

350톤의 탄소저감 확보를 위한 9층 목조건축물 공학목재-하이브리드 구조시스템 적용기술 개발 최종보고서

2018.8.3.

주관연구기관 / 세종대학교 산학협력단

공동연구기관 / 강원대학교 산학협력단

참여기업 / (주)창민우구조컨선탄트

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

2. 제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘350톤의 탄소저감 확보를 위한 9층 목조건축물 공학목재-하이브리드 구조시스템 적용기술 개발’ (연구개발 기간 : 2016.06.22 ~ 2018.06.21) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018.08.03.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 김 선 재 (인)
공동연구기관명 : 강원대학교 산학협력단 (대표자) 윤 경 구 (인)
참여기관명 : (주)창민우구조컨선탄트 (대표자) 김 종 호 (인)



주관연구기관책임자: 이 기 학
공동연구기관책임자: 김 태 완
참여기관책임자: 김 태 진

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘350톤의 탄소저감 확보를 위한 9층 목조건축물 공학목재-하이브리드 구조시스템 적용기술 개발’ (연구개발 기간 : 2016.06.22 ~ 2018.06.21) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018.08.03.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 김 선 재 (인)
공동연구기관명 : 강원대학교 산학협력단 (대표자) 윤 영 두 (인)
참여기관명 : (주)창민우구조건설탄트 (대표자) 김 중 호 (인)

주관연구기관책임자: 이 기 학
공동연구기관책임자: 김 태 완
참여기관책임자: 김 태 진

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C115 068-02	해당 단계 연구 기간	2017.06.22. ~ 2018.06.21.	단계구분	2차년도/2차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	350톤의 탄소저감 확보를 위한 9층 목조건축물 공학목재-하이브리드 구조시스템 적용기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자	이 기 학	해당단계 참여 연구원 수	총: 21 명 내부: 21명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:220,000천원 기업:77,000천원 정부 외: - 천원 계:297,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 24명 내부: 24명 외부: 명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업:140,000천원 정부 외: - 천원 계:540,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단 강원대학교 산학협력단			참여기업명 (주)창민우구조컨선탄트	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
8m 장스팬 적용을 위한 공학목재-콘크리트 합성바닥구조 시스템개발 9층 목구조 건축물용 하이브리드 횡력저항 시스템 개발 - 합성 다이어프램 설계기술 개발 및 면내강성 평가기술 개발 - 공학목재-콘크리트 합성패널 바닥구조 시스템 설계법 개발 9층 목구조 건축물용 하이브리드 횡력저항시스템 성능기반 내진설계 매뉴얼 개발 - 내진성능향상 목구조 접합부 개발 및 내진성능 향상 기술 개발				보고서 면수 102	

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	① 8m 장스팬 적용을 위한 공학목재-콘크리트 합성 바닥구조시스템 개발 ② 9층 목구조 건축물 적용을 위한 공학목재-하이브리드 횡력저항시스템 개발 ③ 9층 목구조 적용을 위한 공학목재 하이브리드 접합부 설계기술 개발				
연구개발성과	• 8m 장경간 공학목재-콘크리트 합성 바닥구조시스템 설계기술 확립 • 9층 목조건축물 공학목재-하이브리드 횡력저항시스템 기술 확립 • 9층 목구조 공학목재 하이브리드 접합부 설계기술 확립				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 목조건축의 새로운 패러다임 창조를 통한 국가경제 활성화 • 탄소저감과 친환경재료인 목재를 통한 국민의 삶의 질 향상 • 공학목재와 하이브리드 재료융합을 통한 새로운 건설시장 먹거리 창조				
핵심어 (5개 이내)	공학목재	하이브리드 슬래브	하이브리드 접합부	성능기반설계	녹색건축

5. 영문 요약문

< SUMMARY >

Purpose & Contents	① Development of engineering wood-concrete hybrid floor structural system for the use of 8m long span ② Development of hybrid engineering wood lateral force resisting systems aimed for 9-story wood buildings ③ Development of design procedures for hybrid engineering wood joint connections aimed for 9-story wood buildings				
Results	• Establishment of engineering wood-concrete hybrid floor structural system for the use of 8m long span • Establishment of hybrid engineering wood lateral force resisting systems aimed for 9-story wood buildings • Establishment of design procedures for hybrid engineering wood joint connections aimed for 9-story wood buildings				
Expected Contribution	• Energization of national economy with a new development of wood architectural engineering • Enhancement of life quality with adaption of carbon reduction policy and usage of eco-friendly wood structural system • Creation of new construction market with the usage of engineering wood and hybrid materials				
Keywords	Engineering Wood	Hybrid Slab	Hybrid Joint Connection	Performance Based Design	Green Architecture

6. 영문 목차

< Table >

1. Outline of R&D Projects	5
2. Status of domestic and overseas technology development	11
3. Research performance and achievements	12
4. Achievement of goal and contribution to relevant field	78
5. Plan to utilize R & D achievements	82
6. Overseas Information on Science & Technology Collected in the Research Process	83
7. Security rating of R & D achievement	97
8. Implementation of safety measures in laboratories based on R & D	98
9. Representative research achievements of R & D	99
10. Etc.	100
11. References	100

7. 본문 목차

< 목 차 >

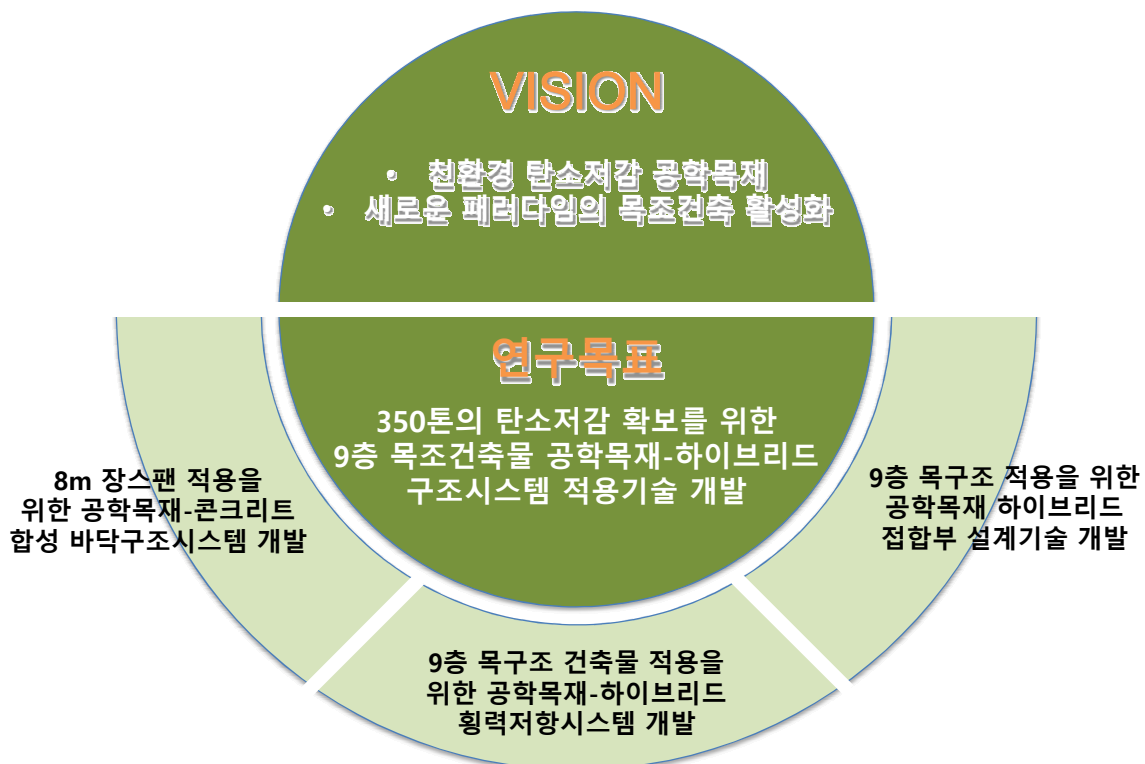
1. 연구개발과제의 개요	5
2. 국내외 기술 개발 현황	11
3. 연구 수행 내용 및 성과	12
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	78
5. 연구개발성과의 활용 계획	82
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	83
7. 연구개발성과의 보안등급	97
8. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	98
9. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	99
10. 기타 사항	100
11. 참고 문헌	100

제1장. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 필요성

(1). 연구개발의 개요

1. 공학목재-하이브리드 구조시스템을 통한 중고층 목조건축물 적용기술 개발을 위하여 안전하고 경제적인 최적의 구조공법과 요소기술을 확립하는 것을 목표로 함.
 - 기술성: 공학목재-하이브리드 구조시스템을 통한 중고층 목조건축물 적용에 대해 수직하중 및 횡하중에 대한 구조저항시스템과 접합부 설계기술을 확립하고
 - 경제성: 기존 일반 건축물 적용 기술 대비 경제성을 확보할 수 있는 장경간 공학목재-콘크리트 합성 바닥구조시스템을 개발하고
 - 기술의 수월성: 수직하중과 횡하중 설계에 대한 성능기반설계법의 개발을 통해 보다 명확하고 성능이 우수한 적정 설계기술을 개발하고
 - 기술의 보급 및 표준화: 설계자와 시공자에 관계없이 최소한의 안전성과 경제성을 보장하며 DB관리 및 축적을 통하여 향후 공학목재-하이브리드 구조시스템의 시공 용이성을 확보하고자 한다.
2. 본 연구개발진의 세부연구목표는 다음과 같다.
 - 가) 8m 장스팬 적용을 위한 공학목재-콘크리트 합성 바닥구조시스템 개발
 - 나) 9층 목구조 건축물 적용을 위한 공학목재-하이브리드 횡력저항시스템 기술 개발
 - 다) 9층 목구조 적용을 위한 공학목재-하이브리드 접합부 설계기술 개발



[그림 1-1] 본 과제 제안의 연구개발 Vision과 목표

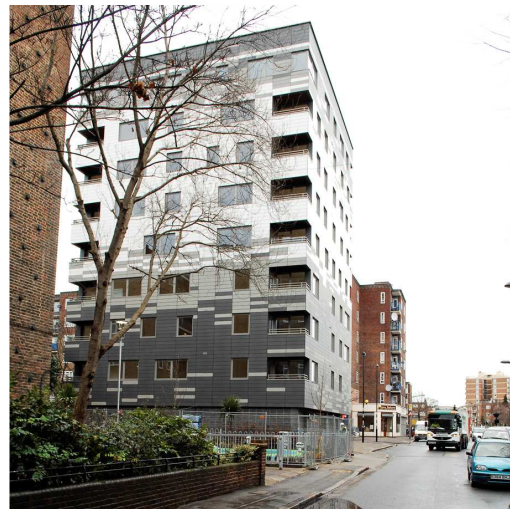
나. 연구개발의 배경 및 필요성

(1) 연구개발의 배경

- 산업의 발달로 인하여 지구 온난화 같은 환경적인 문제가 대두되면서 세계 각국은 탄소 배출량을 줄이기 위한 다양한 접근을 시도하고 있음. 이에 따라 친환경 재료의 중요성이 부각되면서 선진국에서는 목조 구조물의 제한 범위를 점차 넓혀가고 있음.
- 특히 유럽과 북미에서는 목조 구조물에 대한 연구결과를 축적하고 기술을 발전시키면서 목조 구조물의 높이에 대해 제한하고 있는 관련 기준을 개정하여 높이 범위를 완화하고 있고 이에 따라서 목조 구조물의 규모와 높이도 지속적으로 높아지고 건설 분야의 시장 외연이 확대되고 있음.
- 최근 유럽 및 북미와 호주 등에서는 비교적 최근에 개발된 CLT(Cross Laminated Timber) 판넬 및 크로스램(X-Lam)등의 집성패널과 다른 구조재료와의 혼용을 이용하여 10층 이상의 목조 구조물도 시공되고 있음.([그림 2] 참조)
- 그러나 국내에는 목조 구조물 또는 하이브리드시스템을 이용하여 다층으로 설계한 사례를 찾기 힘들고 대부분 단층 독립주택 구조물에 목재가 이용되는 현실임. 이러한 점은 (1) 목재재료의 한계점을 극복하기 위해 공학적으로 목재 재료의 특성을 개선하는 연구의 한계성 (2) 공학목재와 이질 재료와의 하이브리드융합을 통한 건물 골조시스템의 개발의 한계성 (3) 중고층 건물에서 수직하중과 횡하중에 적용할 수 있는 횡력저항시스템 설계기술 한계성 등에서 그 원인이 기인한 것으로 판단됨.



(a) 콘크리트 구조체 상부에 증축된 5층 주거용 목조건축물(캐나다, 밴쿠버)



(b) CLT 적용 주거용 8층 목조건축물 (영국, 런던)

[그림 1-2] 콘크리트 구조체 상부 주거용 다층 목조건축물 시공사례

(2) 연구개발의 필요성

- 우리나라는 전 국토의 3분의 2 가량인 64%가 산림으로 되어있는 산림국가임. 과거 연료 부족에 따른 무분별한 땔나무 벌채로 국내 산림이 황폐화된 시기를 겪기도 했지만, 전 세계에서 유례를 찾아보기 힘든 최단기간의 녹화 성공으로 현재는 ha당 임목축적이 OECD 평균(121m³/ha)을 상회(126m³/ha)하고 있음.
- 구체적으로 산림의 나무 총량(임목축적) 8억m³는 식목일 제정원년인 1946년의 5644만m³에 비해 14.2배, 치산녹화 원년인 1973년의 7447만m³에 비해 10.7배가 각각 증가함([그림 1.3] 참조).

- 이렇듯 풍부한 산림자원을 보유하고 있음에도 불구하고, 우리나라의 목재 이용량은 매우 낮은 수준으로, 2014년 기준 1인당 목재 이용량은(0.6㎥/인) 입업 선진국인 핀란드(13.8㎥/인), 캐나다(5.6㎥/인) 등과 비교해 매우 저조한 상황이며, 또한 국내 산림에서 생산된 목재의 약 70% 가량이 펄프·보드·바이오매스 등에 집중되어 공급되고 있는 현실임.
- 이것은 목재 소비 촉진에 가장 효과적인 목조 건축이 활성화 되지 못한 것에서 그 원인을 찾을 수가 있음. 목조건축은 목재 소비 촉진에 가장 효과적인 수단으로, 30평형 기준 목조주택 1동 건립 시 무려 20㎥의 목재가 사용됨. 따라서 미국, 일본 등 목조건축 선진국에서는 목조건축이 목재 용도의 가장 중요한 몫을 차지하고 있음. 국산 목재의 고부가가치 이용 촉진을 위한 목조건축 산업을 진흥하는 것은 매우 중요한 과제로 인식됨.
- 특히 목조건축이 활성화되기 위해서는 기존의 소규모 단독 목조주택을 주목표로 하는 것은 한계가 있으며 부가가치의 증대와 수요의 확대를 위해 중고층 건물에 적용할 수 있는 공학목재-하이브리드 건축구조시스템의 새로운 패러다임을 창조할 수 있는 기반 연구가 요구됨.



[그림 1-3] 임목축적비율(2010 산림기본통계, 산림청)

(3) 기술개발 성숙도

- 제시된 TRL에 비추어 본 연구과제의 각 단계 수준을 제시하면 위 그림과 같음.
- 본 연구과제 제안은 공학목재-하이브리드 구조시스템을 적용한 9층 목조건축물의 설계 기술을 확보하기 위한 과제로서 건설교통 R&D 기술단계별 실용화 추진전략 수립에 관한 연구 최종보고서”에서 제시한 건설교통 R&D 사업의 5개 유형 중 시스템 개발 과제로 분류될 수 있음.
- 이에 따라 연구 착수 시점에는 TRL 3이며 2년 후 연구 종료 시에는 TRL 5로 분류됨.

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☒	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☒	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

다. 연구개발의 중요성

(1) 관련 연구와 기술의 동향에 따른 연구개발의 중요성

- 해외에서는 5층 이하의 저층건물에 대해서 주로 목조구조물이 적용되었지만 최근에는 목조구조물의 사용범위가 넓어지면서 목조구조물의 높이가 높아지고 이에 따라서 횡력에 대한 목조구조물의 거동 및 설계에 대한 연구가 많이 진행되고 있음([그림 1.4] 참조)
- 엔지니어링적 성능확보를 위해 목재로 이루어진 주 횡력저항부재인 전단벽(shear-wall)과 강막(Diaphragm) 작용에 대한 비선형 거동과 해석방법 등에 대한 연구가 주로 이루어짐.



(a) 철골가새 보강 구조물(14층 계획)

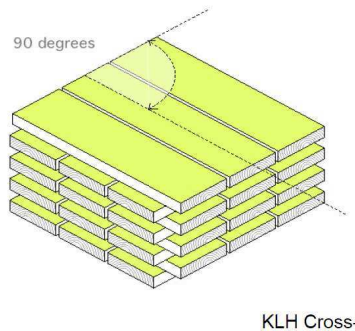


(b) RC Core+목조 골조 구조물(6층)

[그림 1-4] 목재와 이질 구조재료를 혼용한 하이브리드 구조물 사례

- 목조 구조물과 다른 콘크리트나 철골재료를 혼합적으로 사용하여 목조구조물의 활용방안을 넓힐 수 있는 다양한 접근 방법으로 설계하는 방법 등에 대한 연구가 진행되고 있음.
- CLT(Cross Laminated Timber)와 같이 새로 개발된 부재들의 거동에 대한 활발한 연구가 활발히 이루어지고 있음. 영국 런던에서는 크로스램(X-Ram)의 집성패널을 이용하여 9층

의 목조 건축물([그림 5]) 참조)이 시공, 완료되었음. 건축가의 계산에 따르면 런던 Stathaus 9층 목조건축물에서 목재의 적용은 기존 다른 재료의 적용에 비해서 310톤의 이산화탄소 배출이 방지되었음. 이를 통해 본 연구에서 9층 목조건축물에 대한 설계 및 시공기술의 확립을 통해 350톤의 이산화탄소 저감을 목표로 함.



