의 육안 등급별 탄성계수 및 압축강도

수종	육안 등급	수(개)	탄성계수(GPa)	압축강도(MPa)
낙엽송	1	13(18.6%)	12.0	40
	2	21(30.0%)	11.1	38
	3	27(38.6%)	10.8	37
	4	9(12.9%)	10.6	36
소계		70(100%)		
편백	1	2(4.1%)	17.3	52
	2	32(65.3%)	14.6	47
	3	15(30.6%)	13.4	45
소계		49(100%)		
잣나무	1	9(9.0%)	17.1	31.9
	2	34(34.0%)	16.5	30.8
	3	39(39.0%)	15.4	30.3
	4	18(18.0%)	14.2	29.5
소계		100(100%)		

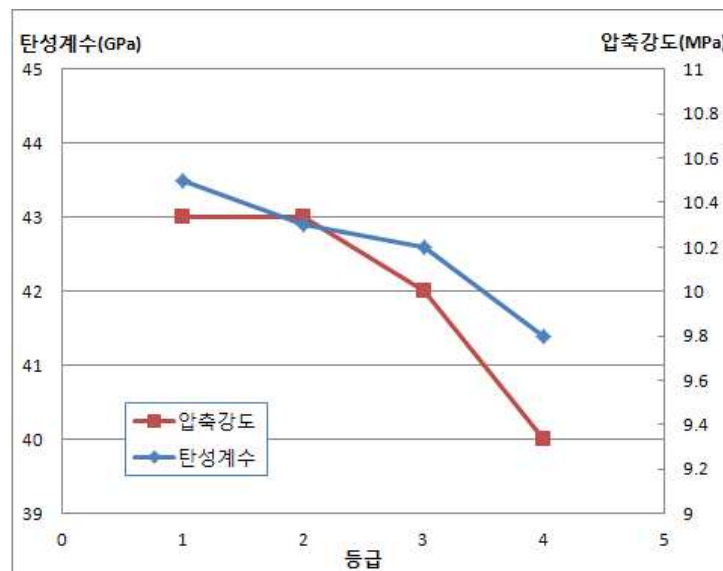


그림 B2-10 잣나무 90mmx90mm 소경각재의 육안 등급별 탄성계수 및 압축강도

표 B2-4에서 보면 시험편으로 사용된 소경각재 중에서 낙엽송은 1, 2, 3 및 4등급이 각각

18.6%, 30%, 38.6% 및 12.9%를 나타내었으며 편백은 1, 2 및 3등급이 각각 4.1%, 65.3% 및 30.6%를 나타내었고 잣나무는 1, 2, 3 및 4등급이 각각 9%, 34%, 39% 및 18%를 나타내었다. 잣나무 소경각재는 비교적 큰 용이가 일정한 간격으로 모인 형태로 나타났으며 이로 인하여 등급이 편백이나 낙엽송보다 낮게 판정되었다. 잣나무 소경각재의 압축탄성계수 및 압축강도를 1차년도에 시험을 실시하였던 낙엽송 및 편백과 비교하면 그림 B2-11 및 B2-12와 같다.

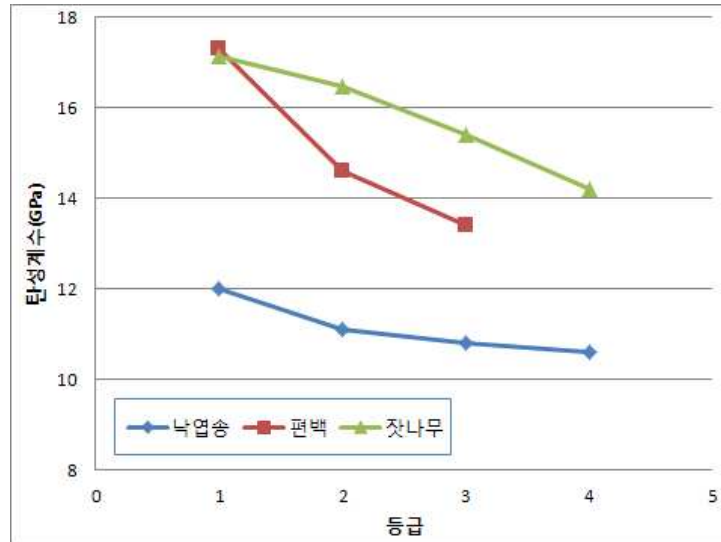


그림 B2-11 낙엽송, 편백 및 잣나무 소경각재의 압축탄성계수 비교

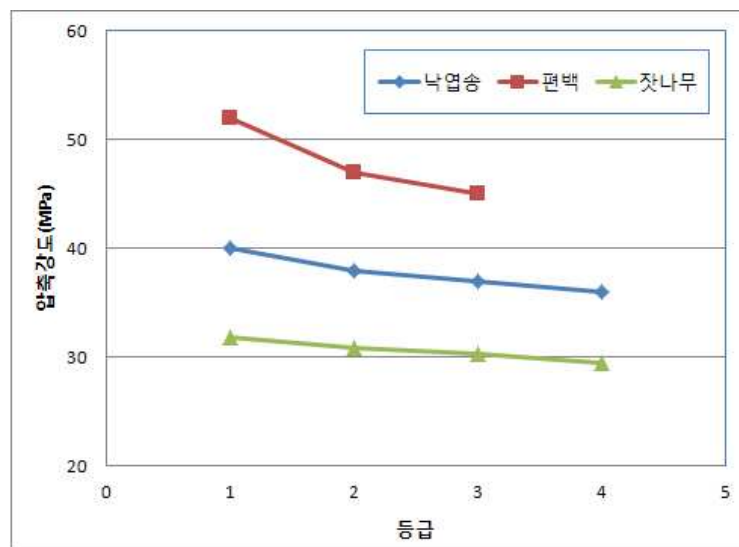


그림 B2-12 낙엽송, 편백 및 잣나무 소경각재의 압축강도 비교

표 B2-4 및 그림 B2-11과 B2-12에서 보면 낙엽송, 편백 및 잣나무 모두에서 육안등급이 높을수록 탄성계수 및 압축강도가 높은 경향을 나타내었다. 동일 등급의 경우에는 편백이 낙엽송보다 높은 탄성계수 및 압축강도를 나타내었으며 잣나무는 탄성계수는 편백과 비슷하였으

나 압축강도는 가장 낮은 값을 나타내었다.

평균 밀도 및 함수율은 낙엽송, 편백 및 잣나무가 각각 $494\text{kg/m}^3(0.494\text{g/cm}^3)$ 및 11.1%, $478\text{kg/m}^3(0.478\text{g/cm}^3)$ 및 12.7% 그리고 $402\text{kg/m}^3(0.402\text{g/cm}^3)$ 및 11.3%를 나타내었다. 밀도는 낙엽송이 가장 높고 잣나무가 가장 낮았으며 함수율은 모든 수종들이 15% 이하의 낮은 값을 나타내었다.

그림 B2-13은 잣나무에서 밀도와 압축강도와의 상관관계를 나타내고 있으며 그림에서 보면 이들 두 가지 성질 사이에는 상관계수가 그렇게 높지 않음을 알 수 있다. 그림 B2-14는 잣나무 소경각재의 압축탄성계수와 압축강도 사이의 상관관계를 보여주고 있으며 이들 사이에는 상호 비례하는 관계가 있음을 알 수 있다.

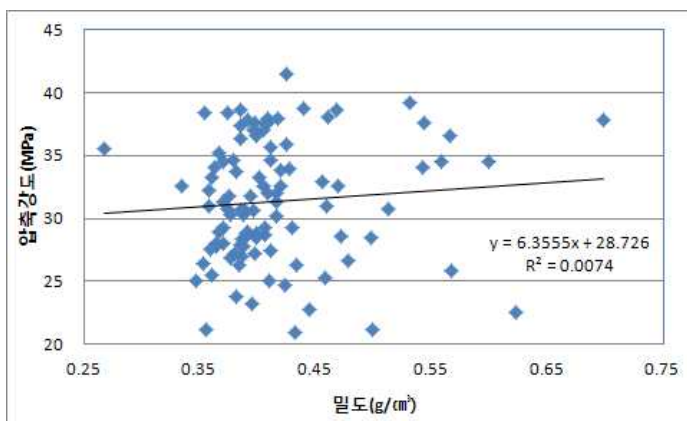


그림 B2-13 잣나무 소경각재에서 밀도와 압축강도의 관계

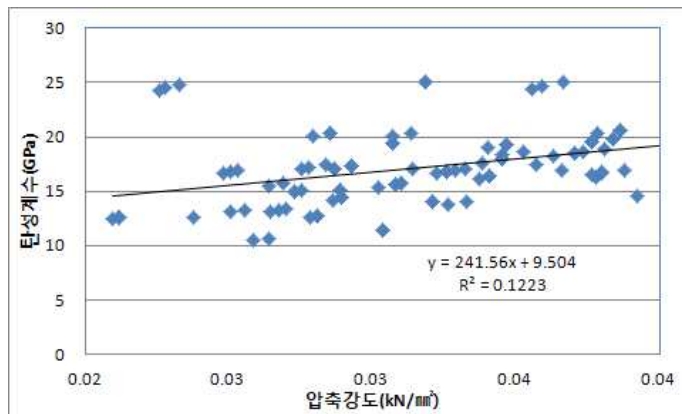


그림 B2-14 잣나무 소경각재에서 압축탄성계수와 압축강도의 관계

그림 B2-15는 잣나무 소경각재에서 압축탄성계수와 초음파 속도 사이의 관계를 나타내고 있으며 상관계수가 높지는 않지만 상호 비례하는 관계에 있음을 알 수 있다. 그림 B2-16은 잣나무 소경각재에 대한 비파괴시험에서 측정된 초음파 속도와 응력파의 속도 사이의 관계로서 이들 사이에 상호 비례하는 관계에 있음을 알 수 있다.

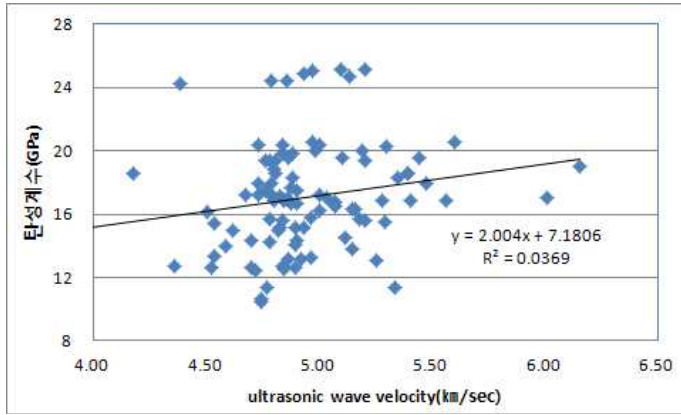


그림 B2-15 잣나무 소경각재에서 압축탄성계수와 초음파 속도의 관계

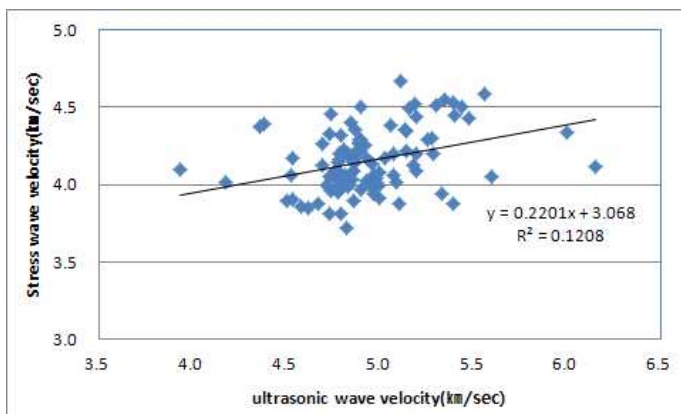


그림 B2-16 잣나무 소경각재에서 초음파 속도와 응력과 속도의 관계

(나) 압축하중 하에서 잣나무 소경각재의 파괴

잣나무 소경각재의 실대재 압축시험에서 나타나는 파괴의 형태를 관찰한 결과 그림 B2-17에서 보는 바와 같이 큰 웅이 주변에서의 섬유경사를 따라서 발생하는 파괴, B2-18에서 보는 바와 같이 모인 웅이 주변에서의 파괴 그리고 그림 B2-19에서 보는 바와 같이 섬유의 찌그러짐에 의한 압축파괴 등이 주로 나타남을 알 수 있었다.

압축하중 하에서 잣나무 소경각재에 나타나는 여러 가지 파괴 원인들 중에서 웅이 주변의 섬유경사에 따른 파괴가 가장 많이 나타났다. 큰 웅이 또는 모인 웅이 주변에서는 목재 섬유가 웅이의 형태를 따라서 경사지게 배열되거나 또는 웅이로 인한 섬유의 불연속이 나타나기 때문에 섬유경사각이 클수록 목재의 강도가 감소하므로 섬유경사를 따라서 파괴가 일어나거나 섬유의 불연속 지점에서 응력 집중이 발생하여 파괴가 초래될 가능성이 매우 높다. 그림 B2-17과 B2-18에서 보면 이러한 현상들이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 여러 가지 목재의 결점 중에서 강도에 가장 영향이 큰 결점을 한 가지 꼽는다면 웅이를 들 수 있으며 육안으로 등급 구분을 실시하는 경우에 웅이의 크기와 위치 그리고 모인 웅이 여부 등을 판단하여 등급을 구분하면 비교적 정확하게 강도 등급 구분이 이루어질 수 있을 것이다.



그림 B2-17 잣나무 소경각재에서 나타나는 큰 옹이 주변에서의 파괴



그림 B2-18 잣나무 소경각재에서 나타나는 모인 옹이 주변의 파괴

그림 B2-19에서 보면 섬유와 리그닌의 찌그러짐에 의한 압축파괴는 방사단면에서는 수평방향으로 나타나며 접선단면에서는 45도의 경사진 방향으로 나타나고 옹이 주변에서 나타난 압축파괴는 옹이 주변의 섬유경사를 따라서 옹이 방향으로 진행됨을 알 수 있다.



그림 B2-19 잣나무 소경각재에서 나타나는 압축파괴

(다) 소경각재의 휨 강도

잣나무 소경각재의 실대재 휨강도 시험 전에 표 B2-3의 기준에 따라서 육안 등급 구분을 실시하였으며 각 등급별 MOE 및 MOR은 표 B2-5에 1차년도 of 낙엽송 및 편백 시험결과와 함께 수록하였다. 잣나무 소경각재에 대한 휨 시험 결과는 그림 B2-20과 같다.

표 B2-5 소경각재의 육안 등급별 MOE 및 MOR

수종	육안 등급	수(개)	MOE(GPa)	MOR(MPa)
낙엽송	1	13(19.1%)	10.3	49
	2	30(44.1%)	9.5	47
	3	21(30.9%)	9.3	46
	4	4(5.9%)	9.2	45
소계		68(100%)		
편백	1	8(16.7%)	9.9	57
	2	33(68.8%)	9.2	55
	3	7(14.5%)	8.9	55
소계		48(100%)		
잣나무	1	29(13.1%)	10.5	43
	2	53(24.2%)	10.3	43
	3	93(42.4%)	10.2	42
	4	44(20.2%)	9.8	40
		219(100%)		

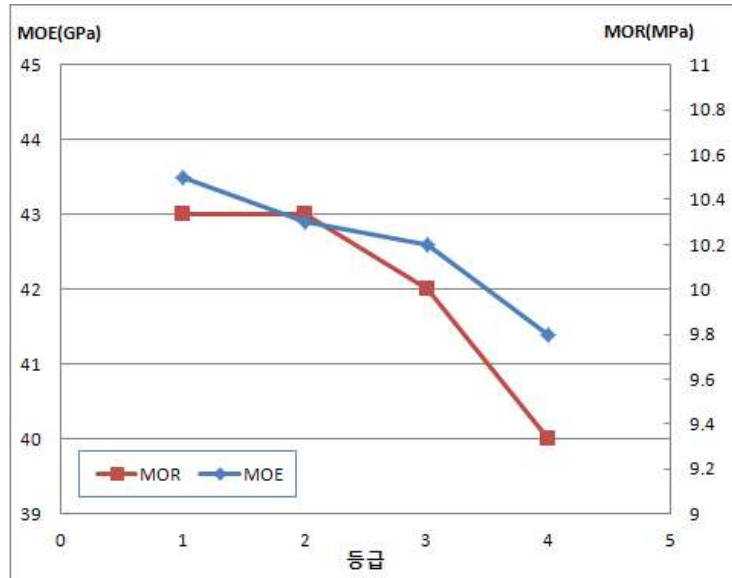


그림 B2-20 잣나무 90mmx90mm 소경각재의 육안 등급별 MOE 및 MOR

표 B2-5에서 보면 1차년도에 휨 시험용으로 사용된 소경각재 중에서 낙엽송은 1, 2, 3 및 4 등급이 각각 19.1%, 44.1%, 30.9% 및 5.9%를 나타내었고 편백은 1, 2 및 3등급이 각각 16.7%, 68.8% 및 14.5%를 나타내었으며 2차년도에 사용된 잣나무 소경각재는 1, 2, 3 및 4등급이 각각 13.1%, 24.2%, 42.4% 및 20.2%를 나타내었다. 압축시험용 소경각재의 경우와 비슷하게 낙엽송 소경각재는 편백보다 비교적 큰 용이가 존재하였으며 이로 인하여 등급이 편백보다 낮게 판정되었으며 잣나무는 큰 용이가 많고 모인용이가 일정한 간격으로 나타남으로써 가장 낮은 등급으로 판정되었다. 표 B2-5 및 그림 B2-20에서 보면 잣나무는 육안 등급이 높을수록 탄성계수 및 압축강도가 높은 경향을 나타내었고 1차년도에 시험을 실시하였던 낙엽송과 편백의 경우에도 동일한 경향을 나타내었다. 잣나무 소경각재의 MOE 및 MOR을 1차년도에 시험을 실시하였던 낙엽송 및 편백과 비교하면 그림 B2-21 및 B2-22와 같다.

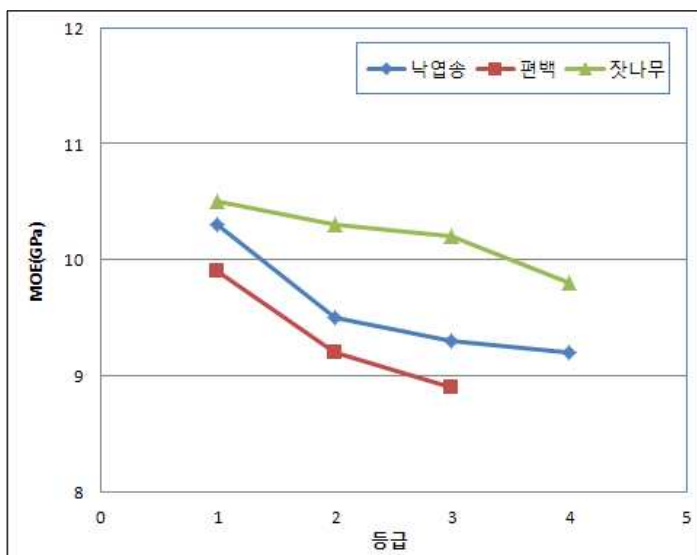


그림 B2-21 낙엽송, 편백 및 잣나무 소경각재의 MOE 비교

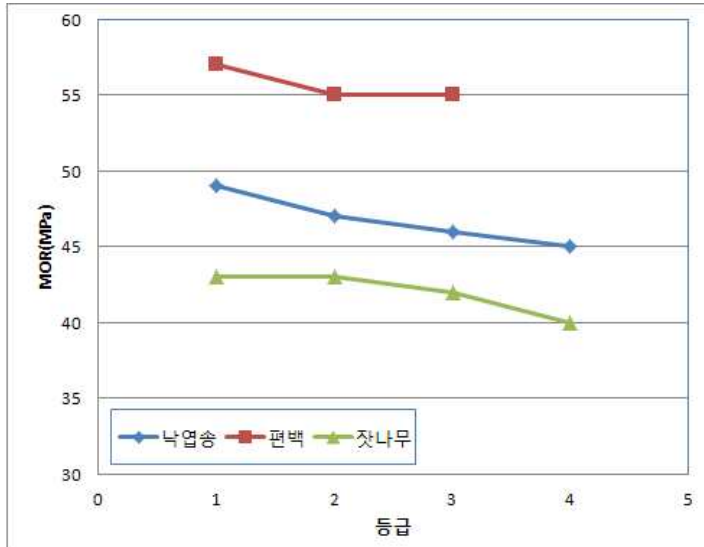


그림 B2-22 낙엽송, 편백 및 잣나무 소경각재의 MOR 비교

표 B2-5 및 그림 B2-21과 B2-22에서 보면 낙엽송, 편백 및 잣나무 모두에서 육안등급이 높을수록 MOE 및 MOR이 증가하는 경향을 나타내었다. MOE는 낙엽송이 가장 낮고 잣나무가 가장 높았으나 MOR은 반대로 낙엽송이 가장 높고 잣나무가 가장 낮은 값을 나타내었다.

그림 B2-23은 잣나무 소경각재에서 MOE와 MOR 사이의 상관관계를 보여주고 있으며 이들 사이에는 상호 비례하는 관계가 있음을 알 수 있다.

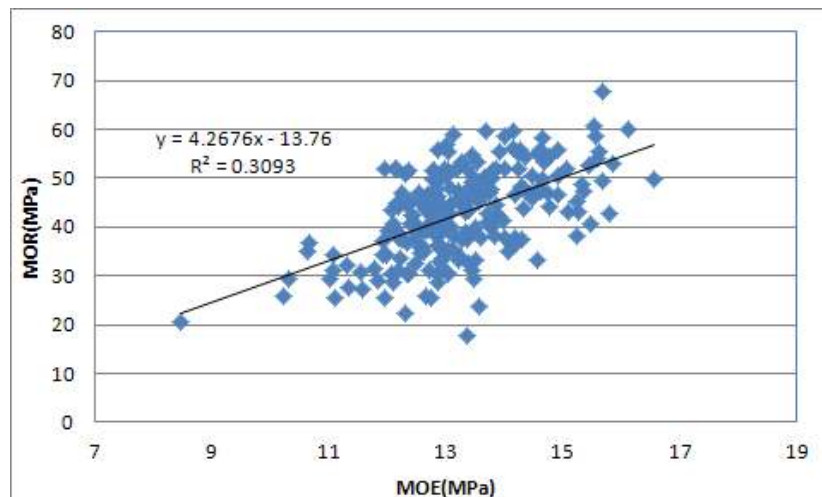


그림 B2-23 잣나무 소경각재에서 MOE와 MOR의 관계

(라) 소경각재의 비파괴 등급 구분

1차년도에 실시하였던 낙엽송 및 편백 소경각재에 대한 휨 시험 결과로부터 소경각재의 MOE에 근거하여 비파괴 등급을 LOW, E5, E7, E9, E11, E13 및 E15의 7등급으로 구분하는 것이 합리적인 것으로 제시하였다. 1차년도와 2차년도의 소경각재에 대한 비파괴시험 결과를 보면 비록 응력파와 초음파의 속도와 MOE와의 상관계수가 높지는 않지만 1차년도에 응력파

또는 초음파의 목재 내 전달 속도에 따른 등급을 구분하여 탄성계수에 따른 등급 구분과 동일하게 LOW(응력과 3.5km/sec 미만, 초음파 3.5km/sec 미만), E5(응력과 3.5km/sec 이상 및 4.0km/sec 미만, 초음파 3.5km/sec 이상 및 4.0km/sec 미만), E7(응력과 4.0km/sec 이상 및 4.5km/sec 미만, 초음파 4.0km/sec 이상 및 4.5km/sec 미만), E9(응력과 4.5km/sec 이상 및 5.0km/sec 미만, 초음파 4.5km/sec 이상 및 5.1km/sec 미만), E11(응력과 5.0km/sec 이상 및 5.5km/sec 미만, 초음파 5.1km/sec 이상 및 5.8km/sec 미만), E13(응력과 5.5km/sec 이상 및 6.0km/sec 미만, 초음파 5.8km/sec 이상 및 6.5km/sec 미만) 그리고 E15(응력과 6.0km/sec 이상, 초음파 6.5km/sec 이상)와 같이 7등급으로 구분하는 것이 합리적일 것으로 판단되었다.

2차년도 시험을 실시한 잣나무 소경각재에 대해서도 1차년도의 비파괴시험 결과 제시되었던 등급 구분을 그대로 적용하여 잣나무 소경각재의 휨 시험 및 압축시험 결과에 근거하여 산출된 각 등급별 휨 탄성계수, 휨강도, 압축 탄성계수 및 압축강도는 표 B2-6과 같다.

표 B2-6 잣나무 소경각재의 등급별 판정 기준 및 기계적 성질

비파괴 등급	응력 등급 기준(MOE)	응력과 등급 기준(km/s)	초음파 등급 기준(km/s)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	허용휨응력 (MPa) ⁽¹⁾	탄성계수 (GPa)	압축강도 (MPa)	허용압축응력 (MPa) ⁽²⁾
LOW	5 미만	2.9 미만	2.8 미만	4.0	25.0	3.2	3.3	17.6	2.6
E5	5 이상 7 미만	2.9 이상 3.3 미만	2.8 이상 3.6 미만	6.1	35.3	5.1	6.2	20.4	4.9
E7	7 이상 9 미만	3.3 이상 3.8 미만	3.6 이상 4.4 미만	8.3	40.1	6.5	8.1	27.5	6.7
E9	9 이상 11 미만	3.8 이상 4.3 미만	4.4 이상 5.2 미만	10.2	44.2	9.2	10.3	30.3	10.3
E11	11 이상 13 미만	4.3 이상 4.7 미만	5.2 이상 6.0 미만	12.2	46.7	10.3	12.5	33.8	13.2
E13	13 이상 15 미만	4.7 이상 5.2 미만	6.0 이상 6.8 미만	14.1	49.3	12.6	13.9	36.4	13.9
E15	15 이상	5.2 이상	6.8 미만	17.0	50.5	14.1	16.6	40.2	16.1

주 ⁽¹⁾ 허용휨응력은 표 B1-11의 계수를 적용하여 MOR 시험결과의 5% 하한값에 1/2.1을 곱하여 계산한 것이다.

⁽²⁾ 허용압축응력은 표 B1-11의 계수를 적용하여 압축강도 시험결과의 5% 하한값에 1/1.9를 곱하여 계산한 것이다.

(마) 휨 하중 하에서 잣나무 소경각재의 파괴

목재는 휨 하중 하에서 처짐이 발생하며 처진 부분의 하단에는 최대 인장응력이 발생하며 상단에는 최대 압축응력이 생기게 된다. 대부분의 경우에 휨 하중 하에서 목재는 최대 인장응력이 발생하는 처짐 부위 하단에서부터 파괴가 이루어지며 특히 이 부위에 웅이나 섬유경사가 존재하는 경우에는 웅이 주변의 섬유경사를 따라서 인장 및 전단파괴가 발생할 가능성이 매우

높다. 휨 부재에서도 큰 웅이 또는 모인 웅이 주변에서는 웅이의 모양을 따라서 섬유가 경사지게 배열되거나 웅이로 인한 섬유의 불연속이 나타나기 때문에 이 부분에서 섬유에 경사진 인장이나 전단 또는 응력 집중에 의한 파괴가 발생하게 될 것이다.

휨 응력 하에서 잣나무 소경각재의 파괴형태는 그림 B2-24와 같은 모인 웅이 주변에서 발생한 파괴, 그림 B2-25와 같은 큰 웅이 주변에서의 파괴, 그림 B2-26과 같이 웅이와 상관없이 섬유경사를 따른 파괴 및 그림 B2-27과 같은 휨응력(인장응력)과 전단응력에 의한 파괴 등으로 나타난다. 잣나무는 큰 웅이가 많고 웅이들이 일정한 간격으로 모여서 나타나기 때문에 큰 웅이나 모인 웅이 주변에서 파괴가 주로 나타나고 있다. 가끔씩 웅이와 웅이 사이의 웅이가 없는 부분에서 섬유경사가 심한 경우에 섬유경사를 따른 파괴가 나타나기도 하고 또는 이러한 부분에서 섬유경사가 그렇게 크지 않은 경우에는 휨응력(인장응력)에 의한 하부의 파괴에 이은 전단파괴의 형태가 나타나기도 한다.



그림 B2-24 모인 웅이 주변에서 발생한 파괴



그림 B2-25 큰 웅이 주변의 섬유경사를 따라서 발생한 파괴



그림 B2-26 용이와 상관없이 섬유경사를 따라서 발생한 파괴



그림 B2-27 휨응력(인장)과 전단에 의한 파괴

(바) 핑거조인트 소경각재의 휨 강도

일반적으로 국산 소경 간벌재는 길이가 1.8m에서 3m 사이로 벌채되기 때문에 길이 3m 이상의 다중접착접합부재를 제작하기 위해서는 길이이음을 하여야 한다. 구조용 집성재에서는 층재의 길이이음을 위하여 핑거조인트가 널리 사용되고 있으며 핑거조인트 층재의 경우에 단일 부재 층재 강도의 약 80% 이상을 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 35mm 두께의 얇은 층재가 사용되는 구조용 집성재에 비하여 다중접착접합부재에는 두께 80mm 이상의 두꺼운 소경각재가 사용되기 때문에 핑거조인트의 강도성능이 구조용 집성재 층재의 경우보다 감소할 것으로 예상되었다. 실제로 1차년도에 낙엽송 소경각재에 대하여 실시하였던 핑거조인트의 경우에 핑거조인트가 잇는 소경각재의 휨강도는 핑거조인트가 없는 소경각재에 비하여 절반 이하의 값을 나타내었다. 따라서 구조용 집성재에 사용되는 35mm 두께의 층재에서 핑거조인트 층재의 휨강도가 핑거조인트가 없는 층재의 휨강도의 80% 수준을 나타내는 것에 비하면 매우 낮은 값을 알 수 있다.

따라서 1차년도의 시험 결과로부터 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 품질 향상이 반드시 필요하다는 결론을 내리고 2차년도에 핑거조인트의 품질 향상에 대한 연구를 실시하는 것으로

연구계획에 반영한 바가 있다. 이러한 계획에 따라서 두꺼운 핑거조인트의 품질을 향상시킬 수 있는 방법에 대한 연구를 실시하였으며 그 결과 핑거조인트가 포함된 낙엽송 소경각재의 휨강도가 핑거조인트가 없는 낙엽송 소경각재 휨강도의 약 80% 정도를 나타낼 수 있게 되었으며 개선된 핑거조인트 제조기술과 시험결과에 대해서는 다음 항에서 자세히 설명하고자 한다. 2차년도에 개선된 핑거조인트 제조기술을 잣나무 소경각재에 적용하여 200개의 핑거조인트가 포함된 90mmx90mm 잣나무 소경각재를 제조하였으며 이들에 대하여 휨시험을 실시하였다. 비록 두꺼운 목재의 핑거조인트가 상당한 강도 감소의 요인이기는 하지만 한옥건축용 보의 경우에는 길이 3m 이상의 부재도 사용하여야 하기 때문에 한옥건축용 다중접착접합부재를 만들기 위해서는 핑거조인트 소경각재를 사용하여야 한다. 따라서 이 연구에서는 핑거조인트가 중앙부에 들어간 잣나무 소경각재를 제작하여 휨 성능을 평가하고 단일부재와의 비교를 통하여 휨성능 감소 정도를 판단하였다.

잣나무 소경각재에 대하여 응력파를 이용한 비파괴시험과 표 B2-3의 기준을 적용한 육안등급구분을 실시하여 등급을 구분한 후 휨 파괴시험을 실시하였으며 핑거조인트 소경각재의 휨 시험 결과는 표 B2-7과 같다.

표 B2-7 잣나무 핑거조인트 소경각재의 휨 시험 결과

수종	단면 치수 (mmxmm)	육안등급	수(개)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
잣나무	90x90	1	29(13.1%)	10.5	43
		2	53(24.2%)	10.3	43
		3	93(42.4%)	10.2	42
		4	44(20.2%)	9.8	40
소계			219(100%)		
잣나무 (핑거조인트)	90x90	1	30(15%)	7.44	27.6
		2	54(27%)	7.46	27.0
		3	92(46%)	7.33	26.9
		4	24(12%)	7.28	26.4
소계			200(100%)		

핑거조인트 잣나무 소경각재에 대한 휨 시험 결과를 보면 그래프로 나타내면 그림 B2-28과 같다.



그림 B2-28 핑거조인트 잣나무 소경각재의 휨 시험 결과

그림 B2-28에서 보면 핑거조인트 소경각재에서 높은 등급일수록 MOE 및 MOR이 높다는 사실을 알 수 있다. 그러나 표 B2-7 및 그림 B2-28에서 보는 바와 같이 등급 간에 MOE 및 MOR의 차이는 그렇게 크지 않았다. 핑거조인트 잣나무 소경각재의 휨강도를 핑거조인트가 없는 잣나무 소경각재의 휨강도와 비교해 보면 핑거조인트가 있는 소경각재의 휨강도가 없는 소경각재에 비하여 약 63% 정도의 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다. 낙엽송 핑거조인트 부재의 경우에는 1차년도에 50% 이하의 낮은 값을 나타내다가 2차년도에 개선된 핑거조인트 제조 기술을 적용한 경우에는 약 80% 수준을 나타내었으나 잣나무의 경우에는 이보다 낮은 수준을 나타내었다. 이번 연구를 위하여 핑거조인트 부재를 제작할 때에 결점을 제거하기 보다는 시험편의 길이를 맞추기 위하여 3.6m 길이의 휨 부재에서 정 중앙에 핑거조인트가 위치할 수 있도록 하기 위하여 결점과 관계없이 치수에 맞추어서 핑거조인트를 제작하였기 때문에 핑거조인트 소경각재에도 많은 수의 큰 용이, 모인 용이 또는 섬유경사가 존재하였다. 따라서 핑거조인트 부재의 휨 시험 결과를 보면 중앙의 핑거조인트 부위에서 파괴가 일어난 부재들도 많았으나 핑거조인트 이외에 큰 용이, 모인 용이 또는 섬유경사를 따라서 발생한 파괴가 많았으며 이러한 요인으로 인하여 잣나무 소경각재의 휨강도가 비교적 낮게 나타났다.

(사) 휨 하중 하에서 핑거조인트 소경각재의 파괴

휨 하중 하에서 핑거조인트 잣나무 소경각재는 핑거조인트의 파괴(그림 B2-29 ~ B2-30), 핑거조인트 이외의 결점에 의한 파괴(그림 B2-31), 결점에서 시작된 파괴가 섬유경사를 따라서 핑거조인트 쪽으로 진행(그림 B2-32) 그리고 핑거조인트에서 시작된 파괴가 섬유경사를 따라서 진행(그림 B2-33) 등의 파괴 형태를 보였다. 그림 B2-29는 수평핑거조인트 부재의 파괴 형태로서 그림 B2-29(a)는 핑거의 부러짐에 의한 파괴 형태이며 그림 B2-29(b)는 접촉 불량으로 인한 핑거의 빠짐 때문에 발생한 파괴이다. 그림 B2-30은 수직핑거조인트 부재의 파괴 형태로서 그림 B2-30(a)는 핑거의 부러짐에 의한 파괴 형태이며 그림 B2-30(b)는 접촉 불량으로 인한 핑거의 빠짐 때문에 발생한 파괴이다.