(a) CLT 적층 방법



(b) 생산된 CLT 단면



(c) 9층 목재골조 빌딩(영국)

[그림 1-5] 유럽에서 개발된 CLT 부재와 이를 통한 목재 건물

(2) 사회적 수요와 산업 동향에 따른 연구개발의 중요성

- 목재는 재생산가능 자원이어서 자원고갈이 예상되는 화석연료를 대체 할 수 있는 자원으로로서 지속적으로 수요가 증가할 것으로 예측됨. 목조 건축물의 비율은 미미한 상황이며, 2010년에 이르러 약 9,500동이 신축되어 전체시장의 약 5.1%를 점유하고 있음.
- 국내에서 건축경기의 침체와 법 제도가 미비함에도 불구하고, 목조 건축물은 지속적으로 증가하는 추세임. 2001년 890동에서 2010년 약 9500동으로 약 10배 이상의 성장률을 보이며 시장 점유율을 늘려가고 있음. GDP와 생활수 준의 향상과 개인주택에 대한 선호도의 상승, 웰빙과 친환경에 대한 소비자들의 관심이 상승함에 따라 나타난 결과로 판단됨.
- 2010년 국내 목조건축 실적을 분석해 본 결과 착공면적은 576,000㎡ 으로 전체의 1% 가량을 점유하고 있었으며, 착공동수는 9,585동으로 전체의 5% 가량을 점유하고 있음. 목조건축 허가건수는 1,993동(2003년)에서 11,615동(2013년), 15,393동(2015년)으로 급격히 증가하고 있음(국토교통부 통계)
- 중장기적으로도, 웰빙과 친환경에 대한 소비자들의 수요가 증가할 것이며, 특히 세계적으로 친환경 건축물의 대표로 손꼽는 목조건축물의 수요가 더욱 증가할 것으로 예상됨.

(3) 정부 정책, 법 제도 동향에 따른 연구개발의 중요성

- 현재 일본에서는 ‘공공건축물의 목재이용촉진에 관한 법률 (‘10.05.26)’ 제정 및 시행을 통해 국가가 책정하는 기본방침에서는 「저층건축물은 원칙으로 모두 목조화를 목표로 한다」라고 하는 국가 스스로의 목표 등을 명확히 하고, 지방 공공단체나 민간사업자에 대하여도, 국가의 방침에 입각한 주체적인 참여를 촉구하고 있음
- 이 법률에 의해 민간이 정비하는 것도 포함시켜 저층 공공건축물로 목조화되지 않고 있는 500만㎡ 중 절반 정도가 목조화된다고 가정하면, 목재수요는 연간 70~80만㎡(통나무의 수요 환산) 증가하는 것으로 확인되었음. 이에 따라 연간 착공되는 공공건축물의 목조율은 현행 8%정도에서 25%정도까지 향상될 것으로 예측됨
- 우리나라 실정에서는 산림청통계에 의하면, 한국의 임업은 2010년 1조 1000억원으로 국내총생산 (GDP)의 약 0.108%를 점유하고 있으며, 이는 한국의 경제규모에 비해 매우 낮은 수치임.

- 목재는 재생산가능 자원이어서 자원고갈이 예상되는 화석연료를 대체 할 수 있는 자원으로 지속적으로 수요가 증가할 것으로 예측됨. 이 때문에 목재산업은 기후변화에 대응한 저탄소 녹색성장 산업으로 파급효과가 클 것으로 예상됨.
- 최근 국내 목재산업은 주로 판상재 위주로 가구재 및 내장재 용도에 치중되고 있으며 해외 선진 기술 습득 및 자국 수종을 이용한 집성재, CLT, LVL, PSL, LSL, OSL 등 구조용 공학목재에 대한 활용화 연구가 진행되어야 할 것임.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

가. 기 수행된 유사과제

번호	년도	사업명	과제명	시작일	종료일	주관연구기관
1	2011	국토교통과학기술진흥원	한국형 목조건축 기술 개발 및 사업화를 위한 기획연구	2011-12	2012-06	목포대학교 산학협력단
2	2014	산림청	대형 목조건축물 구조요소 개발	2011-01	2014-12	국립산림과학원
3	2014	중소기업청	목조 건축물에 FRP 바(Bar)를 표면 매입하는 보수·보강 공법에 관한 기술개발	2014-10	2015-09	한국교통대학
4	2012	국립산림과학원	공업화 목조주택 사용화 기술 및 체계 개발	2010-01	2013-12	국립산림과학원
5	2009	산림청	국산재를 이용한 한국형 목조건축 기술개발-기계 프리커트 방식의 기둥-보 구조시스템 개발	2007-01	2009-12	국립산림과학원
6	2008	소방방재청	목조 건축물의 내진성능 평가기술 개발	2008-08	2009-03	방재연구소

나. 기존의 특허 등록 사례

번호	구분	등록일자	과제명	출원인
1	특허	2012-11	공학목재를 이용한 한옥 지붕의 경량화 시공방법	최원철
2	특허	2009-05	강구조용 하이브리드 구조재 및 그 제조방법	경민산업 주식회사
3	특허	2014-05	하이브리드 샤프트 및 파이프	피앤티케이코 주식회사
4	특허	2015-01	HIPS-SBR 하이브리드 복합체를 포함하는 미끄럼 방지성능과 열 안전성을 가지는 합성목재 조성물 및 이에 의해 제조된 합성목재	주식회사 엔투하이텍

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

가. 1차 년도 연구개발 목표 및 결과

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2016)	8m 장스팬 적용을 위한 공학목 재-콘크 리트 합성 바닥구 조시스 템 개발	공학목재- 콘크리트 바닥구조 시스템의 수직하중 지지능력 을 고려한 해석모델 개발	• 공학목재 바닥 판에 대한 수직 하중 지지능력 산정 및 평가 • 바닥구조시스템의 형상비와 경간길이에 따른 해석 모델 개발	• 콘크리트 단면을 압축영역에 공학목재부재를 인장영역에 배치, 합성구조시스템으로 개발하고 이에 대한 수직하중 지지능력을 검증함. 이를 위해 Ansys해석모델과 15개 전단실험체 및 6개의 합성구조슬래브를 제작하여 실험연구를 수행함 • 바닥구조시스템의 형상비에 대해 6개의 실험 모델을 제작하고 이에 대한 실험을 수행함. 이를 통해 전단실험을 평가 검증하기 위한 Ansys해석모델에 대해 실험결과를 통해 해석 모델을 검증하고 휨해석모델을 개발함.
		공학목재- 콘크리트 바닥구조 시스템의 대형스케 일실험을 통한 성능실험 연구	• 8m 장경간 확보를 위한 공학목재-콘크리트 합성바닥구조시스템의 대규모 실증 실험 • 수직하중 지지 능력과 최대 변위에 대한 DB 확보	• 8m 장경간 확보를 위한 공학목재-콘크리트 합성바닥구조시스템의 실험모델을 6개 제작하여 실험을 수행중임. 합성바닥구조시스템의 거동 특성을 면밀히 파악하기 위해 추가로 15개의 전단연결재 실험체를 제작하여 실험을 수행함. 또한 Ansys해석모델을 통해 전단 실험결과를 비교 평가할 수 있는 해석모델을 개발하여 검증함 • 전단실험과 휨실험을 통한 합성구조바닥판시스템의 Ansys해석모델을 개발 완료하였음. 이를 통해 합성구조바닥판시스템이 수직하중을 적재시 수직하중 지지능력과 최대 변위를 예측, 판정할 수 있는 능력을 개발 완료함
	9층 목구조 건축물 용 하이브 리드 휨력저 항시스 템 개발	9층 목구조 건축물 적용을 위한 공학목재- 하이브리 드 휨력저항 시스템 개발	• 목구조 건축물 용 휨력저항시스템 실험과 해석관련 선진 해외기술에 대한 기존 사례 조사 • 목구조 건축물의 휨력저항시스템에 대한 연구자료수집 및 목구조 건	• 북미나 유럽 등에서는 자국에서 생산되는 수종들에 대한 기초연구를 토대로 공학목재 규격 표준화를 완성함 • 과거, 5층 이하의 저층 건물에 많이 사용하던 공학목재를 중·고층 건물에도 적용하기 위한 실험적 연구가 북미와 유럽을 중심으로 활발히 이루어지고 있음. 특히 공학목재 벽체에 대한 실험이 많은 편으로 이에 대한 사전 연구조사를 완료함 • 목재의 연결은 주로 볼트 접합으로 이루어지며 이러한 접합부에 대해 연구도 다수 존재함. 이를 통해 해외기술에 대한 DB를 축적함 • Glulam과 같은 공학목재는 주로 보, 기둥으로 사용되며 휨력저항시스템은 여러 종류가 있음 • 공학목재 건물의 휨력저항시스템 종류에 대해 분류하고 평가할 수 있는 DB를 구축 완

		축물용 횡력저항시스템 분류	요함
		목구조 건축물용 하이브리드 횡력저항시스템의 프로토타입 선정 및 프로토타입 내진 성능평가 수행	- RC 전단벽을 횡력저항시스템으로 사용하는 사례가 많은 점을 고려하여, 프로토타입의 횡력저항시스템은 기준에 명시되어 있는 ‘건물골조시스템’의 보통 RC 전단벽으로 결정하여 연구를 수행 완료함 - 프로토타입을 공학목재 골조+RC 전단벽(공학목재 건물), RC 골조+RC 전단벽(RC 건물)의 두 가지 방법으로 설계하고 이에 대한 내진성능평가를 수행, 평가함. 그 결과 두 건물의 전체적인 거동 및 부재별 성능은 큰 차이가 나지 않았음. 두 건물 모두 휨에 대해서는 모두 허용수준을 만족하였지만 벽체의 전단에 대해서는 성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났음. - 탄소배출량 산정법 및 탄소배출계수를 통해 두 건물의 탄소배출량 비교함. 목재의 물량 증가뿐 아니라 목재의 단위무게가 RC보다 훨씬 작기 때문에 내진설계 측면에서 밀면 전단력의 감소와 RC 벽체의 두께 감소로 나타남. 이를 통해 추가적으로 탄소배출의 감소를 정량적으로 평가하였음.
		성능기반 내진설계를 적용할 하이브리드 횡력저항시스템 결정	- 공학목재시스템의 독립적인 횡력저항성능은 효율적이지 않으므로 본 연구단계에서는 RC 전단벽을 주 횡력저항시스템으로 설계할 수 있는 복합구조시스템 설계기법을 완성함으로 성과를 도출함 - 공학목재 건물과, 동일한 규모의 RC 건물의 내진성능을 비교했을 때 크게 차이나지 않으며 추가로 탄소배출량 감소효과도 뚜렷하게 나타남. 따라서 성능기반 내진설계를 적용할 하이브리드 횡력저항시스템을 공학목재 골조+RC 전단벽구조로 결정, 연구성과를 완료함
9층 목구조 적용을 위한 공학목재-하이브리드 접합부 설계기술 개발	합성 다이어프램 면내강성 평가기술	- 내진설계적용을 위한 9층 콘크리트-목조 하이브리드 예제 건물의 다이어프램 거동 평가 - 구조물의 층별 변위 및 거동 특성에 따른 안전성 검증	- 목구조의 다이어프램 거동 시 접합부에 미치는 영향과 그에 따른 보완 사항을 검토 완료함. 이를 통해 실무엔지니어가 공학목재-콘크리트 합성구조시스템의 다이어프램 거동을 평가할 수 있는 설계기법을 제안함 - 다이어프램 거동으로 인한 접합부 응력 집중 현상을 완화시키기 위한 목재 브레이싱 특허를 출원 완료함
	다이어프램 수평 연결부 설계 기술	콘크리트와 공학목재의 수평 연결부 (접합부) 설계 기술 개발	- 콘크리트와 공학목재 커넥터 설계(접합부) 설계기술의 확보를 위해 실무에서 쉽게 참조할 수 있는 접합부 설계예제 및 지침서 제안, 완료함 - 접합부 설계를 위한 각 부재별 사이즈에 대

				한 DB를 구분, 축적하였으며 이를 효과적으로 적요할 수 있도록 부재 사이즈 최적화 소프트웨어를 개발, 완료하였으며 이를 등록함
--	--	--	--	---

나. 1차년도 연도 연구 결과 내용

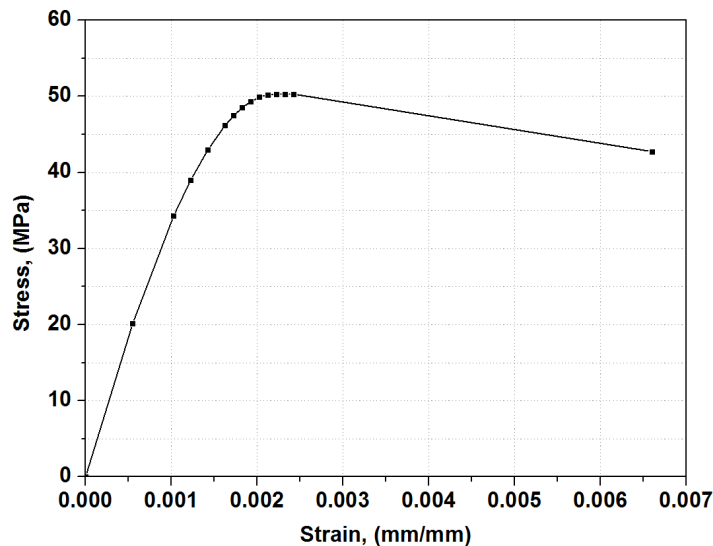
■ 주관연구기관 : 세종대학교

1. 공학목재-콘크리트 바닥구조시스템의 수직하중 지지능력을 고려한 해석모델 개발

가. 재료모델

(1) 콘크리트 재료의 모델

콘크리트 재료의 비선형 거동은 그림 6과 같은 등가 단축 응력 - 변형률 곡선에 의해 제시된다. 압축가력 시 콘크리트에 대하여 얻어진 곡선을 세 부분으로 나눠 확인할 수 있다. 첫 번째 부분(선형 탄성 구간)은 처음에는 EC2에서 제시된 것처럼 $0.4(f_{ck})$ 까지의 탄성 범위에 있다고 가정한다.



[그림 3-1] 콘크리트의 압축응력 - 변형률 그래프

곡선의 두 번째 부분(비례 한도부터 항복)은 EC2에 의하여 주어진 비례 한도 응력에서 시작하여 콘크리트 강도로 가는 비선형 포물선 부분이다.

$$E_{cm} = 9.5(f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (1)$$

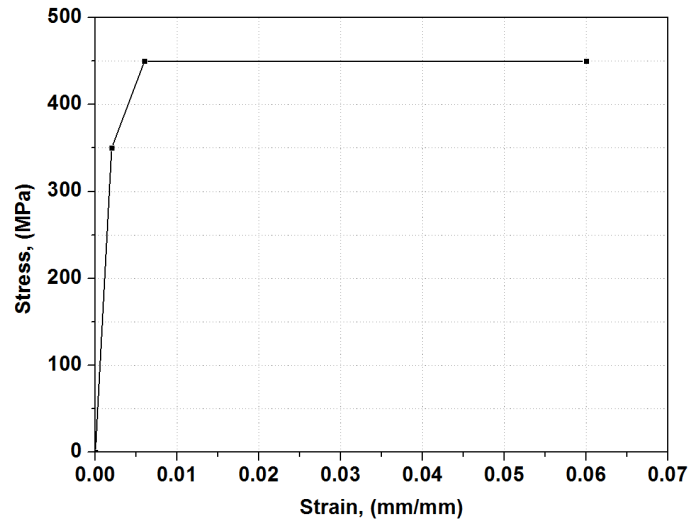
$$\sigma_c = \left(\frac{kn - n^2}{1 + (k - 2)n} \right) f_{ck} \quad (2)$$

여기서, $n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}$; $\epsilon_{c1} = 0.0022$ (최대 압축 응력 의 변형률); $k = 1.1E_{cm} \times \frac{\epsilon_{c1}}{f_{ck}}$

곡선의 세 번째 부분(항복부터 파단까지)은 압축응력은 f_{ck} 보다 작거나 같은 값까지 부분은 감소한다. 구조해석 프로그램 Ansys 18.0의 재료 속성에서 사용 가능한 콘크리트 모델링을 사용하여 콘크리트 재료를 모델링하였다.

(2) 전단연결재의 모델링 특성

전단연결재의 테스트 시뮬레이션은 매우 중요하다. 재료 모델링은 [그림 3-2]과 같이 선형 응력 - 변형률 곡선으로 모델링하였다. 재료의 거동은 초기에는 탄력적이기 때문에 변형이 0.05에서 항복한다. 항복 응력은 0.2 %, 최대 응력은 0.6 % 이다.