(a) 핑거의 부러짐에 의한 파괴



(b) 핑거의 이탈에 의한 파괴

그림 B2-29 수평핑거조인트의 파괴



(a) 핑거의 부러짐에 의한 파괴



(b) 핑거의 이탈에 의한 파괴

그림 B2-30 수직핑거조인트의 파괴



그림 B2-31 핑거조인트 이외의 결점에 의한 파괴



그림 B2-32 결점에서 시작된 파괴가 핑거조인트 쪽으로 진행



그림 B2-33 핑거조인트에서 시작된 파괴가 섬유경사를 따라서 진행

그림 B2-31은 핑거조인트 이외의 부분에서 용이 또는 섬유경사에 의한 파괴를 나타내고 그림 B2-32는 핑거조인트 주변의 결점에서 시작된 파괴가 섬유경사를 따라서 핑거조인트 방향으로 진행되는 것을 나타내며 그림 B2-33은 핑거조인트에서 시작된 파괴가 섬유경사를 따라서 진행되는 것을 나타낸다. 핑거조인트 잣나무 소경각재의 경우에는 큰 용이나 모인 용이 등의 결점이 완전히 제거되지 않고 그대로 남아 있는데다가 핑거조인트가 들어감으로서 새로운 결점의 역할을 하여 결국 핑거조인트 소경각재의 휨강도를 감소시키는 요인이 된 것으로 판단된다.

(2) 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 품질 향상

1차년도에 핑거조인트 부재에 대한 휨 시험 결과 핑거조인트가 있는 소경각재의 휨강도가 핑거조인트가 없는 소경각재 휨강도의 50% 이하를 나타내어 핑거조인트에 대한 품질 향상의 필요성이 제기되었다. 이에 따라서 세부과제에서는 핑거조인트 부재의 휨강도를 향상시킬 수 있도록 핑거조인트 제조기술을 개선하였으며 개선된 기술을 낙엽송 소경각재에 적용하여 핑거

조인트 부재를 제작하고 이에 대한 휨시험을 실시하였다. 2차년도에 핑거조인트 부재를 제작하기 위하여 사용된 부재는 낙엽송 80mmx80mm 및 90mmx90mm 소경각재로서 총 26개의 시험편을 제작하였다. 2차년도의 낙엽송 핑거조인트 부재의 휨시험 결과를 1차년도의 낙엽송 핑거조인트 부재에 대한 휨시험 결과와 함께 그림 B2-34 및 B2-35에 수록하였다. 그림 B2-34에서 보면 2차년도에 제작한 핑거조인트 부재의 탄성계수(MOE)가 1차년도에 시험을 실시하였던 핑거조인트 부재에 비하여 월등하게 향상되었음을 알 수 있다. 그림 B2-35에서 보면 휨강도(MOR)도 1차년도의 시험결과에 비하여 많이 향상되었음을 알 수 있다. 1차년도 및 2차년도에 실시하였던 낙엽송 핑거조인트 소경각재에 대한 휨 시험의 결과를 요약하면 표 B2-8과 같다.

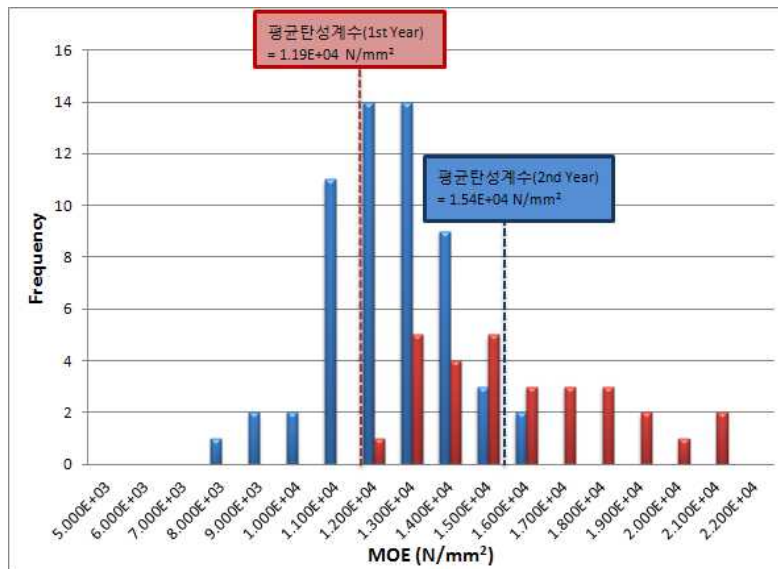


그림 B2-34 낙엽송 핑거조인트 부재의 휨탄성계수(MOE) 향상

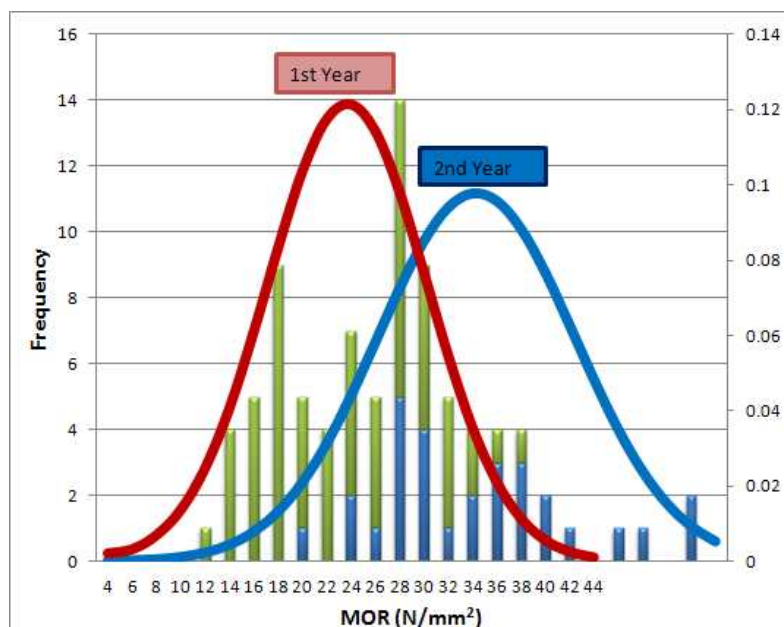


그림 B2-35 낙엽송 핑거조인트 부재의 휨강도(MOR) 성능 향상

표 B2-8 낙엽송 핑거조인트 소경각재의 휨 시험 결과

년차	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	5% 하한치 (N/mm ²)	기준허용휨응력 (N/mm ²)
1년차(개선 전)	90x90 100x100	2.7	11.9	22.7	11.9	5.7
2년차(개선 후)	80x80 90x90	2.7	15.4	37.3	23.9	11.4

표 B2-8에서 보면 1차년도에 비하여 잣나무 핑거조인트 소경각재의 휨탄성계수 및 휨강도가 매우 향상되었음을 알 수 있다. 1차년도의 측정값을 기준으로 하였을 경우에 MOE는 약 30%가 증가하였고 MOR은 약 64%가 증가하였다. 표 B2-5의 낙엽송 소경각재 휨시험 결과와 비교해보면 1차년도의 핑거조인트 소경각재 휨시험 결과는 핑거조인트가 없는 소경각재 휨강도의 약 48% 정도를 나타내었으나 2차년도의 시험결과는 약 80% 정도를 나타내었다. 핑거조인트가 없는 부재의 휨 강도의 약 80% 정도에 해당하는 값은 35mm 두께의 핑거조인트 층재에 대해서 일반적으로 적용되는 기준과 거의 비슷한 수준으로서 이번에 개선된 핑거조인트 제조기술이 매우 효율적이라는 사실을 알 수 있다.

(3) 잣나무 다중접착접합 부재의 강도 성능

(가) 잣나무 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도

2차년도에 시험을 실시한 잣나무 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도 시험 결과를 1차년도에 낙엽송 및 편백 소경각재의 압축시험 결과와 함께 표 B2-9에 수록하였다.

표 B2-9 다중접착접합 기둥 부재의 압축시험 결과

수종	기호	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	비례한도 응력 (MPa)	탄성계수 (GPa)	압축강도 (MPa)
낙엽송	L80D2	160x160	2.5	24.3	9.4	35.4
	L90D2	180x180	2.5	23.7	8.4	34.5
	L80T3 ⁽¹⁾	240x240	2.5	23.5	8.1	34.1
	L80T3E	240x240	2.5	22.0	7.8	33.8
편백	C80D2	160x160	2.5	27.6	9.4	34.3
	C90D2	180x180	2.5	26.4	8.4	34.6
	C80T3 ⁽¹⁾	240x240	2.5	25.1	8.9	34.1
	C80T3E	240x240	2.5	24.9	8.2	33.6
잣나무	S90D2	180x180	3.0	15.6	7.5	26.0
	S90T3	270x270	3.0	16.8	9.6	24.3
	S90T3R	270x270	3.0	11.0	7.3	22.0

주 ⁽¹⁾ 240mmx240mm 단면의 낙엽송과 편백 다중접착접합 기둥 부재는 압축강도 시험기의 최대하중인 200톤의 하중에서도 파괴가 발생하지 않았다.

잣나무 소경각재에 대한 압축 시험 결과를 보면 탄성계수 및 압축강도가 각각 17.1Gpa 및 31.0MPa를 나타내었다. 표 B2-9의 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도 시험 결과를 소경각재의 압축강도와 비교해 보면 탄성계수와 압축강도 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 시험결과는 다중접착접합 기둥 부재의 파괴 형태와 매우 유사한 관계가 있는 것으로 판단된다. 소경각재 기둥은 압축시험을 실시할 때에 좌굴이 발생하지 않도록 4면을 모두 500mm 간격으로 측면 지지하면서 압축시험을 실시하였기 때문에 소경각재의 압축강도는 좌굴의 요소는 배제되고 결점의 영향만이 고려된 값이다. 그러나 다중접착접합 기둥 부재의 경우에는 측면을 지지하지 않고 자유롭게 좌굴이 발생할 수 있도록 한 상태에서 시험을 실시하였기 때문에 목재 자체의 결점의 영향과 함께 좌굴의 영향까지 포함되어 있는 것이 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도이다. 따라서 결점의 영향만 포함된 소경각재의 압축강도보다 좌굴의 영향까지 함께 포함된 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도가 더 낮을 것으로 예상할 수 있다.

(나) 압축하중 하에서 잣나무 다중접착접합 기둥 부재의 파괴

압축하중 하에서 잣나무 다중접착접합 기둥 부재의 파괴 형태는 그림 B2-36 및 B2-37에서 보는 바와 같다. 잣나무의 경우에는 모인 응이가 많기 때문에 주로 모인 응이 주변에서 압축 파괴가 시작되었으며 180mmx180mm 부재의 경우에는 그림 B2-36과 같이 기둥의 길이 방향을 따른 갈라짐이 나타났다. 그러나 단면치수가 큰 270mmx270mm 부재의 경우에는 기둥의 길이를 따른 갈라짐은 관찰되지 않았고 모인 응이주변에서의 압축파괴가 파괴의 주된 형태였다.



그림 B2-36 180mmx180mm 부재에서 모인 용이 주변에서의 압축과괴 후
기둥의 길이방향으로 갈라짐



그림 B2-37 모인 용이 주변에서의 압축과괴

(다) 잣나무 다중접착접합 보 부재의 휨 강도

잣나무 다중접착접합 보 부재의 휨 강도 시험 결과는 표 B2-10과 같다. 앞의 표 B2-7의 잣나무 소경각재에 대한 휨 시험 결과를 보면 MOE 및 MOR의 평균값이 각각 10.3GPa 및 42.9MPa을 나타내었으며 잣나무 핑거조인트 소경각재의 평균 MOE 및 MOR은 각각 7.5GPa 및 27.2MPa을 나타내었다. 표 B2-10의 다중접착접합 보 부재의 휨 강도 시험 결과를 보면 MOE와 MOR 모두 부재 치수가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

표 B2-10 잣나무 다중접착접합 보 부재의 휨 시험 결과

수종	기호	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
잣나무	P90D2	180x180	3.6	14.9	40.4
	P90D3	180x270	3.6	12.7	33.3
	P90D4	180x360	3.6	9.3	23.8
	P90D5	180x450	3.6	4.7	19.9
	P90T3	270x270	3.6	11.6	30.7
	P90T3E	270x270	3.6	9.8	29.0
	P90T4E	270x360	3.6	9.3	21.3
	P90T5E	270x450	3.6	5.9	17.1

표 B2-10의 휨시험 결과를 각 부재 치수별로 소경각재의 평균 휨강도 및 핑거조인트 소경각재의 평균 휨강도와 함께 비교한 것은 그림 B2-38과 같다.

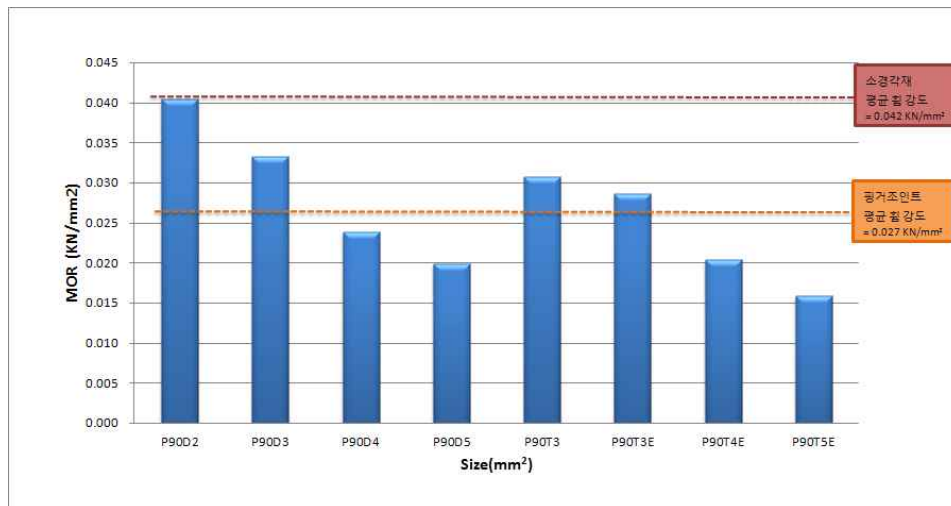


그림 B2-38 잣나무 다중접착접합 휨부재의 치수별 휨강도

그림 B2-38에서 보면 다중접착접합부재의 휨강도는 보의 높이가 증가할수록 감소하였으며 이들 중 가장 높은 휨강도를 나타내었던 P90D2 부재의 휨강도가 잣나무 소경각재의 평균 휨강도와 비슷한 값을 나타내었으며 핑거조인트 소경각재의 평균 휨강도는 이들의 중간 정도의 값을 나타내었다.

(라) 휨 하중 하에서 잣나무 다중접착접합 부재의 파괴

휨 하중 하에서 잣나무 다중접착접합 보 부재의 파괴 형태는 그림 B2-39 ~ B2-41까지에서 보는 바와 같다. 그림 B2-39는 가장 아래층 소경각재의 용이로부터 파괴가 시작되어 섬유 경사를 따라서 진행되는 형태를 보여주고 있다. 그림 B2-40은 중간 접착층 또는 중간층의 소경각재에서 진행되는 전단파괴를 나타내고 있다.



그림 B2-39 하단 용이로부터의 파괴 진행



그림 B2-40 중간 접착층의 전단 파괴



그림 B2-41 수평 및 수직 접착층의 파괴

그림 B2-41은 접착층의 분리를 나타내며 수평접착층 또는 수직접착층이 분리되는 파괴 형태를 나타내었다. 1차년도와 2차년도의 다중접착접합부재에 대한 휨 시험에서는 주로 아래층 소경각재 내의 핑거조인트에서 파괴가 시작되는 형태를 나타내었으나 2차년도의 다중접착접합부재 휨 시험에서는 핑거조인트의 파괴는 관찰되지 않았다. 이는 핑거조인트의 성능이 그만큼 개선되었음을 나타내는 것으로 다중접착접합부재의 제조 시에 두꺼운 소경각재의 길이이음으로 핑거조인트가 충분히 사용될 수 있음을 나타내고 있다.

(4) 잣나무 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 설계기술

(가) 잣나무 소경각재의 압축시험 결과로부터 잣나무 다중접착접합 기둥 부재의 허용응력 산출

다중접착접합부재를 제조하는 원자재인 소경각재에 대하여 많은 수의 실험재 압축시험을 실시하는 이유는 시험결과를 분석하여 임의의 다양한 단면 치수를 갖는 다중접착접합 기둥 부재의 허용응력 또는 허용하중을 예측하기 위한 것이다. 먼저 소경각재의 압축강도 시험 결과로부터 구한 압축강도에 대하여 2MPa 단위로 구간을 나누어서 각 구간에 속한 압축강도를 갖는 시험편의 수를 세어서 그림 B2-42와 같은 도수분포 막대그래프를 그린다. 이 도수분포 막대그래프의 분포 모양이 다양한 분포곡선과 유사할 수 있으나 이 연구에서 정규분포곡선으로 가정하여 도수분포 막대그래프에 해당하는 정규분포곡선을 구하고 이 정규분포곡선으로부터 5% 하한값을 식 (B2-11)에 의하여 계산하였다.

$$\sigma_{5\%} = \sigma_c - 1.645 \times sd \quad \text{----- (B2-11)}$$

여기서, $\sigma_{5\%}$: 압축강도의 5% 하한값(MPa)

σ_c : 압축강도의 평균값(MPa)

sd: 압축강도의 표준편차(MPa)

식 (B2-11)에 의하여 구한 5% 하한값에 안전을 고려한 여러 가지 조정계수를 곱하여 허용응력을 계산하게 된다. 우리나라에서는 아직까지 5% 하한값으로부터 허용응력을 산출할 수 있는 표준화된 방법이 정하여져 있지 않기 때문에 이 연구에서는 ASTM D 2915(Standard practise for evaluating allowable properties for grades of structural lumber)의 표 5를 적용하여 허용응력을 산출하였다. ASTM D 2915에 따르면 강도시험 결과로부터 허용응력을 산출하기 위해서는 안전계수와 함께 10년간의 누적된 하중작용기간(정상하중) 효과를 고려하여 표 B2-11과 같은 계수를 적용하도록 하고 있다.

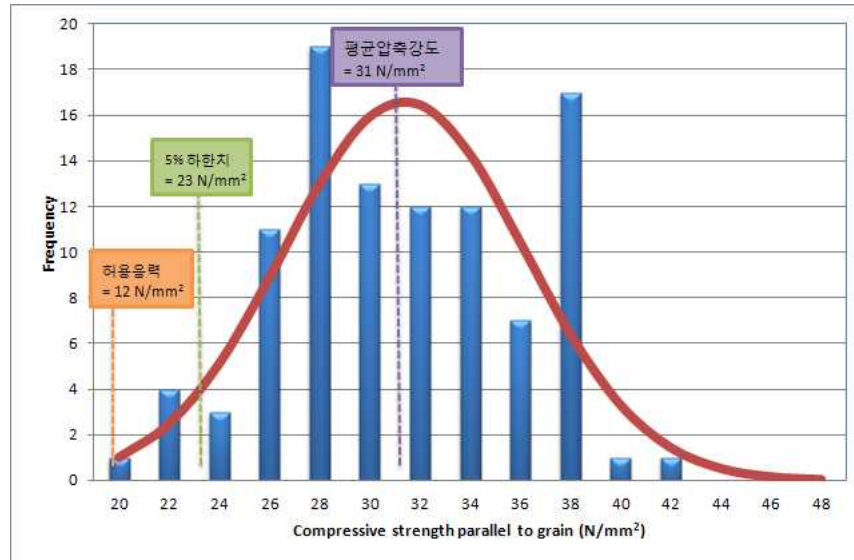


그림 B2-42 잣나무 소경각재의 압축강도로부터 허용응력 산출

잣나무 소경각재의 압축시험에서 얻은 압축탄성계수의 분포는 그림 B2-43과 같으며 허용탄성계수를 계산하기 위하여 5% 하한치를 적용하는 대신에 평균값을 사용하며 표 B2-11의 계수도 탄성계수에 대해서는 1을 적용한다. 따라서 잣나무 소경각재에 대한 기준허용압축탄성계수는 그림 B2-43으로부터 17.1GPa임을 알 수 있다.

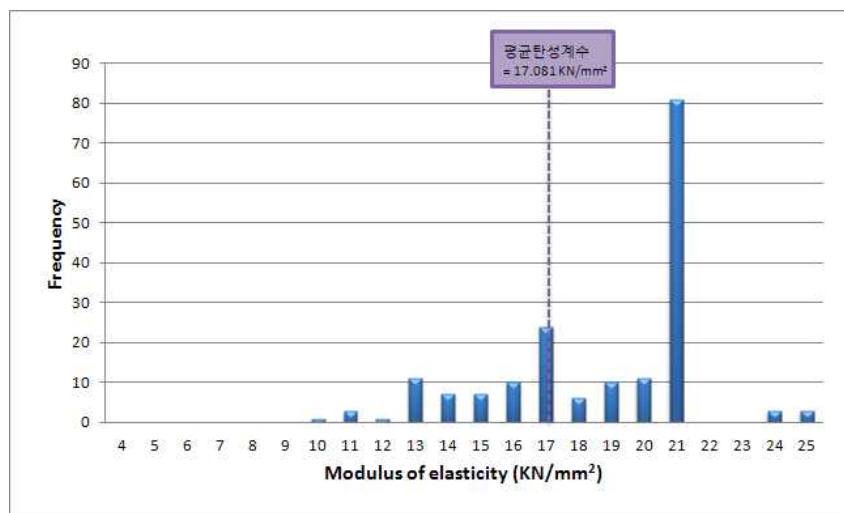


그림 B2-43 잣나무 소경각재의 압축탄성계수

표 B2-11 ASTM D 2915에 따라서 허용응력 산출을 위하여 적용되는 계수

강도 성질	허용응력 산출을 위한 적용 계수
탄성계수	1
휨 강도(MOR)	1/2.1
인장강도	1/2.1
섬유방향 압축강도	1/1.9
전단강도	1/2.1
섬유 직각방향 압축강도	1/1.67

표 B2-11에 따라서 이 연구에서는 잣나무 소경각재 압축강도의 5% 하한값에 (1/1.9)을 곱하여 그림 B2-42에 주어진 바와 같은 12.0MPa의 기준허용압축응력을 산출하였다.

잣나무 다중접착접합 기둥 부재의 경우에는 12.0MPa의 기준허용압축응력을 사용하여 구조설계를 할 수 있으며 기둥 부재의 치수가 정해지면 해당 부재에 대한 기둥안정계수를 계산하여 기준허용압축응력에 곱하면 구조설계에 사용할 수 있는 설계허용압축응력을 구할 수 있다. 이렇게 산출된 설계허용압축응력에 부재의 단면적을 곱하면 해당 부재에 대한 허용하중의 크기를 구할 수 있다. 다중접착접합 기둥 부재가 지지할 수 있는 최대 하중의 크기를 예측하기 위하여 소경각재의 압축강도 평균값에 이 연구에서 사용된 다중접착접합 기둥 부재들에 대한 기둥안정계수를 곱하여 각 종류의 기둥 부재들에 대한 예측 최대하중을 계산하여 실제 압축강도 시험결과와 비교하였다. 잣나무 다중접착접합 기둥 부재에 대한 허용하중, 예측 최대하중 및 실제 최대하중의 비교는 그림 B2-44와 같다.

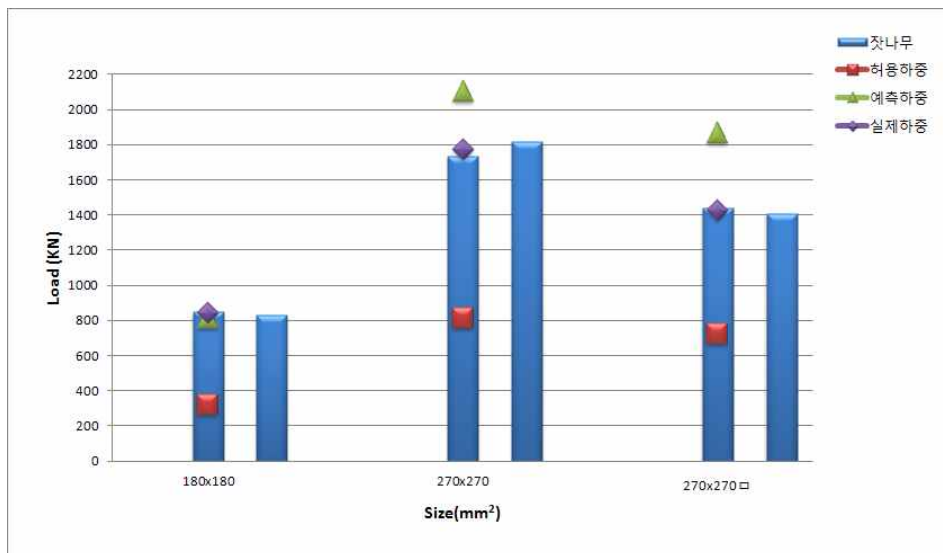


그림 B2-44 잣나무 다중접착접합 기둥 부재에 대한 예측 하중과 실제하중의 비교

그림 B2-44에서 보는 바와 같이 각각의 기둥 부재들에 대한 허용하중의 크기는 실제 최대 하중의 절반 이하로서 매우 낮았으며 이는 허용응력을 산출하는 과정에서 안전을 위하여 5% 하한값을 구하고 여기에 다시 조정계수를 적용하였기 때문이다. 소경각재의 압축강도 평균값 으로부터 산출한 예측 최대하중이 1차년도에 낙엽송과 편백의 경우에는 실제 최대하중보다 낮 게 나왔으나 잣나무의 경우에는 오히려 실제 최대하중보다 더 높은 값을 나타내었다. 잣나무 의 경우에는 각각의 소경각재마다 많은 양의 용이도가 포함되어 있기 때문에 이들로부터 다중접 착접합부재를 제조한 경우에는 기둥의 단면상에 용이 등의 결점이 나타날 확률이 그만큼 높아 진다. 따라서 단순히 이론적으로 계산된 값보다 실제로 더 낮은 강도를 나타낸 것으로 생각된 다.

기둥안정계수의 계산은 일반적인 구조설계 공식을 사용하여 할 수 있으며 예를 들어서 이 연구에서 사용되었던 270mmx270mm 단면에 길이 3.0m의 잣나무 다중접착접합 기둥 부재에 대한 기둥안정계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{기준허용압축응력}(F_c) = 12.0\text{MPa}$$

$$\text{탄성계수}(E) = 17.1\text{GPa}$$

$$\text{나비}(b) = 270\text{mm}$$

$$\text{길이}(L) = 3,000\text{mm}$$

$$\text{하중계수}(C_D) = 1(\text{바닥활하중으로 가정})$$

$$\text{습윤계수}(C_M) = \text{온도계수}(C_t) = \text{인사이징계수}(C_i) = 1$$

$$\text{좌굴길이계수}(K_c) = 1(\text{상하부 편접합으로 가정})$$

$$K_{cE} = 0.3(\text{육안등급 구조재})$$

$$c = 0.8(\text{제재목})$$

$$\text{기둥의 유효길이}(L_e) = L = 3,000\text{mm}$$

$$\text{기둥의 세장비}(L_e/d) = 3,000/270 = 11.1$$

$$F_c^* = F_c = 12.0\text{MPa}$$

$$F_{cE} = \frac{K_{cE}E'}{(L_e/d)^2} = \frac{0.3 \times 17.1 \times 10^3 \text{N/mm}^2}{(11.1)^2} = 41.636 \text{N/mm}^2 = 41.636 \text{MPa}$$

$$\frac{1 + (F_{cE}/F_c^*)}{2c} = \frac{1 + (41.636/12.0)}{2 \times 0.8} = 2.794$$

$$\text{기둥안정계수}(C_P) = 2.794 - \sqrt{2.794^2 - \frac{41.636/12.0}{0.8}} = 0.931$$

이 연구에서 사용된 잣나무 다중접착접합 기둥 부재들에 대한 기둥안정계수를 계산한 결과 는 표 B2-12와 같다.

표 B2-12 잣나무 다중접착접합 기둥 부재들에 대한 기둥안정계수(C_p)

수종	기호	단면치수(mm \times mm)	길이(m)	기둥안정계수(C_p)
잣나무	P90D2	180 \times 180	3.0	0.816
	P90T3	270 \times 270	3.0	0.931
	P90T3E	270 \times 270	3.0	0.931

(나) 잣나무 소경각재의 휨 시험 결과로부터 잣나무 다중접착접합 보 부재의 허용응력 산출

잣나무 소경각재의 휨 시험 결과로부터 구한 휨 강도에 대하여 5MPa 단위로 구간을 나누어서 각 구간에 속한 휨 강도를 갖는 시험편의 수를 세어서 도수분포 막대그래프를 그린다. 이 도수분포 막대그래프의 분포 모양이 다양한 분포곡선과 유사할 수 있으나 이 연구에서 정규분포곡선으로 가정하여 도수분포 막대그래프에 해당하는 정규분포곡선을 구하고 이 정규분포곡선으로부터 5% 하한값을 식 (B2-11)에 의하여 계산하였다.

식 (B2-11)에 의하여 구한 5% 하한값에 표 B2-11에 따라서 (1/2.1)의 조정계수를 곱하여 기준허용휨응력을 구하였다. 이 연구에서는 잣나무 소경각재 휨 강도의 5% 하한값에 (1/2.1)을 곱하여 그림 B2-45에 주어진 바와 같은 13.4MPa의 기준허용 휨응력을 산출하였다. 잣나무 소경각재의 휨시험에서 얻은 휨탄성계수의 분포는 그림 B2-46과 같으며 허용탄성계수를 계산하기 위하여 5% 하한치를 적용하는 대신에 평균값을 사용하며 표 B2-11의 계수도 탄성계수에 대해서는 1을 적용한다. 따라서 잣나무 소경각재에 대한 기준허용휨탄성계수는 그림 B2-46으로부터 10.3GPa임을 알 수 있다.

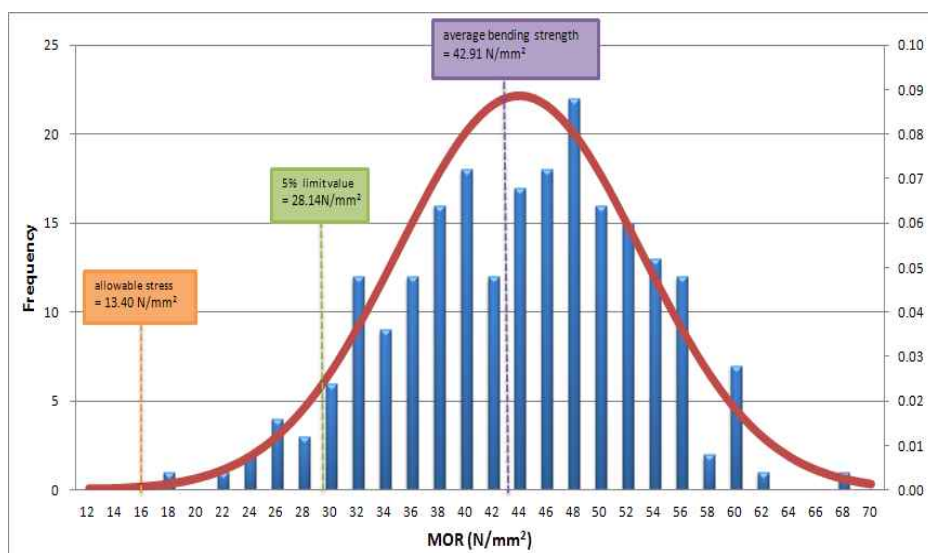


그림 B2-45 잣나무 소경각재의 휨 강도로부터 허용응력 산출

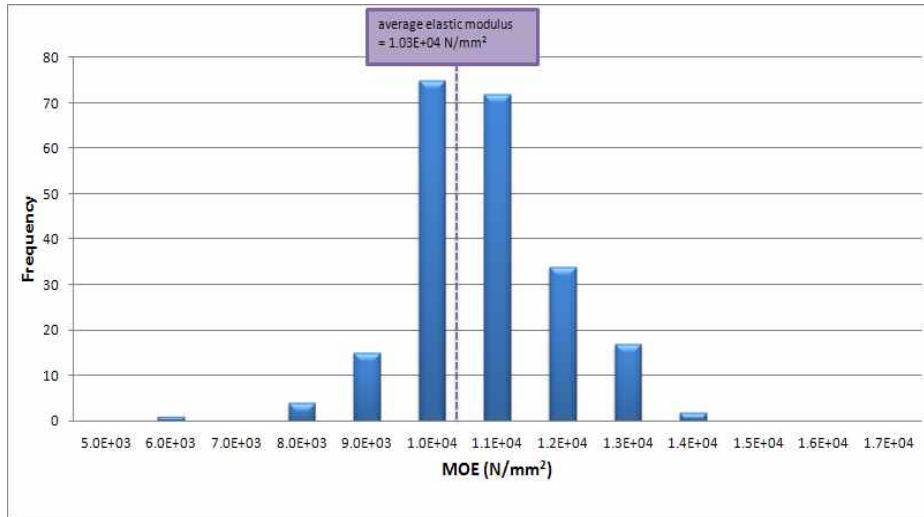


그림 B2-46 잣나무 소경각재의 휨탄성계수

다중접착접합 보 부재는 길이가 길기 때문에 핑거조인트로 길이이음을 한 핑거조인트 소경각재가 사용되었다. 따라서 핑거조인트가 없는 단일부재 소경각재의 휨 시험 결과로부터 허용응력을 산출하기 보다는 핑거조인트 소경각재의 휨 시험 결과로부터 허용응력을 산출하는 것이 더 타당할 것으로 생각된다. 이 연구에서 실시하였던 잣나무 핑거조인트 소경각재에 대한 휨 시험 결과에 대해서도 앞에서 소경각재의 허용응력 산출을 위하여 적용하였던 것과 동일한 방법을 적용하여 허용응력을 산출하면 그림 B2-47과 같이 8.04MPa의 허용응력을 얻을 수 있다.