[그림 3-2] 커넥터의 응력 - 변형률 그래프

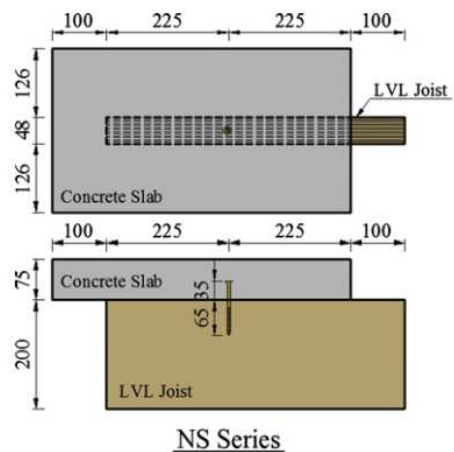
(3) 목재 재료의 특성

목재 진동판의 실질적인 모델을 제공하려면 기계적 특성에 대한 값을 확인하는 것이 필수적이다. 목재의 거동은 제조 회사마다 다르며 서로 수직 인 3 가지 방향에 따라 다르다. 이는 목재의 특성상 재료가 균질하지 않기 때문이다. 그러므로, 목재 거동의 유형은 직교성 물질 거동으로 사료된다. 이 분석에 사용 된 목재는 평균 영률(탄성계수)이 11.3Gpa 인 LVL이며 제조업체의 보고서에 따르면 LVL의 굽힘(휨)강도 및 인장 강도는 46.8Mpa 및 33.4Mpa이다.

나. 유한요소 모델링을 통한 검증



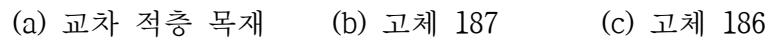
(a) 일반 나사



(b) 기존 연구된 전단해석 실험체

[그림 3-3] 실험체의 세부사항

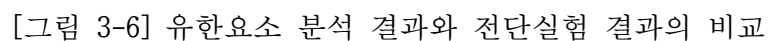
유한요소 모델링은 다음과 같이 진행을 하였다. 적층된 목재를 상업용 소프트웨어 Ansys를 이용하여 교차 적층 목재와 콘크리트를 3차원 10노드 사면체, 3차원 균질 구조 고체로 이산화 하였다. 이산화 방법은 [그림 3-4] 3차원 이산화에 나와 있다.

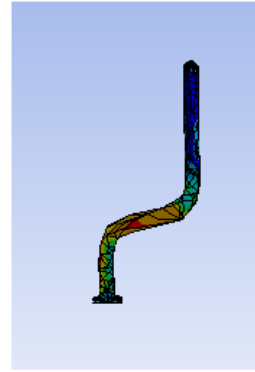
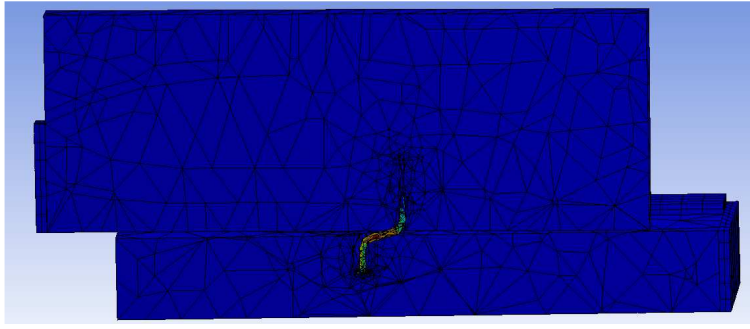


Khorsandnia 는 일반 나사, SFS 그리고 bird-mouth 을 포함한 여러 유형의 목재 - 콘크리트 연결의 동작을 연구하기 위하여 특수 테스트 모델을 만들었다. 전단가력 하에서 직접 전단 시험을 수행했다. 본 연구에서는 구조해석 프로그램인 Ansys 18.0을 이용한 FEA 모델을 분석하였다.



Korsandnia et al.의 실험에서 평균 하중 - 거동 곡선 결과와 유한요소해석 모델링으로부터 얻어진 곡선 결과는 [그림 3-6]에 나와 있다.





[그림 3-7] 파괴 거동

2. 공학목재-콘크리트 바닥구조시스템의 대형스케일실험 통한 성능실험 연구

가. 전단연결재를 통한 공학목재와 콘크리트 전단성능 확인 실험

기존 공학목재를 전단연결재를 통하여 공학목재-콘크리트복합체의 거동을 일체화시켜 목재 단면을 인장 영역에 배치하고, 콘크리트 단면을 압축 영역에 배치하여 혁신적이고, 효율적인 건축구조 재료로 개발하는 것이다. 이러한 구조에서 전단연결재를 통한 부재간의 연결 방법은 공학목재-콘크리트의 복합단면에 대한 구조성능을 최대화할 수 있도록 강하게 설계 및 시공해야 될 부분이지만 이 시스템을 비용, 효율성 및 단순화하기 위해서는 전단연결재의 설치가 복합구조의 성능 부분에 대해 최적화해야한다.

따라서 본 실험의 목적은 앵커의 종류, 정착각, 정착길이 및 소요량 등 여러 가지 특성 변수에 따라 전단력을 측정 하는 것이다. 앵커의 종류는 [그림 3-8], 앵커의 정착각, 정착길이, 소요량은 [표 3-1] 에 나와 있다.



(a) 일반 나사
(Normal screw)



(b) 라그 볼트(Lag bolt)



(c) SFS 스크류

[그림 3-8] 앵커의 종류

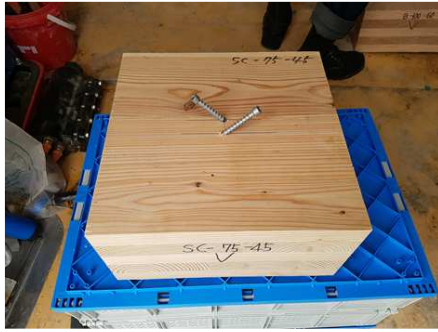
나. 공학목재 전단 실험체

(1) 전단 실험체 세부사항

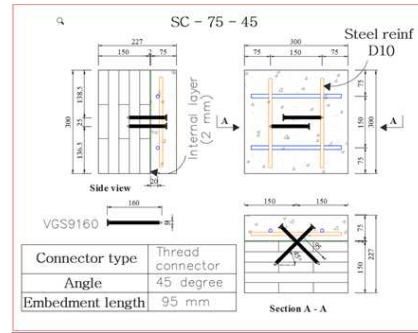
- 사이즈(mm) : $300 \times 300 \times 150$
- 품목 : 국산 낙엽송
- 적층 방식: CLT

(2) 실험체 도면 주요 특성

- 목재의 결방향으로 서로 연직하게 접합한 구조용 집성체
- 목재의 강도등급에 기준하여 선정된 층재를 목재의 결 방향으로 서로 평행하게 적층 접합하여 공학적으로 강도 성능이 보증된 목질재료



(a) 실험체 사진



(b) 실험체 도면

[그림 3-9] 전단 실험체

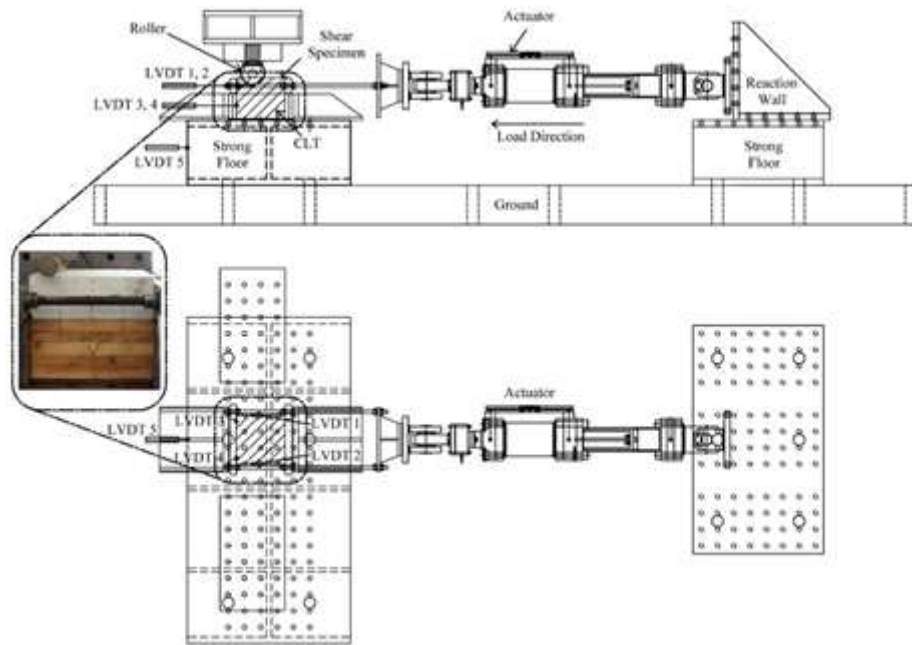
[표 3-1] 전단 실험체

번호	시험체 이름	CLT 두께	콘크리트 두께	전단연결재 연결각	콘크리트 부피	철근 타입 (d=10mm)
1	SC-100-90	150	100	09	0.009	4 × 260
2	SC-100-60			60		4 × 260
3	SC-100-45			45		4 × 260
4	SC-75-45		75	45	0.00675	4 × 260
5	B-100-90	150	100	90	0.009	4 × 260
6	B-100-60			60		4 × 260
7	B-100-45			45		4 × 260
8	B-75-45		75	45	0.00675	4 × 260
9	SFC-100-90	150	150	90	0.009	4 × 260
10	SFC-100-75			75		4 × 260
11	SFC-100-60			60		4 × 260
12	SFC-100-45			45		4 × 260
13	SFC-75-45	150	75	45	0.00675	4 × 260
14	SC-13d		100	45	0.009	4 × 260
15	SD-5d			45		4 × 260
	15EA	(mm)	(mm)	(°)	(m3)	(mm)

다. 전단 실험체의 실험 방법 및 실험체 세팅

공학목재-콘크리트의 전단연결재 전단 실험체의 실험은 위의 [표 3-1]와 같이 15개의 실험체로 구성 하였으며, 직육면체의 콘크리트 부분에 순수전단을 주어 시험체가 파괴 할 때까지 가력하여 스트레인 게이지를 통해 전단하중 및 변위를 측정한다.

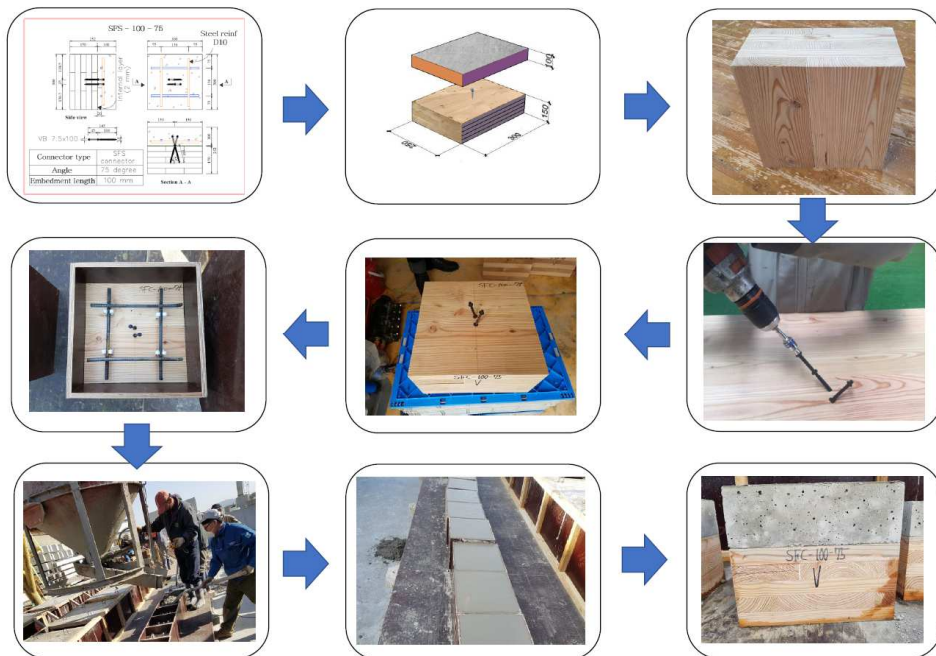
실험 셋팅 도면은 [그림 3-9] 에 나와 있다.



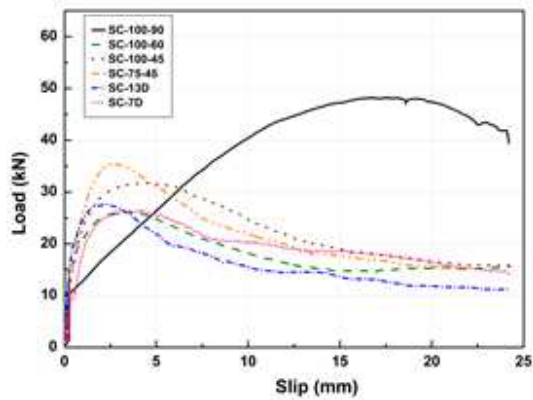
[그림 3-10] 전단 실험 세팅 상세



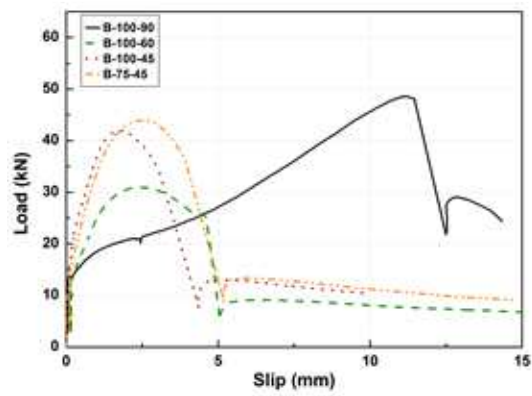
[그림 3-11] 전단 실험 세팅



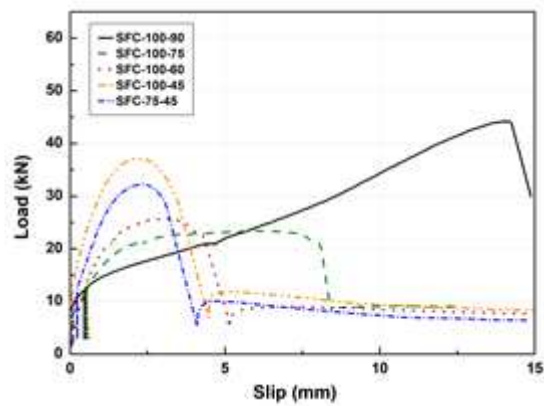
[그림 3-12 전단 실험체 제작 과정 및 실험 과정



(a) 노말 스크류 실험 결과



(b) 라그볼트 실험 결과



(c) SFS 스크류 실험결과

[그림 3-13] 전단 실험체 실험 결과

[표 3-2] 시편의 파괴모드 및 결과 요약

Specimen	Slip modulus (kN/mm)			Shear strength (Fmax,kN)	Slip at Fmax (mm)	Type of connection (P2/P1)
	Ks,0.4	Ks,0.6	Ks,0.8			
SC-100-90	5.65	4.51	3.94	48.21	17.62	Ductile (16.2%)
SC-100-60	52.13	33.3	19.9	26.1	3.52	Fairly ductile (30.6%)
SC-100-45	50.14	31.1	20.4	31.76	4.49	Ductile (22.5%)
SC-75-45	33.42	27.11	22.39	35.43	2.74	Fairly ductile (38.1%)
SC-13D	43.54	44.32	29.1	27.58	2.31	Fairly ductile (43.7%)
SC-7D	20.13	20.61	17.43	26.5	3.21	Ductile (23.8%)
B-100-90	11.65	4.87	4.55	48.54	11.15	Ductile (5.94%)
B-100-60	80.85	35.2	25.1	30.99	2.39	Brittle (73.9%)
B-100-45	116.53	63.56	40.43	41.95	1.71	Brittle (75.3%)
B-75-45	83.42	44.86	32.92	43.94	2.44	Brittle (74.4%)
SFC-100-90	6.58	3.6	3.36	44.21	14.08	Ductile (22.2%)
SFC-100-75	53.92	39.67	18.54	23.4	6.21	Fairly Brittle (61.1%)
SFC-100-60	45.3	41.4	21.5	25.67	2.74	Fairly Brittle (67.1%)
SFC-100-45	89.18	44.89	31.4	37.16	2.3	Brittle (74.9%)
SFC-75-45	47.22	29.4	23.61	32.267	2.25	Brittle (77.3%)

라. 전단실험의 결론

실험연구에서는 전단연결재의 종류, 정착각, 정착길이, 그리고 콘크리트 두께 등을 변수로 공학목재-콘크리트 요소실험체의 거동 및 파괴모드, 연성능력과 전단내력 특성 등을 파악하였다. 다음은 본 연구를 통해 얻어진 결론이다.

(1) 전단연결재의 각각의 정착각에 따른 최대 전단하중의 지지능력은 대체적으로 90° - 75° - 45° - 60° 순서에 따라 감소하고 연성능력은 대체적으로 90° - 75° - 45° - 60° 순서로 증가하였다. 90° 에서 가장 컸으며 연성 또한 크게 관찰되었다. 이는 대체로 정착각이 수직에 가까울수록 최대 횡하중의 지지능력과 항복변형률은 증가하고 전단내력과 연성능력은 최대를 보였다.

(2) SC-13d의 시편과 SC 노말 스크류를 사용한 시편을 비교 분석한 결과 전단연결재와 콘크리트 정착길이가 비교적 짧은 경우에는 콘크리트의 과도한 균열과 분리 현상이 일어나 콘크리트 파괴 및 전단연결재의 뽑힘 현상이 발생하였다.

(3) 정착각에 따라 설치된 두 전단연결재의 한쪽에만 전단하중을 받는 실험체는 수직으로 전단연결재가 설치된 실험체 보다 전단 강도와 연성이 작게 관찰되었다. 이에 따라 90° 실험체에서 전체적으로 전단강도와 연성이 가장 높게 발생하였고 전단하중에 대한 합성 효과는 하중 가력방향의 직교 방향인 90° 에서 최적으로 발현하였다.