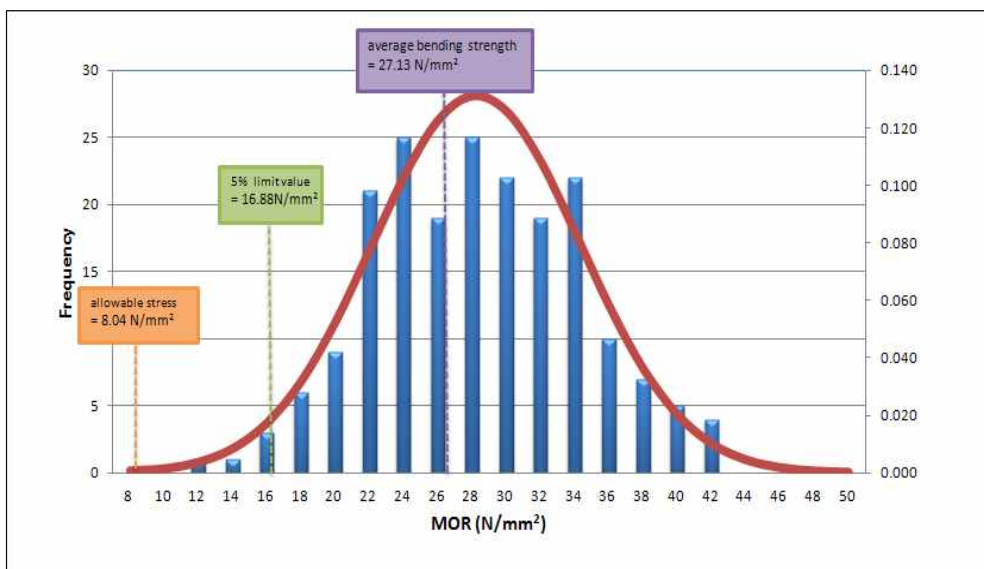


그림 B2-47 잣나무 핑거조인트 소경각재의 휨 강도로부터 허용응력 산출

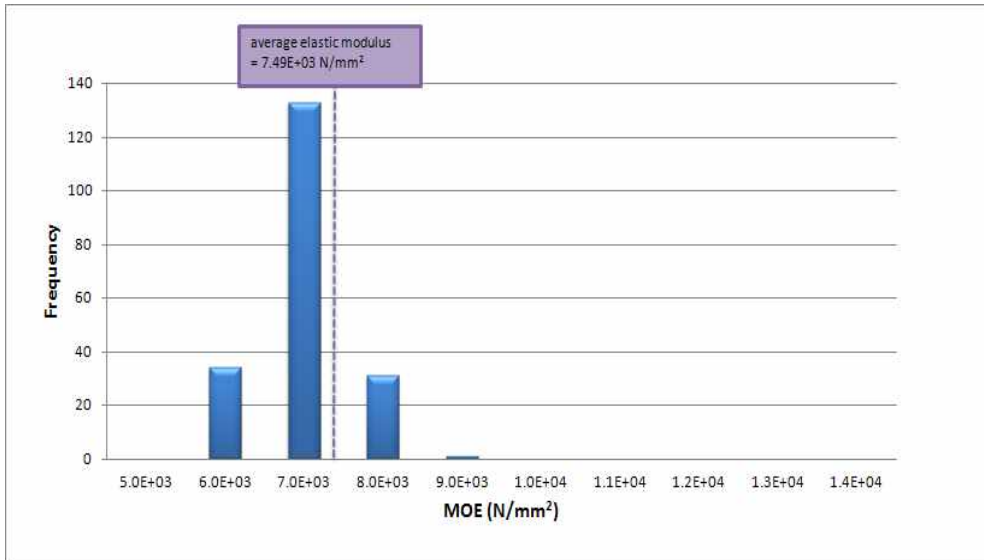


그림 B2-48 잣나무 핑거조인트 소경각재의 휨탄성계수

잣나무 핑거조인트 소경각재의 휨시험에서 얻은 휨탄성계수의 분포는 그림 B2-48과 같으며 허용탄성계수를 계산하기 위하여 5% 하한치를 적용하는 대신에 평균값을 사용하며 표 B2-11의 계수도 탄성계수에 대해서는 1을 적용한다. 따라서 잣나무 핑거조인트 소경각재에 대한 기준허용휨탄성계수는 그림 B2-48로부터 7.49GPa임을 알 수 있다.

그림 B2-45와 B2-47을 비교하면 잣나무에서 핑거조인트 소경각재의 허용응력은 핑거조인트가 없는 단일부재 소경각재의 허용응력에 비하여 60% 정도의 값을 나타내고 있다. 따라서 핑거조인트가 들어간 잣나무 소경각재의 허용응력은 핑거조인트가 없는 잣나무 소경각재의 허용응력에 0.6의 계수를 곱하여 구할 수 있는 것으로 가정할 수 있다.

앞에서 산출한 잣나무 소경각재 및 핑거조인트 소경각재에 대한 허용응력을 이용하여 이 연구에서 휨 시험을 실시하였던 다양한 치수의 다중접착접합 보 부재에 대한 허용하중 및 예측 최대하중을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_b^i(N/mm^2) = \frac{P_{\max} L}{bh^2}$$

$$\text{따라서 } P_{\max} = \frac{F_b^i bh^2}{L} = \frac{F_b C_L bh^2}{L}$$

여기서, F_b : 기준허용휨응력(MPa)

C_L : 보안정계수

F_b^i : 설계허용휨응력(MPa)

보안정계수의 계산은 일반적인 구조설계 공식을 사용하여 할 수 있으며 예를 들어서 이 연구에서 사용되었던 180mmx360mm 단면에 길이 3.6m의 낙엽송 다중접착접합 보 부재가 1/3점

하중을 지지하는 경우에 대한 보안정계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{소경각재의 기준허용 휨응력}(F_b) = 8.04\text{MPa}$$

$$\text{휨탄성계수}(MOE) = 7.49\text{GPa}$$

$$\text{나비}(b) = 180\text{mm}$$

$$\text{높이}(d) = 360\text{mm}$$

$$\text{길이}(L_u) = 3,600\text{mm}$$

$$\text{하중계수}(C_D) = 1(\text{바닥활하중으로 가정})$$

$$\text{습윤계수}(C_M) = \text{온도계수}(C_t) = \text{인사이징계수}(C_i) = 1$$

$$\text{유효길이}(L_e) = 1.63(L_u) + 3d = 6,588\text{mm}$$

$$K_{bE} = 0.439(\text{육안등급 구조재})$$

$$\text{보의 세장비}(R_B) = \sqrt{\frac{L_e d}{b^2}} = \sqrt{\frac{6,588 \times 360}{180^2}} = 8.556$$

$$F_b^* = F_b = 8.04\text{MPa}$$

$$F_{bE} = \frac{K_{bE} E'}{(R_B)^2} = \frac{0.439 \times 7.49 \times 10^3 \text{N/mm}^2}{(8.556)^2} = 44.916 \text{N/mm}^2 = 44.916 \text{MPa}$$

$$\frac{1 + (F_{bE}/F_b^*)}{1.9} = \frac{1 + (44.916/8.04)}{1.9} = 3.467$$

$$\text{보안정계수}(C_L) = 3.467 - \sqrt{3.467^2 - \frac{44.916/8.04}{0.95}} = 0.989$$

이 연구에서 사용된 다중접착접합 보 부재들에 대한 보안정계수를 계산한 결과는 표 B2-13과 같다. 표 B2-13의 보안정계수를 적용하여 소경각재의 허용응력 및 MOR 그리고 핑거조인트 소경각재의 허용응력 및 MOR로부터 이 연구에서 휨시험을 실시하였던 다양한 치수의 다중접착접합부재들에 대한 허용하중, 예측 최대하중 및 실제 최대하중을 비교한 결과는 그림 B2-49와 같다.

표 B2-13 다중접착접합 보 부재들에 대한 보안정계수(C_L)

수종	기호	단면치수 (mmxmm)	길이 (m)	보안정계수 (C_L)
잣나무	P90D2	180x180	3.6	0.996
	P90D3	180x270	3.6	0.993
	P90D4	180x360	3.6	0.989
	P90D5	180x450	3.6	0.985
	P90T3	270x270	3.6	0.997
	P90T3E	270x270	3.6	0.997
	P90T4E	270x360	3.6	0.996
	P90T5E	270x450	3.6	0.994

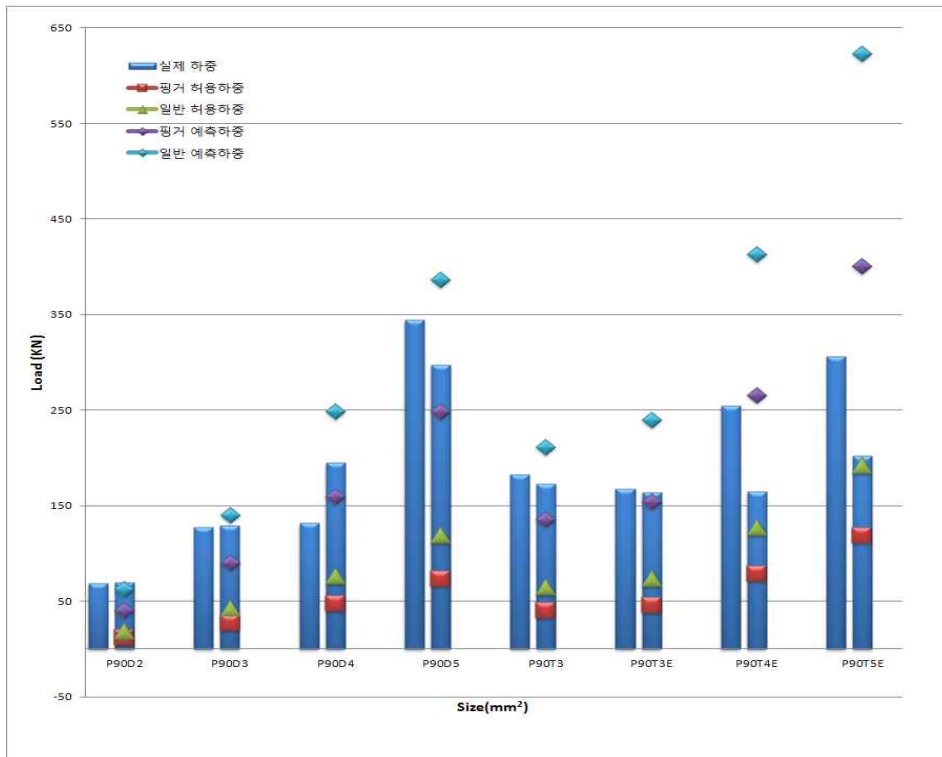


그림 B2-49 잣나무 다중접착접합 보 부재에 대한 예측 하중과 실제하중의 비교

그림 B2-49에서 보면 핑거조인트 소경각재의 허용응력으로부터 산출한 허용하중의 크기가 가장 낮았으며 다음으로 소경각재의 허용응력으로부터 산출한 허용하중 그리고 핑거조인트 소경각재의 MOR로부터 산출한 그림 B2-49의 막대그래프는 해당 부재에 대한 실제 휨강도 시험으로부터 측정된 MOR을 나타낸다. 그림 B2-49에서 보면 핑거조인트 소경각재의 MOR로부터 계산한 예측 최대하중의 크기가 P90T4E 및 P90T5E 부재를 제외하고 실제 시험을 통하여

측정된 최대하중의 크기와 비슷하거나 약간 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. P90T4E 및 P90T5E 부재는 중간이 비어있는 부재로서 중간에 비어있는 부분 때문에 다른 부재들과는 다른 거동을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 다중접착접합 보 부재의 구조설계를 위하여 사용되는 허용응력은 소경각재보다는 핑거조인트 소경각재의 허용응력을 사용하는 것이 더 합리적이고 안전할 것으로 생각되며 해당 부재를 보로 사용하는 경우에 그 부재가 견딜 수 있을 것으로 예상되는 최대하중의 크기를 예측하기 위해서도 소경각재의 MOR보다는 핑거조인트 소경각재의 MOR를 적용하는 것이 더 정확할 것으로 판단된다.

(5) 보강다중접착접합부재의 강도

수심 주변의 유령목이 다량 포함되어 있는 다중접착접합부재의 특성상 강도 성능이 좀 약하며 이로 인하여 부재의 단면치수가 구조용 집성재에 비하여 커져야 하는 문제점을 안고 있다. 이러한 취약점을 보강하기 위하여 세부과제에서 다중접착접합 휨부재를 제조할 때에 아래 쪽 소경각재 부분에 옹이 등의 결점이 나타나는 부분의 좌우측에 지름 10mm에 길이가 160mm인 래그나사못을 박아서 보강하는 방법을 적용하였다. 이와 같이 제조된 보강다중접착접합 휨부재의 보강효과를 검증하기 위하여 낙엽송을 사용한 보강다중접착접합부재의 휨시험을 실시하였다. 이러한 보강은 270mmx270mm 부재 한 가지에만 적용하였으며 그 결과를 보강하지 않은 다중접착접합부재의 휨시험 결과와 함께 표 B2-14에 수록하였다.

표 B2-14 보강다중접착접합부재의 휨성능

수종	기호	단면치수 (mmxmm)	길이 (mm)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
낙엽송 (보강하지 않음)	L90T3	270x270	3,000	9.485	30.0
낙엽송 (보강)	L90T3F ¹⁾	270x270	3,000	8.784	28.0

주 1) 기호 중에 F는 보강부재임을 나타내는 뜻임

표 B2-14를 보면 래그나사못으로 보강한 다중접착접합 휨부재나 보강하지 않은 휨부재나 거의 값의 차이가 없으며 오히려 보강한 부재에서 휨강도가 다소 낮게 나타나는 경향이 있음을 알 수 있다. 그림 B2-50에서 볼 수 있는 바와 같이 일부 시험편의 경우에는 래그나사못을 박은 부분에서 파괴가 진행됨으로써 래그나사못이 결점으로 작용하는 경우도 있음을 알 수 있다. 따라서 래그나사못을 박아서 보강하는 방법은 예상보다 좋은 효과를 나타내지 못했으며 이러한 방법으로는 다중접착접합부재의 휨강도를 보강하는 효과를 거둘 수 없음을 알 수 있다.



그림 B2-50 래그나사못으로부터의 파괴 진행

(6) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 전단성능

(가) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 항복하중

목구조에 사용되는 접합부에 대한 전단시험을 실시하면 그림 B2-51과 같은 하중-변위선도를 얻을 수 있다. 그림 B2-51에서 접합부의 하중-변위선도는 3개의 직선구간으로 나타낼 수 있으며 이중 첫 번째 직선구간이 접합부의 초기 강성을 나타내며 2번째 직선구간이 초기 강성이 사라진 후 접합부의 항복(yielding)현상(하중의 증가에 비하여 변형이 과다하게 나타나는 현상)을 나타낸다. 이러한 항복이 시작되는 지점을 항복점(yield point)이라고 하며 접합부의 설계는 이 항복점을 기준으로 이루어진다. 일반적으로 금속류나 플라스틱과 같이 합성물질로서 균일한 성질을 갖는 제품의 경우에는 이 항복점이 뚜렷하게 나타나지만 목재의 경우에는 이 항복점이 뚜렷하게 나타나지 않는 특성을 지니고 있다. 일반적으로 금속류나 플라스틱과 같이 항복점이 뚜렷한 재료의 경우에는 하중 하에서 초기 강성이 나타나다가 초기 강성이 거의 끝나는 부분에서 하중-변위선도가 급격하게 꺾여서 거의 수평상태로 상당부분 하중의 증가없이 변형만 증가되는 항복현상을 나타낸다. 이러한 재료의 경우에는 하중-변형선도에서 수평부분이 시작되는 지점을 항복점으로 선택할 수 있으며 그래프의 모양으로부터 쉽게 항복점을 찾을 수 있다. 그러나 목재에서 얻을 수 있는 그림 B2-51과 같은 하중-변위선도에서는 수평부분이 없기 때문에 항복점이 명확하지 않다. 이러한 경우에 그림 B2-51에서 보는 바와 같이 초기 강성과 같은 기울기의 직선을 그리고 이 직선을 일정한 변형(또는 변위)만큼 수평 이동시켜서 하중-변위선도와 만나는 지점을 항복점으로 찾는 방법을 적용한다. 이러한 항복점을 유사항복점(off-set yield point)라고 하며 항복점이 명확하게 정의되지 않는 재료에 대하여 적용할 수 있다. 접합부의 경우에는 사용되는 조임쇠의 지름의 5%에 해당하는 변위(또는 변형)를 초기 강성을 나타내는 직선의 수평 이동 거리로 적용하고 있다.

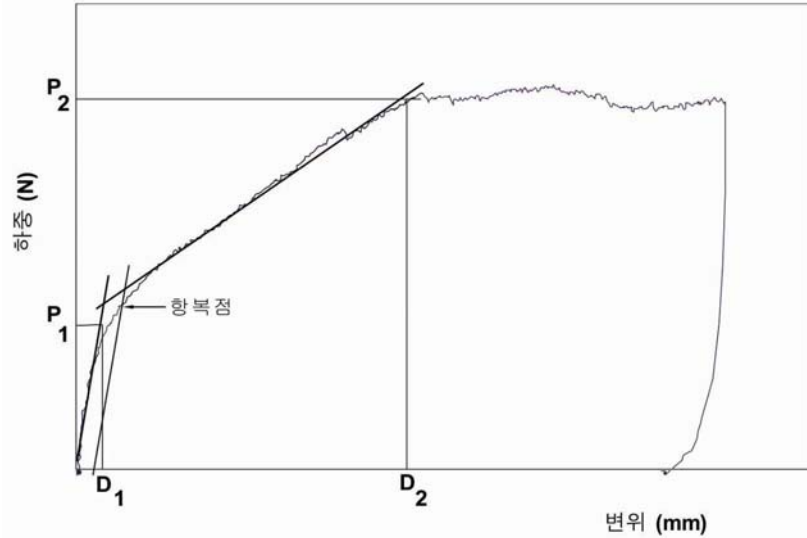


그림 B2-51 접합부의 하중-변위선도와 항복점의 산출

그림 B2-51의 방법을 적용하여 이 연구의 세부과제에서 개발된 여러 가지 접합부에 대한 전단시험 결과는 표 B2-15와 같다.