(4) 본 실험에서 전단 하중에 대한 최대 성능 확보를 위한 콘크리트 정착 깊이 및 정착각 그리고 전단연결재 시편은 SC-노말 스크류, 90°의 정착각과 95mm의 정착 깊이를 갖는 SC-100-90의 2번 시편이 가장 최대 성능을 갖는 것으로 나타났다. 이에 따라 90° 정착각과 정착깊이가 공학목재와 콘크리트의 합성거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

마. 공학목재-콘크리트 슬래브의 휨 및 진동성능 확인 실험

본 실험의 목적은 공학목재-콘크리트복합체의 바닥판에 대한 수직하중 지지능력 산정 및 평가와 본 시스템의 일체화 거동에 대해 구조성능을 알아보기 위해 앵커의 종류, 정착각, 및 소요량 등 여러 가지 특성 변수에 따라 휨 모멘트 및 진동에 대한 사용성을 측정 하는 것이다. 앵커의 종류는 [그림 3-14], 앵커의 정착각, 정착깊이, 소요량은 [표 3-3]에 나와 있다.



(a) 라그 볼트(Lag bolt)

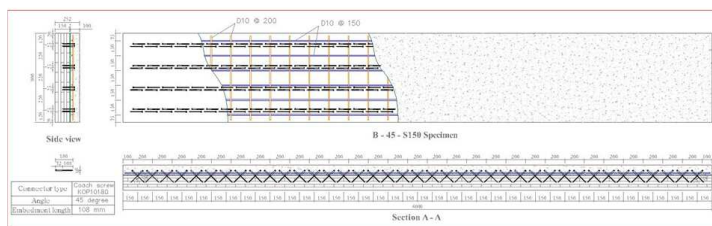


(b) SFS 스크류

[그림 3-14] 앵커의 종류

휨-진동 실험체 세부사항

- 사이즈(mm) : 6000×900×150
- 품목 : 국산 낙엽송
- 적층 방식: CLT
- 목재의 결방향으로 서로 연직하게 접합한 구조용 집성체
- 목재의 강도등급에 기준하여 선정된 층재를 목리 방향이 서로 평행하게 적층 접합하여 공학적으로 강도 성능이 보증된 목재료



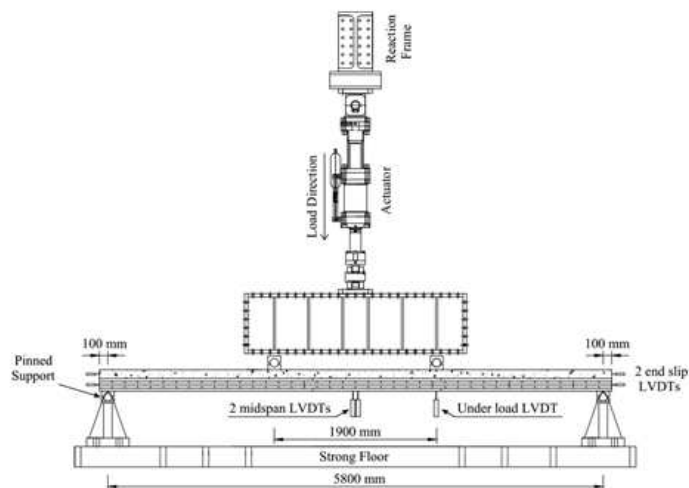
[그림 3-15] 휨-진동 실험체 상세

[표 3-3] 휨,진동 실험체

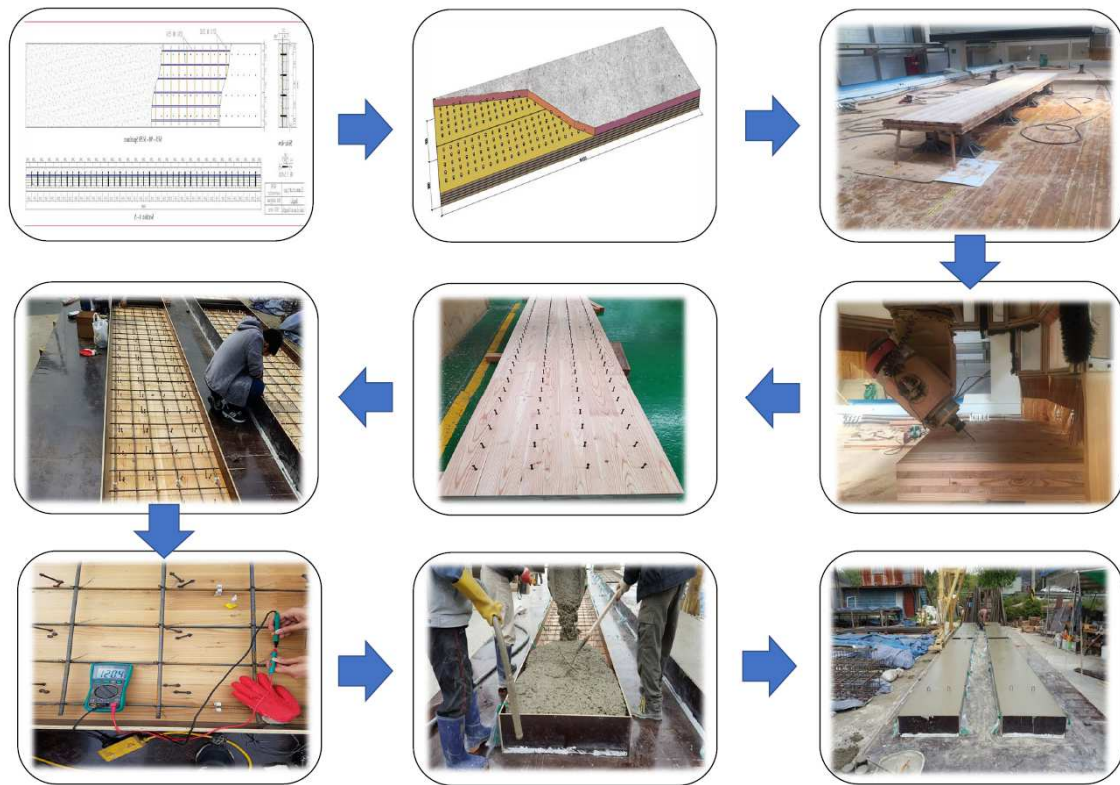
번호	시험체 이름	CLT 두께	콘크리트 두께	전단연결재 연결각	콘크리트 부피	전단연결재 소요량
1	Standard	-	-	-	-	
2	B-45-S150	150	100	45	0.54	B: 400
3	SFC-90-S150	150	100	90	0.54	SFC: 400
4	SFC-45-S150	150	100	45	0.54	SFC: 800
5	SFC-45-S300	150	100	45	0.54	SFC: 400
	5EA	(mm)	(mm)	(°)	(m3)	EA

바. 휨 실험체의 실험 방법 및 실험체 세팅

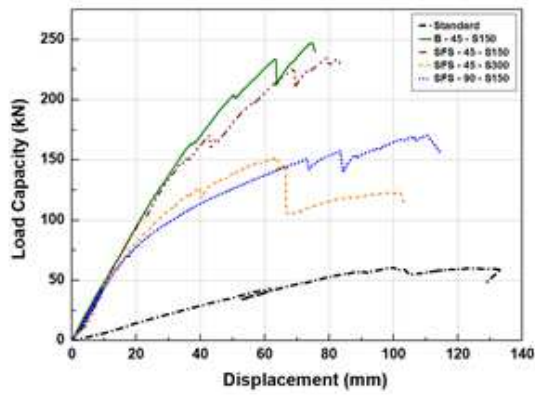
공학목재-콘크리트합성 슬래브 휨 실험체의 실험은 위의 [표 3-3]와 같이 5개의 실험체로 구성 하였으며, 콘크리트에 2개의 유압장치로 수직하중을 가력하여 시험체가 파괴 할 때까지 철근의 스트레인 게이지를 통해 전단하중 및 변위를 측정한다. 실험 셋팅 도면은 [그림 3-16]에 나와 있다.



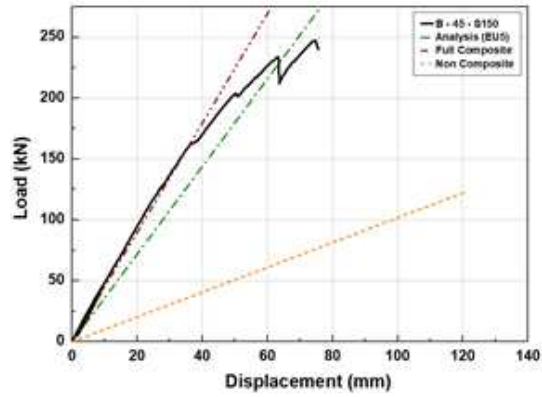
[그림 3-16] 휨 가력 실험 상세 및 측정기 위치



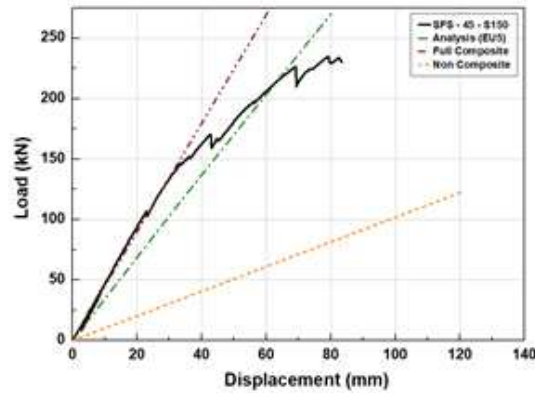
[그림 3-17] 휨 실험체 제작 과정



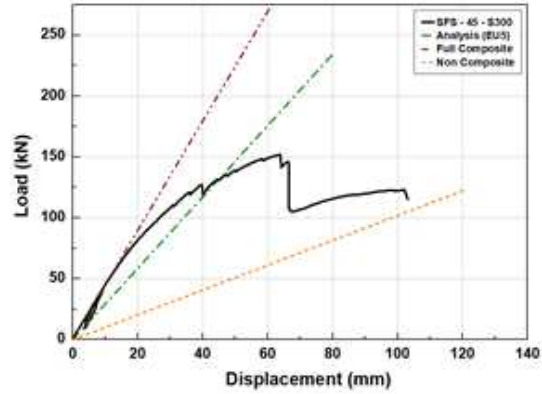
(a) 실험결과



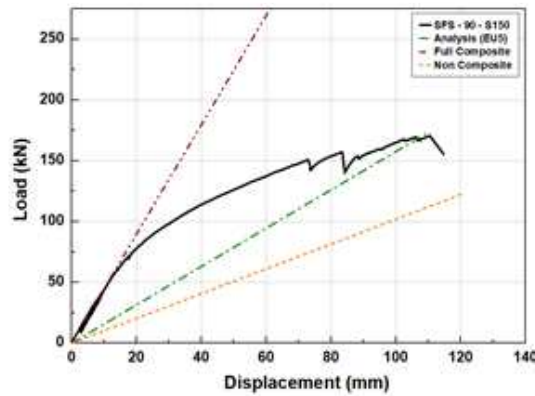
(b) B - 45 - s150



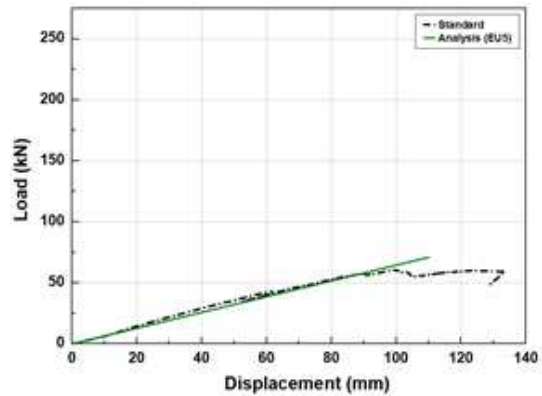
(c) SFS - 45 - s150



(d) SFS - 45 - s300



(e) SFS - 90 - s150



(f) 표준 시험체

[그림 3-18] 휨 가력 실험 결과

[표 3-4] 휨 가력 실험 결과 요약

Specimen	At 0.4 Fmax		최대하중 F _{max} (kN)	가운데 처짐 $\delta_{F_{max}}$ (mm)	End slip - 좌 v_{Left} (mm)	End slip - 우 v_{right} (mm)
	0.4 F _{max}	$\delta_{0.4F_{max}}$ (mm)				
Standard	24.4	33.29	61.22	100.26	-	-
B-45 - s150	98.6	20.86	247.32	74.77	0.29	0.37
SFS - 45 - s150	93.44	19.98	234.79	79.28	1.39	1.24
SFS - 45 - s300	60.24	13.78	152.12	63.86	10.59	2.01
SFS - 90 - s150	68.22	16.44	170.45	110.53	6.07	4.93

사. 진동실험

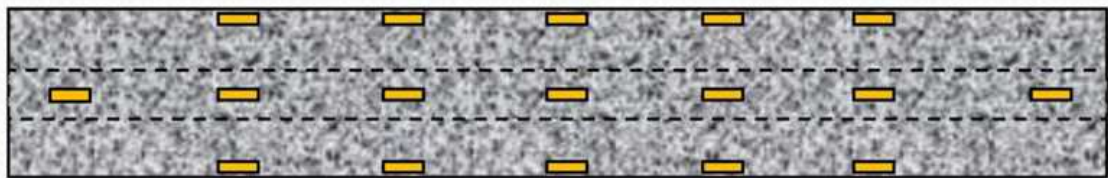
경량 바닥 구조는 진동에 약하고, 저주파수에서 공진하기 쉽고 강성이 낮고, 가볍고, 목재의 댐핑 (damping)이 약하기 때문에 충격에 강한 차음이 부족하다.

사무실 건물, 병원 및 가정용 주택과 같은 구조물은 장거리로 경향하고 낮은 진동 환경이 필요하다. 고유 진동수, 모델 감쇠비, 모드 모양 및 구조체의 모양은 같은 바닥 동적 매개 변수의 측정에 대한 필요성이 커지고 있다. 주거용 바닥의 경우, 인간의 불편함을 예방하기 위해 기본 주파수는 8Hz 이상 이어야 한다.

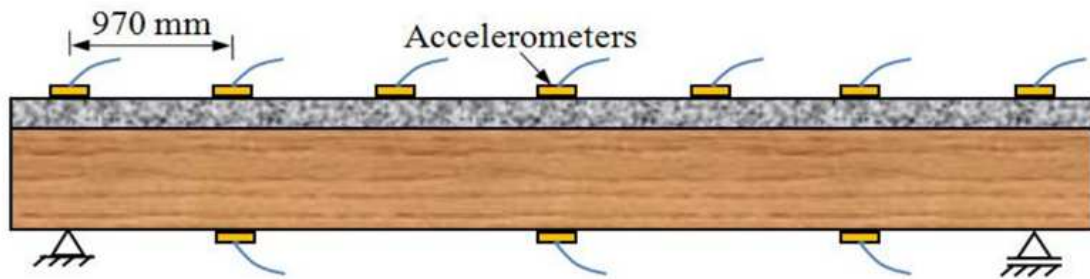
본 실험의 목적은 본 구조체의 재료 중 공학목재의 특성이 사용성에 있어서 진동에 매우 취약하기 때문에 공학목재-콘크리트 합성구조체의 상용화 및 사용성을 위하여 실제 사람이 위에 올라간 뒤 무작위로 진동을 가력하여 사용성을 측정할 예정이고, 가장 일반적인 비파괴 실험 방법이 바닥에 대한 동적 테스트에 사용되었으며 실험 방법은 다음과 같다.

(1) 사용성 검증을 위한 진동실험 실험방법 및 실험체 세팅

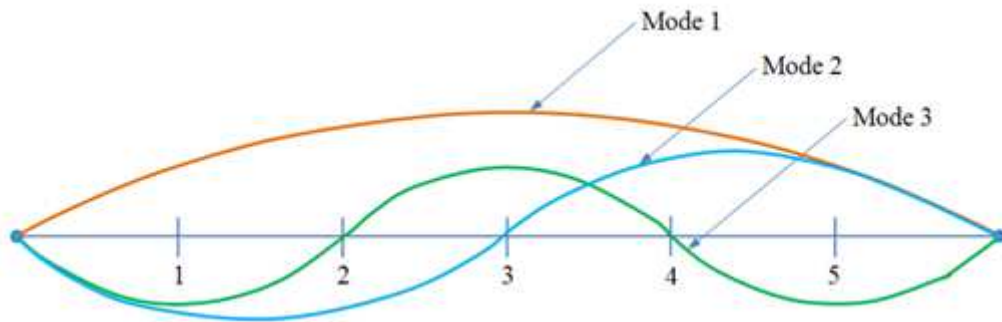
- 뒤꿈치 낙하 테스트 : 잘 알려진 잘 교정 된 바닥 테스트
- 충격 해머 테스트 : 바닥의 동적 성능 평가에 사용
- 강제 진동 테스트 : 시스템의 강성과 모드 형상을 측정하는 데 사용되는 가장 포괄적 인 실험



[그림 3-19] 진동성 측정, 실험체를 위에서 바라본 모습



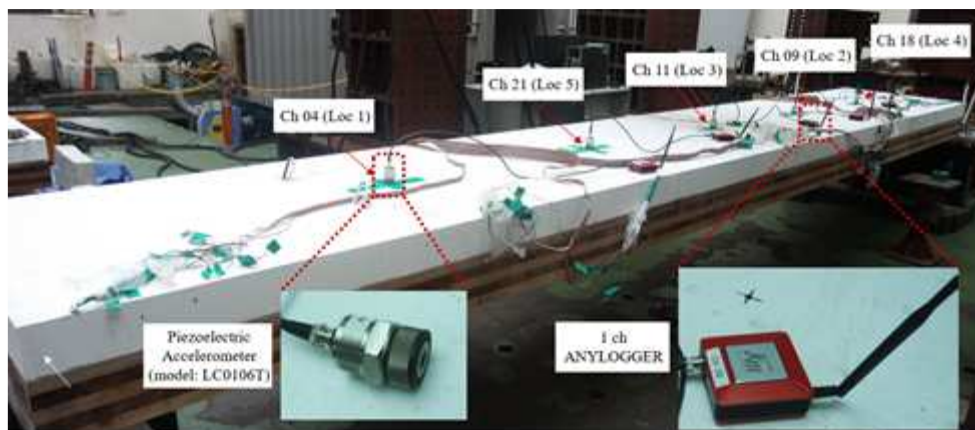
[그림 3-20] 진동성 측정, 실험체를 전면에서 바라본 모습



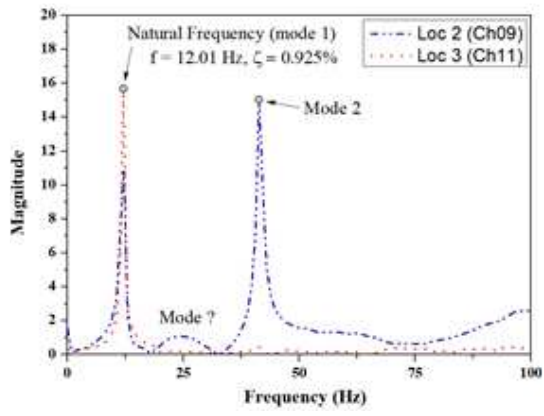
[그림 3-21] 1,2,3차 모드

(2) 진동실험의 목표 및 주의사항

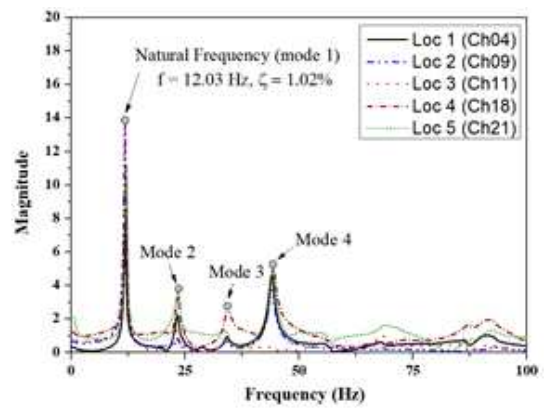
- 가속도계는 5g의 전체 범위를 가지는 측정계를 사용함
- 중심선을 따라 콘크리트 슬래브 위에 7 개의 가속도계를 사용하는 목적은 처음 세 모드를 정확하게 유도
- 가장자리의 가속도계는 처음 두 비틀림 모드를 측정



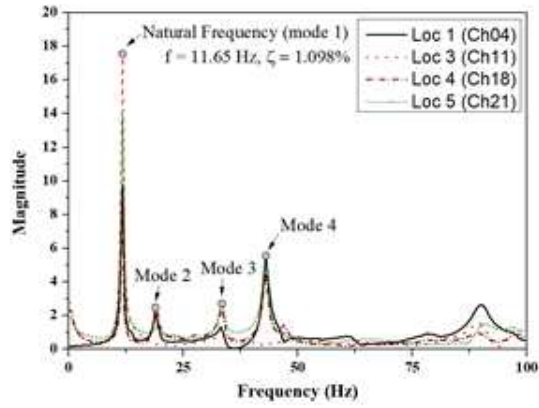
[그림 3-22] 동적특성 실험 결과



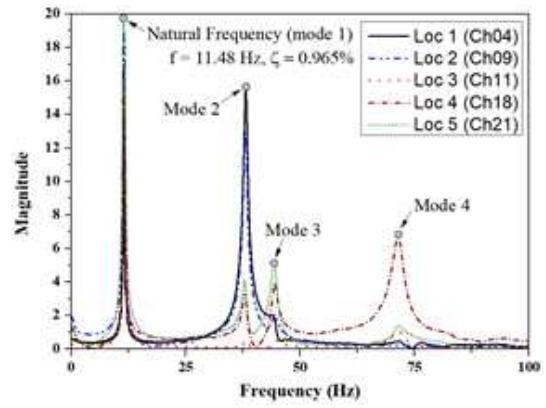
(a) B - 45 - s150



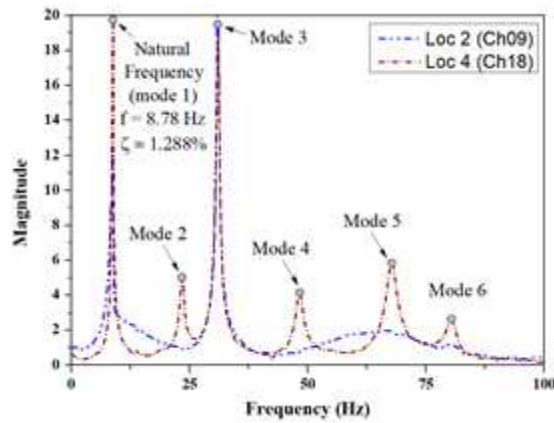
(b) SFS - 45 - s150



(c) SFS - 45 - s300



(d) SFS - 90 - s150



(e) 표준 시험체

[그림 3-23] 동적특성 실험 결과

3. 9층 목구조 건축물 적용을 위한 공학목재-하이브리드 횡력저항시스템 개발

가. 목구조 건축물용 횡력저항시스템 실험과 해석 관련 선진 해외기술에 대한 기존 사례 조사

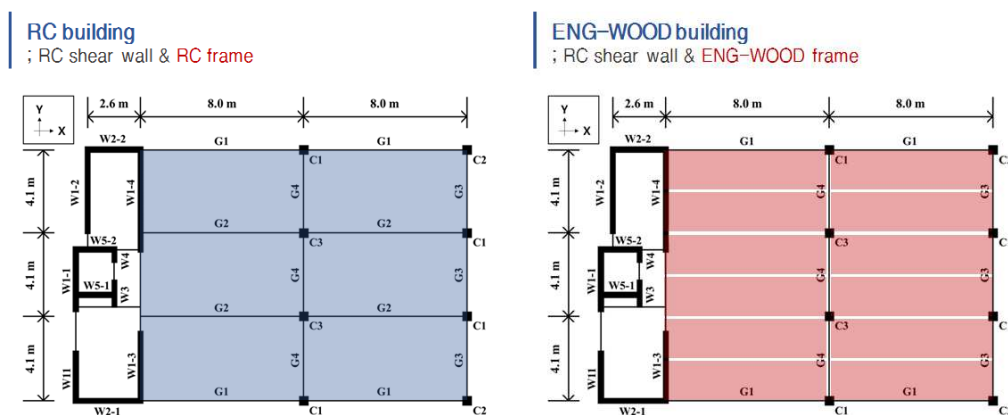
- 북미나 유럽 등에서는 자국에서 생산되는 수종들에 대한 기초연구를 토대로 공학목재 규격 표준화
- 과거, 5층 이하의 저층 건물에 많이 사용하던 공학목재를 중·고층 건물에도 적용하기 위한 실험적 연구가 북미와 유럽을 중심으로 활발히 이루어지고 있음. 특히 공학목재 벽체에 대한 실험이 많은 편
- 목재의 연결은 주로 볼트 접합으로 이루어지며 이러한 접합부에 대해 연구도 다수 존재함

나. 목구조 건축물의 횡력저항시스템에 대한 연구자료수집 및 목구조 건축물용 횡력저항시스템 분류

- Glulam과 같은 공학목재는 주로 보, 기둥으로 사용되며 횡력저항시스템은 여러 종류가 있음
- 공학목재 건물의 횡력저항시스템 종류
 - RC core wall
 - Glulam brace with steel connector
 - CLT panel wall
 - Steel brace frame

다. 구조 건축물용 하이브리드 횡력저항시스템의 프로토타입 및 프로토타입 내진성능평가

- 국내건축구조기준에는 목조건축물에 대한 높이 제한이 있기 때문에 목재 단독으로는 고층 건물에 적용할 수 없음
- RC 전단벽을 횡력저항시스템으로 사용하는 사례가 많은 점을 고려하여, 프로토타입의 횡력저항시스템은 기준에 명시되어 있는 ‘건물골조시스템’의 보통 RC 전단벽으로 결정



[그림 3-24] 프로토타입의 평면 및 슬래브 형식

- 프로토타입을 공학목재 골조+RC 전단벽(공학목재 건물), RC 골조+RC 전단벽(RC 건물)의 두 가지 방법으로 설계

(가) RC 재료 강도

- ① 콘크리트 압축강도 (fck) : 24 MPa
- ② 철근 항복인장강도 (fy) : 400 MPa

[표 3-5] 중력하중

Story	RC		ENG-WOOD	
	Dead Load	Live Load	Dead Load	Live Load
Typical	5.34	3.50	4.80	3.50
Roof	6.30	1.00	4.04	1.00

(나) 내진설계 조건

- ① 지역계수: 0.176 g
- ② 중요도계수: 1.0
- ③ 지반분류: SD
- ④ 지진력저항시스템: 철근콘크리트 보통전단벽(건물골조시스템)
- ⑤ 반응수정계수: 5.0

(다) 공학목재 설계 조건

- ① 수종: 국내산 낙엽송
- ② 등급: 대칭다른등급(10S-30B)
- ③ 설계법: 허용응력설계법(KBC2016)
- ④ 보 부재 양단: 핀 접합 가정
- ⑤ 보 단부 접합부: 볼트 접합(볼트 직경=16 mm)

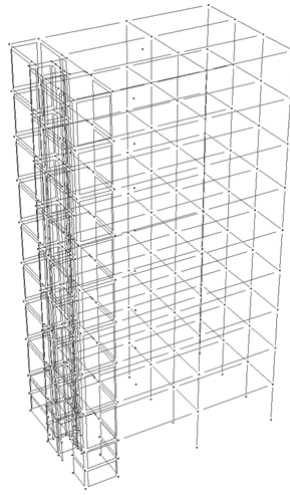
(라) 설계 결과 (단위: mm)

[표 3-6] 설계 결과

Element	Section	RC	ENG-WOOD
Girder	G1	300 × 500	160 × 530
	G2	350 × 550	-
	G3	300 × 500	160 × 530
	G4	350 × 550	160 × 760
Column	C1	500 × 500	360 × 360
	C2	350 × 350	300 × 300
	C3-11)	600 × 600	480 × 480
	C3-22)	450 × 450	
Wall		300	200
Weight (kN)		24949	15556
1) 1F-4F, 2) 5F-9F			

(마) 내진성능평가

- ① 해석 모델

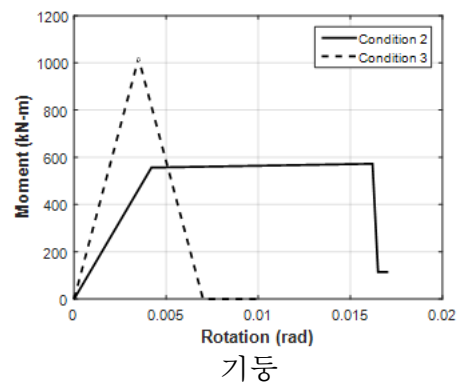
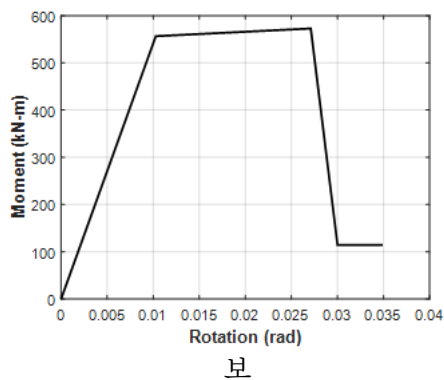


[그림 3-25] PERFORM-3D Model

② RC 전단벽 비선형 모델

- ㉓ 휨 특성: Fiber 요소, 콘크리트/철근의 응력-변형률 관계 입력
- ㉔ 전단 특성 : 탄성

③ RC 보/기둥 비선형 모델



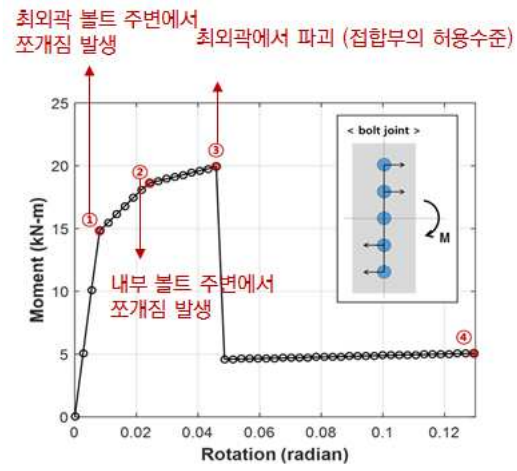
[그림 3-26] 보/기둥 모멘트-회전각 관계

④ 공학목재 보 비선형 모델

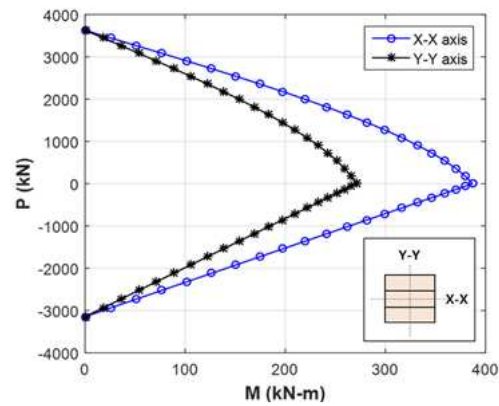
- ㉓ 보 부재 : 탄성
- ㉔ 단부 접합부 : Moment hinge 사용

⑤ 공학목재 기둥 비선형 모델

- ㉓ PM 상관계수 작성
- ㉔ 재료강도 : 기준허용응력의 2.1배
- ㉔ 축에 따라 재료 특성이 다름 (직교 이방성 재료)



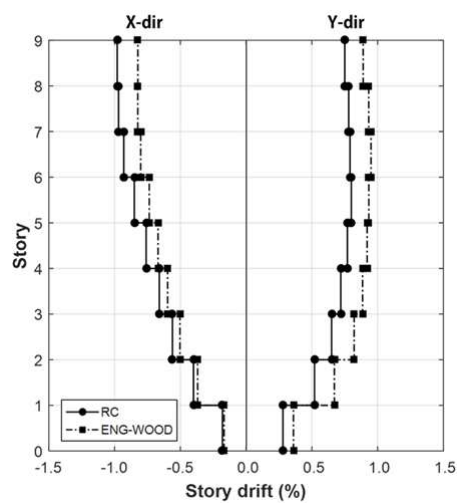
[그림 3-27] 볼트 접합부의 모멘트-회전각 관계



[그림 3-28] 공학목재 기둥의 PM 상관곡선

⑥ 성능평가 결과

- 두 건물의 전체적인 거동 및 부재별 성능은 큰 차이가 나지 않았음.
- 두 건물 모두 휨에 대해서는 모두 허용수준을 만족하였지만 벽체의 전단에 대해서는 성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.