표 B2-15 다중접착접합 기둥-보 접합부의 전단 성능

기능	고정방법	접합철물	접합부 기호	1차 접합계수 (kN/mm)	2차 접합계수 (kN/mm)	항복하중 (kN)
인장형	철물고정	파이프	PI-C-N-S	7.811	1.24	45.88
			PI-C-T-S	9.04	1.68	61.83
		볼트	BN-C-T-S	6.26	2.15	32.88
	조임고정	래그볼트	LB-F-T-S	10.37	3.50	55.84
	접착고정	철근	SB-G-T-S	17.35	3.14	62.25
전단형	철물고정	십자철판	SC-C-N-S	12.326	4.20	82.54
			SC-C-T-S	14.16	3.96	88.68
		안장철판	SH-C-N-S	6.86	2.96	46.00
		받이철판	SE-C-N-S	5.81	3.67	48.04
	장부맞춤	없음	WC-N-T-S	3.86	1.55	62.74

표 B2-15에서 보면 항복하중은 십자철판 접합부가 가장 높으며 볼트-장부접합부가 가장 낮은 것을 알 수 있다. 항복하중의 크기로 보면 십자철판 접합부가 가장 높고 다음으로 철근-

장부접합부, 파이프-장부접합부 및 전통장부접합부가 비슷하였으며 다음으로 래그볼트-장부접합부, 파이프접합부 및 볼트-장부접합부의 순서로 나타났다. 초기강성을 기준으로 보면 철근-장부접합부가 가장 높았으며 다음으로 십자철판접합부 그리고 래그볼트-장부접합부, 파이프-장부접합부, 파이프접합부 등의 순으로 나타났으며 볼트-장부접합부, 안장철판접합부 및 반이철판접합부의 초기강성이 낮았으며 전통장부접합부가 가장 낮은 초기강성을 나타냈다. 전통장부접합부는 항복하중은 비교적 높게 나타났으나 초기강성뿐만 아니라 2차강성도 가장 낮은 값을 나타내어 전단하중 하에서 많은 변형이 발생함을 알 수 있다.

앞에서 한옥구조에 대한 이론적인 분석을 통하여 하나의 기둥-보 접합부에 작용할 수 있는 최대전단하중의 크기가 47kN으로 산출되었으므로 표 B2-15에서 항복하중의 크기가 47kN 이상인 PI-C-T-S, LB-F-T-S, SB-G-T-S, SC-C-N-S, SC-C-T-S, WC-N-T-S 등의 접합부는 한옥구조의 기둥-보 접합부로 충분히 사용될 수 있으며 나머지 PI-C-N-S, BN-C-T-S, SH-C-N-S 및 SE-C-N-S 접합부 등은 별도의 보강방법을 적용하여 더 높은 항복하중을 나타낼 수 있어야 사용이 가능할 것으로 판단된다. 항복하중만을 기준으로 하였을 때에는 이와 같은 결론을 얻을 수 있으나 허용변형의 크기에 따라서 이들 중 WC-N-T-S와 같이 많은 변형이 발생하는 일부 접합부는 사용이 제한될 수도 있으나 아직까지 한옥에 사용되는 기둥-보 접합부의 허용변형에 대해서는 명확한 정의가 내려진 것이 없다.

(나) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 파괴 형태

다중접착접합부재 기둥-보 접합부에 대한 전단시험은 그림 B2-52와 같이 실시되었다. 상부에서 가해지는 하중이 양끝의 접합부에 각각 절반씩 전달되도록 하였으므로 결과의 분석 시에 한쪽 접합에는 작용하중의 절반이 작용하는 것으로 가정하여 계산을 실시하였다.



(a) 하중을 가하기 전



(b) 접합부의 변형 및 파괴

그림 B2-52 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 전단시험

PI-C-N-S 접합부의 파괴형태는 그림 B2-53과 같으며 파이프만 가지고 전단하중을 지지하기 때문에 전단강도가 낮으며 변형이 많이 발생하였다. 접합부 내부에 삽입된 파이프는 하중

에 의하여 변형이 되면서 기둥에 고정을 위하여 삽입된 핀이나 볼트에 의하여 파이프가 끊어지는 파괴가 발생하였다.



그림 B2-53 PI-C-N-S 접합부의 파괴

PI-C-T-S 접합부의 파괴형태는 그림 B2-54와 같으며 파이프와 목재 장부가 함께 전단하중을 지지하기 때문에 전단강도가 비교적 높았으며 PI-C-N-S에 비해서는 변형이 적게 발생하였다. 접합부 내부에 삽입된 파이프는 하중에 의하여 변형이 되면서 기둥에 고정을 위하여 삽입된 핀이나 볼트에 의하여 파이프가 끊어지는 파괴가 발생하였다.



그림 B2-53 PI-C-T-S 접합부의 파괴

BN-C-T-S 접합부의 파괴 형태는 그림 B2-54 및 B2-55와 같다. 전단하중에 의하여 보가 늘리면서 장부가 기둥부재의 홈 부분에 중앙집중 압축하중을 가하고 이 압축하중이 중앙부에 집중되면서 기둥부재에 섬유직각방향 인장하중을 작용시켜서 기둥부재가 갈라지는 결함이 발생하였다. 장부의 밑면적이 너무 좁아서 장부를 통한 압축하중이 중앙부에 집중되고 이로 인하여 장부가 썪기와 같은 작용을 하여 기둥부재를 갈라지게 하는 섬유직각방향 인장하중을 추

래하였으며 장부의 위치가 기둥의 끝부분과 가깝고 목재가 섬유직각방향 인장하중에 대하여 매우 약하기 때문에 기둥부재의 파괴가 발생한 것으로 판단된다.



그림 B2-54 전단하중 하에서 BN-C-T-S 접합부의 변형 및 기둥의 파괴



그림 B2-55 BN-C-T-S 접합부 내부의 철물의 변형

LB-F-T-S 접합부의 파괴 형태는 그림 B2-56과 같다. 장부를 통한 압축하중에 의하여 기둥이 갈라지는 파괴형태를 나타내었으나 래그볼트 자체는 그렇게 많은 변형을 나타내지 않았다. SB-G-T-S 접합부의 파괴 형태는 그림 B2-57과 같으며 파괴형태는 LB-F-T-S 접합부와 비슷하였다. SB-G-T-S 접합부도 장부를 통한 압축하중에 의하여 기둥이 갈라지는 파괴 형태를 나타내었으며 삽입된 철근 자체는 그렇게 많은 변형을 나타내지 않았다.



그림 B2-56 LB-F-T-S 접합부의 파괴



그림 B2-57 SB-G-T-S 접합부의 파괴

SC-C-N-S 및 SC-C-T-S 접합부의 파괴형태는 각각 그림 B2-58 및 B2-59와 같다.



그림 B2-58 SC-C-N-S 접합부의 파괴

두 가지 접합부 모두 전단하중에 의하여 보가 눌리면서 철판이 같이 눌렸으며 장부가 있는 SC-C-T-S 접합부의 경우에는 장부의 밑면이 섬유직각방향 압축응력에 의하여 눌리는 변형을 나타내었다.



그림 B2-58 SC-C-T-S 접합부의 파괴



그림 2-59 SC-C-T-S 접합부에서 장부의 압축변형

SH-C-N-S 및 SE-C-N-S 접합부의 파괴형태는 각각 그림 B2-60 및 B2-61과 같다. 두 가지 접합부는 비슷한 형태의 파괴를 나타내었으며 보에 의하여 철판이 아래로 눌리면서 철판이 찌그러지고 철판이 부착되었던 기둥부재에 갈라짐이 발생하였다. 철판이 눌리면서 철판을 보에 고정하였던 핀들도 함께 변형되었으며 다른 접합부에 비하여 철판의 변형이 심하게 나타났다. WC-N-T-S 접합부의 파괴 형태는 그림 B2-62와 같다. 보를 통하여 전단하중이 작용하면서 보의 장부 밑면이 섬유직각방향 압축응력에 의하여 변형되면서 보와 장부와의 사이에 갈라짐이 발생하였다.



그림 B2-60 SH-C-N-S 접합부의 파괴



그림 B2-61 SE-C-N-S 접합부의 파괴



그림 B2-62 WC-N-T-S 접합부의 파괴

(7) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 회전모멘트 저항 성능

세부과제에서 개발된 다중접착접합부재 기둥-보 접합부에 대한 회전모멘트 저항 시험을 그림 B2-63과 같이 실시하였으며 그 시험결과로 그림 B2-64와 같은 하중-회전각선도를 얻을 수

있었다. 하중-회전각선도의 모양은 접합부의 종류와 강성 그리고 에너지 흡수 능력에 따라서 달라질 것이다. 그림 B2-64의 하중-회전각선도를 각 반복구간의 꼭지점들을 연결한 특성곡선(envelop curve)으로 전환하면 그림 B2-65와 같이 된다.



그림 B2-63 접합부의 회전모멘트 저항 시험

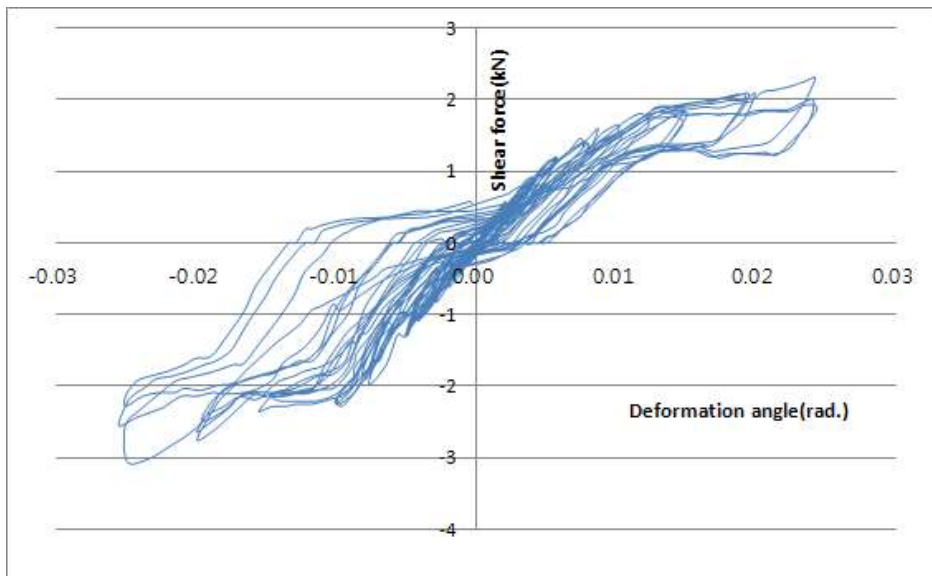


그림 B2-64 접합부의 하중-회전각선도

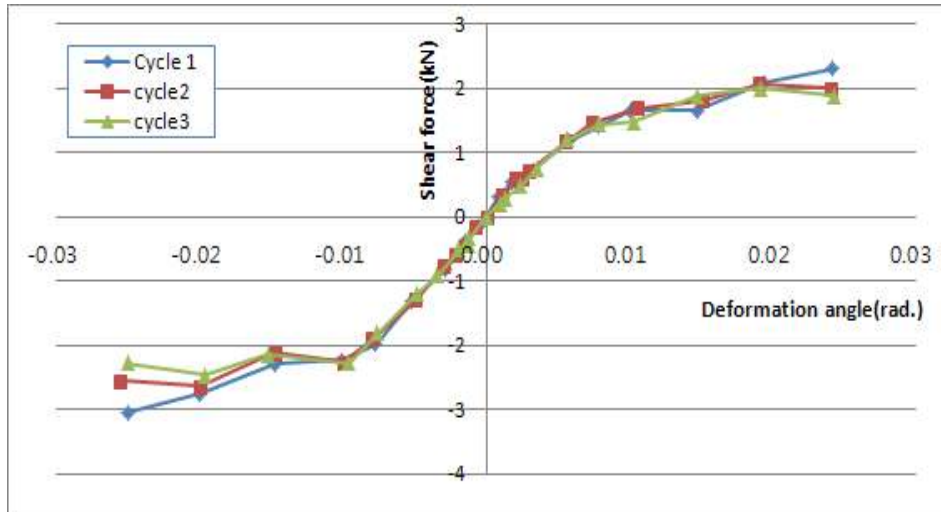


그림 B2-64 접합부의 1차, 2차 및 3차 특성곡선(envelop curve)

그림 B2-64에서 1차, 2차 및 3차의 특성곡선으로부터 각각 회전강성계수를 계산할 수 있으나 1차는 접합부가 안정되는 단계이며 3차는 다음 단계로 넘어가는 단계이기 때문에 2차 특성곡선으로부터 구한 회전강성계수를 해당 접합부의 회전강성계수로 하였다. 이 연구에서 개발된 접합부들 중에서 회전모멘트 저항 시험에 사용된 접합부의 종류별 회전강성계수 및 예상되는 허용수평하중은 표 B2-16과 같다.

표 B2-16 다중접착접합 기둥-보 접합부의 회전모멘트 저항 성능

기능	고정방법	접합철물	접합부 기호	회전강성계수 (kNm/degree)	허용수평하중 (kN)
인장형	철물고정	볼트	BN-C-N-M	3.92	1.96
	조임고정	래그볼트	LB-F-N-M	3.26	1.63
	접착고정	철근	SB-G-N-M	3.49	1.75
전단형	철물고정	십자철판	SC-C-T-M	3.01	1.51

표 B2-16에서 보면 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 회전강성계수 및 허용 수평하중의 크기가 매우 작음을 알 수 있다. 이 연구에 사용된 접합부들을 기둥-보 구조에서 양끝에 하나씩 2개를 사용한다고 하더라도 표 B2-16의 값들은 2.4m 높이의 일반적인 경골목조건축 전단벽의 수평하중 저항성능에 비하여 약 1/5~1/6 정도의 수준을 나타내고 있다. 이로 미루어 비록 다중접착접합부재 기둥-보 접합부가 전단하중의 지지에는 효율적이지만 수평하중에 의한 회전모멘트의 지지에는 그렇게 효율적이지 못하다는 사실을 알 수 있다. 다중접착접합부재뿐만 아니라 일반적인 목구조의 기둥-보 접합부는 우리나라의 전통적인 맞춤접합부든지 아니면 현대적인 철물접합부든지 접합부 자체만 가지고는 회전모멘트에 대한 저항력을 제대로 제공하

기가 쉽지 않다. 철물을 사용하면 철물의 강도는 높을지라도 결국 철물을 받치는 목재 부분의 강도 특히 섬유직각방향 압축이나 인장강도가 매우 약하기 때문에 이로 인하여 회전모멘트에 대한 높은 저항력을 제공하는 데는 한계가 있다.

그러므로 전 세계적으로 목구조 분야의 전문가들이 목구조 접합부의 강성과 강도 향상을 위하여 많은 연구를 하며 노력을 기울이고 있지만 여전히 목재 접합부만을 사용한 회전모멘트 저항성능에는 한계를 드러내고 있다. 따라서 우리나라의 한옥구조에서도 목구조 접합부만을 고집할 것이 아니라 목구조 접합부와 경골목조전단벽, 수직트러스 구조 또는 강철 케이블 등과의 복합구조를 사용하여 수평하중을 보다 효율적으로 지지할 수 있도록 복합구조에 대한 연구를 실시할 필요가 있다.

접합부의 회전모멘트 저항시험에서 접합부의 회전에 따른 목재 부재의 손상은 외형적으로는 그렇게 뚜렷하게 나타나지 않았으나 그림 B2-65에서 보는 바와 같이 접합부를 고정하는 철물이 회전모멘트에 의하여 변형되어 움직였음을 알 수 있다.



그림 B2-65 회전모멘트에 의한 접합부 고정핀의 변형

(8) 중공다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 전단성능

가운데가 비어있는 중공다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 전단시험 결과는 표 b2-16과 같다.

표 B2-16 중공다중접착접합 기둥-보 접합부의 전단 성능

기능	고정방법	접합철물	접합부 기호	1차 접합계수 (kN/mm)	2차 접합계수 (kN/mm)	항복하중 (kN)
인장형	조임고정	강관+볼트	TB-F-T-S	37.42	3.26	89.03

표 B2-16을 앞의 표 B2-15와 비교해 보면 TB-F-T-S 접합부가 높은 초기 강성 및 항복하중을 나타내었다. 특히 초기 강성은 다른 접합부들보다 거의 2배 이상 높은 값을 나타냄으로써 전단하중 하에서 변형이 매우 적게 발생함을 알 수 있다. TB-F-T-S 접합부는 중공부재에 80mmx80mm 치수의 각형 강관을 딱 맞게 끼워 넣고 강관과 보 사이에 볼트로 조이는 방법으로 제작되는 접합부로서 기둥-보 접합부로 그 성능이 매우 우수하며 초기 변형도 적고 지지할 수 있는 하중의 크기도 매우 높은 것으로 나타났다.

전단하중 하에서 TB-F-T-S 접합부의 파괴 형태는 그림 B2-66~B2-68과 같다. 전단하중이 작용하면 보가 늘리면서 그림 B2-66과 같이 아래로 처지고 보의 밑면이 섬유직각방향 압축응력에 의하여 압착파괴가 발생한다. 이와 동시에 기둥부재 내부에 삽입된 강관과 연결된 볼트가 움직이면서 기둥부재를 누르고 이러한 압력이 기둥부재에는 섬유직각방향 인장응력을 발생시켜서 그림 B2-67 및 B2-68에서 보는 바와 같이 기둥부재에 갈라짐이 발생한다.