[그림 3-29] 최대 층간변위각

[표 3-7] 전단벽 단부 압축변형률 및 소성회전각 결과 (단위:%)

Wall ID	단부압축변형률		소성회전각	
	RC	ENG-WOOD	RC	ENG-WOOD
W1-1	0.04	0.07	0.14	0.13
W1-2	0.06	0.12	0.16	0.14
W1-3	0.06	0.09	0.22	0.19
W1-4	0.07	0.13	0.21	0.18
W2-1	0.05	0.09	0.41	0.38
W2-2	0.06	0.13	0.54	0.55
W3	0.04	0.06	0.16	0.14
W4	0.02	0.04	0.15	0.13
W5-1	0.03	0.05	0.45	0.42
W5-2	0.03	0.05	0.47	0.45
W11	0.05	0.07	0.15	0.14

[표 3-8] 전단벽 전단력 검토 결과

Wall ID	RC			ENG-WOOD		
	Fu	Fn	DCR	Fu	Fn	DCR
W1-1	769	1272	0.60	659	856	0.77
W1-2	1645	1739	0.95	1284	1170	1.10
W1-3	1510	1442	1.05	939	970	0.97
W1-4	2829	2078	1.36	1615	1397	1.16
W2-1	2293	1601	1.43	1460	913	1.60
W2-2	2326	1353	1.72	1619	741	2.18
W3	147	636	0.23	105	428	0.25
W4	19	705	0.03	61	374	0.16
W5-1	839	806	1.04	525	542	0.97
W5-2	611	806	0.76	481	489	0.98
W11	747	1119	0.67	598	684	0.87

(바) 탄소배출량 산정법 및 탄소배출계수를 통해 두 건물의 탄소배출량 비교

- RC 건물이 공학목재 건물에 비해 약 2배정도 더 많이 탄소배출
- RC Core: 슬래브는 동일하지만 벽체 두께의 차이로 인해 탄소배출량 차이 발생
- 공학목재 Frame: 합성바닥판에 콘크리트 사용하여 RC 건물 슬래브 두께의 2/3만 사용하기 때문에 탄소배출량도 2/3 정도로 나타남
- 공학목재 건물 : RC 골조 대신 공학목재 골조를 사용함으로써 콘크리트의 물량 및 탄소배출량이 감소되는 것은 당연한 결과임
- 목재의 단위무게가 RC보다 훨씬 작기 때문에 공학목재 건물은 RC 건물에 비해 전체 건물 무게가 작음. 따라서 밀면전단력이 작아지게 되고 이는 RC 벽체의 두께 감소로 이어질 수 있음. 이를 통해 추가적으로 탄소배출의 감소가 발생함

[표 3-9] 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인 (국토교통부)

Material	Unit	Carbon emissions factor (tCO ₂ /unit)				Carbon emissions factor (kgCO ₂ /unit)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total	
Ordinary portland cement	kg	9.31×10^{-4}	2.04×10^{-5}	1.88×10^{-7}	9.52×10^{-4}	0.95

* 자재투입에 따른 탄소배출량 : 실제 투입자재 물량을 사용해야 하지만, 본 연구에서는 콘크리트의 단위중량을 이용해 산정한 각 부재의 질량을 이용

[표 3-10] RC 건물

Part	Element	Mass (kg)	Carbon emissions (kgCO ₂)
Core	Slab (150 mm)	103.0	97.9
	Wall (300 mm)	755.0	717.3
Frame	Slab (150 mm)	651.0	618.5
	Girder & Column	473.0	449.4
Sum			1883.1

[표 3-11] 공학목재 건물

Part	Element	Mass (kg)	Carbon emissions (kgCO ₂)
Core	Slab (150 mm)	103.0	97.9
	Wall (200 mm)	514.0	488.3
Frame	Slab (100 mm)	434.0	412.3
	Girder & Column	-	
Sum			998.5

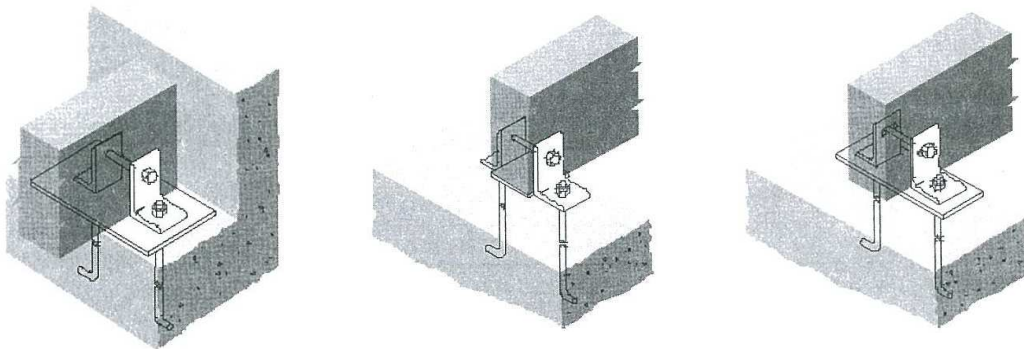
라. 성능기반 내진설계를 적용할 하이브리드 횡력저항시스템

- 공학목재의 횡력저항성능은 명확하지 않으므로 공학목재 골조를 주 횡력저항시스템으로 설정하는 것은 무리임
- 공학목재 건물과, 동일한 규모의 RC 건물의 성능을 비교했을 때 크게 차이나지 않으며 탄소배출량 감소효과도 뚜렷하게 나타나므로 성능기반 내진설계를 적용할 하이브리드 횡력저항시스템을 공학목재 골조+RC 전단벽 구조로 결정

4. 9층 목구조 적용을 위한 공학목재-하이브리드 접합부 설계기술 개발

목재와 목재끼리의 접합에 대한 기준은 건축구조기준 (KBC2016) 제 8장에 상세하게 기술되어 있으나 목재와 이종재료 간 하이브리드 접합 내력에 대한 설명은 제한적이다. 이로 인해 기준이 상세를 다 포함하기 어려울 가능성이 존재한다.

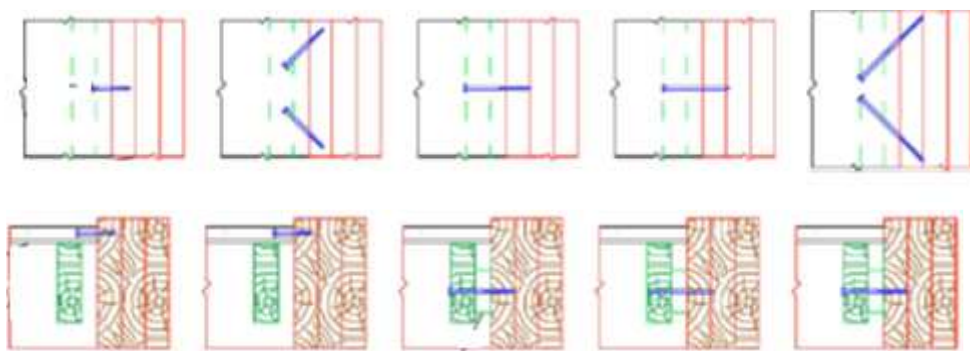
실무자들은 목재와 콘크리트의 접합을 설계할 때 미국의 NDS가 권장하는 상세를 참고하기도 한다. 건축구조기준에는 목재와 콘크리트의 직접 접합에 관해서는 설명이 없지만 목재와 접합철물 그리고 접합철물과 콘크리트에 대한 기준은 나와 있으므로 각각을 설계하는 것이 하나의 목재-콘크리트 접합 설계 방안이 될 수 있다.



[그림 3-30] 목재 보와 콘크리트의 접합 상세 예시 (NDS 2010)

목재와 콘크리트를 직접 연결하는 파스너의 경우, 위와 같은 방법으로 설계가 불가능하다. 또한 건축구조기준에도 관련 내용 없으므로 설계자들은 선행 연구결과를 찾아 참고하여 설계해야 한다.

Newcombe (2010) 는 목재-콘크리트 합성 슬라브를 횡저항시스템에 연결하기 위해 다음 5가지의 파스너의 상세를 사용하였고 이들의 내력을 반복가력 실험을 통해 평가하였다.



[그림 3-31] 목조-콘크리트 합성 슬라브의 접합 상세 종류 (Newcombe 2010)

Newcombe (2010)는 콘크리트와 목재를 연결하는 파스너를 유로코드 5를 참고하여 설계하였다. 파스너의 파괴모드는 목재-강재 접합부의 경우와 동일하게 가정하고 강재 대신 콘크리트의 강도를 설계식에 사용하였다. 유로코드 5에 나온 설계식은 아래와 같다.

- 얇은 금속판에 일면전단이 작용할 경우 :

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.4 f_{h,k} t_1 d \\ 1.15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,k}} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (a) \\ (b) \end{array}$$

- 두꺼운 금속판에 일면전단이 작용할 경우 :

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} t_1 d \\ f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2.3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k}} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (c) \\ (d) \\ (e) \end{array}$$

- 금속판 두께와 상관없이 이면전단이 작용할 경우 :

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2.3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k}} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (f) \\ (g) \\ (h) \end{array}$$

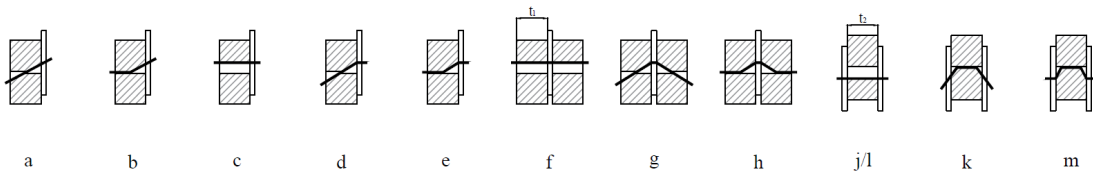
- 얇은 금속판이 바깥부재로 이면전단이 작용할 경우 :

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1.15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,2,k}} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (j) \\ (k) \end{array}$$

- 두꺼운 금속판이 바깥부재로 이면전단이 작용할 경우 :

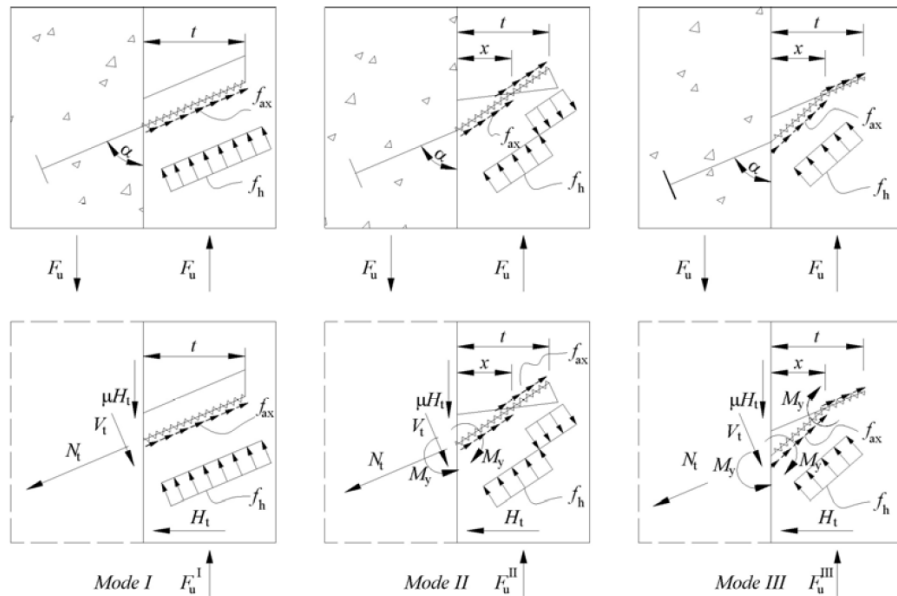
$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 2.3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k}} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (l) \\ (m) \end{array}$$

$F_{v,Rk}$	각 전단면에서의 하중전달능력
$f_{h,k}$	목재 지압강도
t_1	목재의 두께 또는 나사못의 관입 깊이
t_2	가운데 목재의 두께 (이면전단 발생시)
d	파스너의 지름
$M_{y,Rk}$	파스너의 고유 항복모멘트
$F_{ax,Rk}$	파스너의 고유 못 뽑기 허용 하중



[그림 3-32] 금속-목재 접합부의 파괴모드

파스너가 경사각을 가질 경우는 Kavaliauskas (2007)을 참고하여 설계하였다.



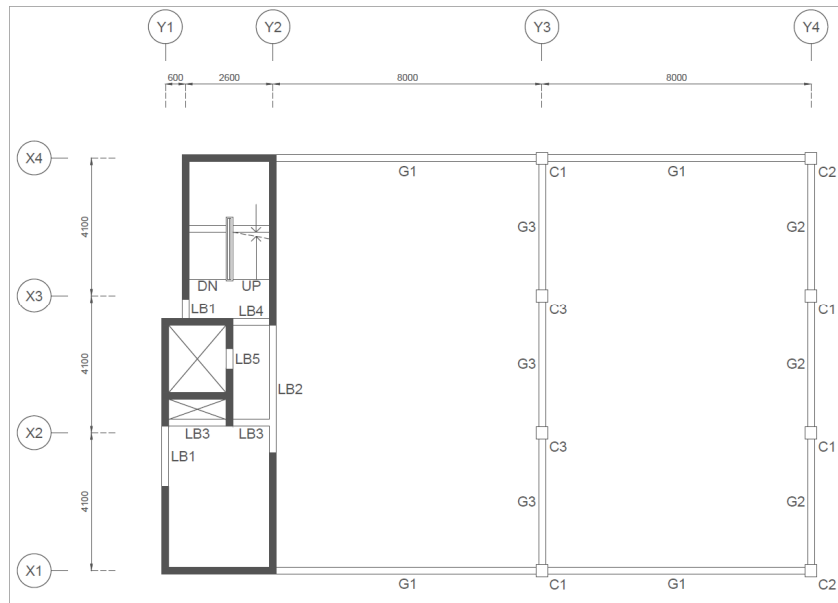
[그림 3-33] 경사각을 가지는 파스너의 목재-콘크리트 접합 내력 Kavaliauskas (2007)

가. 설계 예제

공학목재 하이브리드 시스템을 사용하여 고층 목구조물의 프로토타입 설계를 수행하였다. 건물의 용도는 오피스이며 지상 9층 높이의 규모이다. 목구조와 철근콘크리트가 결합된 구조형식을 가지고 있다. 건축물은 아래의 기준을 만족하도록 설계되었다.

- (1) 건축구조기준(KBC 2016, 국토교통부 고시)
- (2) 콘크리트 구조설계기준(KCI 2012, 한국콘크리트학회)
- (3) Special Design Provisions for Wind & Seismic (SDPWS 2016, AWC)

건축물의 바닥은 목재-콘크리트 합성 슬라브를 사용하였고 슬라브의 스패ンは 8미터로 설계하였다. 기둥은 구조용집성재를 사용하였고 층고는 4미터이다. 횡저항 시스템은 철근콘크리트로 선정하였다. 철근콘크리트 전단벽은 건축물의 횡력을 부담하는 동시에 화재가 발생했을 시 대피 통로를 제공할 수 있는 장점이 있으므로 고층 목조 건축물에 유리하다.



[그림 3-34] 예제건물의 기준층 구조평면도

설계하중은 KBC2016내 근린생활시설 건물을 대상으로 하여 선정되었다. 지진설계하중 선정 시에는 건물의 위치를 중약진 지역인 서울로 가정하였다. 선정된 하중을 바탕으로 초기 설계를 수행하고, 건축물의 층별 전단력을 계산하였다.

접합부를 설계하기 위해 x와 y 방향의 횡하중에 대한 구조 특성을 분석하였다. x 방향에 대한 횡하중은 철근콘크리트 전단벽의 압축력으로 충분히 지지할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 y-방향에 횡하중이 작용할 때는 강성이 약한 목구조가 캔틸레버와 비슷한 거동을 하게 되어 접합부가 매우 취약한 것으로 나타났다.

나. 접합부 설계

목재와 목재가 연결되는 접합은 파스너 설계기준 (KBC2016) 을 참고하여 설계되었다. 파스너로는 일반 나사못 타입이 사용되었다. 목재 보와 철근콘크리트 전단벽이 연결되는 접합부에는 접합철물과 다우얼이 사용되었다. 접합철물과 다우얼은 이탈리아 Rothoblaas 사의 제품을 사용하는 것으로 가정하였다. 유로코드 설계식 대신에 KBC2016 기준에 나온 다우얼 설계 기준을 참고하여 설계 내력을 검증하였다. 보를 콘크리트 위에 얹지 않고 직접 철물을 통해서 하중이 철근 콘크리트 전단벽 면에 직접 전달하도록 구조를 배치하였다.

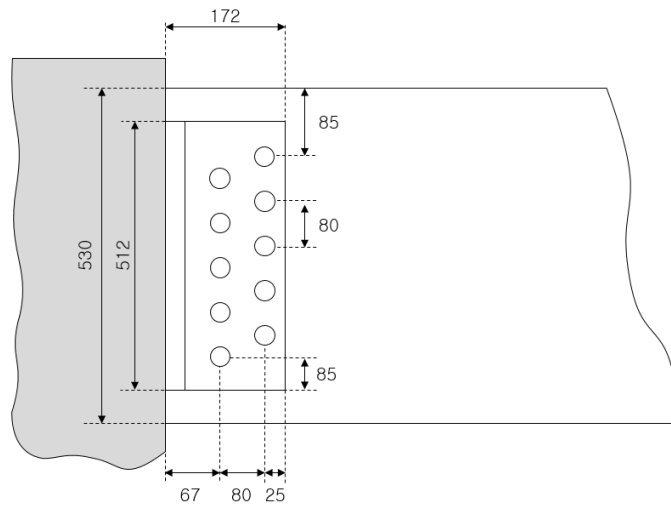


(a) AluMAXI

(b) STA

출처: Rothoblaas, Wood connectors and timber plates catalogues

[그림 3-35] Rothoblaas사의 AluMAXI와 STA



[그림 3-36] 목재-철근콘크리트 전단벽 접합상세

다. 2차 년도 연구개발 목표 및 결과

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2017)	공학목재-콘크리트 합성패널 바닥구조시스템 설계법 개발	공학목재-콘크리트 합성패널 바닥구조 시스템 해설모델 검증	공학목재 바닥판에 대한 강도 및 변형능력과 파괴모드를 재현할 수 있는 해석모델 개발	- Ansys 프로그램을 사용하여 푸시아웃 테스트를 통하여 유한요소해석 예측값과 시험결과된 전단하중-변위곡선을 비교 분석함 8m 바닥판 수직하중 가력 모델링도 Ansys를 사용하였으며 비선형 스프링을 사용하여 전단연결재의 해석을 진행하여 예측값과 실험결과를 비교 분석함. 정확한 실험 데이터를 사용하여 휨 시편의 전체 응답 및 용량에 대한 취성적 파괴 값을 예측할 수 있게됨
		공학목재-콘크리트 합성패널 바닥구조 시스템 설계법 개발	현행설계기준에 따라 형상과 경간비에 따른 공학목재-콘크리트 합성패널 바닥 구조시스템 설계 및 설계절차 정립	- 바닥구조시스템의 형상비와 경간길이에 대한 설계법을 개발하기 위하여 개발된 해석모델을 이용하여 합성패널 바닥구조시스템의 설계법 절차를 완성함 - 내화기준 및 법적 허용 기준치에 대한 사례 조사와 전문가 자문을 통하여 친환경적이고 탄소저감에 효과적인 바닥구조시스템을 개발함 - 전단실험을 통해 얻은 자료로 전단연결재 설계법이 합성 구조의 다양한 유형에 적용할 수 있는 결과를 얻음
	9층 목구조 건축물 용 하이브리드 횡력저 항시스 템 성능기 반 내진설 계 매뉴얼 개발	9층 목구조 건축물용 하이브리드 횡력저항 시스템 성능기반 내진설계 매뉴얼 개발	성능기반설계 대상시스템 기본 설계	성능기반설계 절차에 따라 비선형정적 및 동적해석으로 구조물의 성능을 평가하기 위하여 구조해석을 통해 부재의 크기 및 철근 배근, 접합부 등을 설계함
			성능기반설계를 위한 성능목표 및 지진하중 설정	- 연구 대상 건물의 용도는 근린생활시설(사무소)로, 내진등급은 II 등급에 해당 - 대상시스템의 내진등급을 고려하여 설계스펙트럼가속도의 1.0배에 대한 인명안전수준 및 설계스펙트럼가속도의 1.5배에 대한 붕괴방지수준으로 성능목표 설정 완료함
			내진성능평가를 위한 비선형모델 및 허용수준 결정	- RC 전단벽, 공학목재 보-기둥 연결부 및 RC 벽-GLT 커넥터는 중요한 구조부재이기 때문에 비선형 모델에 포함하고 공학목재 보와 기둥 부재 자체는 탄성으로 모델링 완성함 - 기둥은 축력과 휨 간의 상관관계가 있으므로 축력에 따라 달라지는 기둥의 휨 강도를 산정하기 위해 구조용집성재 기둥의 PM 상관곡선을 입력함 - 비선형 해석을 통한 내진성능평가를 위하여 최대 층간변위각, RC 전단벽의 전단력 및 소성회전각, GLT 보-기둥 연결부의 회전각,

				GLT 기둥의 모멘트에 대한 인명안전 및 붕괴방지 수준 허용기준을 결정함
			내진성능평가를 수행하여 하이브리드 횡력저항시스템 설계 확정	- KBC의 성능설계법 규정에 부합하도록 비선형정적해석 및 동적해석을 모두 수행하여 공학목재-하이브리드 구조시스템에 대한 내진성능평가를 완료함 - 비선형정적해석의 결과 최대 층간변위각, 부재별 성능수준, 최소강도기준 모두 허용기준을 만족하였으나 동적해석 결과 일부 RC 전단벽에서 전단강도가 부족하여 목표 성능을 만족하지 못하는 것으로 나타남. 따라서 이에 대한 재설계를 수행함 - 재설계는 ① 벽체 두께 및 수평철근량 증가, ② 가새 추가 및 수평철근량 증가와 같이 두 가지 방안에 대하여 각각 부재를 설계하여 비선형 해석 및 평가를 수행하였고 모든 부재가 목표 성능을 만족할 때까지 반복 수행하여 최종 설계를 확정함
			하이브리드 횡력저항시스템 성능기반 내진설계 예제 및 매뉴얼 작성	- 실무에서 공학목재를 활용한 중층 사무소의 성능기반설계를 수행하는 데에 참고할 수 있도록 매뉴얼을 작성, 연구성과를 완료함. 단, 해당 매뉴얼의 적용은 공학목재 중 하나인 구조용집성재 골조와 철근콘크리트 보통전단벽을 함께 사용하는 하이브리드 구조시스템으로 제한함 - 매뉴얼에는 일반적인 성능기반설계의 절차 및 세부적인 방법뿐만 아니라 공학목재 부재 설계와 연결부 평가 등에 대해서도 수록함 - 예제집은 9층의 공학목재 골조-철근콘크리트 보통 전단벽 건물을 설계하는 과정을 매뉴얼과 대응되도록 작성함
9층 목구조 적용을 위한 공학목재-하이브리드 접합부 설계기술 개발	내진성능 향상 목구조 접합부 개발	하이브리드 접합부의 내진성능을 향상시키기 위한 내진접합 프레임 개발	CLT-콘크리트 접합부의 부족한 내진성능 확보를 위해 기존의 나사못 접합이 아닌 특수 내진접합 프레임을 개발하였으며 이를 특허출원함	
	하이브리드 목구조 내진 접합부 설계기술 개발	내진접합 프레임의 성능검증 및 설계기술 개발	- 내진접합 프레임의 감쇠부 설계 기술 개발 - 내진접합 프레임에 대한 에너지 소산능력과 비선형적 거동 예측	

라. 2차년도 연도 연구 결과 내용

■ 주관연구기관 : 세종대학교

1. 공학목재-콘크리트 합성패널 바닥구조시스템 해석모델 검증

1차년도에 개발된 해석모델에 대해 기존 공학목재-콘크리트 합성패널 바닥구조시스템 실험결과를 바탕으로 해석모델의 검증을 통해 최종 해석모델을 완성함. 특히 해석모델 개발을 위한 절차에서 기존 실험결과와 수집과 그 이력특성 분석이 매우 중요하며 기존의 슬래브의 수직하중가력에 따른 처짐 변화에 따른 극한성능 실험과 해석모델을 통해 예측한 파괴형태를 고려해야 함. 이러한 수직하중에 대한 거동 특성을 이상화하여 해석 모델에 반영하도록 함. 이를 통해 취성적 파괴에 대한 제한값을 설정함

강도 및 변형능력과 파괴모드를 재현할 수 있는 해석 모델을 개발함. 해석 모델은 공학목재와 콘크리트 부재의 특성을 이용해서 합성 바닥구조시스템의 특성을 반영할 수 있는지 검증하도록 함. 특히 공학목재와 콘크리트의 복합거동을 확보하기 위한 수직 전단스터드의 영향에 따른 모델링의 고려로 이를 통해 일체화의 특성을 반영한 전체 모델링을 완성함

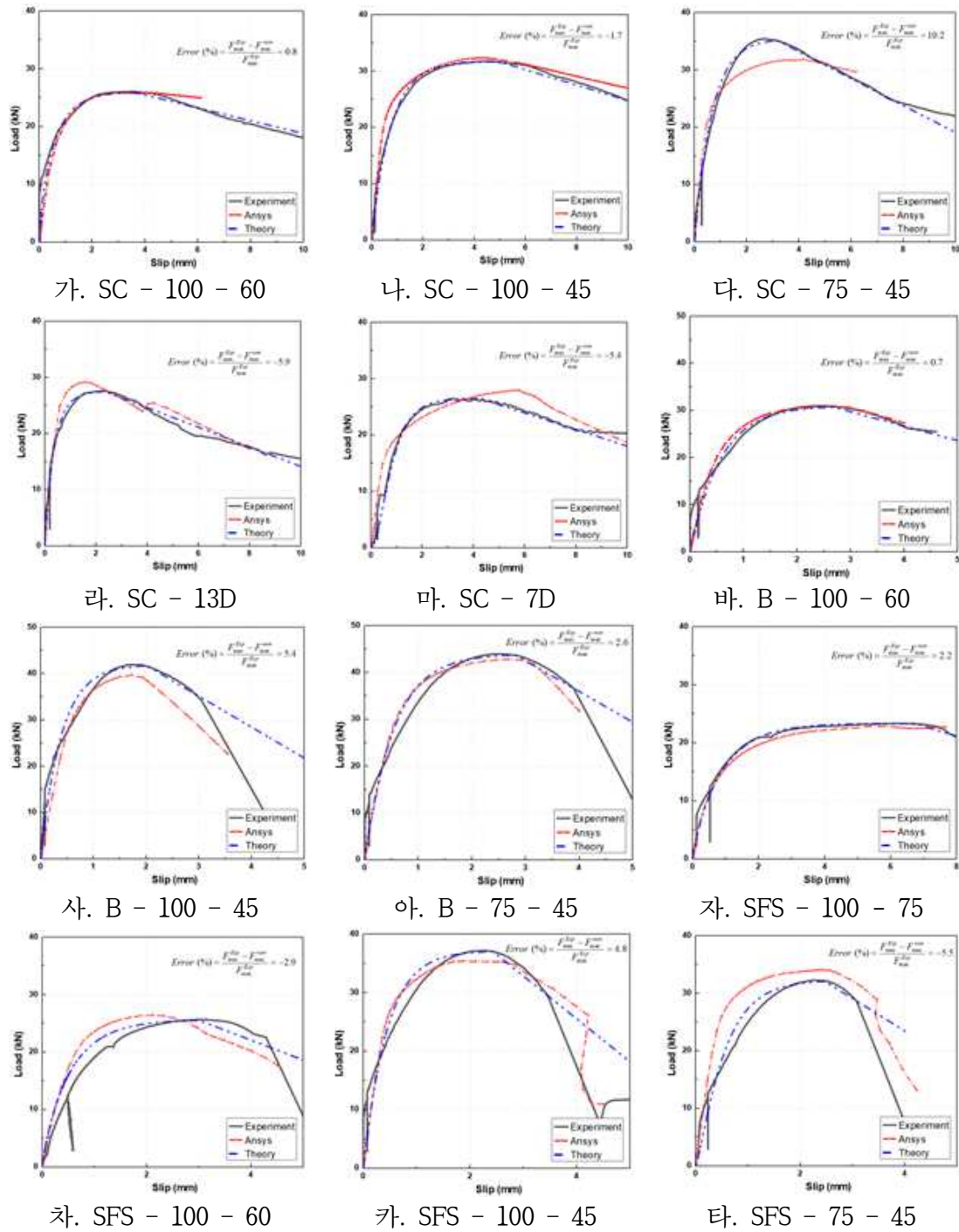
가. 푸시아웃 테스트 모델링

전단 연결재의 응답을 컴퓨터 유한요소해석을 하기 위해 상요 소프트웨어 프로그램인 ANSYS 18.1을 사용하여 3D 유한 요소 모델을 수행하였다. 밀어내기 시험 시뮬레이션(Push out test), (콘크리트 슬래브, 공학목재, 전단연결재, 고정단 지그 및 하중가력 프레임)의 주요 구성 요소는 ANSYS 속성 탭 에서 사용 가능한 20개의 균질 노드 (Solid186) 및 10 개 노드 사면체 고체요소(Solid187)를 사용하여 개별적으로 모델링을 진행한 후 전체 구조해석 모델링을 진행하였다. 교차적층 공학목재는 5층으로 모델링 할 수 있으며 각 층은 시험 중 공학목재의 실제 동작을 나타 내기 위해 접합된 표면 과 표면 접촉 (타겟 표면의 경우 TARGE170 및 접촉 표면의 경우 CONTA174)을 사용하여 보다 근사하게 모델링을 진행할 수 있다. 각각의 전단연결재 구성 요소와 전단연결재와 목재료 또는 콘크리트 사이의 정착 주변 영역은 정밀한 결과를 얻기 위해 미세한 메시(Mesh)로 사용하였다.

합성구조체의 시편의 상이한 성분, 즉 공학목재, 콘크리트 또는 전단연결재에서의 복합거동은 표면 접촉에 의해 정의된다. 공학목재와 콘크리트 사이의 접촉은 표면 거칠기 접촉 (TARGE170 및 CONTA174)으로 나타냈으며, 거동이 오차범위내를 허용하고, $\mu = 0.57$ 의 마찰 계수를 보였다. $\mu = 0.9$ 인 페널티 마찰 공식(이론에 근거한 해석)을 전단연결재와 콘크리트 사이의 표면 접촉에 적용했다. 전단연결재의 스프레드와 공학목재 사이의 접촉을 나타내기 위해 콘크리트 점착력에 대한 고유의 마찰력을 사용하였다.

나. 푸시아웃 테스트 결과 값 비교

유한요소해석을 통한 예측 값, 이론에 근거한 예측 값 과 실제 실험에 의하여 얻어진 결과 값은 다음과 같다.

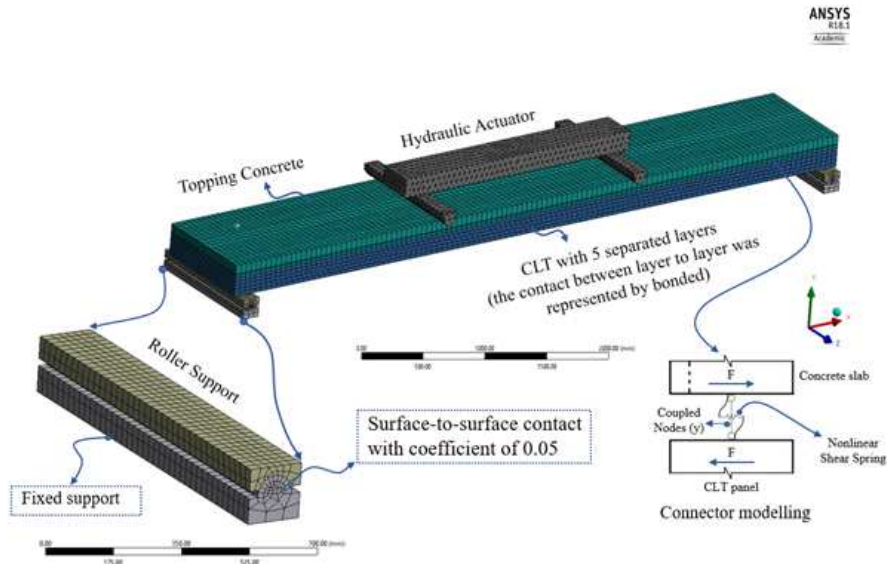


[그림 3-37] 유한요소해석 및 실제 실험 결과 비교

시험 된 각 시편에 대한 전단 하중-변위 곡선을 유한요소해석으로부터 얻은 다음 실험 결과와 비교 하였다. [그림 3-37] 과 같이, 최대 전단력에서 10 %의 오차 내에서 해석 결과는 근사를 보였다.

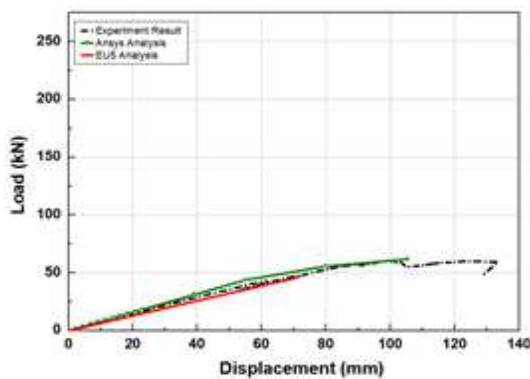
다. 8m 바닥판 수직하중 가력 모델링

바닥 시편의 응답을 시뮬레이션하기 위해 푸시 아웃 시편을 모델링하는 데 사용된 것과 동일한 방법이 적용되었다. 휨 시편 (콘크리트 합성 슬래브, 공학목재, 지지점 이동단, 회전단 하중가력 프레임)의 주요 구성 요소는 ANSYS 속성 탭 에서 사용 가능한 20개의 균질 노드 (Solid186) 및 10 개 노드 사면체 고체요소(Solid187)를 사용하여 개별적으로 모델링을 진행한 후 전체 구조해석 모델링을 진행하였다.

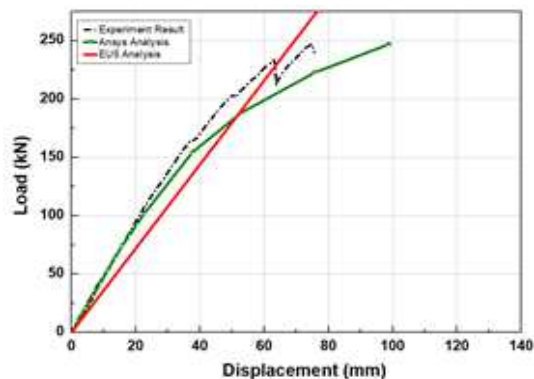


[그림 3-38] 8m 바닥판 유한요소해석 모델링

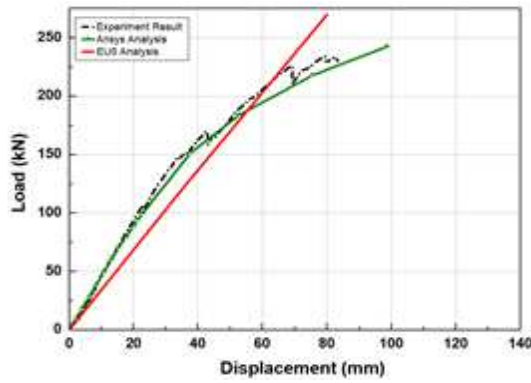
하중-변위각 시험편의 처짐은 유한요소해석으로부터 얻은 다음 실험 결과와 비교하였다. [그림 3-39]에 나타난 것 과 같이, 최대 전단력의 15 % 오차 내에서 해석 결과는 양호한 근사를 나타냈다. 정확한 실험 데이터를 사용하여 Ansys를 사용하여 수직하중에 대한 거동 특성을 이상화하여 신뢰할 수 있는 비선형 유한 요소법을 제시할 수 있었고, 휨 시편의 전체 응답 및 용량에 대한 취성적 파괴에 대한 제한 값을 예측할 수 있었다.