그림 B2-66 TB-F-T-S 접합부에서 전단하중에 의한 보의 처짐



그림 B2-67 TB-F-T-S 접합부에서 전단하중에 의한 기둥의 갈라짐



그림 B2-68 TB-F-T-S 접합부에서 전단하중에 의한 기둥의 갈라짐

라. 2차년도 연구결과의 검토 및 분석

이 연구에서 다중접착접합 부재의 개발 및 기둥-보 접합부의 개발 연구를 통하여 얻어진 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 잣나무 소경각재에 대한 압축시험 결과 탄성계수는 가장 낮은 4등급이 14.2GPa로서 KS F 3020(침엽수 구조용재)에서 제시된 낙엽송류 1등급의 허용탄성계수 12.25GPa 보다도 높은 값을 나타내었고 허용압축응력은 12MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용압축응력 8.8GPa보다 높은 값을 나타내었다. 따라서 잣나무 소경각재의 압축강도는 KS F 3020 잣나무류 1등급뿐만 아니라 낙엽송류 1등급보다도 더 높은 값을 나타냄을 알 수 있다.
- 2) 잣나무 소경각재에 대한 휨시험 결과 허용휨응력은 13.4MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용휨응력 7.8GPa보다 높은 값을 나타내었으며 잣나무 소경각재의 휨강도는 KS F 3020의 잣나무류뿐만 아니라 낙엽송류 1등급보다도 높은 값을 나타내었다.
- 3) 핑거조인트 잣나무 소경각재에 대한 휨시험 결과 허용휨응력은 8.04MPa로서 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용휨응력 7.8GPa보다 높은 값을 나타내었으며 핑거조인트 잣나무 소경각재의 휨강도도 KS F 3020의 잣나무류뿐만 아니라 낙엽송류 1등급보다도 높은 값을 나타내었다.
- 4) 핑거조인트 잣나무 소경각재에 대한 휨시험 결과 허용휨응력은 핑거조인트가 없는 소경각재의 허용휨응력보다 낮은 값을 나타내었으나 KS F 3020의 낙엽송 1등급의 허용휨응력 7.8GPa보다 높은 값을 나타내었다. 핑거조인트 잣나무 소경각재의 휨강도는 핑거조인트가 없는 소경각재 휨강도의 약 60% 정도를 나타내었으며 이 부재는 KS F 3020의 낙엽송류 1등급으로 사용하기에 적합한 것으로 판단된다.
- 5) 핑거조인트 낙엽송 소경각재에 대하여 핑거조인트 제조기술의 개선 전 및 개선 후를 비교해 보면 MOE는 11.9GPa에서 15.4GPa로 약 30%의 증가를 나타내었고 MOR은 22.7MPa에서 37.3MPa로 약 64% 향상된 값을 나타내었으며 개선된 핑거조인트 낙엽송 소경각재의 휨강도는 핑거조인트가 없는 낙엽송 소경각재 휨강도의 약 80%를 나타내었

다.

- 6) 잣나무 소경각재의 휨탄성계수는 낙엽송이나 편백과 비슷하였으나 압축강도 및 휨강도는 모인 용이 및 큰 용이의 빈도가 높음으로 인하여 이들에 비하여 낮은 값을 나타내었다.
- 7) 다중접착접합 기둥 부재의 허용응력은 잣나무가 12MPa로서 1차년도에 시험을 실시하였던 낙엽송(13MPa)이나 편백(19MPa)보다는 낮았으나 KS F 3021의 구조용 집성재에 대한 허용응력과 비교해보면 비교적 등급의 집성재와 비슷한 수준으로서 잣나무 다중접착접합부재를 한옥건축용 기둥으로 사용하여도 충분한 강도성능을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.
- 8) 다중접착접합 보 부재의 허용응력은 잣나무가 13.4MPa로서 낙엽송(12MPa) 또는 편백(22MPa)보다는 낮았으나 KS F 3021의 구조용 집성재에 대한 허용응력과 비교해보면 비교적 높은 등급 정도의 수준으로서 다중접착접합부재를 한옥건축용 보로 사용하기에 충분할 것으로 생각된다.
- 9) 다중접착접합 보 부재에는 핑거조인트가 들어있기 때문에 핑거조인트가 없는 소경각재의 허용응력을 적용하기 보다는 핑거조인트 소경각재의 허용응력을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 1차년도의 시험결과로는 핑거조인트 소경각재의 휨허용응력이 매우 낮았으나 2차년도에 개선된 기술을 적용함으로써 중간 이상 등급의 구조용 집성재와 비슷한 수준을 나타내어(낙엽송은 11S-31B 등급, 편백은 12S-36B 등급 이상 그리고 잣나무는 9S-25B 등급과 비슷) 한옥건축용 보로 사용하는데 큰 문제는 없으나 단면치수가 약간 커지는 단점이 있을 것으로 생각된다.
- 10) 래그나사못을 사용한 다중접착접합부재의 보강방법은 큰 효과가 없었으며 단면치수를 줄이기 위해서는 다른 보강기술의 개발이 필요할 것으로 판단된다.
- 11) 1차년도에는 낙엽송과 편백 간벌목을 연구대상으로 정하였고 2차년도에는 잣나무를 추가하였으며 이들 수종의 소경각재를 이용한 다중접착접합부재 생산기술은 매우 실용성 및 사업 가능성이 높은 것으로 판단되나 원자재인 국산 소경 간벌재의 구입이 매우 어려운 문제점이 있다. 이 연구의 결과를 실용화하기 위해서는 국산 소경간벌재의 고부가가치 이용을 위한 정책적 배려가 필요하다고 할 수 있다.
- 12) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 전단성능 시험 결과 십자철판 전단형 접합부가 가장 높은 강성 및 항복하중을 나타내었으며 파이프 인장형 접합부 및 볼트-장부 인장형 접합부는 별도의 보강 없이 한옥구조에 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.
- 13) 전통장부맞춤접합부는 항복하중은 철물접합부아 비슷한 수준을 나타내었으나 초기강성이 매우 낮아서 전단하중 하에서 변형이 많이 발생할 것으로 예상되며 이에 대한 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.
- 14) 래그볼트-장부 인장형 접합부나 철근접착-장부 인장형 접합부는 강성과 강도면에서 우수한 접합부인 것으로 판단된다.
- 15) 이 연구에서 개발된 중공다중접착접합부재 기둥-보 접합부(강관조임-장부 인장형 접합부)는 강성과 강도가 모두 매우 우수한 접합부였으며 특히 초기강성이 다른 접합부에

비하여 2배 이상 높은 값을 나타내었다.

- 16) 다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 회전모멘트 저항 성능은 매우 낮은 수준으로서 수평하중에 대한 저항력이 일반 경골목조건축 전단벽의 1/5 이하인 것으로 판단되며 보다 효율적인 목구조건축을 위하여 기둥-보 구조로는 수직하중을 지지하고 경골목구조, 수직트러스 구조 또는 강철 케이블 등을 사용한 복합구조로 수평하중을 지지하는 복합목조건축공법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

이 연구는 국산 소경 간벌재를 사용하여 고부가가치의 한옥건축용 구조부재를 개발하기 위한 연구로서 소경 간벌재로부터 소경각재를 제재, 건조 및 대패 가공하여 채취한 후 소경각재를 가로 및 세로 방향으로 접착 접합하여 기둥 및 보 부재를 생산하는 기술이며 이를 다중접착접합부재라고 한다. 이 연구에서 진행된 연구의 진척도 및 연구목표의 달성도는 1차년도 및 2차년도에 각각 표 4-1 및 4-2와 같다.

전반적으로 연구목표는 거의 다 달성되었으나 국산 간벌재 중에서 소나무 등은 구하기가 힘들어서 원자재 확보에 실패함으로써 목표 달성에 실패하였다. 이 연구를 진행하면서 국산 소경 간벌재의 고부가가치 이용에 대한 높은 가능성을 발견하였으나 현재 우리나라의 간벌목 수거 시스템이 이러한 고부가가치 이용에 적합하지 못한 실정임을 발견하였다. 연구에 소요되는 소량의 간벌목은 시중가보다 높은 가격을 주고도 구하기가 힘들었으며 간벌목 수거업체들이 소량의 특수한 취급을 원하지 않거나 심지어는 웃돈을 요구하는 실정이었다. 이러한 문제는 국산 소경간벌재의 고부가가치 산업화가 이루어지기 전이기 때문에 아직까지 연구용으로 소량의 간벌재만이 요구되므로 이 수량만큼 특별 취급이 어려운 것이 현실이기 때문에 앞으로 다중접착접합부재 시장이 확보되고 산업화가 이루어져서 다량의 원자재 수요가 발생한다면 자연스럽게 해결될 수 있을 것으로 생각한다.

지금까지 국산재 중에서 지름이 굵은 대경재는 제재 및 건조를 통하여 다양한 고부가가치 제품으로 활용할 수 있는 길이 개발되어 있으나 지름 120mm~180mm의 소경재는 고부가가치의 용도는 전혀 개발되어 있지 않고 칩, 펠릿, 연료 등의 가장 부가가치가 낮은 용도로 전량 사용되고 있는 실정이다. 목재가 이 정도의 지름으로 성장하기까지는 10년 이상 20년 정도의 성장을 해야 하며 그 동안 광합성을 통해서 이산화탄소를 저장하고 있는데 이들을 펠릿이나 화목 등의 연료용으로 사용하면 그대로 이산화탄소가 방출되므로 소경재의 탄소수명은 거의 인정받기 어려운 실정이다. 따라서 이들을 그대로 연료용으로 사용하기 보다는 고부가가치의 제품으로 개발함으로써 소경재의 경제적 가치도 높이고 또한 탄소수명도 늘리는 것이 국가경제 차원이나 세계의 자연환경 차원에서도 도움이 되는 길일 것이다.

지금까지 대부분의 국산재 이용 연구는 주로 대경재의 이용에 초점을 맞추어 왔으며 소경재는 거의 관심의 대상이 되지 못하고 있다. 이와 같은 실정에서 육림을 위하여 간벌을 실시하여야 하므로 간벌하기는 하지만 간벌재들은 운반 및 가공에 경제성이 없어서 그대로 산속에 버려지거나 수집이 되어도 칩이나 연료 등의 용도로만 이용되어 왔다. 이 연구를 통해서 국산 소경재들이 한옥 건축용 구조부재로 개발됨으로써 국산 소경재의 경제적 가치가 올라가고 이로 인하여 간벌 및 육림의 활성화, 국내 벌목, 제재 및 목재가공 산업의 발전 등이 이루어질 수 있을 것이다. 소경재를 소경각재로 가공하여 다중접착접합부재로 생산하는 기술은 아직까지 외국에서도 개발된 바가 없으며 이번 연구를 통해서 수심을 포함하는 소경각재를 이용한 다중접착접합부재의 강도성능을 확인함으로써 소경 간벌재의 고부가가치 이용이 널리 확대되어 갈 것으로 예상된다.

표 4-1 1차년도 연구의 진행 정도 및 연구목표 달성도

구분	연도	연구개발의 목표	연구진행	목표 달성도
1차년도	2010	1) 세부과제 - 다중접합부재 생산을 위한 국산소경 간벌재의 최적 제재기술 개발	1) 세부과제 - 다중접합부재 생산을 위하여 필요한 소경각재를 생산하기 위한 소경재의 최적 제재기술을 개발함 (squaring saw를 이용하여 양면 제재 - 90도 회전 - 양면 제재)	- 100%
		- 다중접합부재 생산을 위한 국산소경 간벌재의 최적 건조기술 개발	- 소경각재의 고온건조를 위한 최적 건조기술 개발 (증습-고온건조 - 중온건조-저온건조의 4단계 온습도 조절 및 3일간 양생)	- 100%
		- 한옥건축용 다중접착접합 기둥 부재의 개발	- 한옥건축용 다중접착접합 기둥 부재의 개발 (다양한 단면치수를 갖는 다중접착접합 기둥부재의 개발)	- 100%
			- 한옥건축용 다중접착접합 보 부재의 개발 (다양한 단면치수를 갖는 다중접착접합 보 부재의 개발)	- 기둥과 보 부재를 동시에 개발함
		2) 위탁과제 - 다중접착접합부재 접착층의 전단성능 평가	2) 위탁과제 - 다중접착접합부재 접착층의 전단성능 평가 - 다중접착접합부재 접착층의 실내공기질 오염 영향 평가	- 100%
		3) 협동과제 - 국산 소경 간벌재로부터 생산된 소경각재의 강도 특성 평가	3) 협동과제 - 낙엽송 및 편백 소경각재의 압축강도, 휨강도 특성 평가 및 허용응력 산출 - 핑거조인트 소경각재의 휨강도 특성 평가 및 허용응력 산출	- 100%
		- 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도 평가	- 낙엽송 및 편백 다중접착접합 기둥 부재의 압축강도 평가 - 낙엽송 및 편백 다중접착접합 보 부재의 휨 강도 평가	- 100%
		- 다중접착접합 기둥부재의 설계기술 개발	- 다중접착접합 기둥부재의 설계기술 개발 - 다중접착접합 보 부재의 설계기술 개발	- 핑거조인트 부재의 성능 평가 - 보 부재의 성능 평가 - 100%
				- 보 부재의 설계기술 개발

표 4-2 2차년도 연구의 진행 정도 및 연구목표 달성도

구분 (연도)	세부과제명	세부연구내용	연구 진행	비고
2차 년도 (2011)	세부과제: 다중접착접합 부재의 접합 및 보강 기술 개발	- 다중접착접합 기둥 과 보 사이의 접합 기술 개발	- 다양한 형태 및 종류의 다중접착 접합부재 기둥-보 접합부의 개발	100%
		- 중공다중접착접합 기둥과 보 사이의 접합기술 개발	- 중공다중접착접합부재 기둥-보 접합부의 개발	100%
		- 다중접착접합부재 의 보강기술 개발	- 래그나사못을 이용한 다중접착접 합부재의 보강기술 개발 (평가결과 크게 효과는 없는 것으 로 나타남)	100% (결과는 성공적이지 못함)
		- 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 품질 향상	- 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 제작에 적합한 조건 설정 (허용응력 향상)	100%
		- 소나무 간벌목의 활용 가능성 평가 - 잣나무 간벌목의 활용 가능성 평가	- 소나무 간벌목을 구하지 못했음 - 잣나무 간벌목으로부터 소경각재 및 핑거조인트 소경각재 생산기 술 개발	- 소나무는 구하 지 못함 - 잣나무는100%
		- 다중접착접합부재 의 경제성 평가	- 다중접착접합부재의 제조에 소요 되는 경비를 구조용 집성재와 비 교 평가	100%
	협동과제: 다중접착접합 부재 접합부의 성능 평가	- 다중접착접합 기둥 -보 접합부의 전단 및 모멘트 저항 성 능 평가	- 다양한 형태 및 종류의 다중접착 접합 기둥-보 접합부에 대한 전 단 및 모멘트 저항 성능 평가	100%
		- 중공다중접착접합 기둥-보 접합부의 전단성능 평가	- 중공다중접착접합 기둥-보 접합 부에 대한 전단성능 평가	100%
		- 다중접착접합부재 를 사용한 기둥-보 구조의 수평하중 저항성능 평가	- 다중접착접합부재 기둥-보 접합 부의 회전모멘트 저항 성능 측정 을 통한 수평하중저항성능 평가	100%
		- 보강 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 휨 성능 평가	- 래그나사못 보강 다중접착접합 보 부재의 휨 성능 평가 (보강효과가 미미함)	100%
		- 핑거조인트 부재의 성능 평가	- 개선된 핑거조인트 부재의 성능 평가를 통하여 강도성능 향상을 확인	100%
		- 소나무 및 잣나무 소경각재의 강도성 능 평가	- 잣나무 소경각재 및 핑거조인트 소경각재의 의 강도성능 평가 (소나무 간벌재는 구하지 못하여 소경각재의 성능 평가를 실시하 지 못함)	잣나무는 100% 소나무는 구하지 못함

지금까지 제재목을 가로 및 세로로 적층 접착하여 구조용재로 이용하는 것은 두께 35mm의 층재를 사용하여 생산되는 구조용 집성재가 유일하였으나 이 연구를 통하여 두께 80mm 이상의 두꺼운 소경각재를 가지고도 가로 및 세로 방향으로 접착 접합이 가능하고 이와 같이 생산된 다중접착접합부재가 구조용 집성재 수준의 강도 성능을 지니고 있음이 확인되었다. 따라서 이 연구의 결과를 반영하여 구조용 집성재 산업에서도 두께 35mm 이상의 층재도 이용 가능하도록 표준을 수정할 필요가 있으며 두께 80mm 이상의 소경각재를 사용한 다중접착접합부재에 대해서도 표준규격에 그 내용을 포함시킬 필요가 있다.

이 연구를 통하여 그동안 명확하게 전단성능 및 회전모멘트 저항 성능이 규명되어 있지 않은 목구조 기둥-보 접합부의 전단성능과 회전모멘트 저항성능을 확인하였다. 따라서 이러한 접합부를 사용하는 기둥-보 구조의 구조설계에 강성 및 강도값을 사용함으로써 보다 안전하고 내구성이 있는 건축물의 설계가 가능할 것으로 기대된다. 특히 한옥 건축의 경우에 구조부재의 허용응력이나 접합부의 전단 및 모멘트 저항 성능이 명확하지 않아서 안전한 구조설계가 불가능하였으나 이 연구의 결과를 활용함으로써 보다 안전한 한옥구조의 설계가 가능해질 것으로 생각된다.

한옥은 우리나라의 전통 주거문화의 가장 핵심적인 사안으로서 정부에서도 우리 고유의 전통과 문화의 계승 및 발전 그리고 국격의 상승과 대한국민으로서의 자부심과 긍지 고취라는 차원에서 한옥 건축을 적극 장려하고 있다. 그러나 정부의 적극적인 의지에 비하여 한옥 건축을 위한 민간차원의 준비 및 대책은 소홀하기 짝이 없어서 아직까지 국산 목재를 사용한 고품질의 한옥 건축 자재의 공급이 전혀 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 대부분의 한옥 건축이 대단면의 대경재 중심으로 이루어지다 보니 목재 내부까지 건조가 어렵기 때문에 건조되지 않은 생재를 사용하여 건축이 이루어졌으며 이로 인하여 사용 중에 수축과 갈라짐, 뒤틀림 등의 건조결함이 발생하여 한옥 자체의 품질 저하와 한옥에 대한 국민들의 불신만 높아지는 결과가 초래되었다.

따라서 지금이라도 기초부터 다시 시작하여 고품질의 국산 한옥 건축자재의 개발과 보급이 이루어져야 한옥건축의 보급과 이를 통한 국민의식과 자부심의 고양 등의 성과를 이룰 수 있을 것이다. 이러한 측면에서 이 연구의 결과는 매우 바람직한 방향으로 활용되어질 것으로 생각된다. 국산재를 이용하여 국내기술로 개발된 부재이며 내부까지 완전히 건조된 상태로 사용되기 때문에 사용 중에 건조로 인한 갈라짐, 뒤틀림, 수축 등의 문제 발생 가능성이 매우 적다. 강도 성능이나 안전성 또는 내구성 측면에서도 한옥 건축자재로 이용하기에 충분한 것으로 예상되며 휘발성 유기물이나 실내 공기질을 오염시키는 물질의 방출이 극히 적어서 매우 건강한 주거환경을 조성할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구를 통해서 앞으로 다중접착접합부재의 강도 보강에 대한 연구가 좀 더 진행되어야 할 필요가 있는 것으로 나타났고 한옥 건축에 활용하기 위해서는 기둥-보 구조 자체만이 아니라 경골이나 기타 구조와의 복합건축공법을 개발하여 더욱 효율적인 수평하중저항구조를 만들 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

1) 실용화·산업화 계획(기술실시 등)

이 연구의 결과로 개발된 다중접착접합부재 기둥과 보는 이미 국토해양부의 신한옥사업단(명지대학교)에서 추진하는 신한옥 모델하우스 건설에 활용되어 현재 명지대학교 내에 지어진 신한옥 모델하우스에 사용되어 실제 건축물에서의 사용 중 성능을 평가하고 있다. 해당 건물에는 다중접착접합부재와 함께 미송 제재목이 사용되었으며 몇 개월이 지난 현 시점에 벌써 미송 제재목들은 갈라짐, 뒤틀림 등의 건조 결함이 나타나고 있으나 다중접착접합부재는 온전한 상태로 남아있어서 품질의 우수성을 인정받고 있다. 이 모델하우스 내에 사용된 다중접착접합부재 기둥과 보의 장기적인 성능은 앞으로도 지속적으로 모니터링 및 분석하여 향후 부재의 품질개선에 참고하고자 한다.

이 연구의 결과는 주관기관인 경민산업(주)를 통해서 실용화 및 산업화를 계획하고 있으며 신한옥 사업단에서의 사용과 더불어 현재 서울시에서 추진하는 150세대 한옥 뉴타운개발사업에서도 다중접착접합부재의 사용을 적극 검토하고 있다. 그 외에도 경민산업(주)가 참여하는 다양한 한옥 건축 프로젝트에 다중접착접합부재 및 접합부의 사용을 적극 검토 또는 권장하고자 한다. 이를 위하여 다중접합부재 기둥-보 접합부의 모멘트 저항 성능을 평가하고 이를 보강하기 위한 대책의 마련이 필요할 것으로 생각된다.

이 연구에서 부족한 것으로 판단되었던 강도성능 보강기술, 기둥-보 접합부의 모멘트 저항 성능 평가 및 보강기술, 기둥-보 및 경골의 복합건축공법 개발 등의 후속연구를 추진하여 보다 완전한 한옥건축 자재 및 공법으로 발전시켜 나아가고자 한다. 다중접착접합부재의 강도성능 보강기술은 이미 2012년도 산림기술개발사업으로 선정(주관연구기관: 충남대학교, 참여기업: 경민산업(주))되어 앞으로 3년간 연구 및 기술 개발을 진행할 예정이며 접합부의 모멘트 저항 성능 평가 및 보완 그리고 기둥-보 및 경골 복합건축공법의 개발에 관한 연구도 지속적으로 추진할 계획이다.

2) 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획 등

이 연구의 결과는 주관기관인 경민산업(주)를 통해서 작년도 목재산업박람회에서 홍보활동을 펼친 바 있으며 앞으로도 지속적으로 산업박람회 및 건축자재전시회 등에 참여하여 다중접착접합부재에 대하여 홍보하여 시장을 확보하는데 힘을 쏟고자 한다.

이 연구의 결과는 충남대학교 환경소재공학과 대단면목조건축, 목구조설계 등의 과목에서 교육용 교재로 활용될 예정이며 학회 논문 발표, 세미나 등을 통해서 연구결과의 확산을 기하고자 한다.

경민산업(주)에서 산업화를 실시하는 과정에서 이론 및 학문적인 뒷받침이 필요한 분야에 대해서는 협동기관인 충남대학교와 지속적으로 협력하며 기술지도를 실시할 계획이며 추가적인 시험이나 연구가 필요한 경우에도 계속 협력해 나아갈 계획이다.

3) 특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획 등

이 연구의 결과 중 일부는 이미 지식재산권 출원을 마쳤으며 향후 필요한 경우에는 추가적인 지식재산권 출원을 실시하고자 한다. 또한 연구의 학문적인 결과들은 충남대학교를 통하여 계속 논문으로 발표하고 있으며 앞으로도 연구결과를 정리하여 추가적인 논문들을 발표하고자 한다.

또한 이 연구의 결과를 활용하여 두께 35mm 이상의 층재에 대한 적층 및 접착을 허용하는 방향으로 KS F 3021을 개정하고자 하며 특히 수심을 포함하는 소경각재를 이용한 다중접착접합부재에 대한 내용을 KS F 3021에 반영하도록 개정하여 국내에서 유일하게 KS F 3021에 대하여 표시허가를 받은 경민산업(주)가 이 표준을 적용하여 제품 생산을 해 나아가는 활로를 열어 놓고자 한다.

4) 추가연구, 타 연구에 활용 계획 등

앞에서도 언급하였듯이 이 연구의 결과를 통하여 다중접착접합부재의 보강기술 개발과 기둥-보 및 경골의 복합건축공법의 개발에 대한 연구의 필요성이 제기되었다. 다중접착접합부재의 보강기술 개발에 대해서는 이미 올해 산림청의 연구과제로 선정(연구책임자 충남대학교 장상식 교수, 참여기업 경민산업(주))되어 올해 하반기부터 연구를 시작할 계획이며 이 연구의 결과가 후속연구의 시발점이 될 것이다.

기둥-보 구조와 경골 또는 기타 구조와의 복합건축공법 개발은 앞으로 새로운 연구과제로 만들어서 후속연구를 이어감으로써 다중접착접합부재의 이용에 관한 연구가 지속적으로 이루어져서 이를 이용한 한옥건축공법이 보다 효율적이고 완전해질 수 있도록 노력하고자 한다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당사항 없음

제 7 장 참고문헌

- 1) 대한건축학회. 2009 건축구조기준. 국토해양부.
- 2) 대한건축학회. 건축공사 표준시방서. 국토해양부.
- 3) ASTM D 198. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. American Society for Testing of Materials.
- 4) KS D 3503. 일반 구조용 압연 강재. 기술표준원.
- 5) KS F 1611-3. 건축 구조 부재의 내화성능 표준 - 제 3부: 구조용 집성재 보 및 기둥. 기술표준원
- 6) KS F 2150. 구조용 실대재의 휨 시험 방법. 기술 표준원.
- 7) KS F 2198. 목재의 밀도 및 비중 측정 방법. 기술표준원.
- 8) KS F 2199. 목재의 함수율 측정 방법. 기술표준원.
- 9) KS F 2206. 목재의 압축 시험 방법. 기술표준원.
- 10) KS F 2208. 목재의 휨 시험 방법. 기술표준원.
- 11) KS F 3021. 구조용 집성재. 기술표준원.
- 12) KS F 4514. 목구조용 철물. 기술표준원.
- 13) KS F 9008. 구조용 집성재의 접합부 시공표준. 기술표준원.
- 14) KS M 1998. 건축 내장재의 폼알데하이드 및 휘발성 유기화합물 방출량 측정. 기술표준원.
- 15) (사)일본건축학회. Fundamental theory of timber engineering. 2010.
- 16) (사)일본건축학회. Design Manual for engineered timber joints. 2010.
- 17) 澤井聖一. 木のDesign最强manual. 2011.
- 18) 川口衛. 木の構造Design. 2010.
- 19) 木の適材適所Comfort. 2008.
- 20) (재)일본주택목재기술센터. 木質系混構造建築物の構造設計の手引き. 2011.

[별첨 1]

연구개발보고서초록

과 제 명	(국문) 국산 간벌 소경재를 이용한 한옥건축용 다중접착접합부재의 개발					
	(영문) Development of multi-layer glued members used for construction of Korean-style houses by utilizing thinned domestic small logs					
주관연구기관	경민산업(주)		주 관 연 구 책 임 자	(소속) 경민산업(주)		
참 여 기 업	경민산업(주)		총 연 구 기 간	(성명) 이경호		
총연구개발비 (480,000천원)	계	480,000,000	총 참 여 연 구 원 수	2010. 7.~2012. 7.(2년)		
	정부출연 연구개발비	300,000,000		총 인 원	24	
	기업부담금	180,000,000		내부인원	24	
	연구기관부담금	0		외부인원	0	
<p>○ 연구개발 목표 및 내용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 국산 소경재로부터 소경각재를 제재하는 최적의 제재기술 개발 - 소경각재의 최적 건조 기술 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 기술 개발 - 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 개발 - 다중접착접합 기둥 부재의 압축 성능 평가 - 다중접착접합 보 부재의 휨 성능 평가 - 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 구조설계 방법 개발 - 다중접착접합부재를 사용한 기둥-보 접합부의 개발 - 다중접착접합 기둥-보 접합부의 성능 평가 <p>○ 연구결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 국산 소경재로부터 소경각재를 생산하는 제재기술 개발: 제재수율 40%~50% - 소경각재의 최적 건조 기술 두꺼운 소경각재의 핑거조인트 기술 개발: 소경각재에 대한 핑거조인트 부재의 강도비율: 60%~80% - 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 개발: 가로방향 2~3열 접합, 세로방향 2~5열 접합 - 다중접착접합 기둥 부재의 압축 성능 평가: 소경각재 및 다중접착접합 기둥부재의 압축강도 측정 - 다중접착접합 보 부재의 휨 성능 평가: 소경각재 및 다중접착접합 보 부재의 휨강도 측정 - 다중접착접합 기둥 및 보 부재의 구조설계 방법 개발: 시험결과를 다중접착접합부재 기둥과 보의 설계에 활용 - 다중접착접합부재를 사용한 기둥-보 접합부의 개발: 다양한 형태 및 종류의 전단형 및 인장형 접합부 개발 - 다중접착접합 기둥-보 접합부의 성능 평가: 접합부의 전단성능 및 회전모멘트 저항 성능 측정 <p>○ 연구성과 활용실적 및 계획</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연구성과 중 일부는 특허 출원 중, 일부는 논문 발표, 앞으로 계속 논문 발표 예정 - 연구결과의 일부는 신한옥 사업단에서 활용, 서울시의 한옥뉴타운 개발에 활용 협의중 - 연구결과는 주관기관에서 실용화 및 사업화 계획 						

[별첨 2]

자체평가 의견서

연구개발분야	첨단생산기술개발	과제구분	<input type="checkbox"/> 지정공모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 자유응모과제	관리번호	
연구과제명	국산 간벌 소경재를 이용한 한옥건축용 다중접착접합부재의 개발				
주관연구기관	Development of multi-layer glued members used for construction of Korean-style houses by utilizing thinned domestic small logs				
연구담당자	주관연구책임자	이경호			
	협동/위탁/세부 연구책임자	기관(부서)	진남대학교(임산공학과)	성명	정우양
		기관(부서)	충남대학교(환경소재공학과)	성명	장상식
		기관(부서)		성명	
		기관(부서)		성명	
연구기간	총 기간	2010.07.01.~2012.06.30.(2년)	당해년도기간	2011.07.01.~ 2012.06.30.	
연구비(천원)	총 규모	480,000	당해년도규모	190,000	

1. 연구는 당초계획대로 진행되었는가?

당초계획 이상으로 진행 계획대로 진행 계획대로 진행되지 못함

○ 계획대로 수행되지 않은 원인은?

<p>- 소나무 등 일부 간벌재를 구하기가 어려워서 이들을 이용한 다중접착접합부재의 개발 연구가 이루어지지 못했음</p> <p>- 국산 간벌재를 고 부가가치 용도로 이용하기 위하여 원자재 구입 경로를 확보해 주는 정책적 배려 필요</p>

2. 당초 예상했던 성과는 얻었는가?

예상외 성과 얻음 어느 정도 얻음 얻지 못함

3. 연구과정 및 성과가 농림어업기술의 발전·진보에 공헌했다고 보는가?

공헌했음 현재로서 불투명함 그렇지 않음

6. 연구개발착수 이후 국내 다른 기관에서 유사한 기술이 개발되거나 또는 기술 도입함으로 연구의 필요성을 감소시킨 경우가 있습니까?

- 없다 약간 감소되었다 크게 감소되었다

○ 감소되었을 경우 구체적인 원인을 기술하여 주십시오?

7. 관련된 기술의 발전속도나 추세를 감안할 때 연구계획을 조정할 필요가 있다고 생각하십니까?

- 없다 약간 조정필요 전반적인 조정필요

8. 연구과정에서의 애로 및 건의사항은?

- 국산 소경 간벌재가 현재 칩, 펠릿, 화목 등의 저부가가치 용도로만 사용되고 있으며 이러한 용도에 대량으로 소모되다 보니 소량의 고부가가치 용도로 사용하기 위하여 원자재를 확보하기가 어려움
- 국산 소경재를 고부가가치 용도로 활용하는 산업을 활성화시키기 위해서는 국산 소경재를 원자재로 원활하게 확보할 수 있도록 지원할 수 있는 대책 마련이 필요함

(※ 아래사항은 기업참여시 기업대표가 기록하십시오)

1. 연구개발 목표의 달성도는?

- 만족 보통 미흡

(근거 : _____)

2. 참여기업 입장에서 본 본과제의 기술성, 시장성, 경제성에 대한 의견

가. 연구성과가 참여기업의 기술력 향상에 도움이 되었는가?

- 충분 보통 불충분

나. 연구성과가 기업의 시장성 및 경제성에 도움이 되었는가?

- 충분 보통 불충분

3. 연구개발 계속참여여부 및 향후 추진계획은?

가. 연구수행과정은 기업의 요청을 충분히 반영하였는가?

충분 보통 불충분

나. 향후 계속 참여 의사는?

충분 고려 중 중단

다. 계속 참여 혹은 고려중인 경우 연구개발비의 투자규모(전년도 대비)는?

확대 동일 축소

4. 연구개발결과의 상품화(기업화) 여부는?

즉시 기업화 가능 수년 내 기업화 가능 기업화 불가능

5. 기업화가 불가능한 경우 그 이유는?

구 분	소 속 기 관	직 위	성 명
주관연구책임자	경민산업(주)	회장	이경호 (인)
참여기업대표	경민산업(주)	대표이사	이한식 (인)

[별첨 3]

연구결과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input checked="" type="checkbox"/> 자유응모과제 <input type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야	첨단생산기술개발사업	
연구과제명	국산 간벌 소경재를 이용한 한옥건축용 다중접착접합부재의 개발			
주관연구기관	경민산업(주)		주관연구책임자	이경호
연구개발비	정부출연 연구개발비	기업부담금	연구기관부담금	총연구개발비
	300,000,000	180,000,000	0	480,000,000
연구개발기간				
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체이전 <input checked="" type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input type="checkbox"/> 기타(자체 사업화)			
	<input type="checkbox"/> 미활용 (사유: _____)			

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 국산 소경재로부터 소경각재의 생산기술 개발	제재, 건조, 핑거조인트 및 접착기술 개발
② 소경각재의 강도 성능 평가	낙엽송, 편백 및 잣나무 소경각재와 핑거조인트 소경각재의 강도 성능 평가 및 허용응력 산출
③ 다중접착접합 기둥과 보 부재의 개발	다중접착접합 기둥부재 및 보 부재의 개발
④ 다중접착접합 기둥과 보 부재의 강도성능 평가	다중접착접합 기둥부재의 압축강도 및 보부재의 휨강도 평가
⑤ 다중접착접합 기둥-보 접합부의 개발	다양한 형태 및 종류의 전단형 및 인장형 접합부 개발
⑥ 다중접착접합 기둥-보 접합부의 강도성능 평가	다양한 접합부의 전단성능 및 회전모멘트 저항성능 평가
⑦ 다중접착접합부재 기둥과 보의 설계기술 개발	시험결과의 적용을 통한 기둥과 보부재의 설계기술 개발

3. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	소경각재의 제재, 건조, 핑거조인트 및 접착 기술
②	소경각재 및 핑거조인트 소경각재의 허용응력 산출
③	다중접착접합 기둥 및 보부재의 제조기술 및 허용응력 산출
④	다중접착접합 기둥-보 접합부의 개발 및 전단성능과 회전모멘트 저항성능 측정

4. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복 제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장애로 해 결	정책 자료	기타
①의 기술	v						v			
②의 기술		v					v			
③의 기술	v						v			
④의 기술		v				v	v			

* 각 해당란에 v 표시

5. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	주관기관에서 자체 상품화를 통한 소경제의 경제적 가치 향상
②의 기술	주관기관에서 자체 상품화를 통한 다중접착접합부재의 구조성능 향상
③의 기술	주관기관에서 자체 상품화를 통한 한옥건축용 기둥 및 보의 공급
④의 기술	주관기관에서 자체 상품화를 통한 한옥건축설계 및 시공기술의 개발

6. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명			
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	천원
이전방식	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간		실용화예상시기	
기술이전시 선행조건			

* 핵심기술이 2개 이상일 경우에는 각 핵심기술별로 위의 표를 별도로 작성

** 기술이전시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)

*** 실용화예상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등