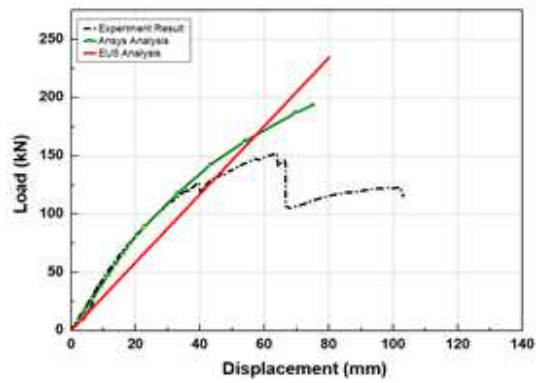
가. 표준 시편



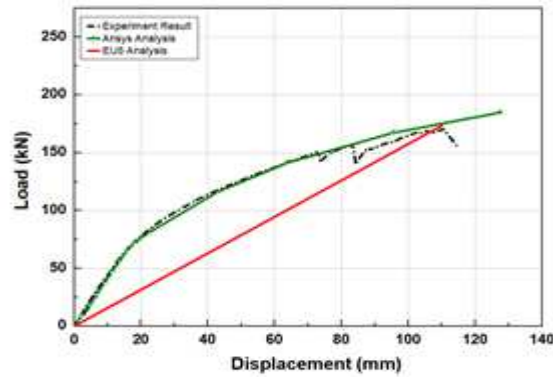
나. B - 45 - s150 Specimen



다. SFS - 45 - s150 Specimen



라. SFS - 45 - s300 Specimen



마. SFS - 90 - s150 Specimen

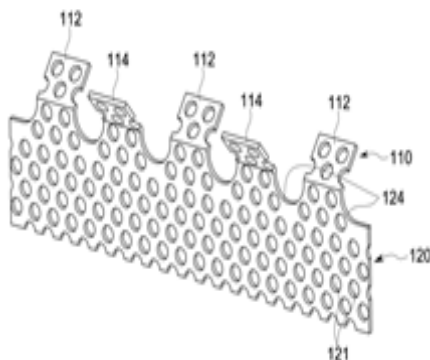
[그림 3-39] 유한요소해석 및 실제 실험 결과 비교

2. 공학목재 콘크리트 합성패널 바닥구조 시스템 설계법 개발

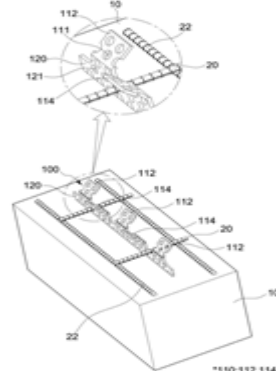
- 현행설계기준에 따라 공학목재-콘크리트 합성패널 바닥구조시스템 설계 및 설계 절차 정립
- 원천기술 확보를 통한 바닥구조시스템의 형상과 경간비에 따른 설계법 개발
- 내화기준 및 법적 허용 기준치 확인 및 전문가 자문

가. Y형상 전단연결재 설계법 제시 - 특허 출원 완료, 등록 대기

본 발명의 전단연결재는 부분적으로 목재 구성 요소에 매입되는 격자 원형 구멍의 분포를 갖는 강판이고, 다른 끝은 콘크리트 슬래브에 단단히 매달려있다. 강판에는 수평의 철근이 쉽게 통과하여 전단 저항을 전달할 수 있는 큰 구멍이 있다. 본 발명을 적용하면, 어렵거나 노동 집약적인 시공 방법인 래그 볼트 또는 나사를 이용하는 것과 같은 현재의 연결 기술의 단점이 제거된다. 콘크리트와 목재 구성 요소 사이의 높은 강성 및 전단강도저항에 이점이 있으며, 연결이 간단하고 설치가 용이하다는 것에서 시공성을 기대할 수 있다.



가. 전단연결재 상세



나. 정착상세

[그림 3-40] 전단연결재 설계법 개발 컨셉

발명된 전단 전단연결재의 전단저항을 평가하기 위해 총 치수가 300 x 300 x 150 mm 인 총 16 개의 밀어내기실험 시편을 제작했다.

[표 3-12] 전단연결재 시편 요약

No	실험체	실험체 개수	하중 종류	CLT 두께	Concrete 두께
1	SFS - 45	1	Cyclic load	150	100
2	Y - T1.6 - A0	2	Cyclic load	150	100
3			Monotonic		
4	Y - T1.6 - A30	3	Cyclic load	150	100
5			Monotonic		
6			Monotonic		
7	Y - T1.6 - A45	2	Cyclic load	150	100
8			Monotonic		
9	Y - T1.0 - A30	1	Monotonic	150	100
10	Y - T2.0 - A30	1	Monotonic		
11	Y - T1.6 - A30 - Round	1	Monotonic		
12	Steel Plate	1	Monotonic		
13	Y - H125 - W150	1	Monotonic		
14	Y - H105 - W150	1	Monotonic		
15	Y - H115 - W160	1	Monotonic		
16	Y - H115 - W140	1	Monotonic		



가. 전단연결재 목재 정작



나. 콘크리트 타설 전 철근 배근 상태



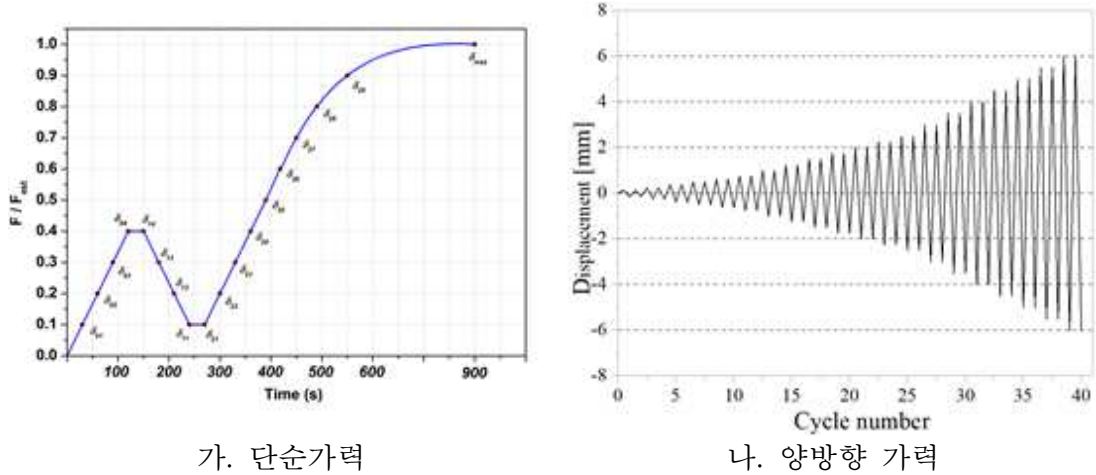
다. 콘크리트 타설 - 진동기 사용



라. 콘크리트 양생

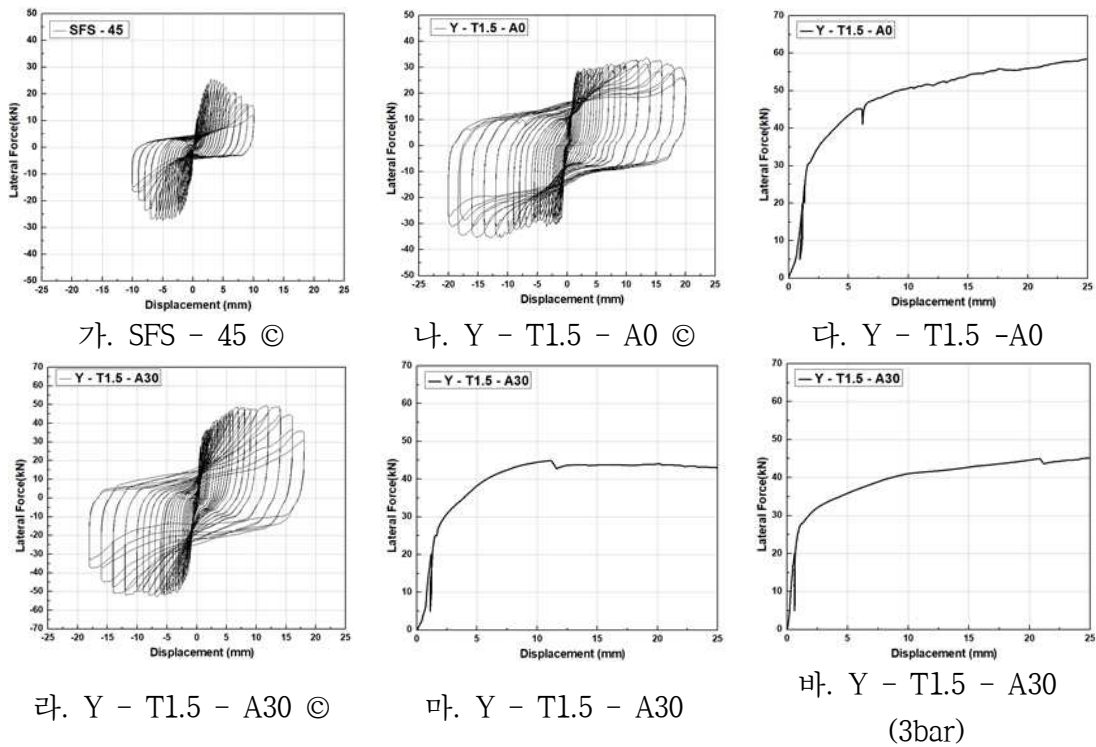
[그림 3-41] 전단시편 제작방법

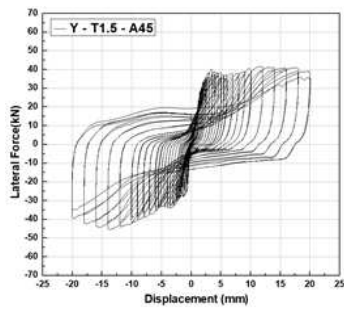
본 실험의 실험방법은 2장에서 설명한 밀어내기 실험 (Push out test)와 동일하며 단순 1방향 가력과 양방향 가력에서 차이가 있다.



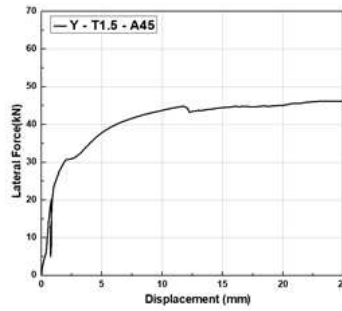
[그림 3-42] 전단실험의 가력방법

본 연구를 통하여 제안 된 전단연결재 설계법이 합성 구조의 다양한 유형에 적용 할 수 있는 결과를 얻었고 시공성과 더 높은 전단 저항 및 연성을 보여주었다. 전단 시험편의 하중-변위 응답은 파괴하기 전에 약간의 소성 거동을 나타냈다.

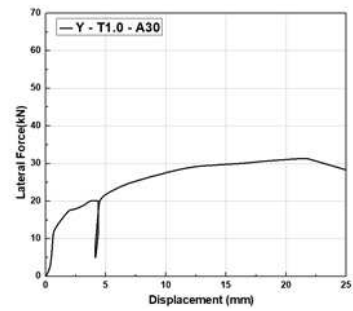




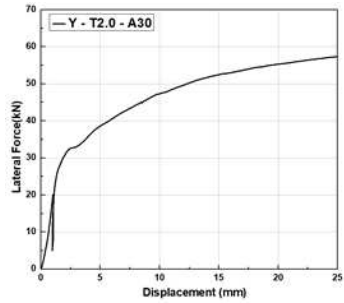
사. Y - T1.5 - A45 ©



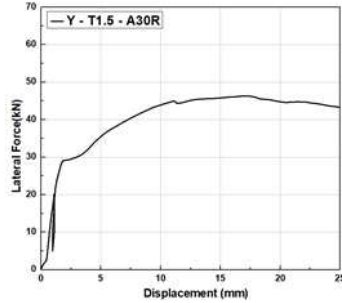
아. Y - T1.5 - A45



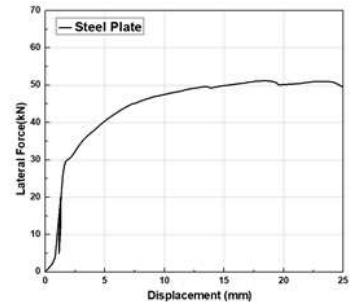
자. Y - T1.0 - A30



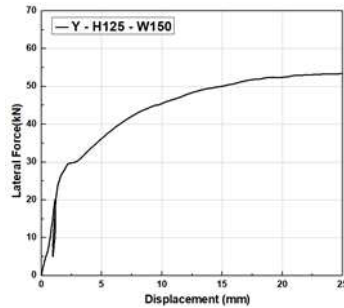
차. Y - T2.0 - A30



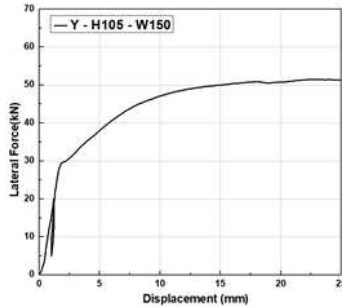
카. Y - T1.5 - A30R



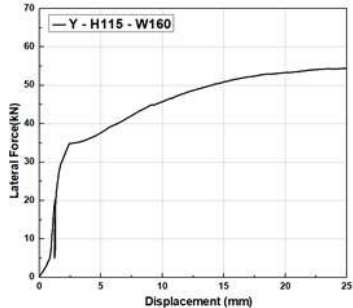
타. Steel Plate



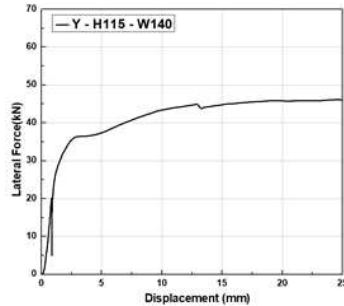
파. Y - H125 - W150



하. Y - H105 - W150



거. Y - H115 - W160



너. Y - T115 - A140

[그림 3-43] 본 연구를 통한 전단설계법 전단실험의 실험결과



가. 공학목재의 파괴거동



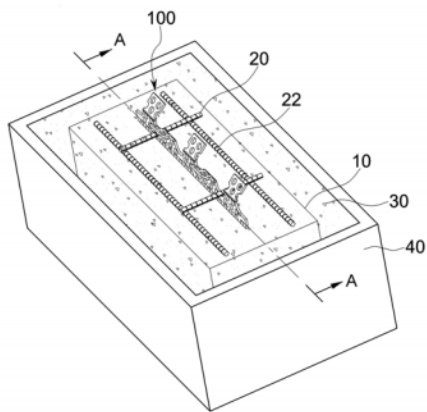
나. 전단연결재 강재의
항복 거동



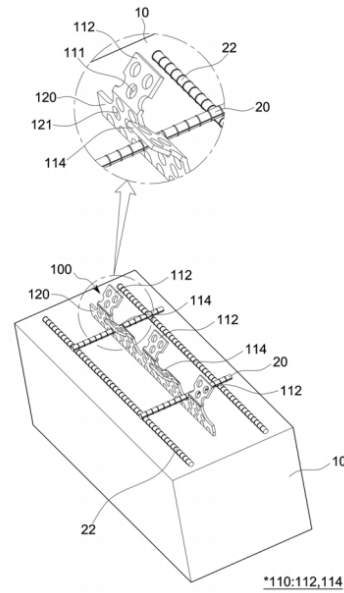
다. 콘크리트 표면의
파괴거동

[그림 3-44] 본 연구를 통한 전단설계법 전단실험의 재료별 파괴거동

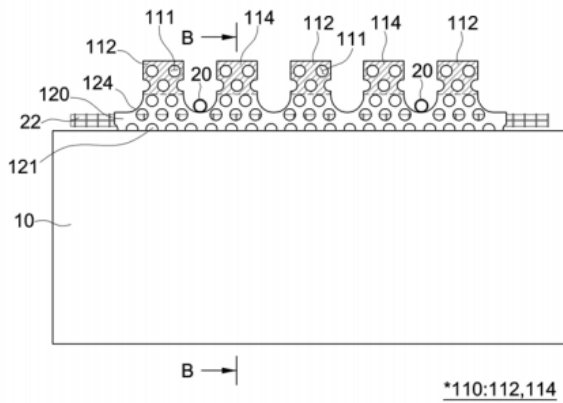
나. 본 연구를 통하여 얻어진 결과들을 기반으로 한 새로운 설계 공법 상세



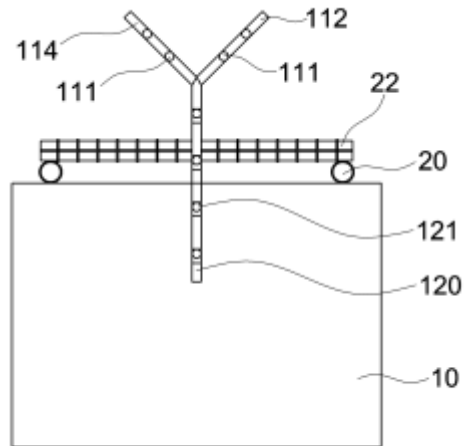
가. 정착 완료 상태



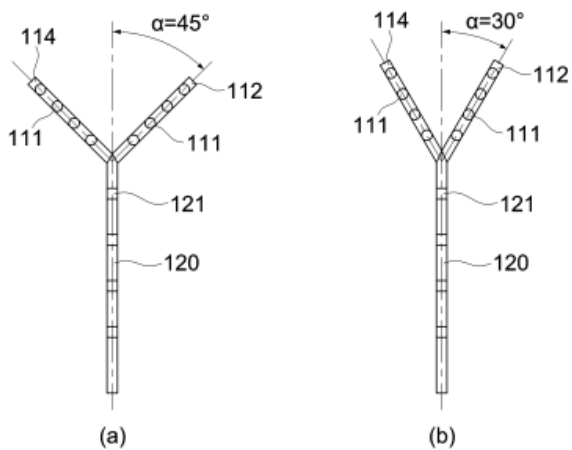
나. 정착 완료 상태 상세-1



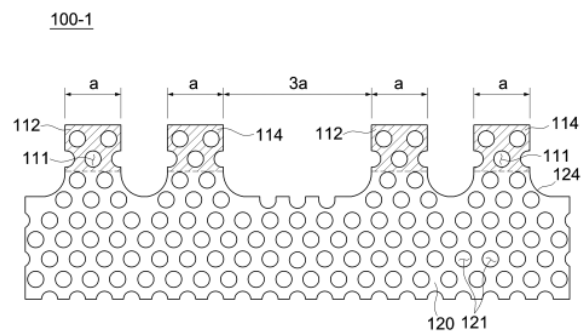
다. 정착 완료 상태 상세-정면도



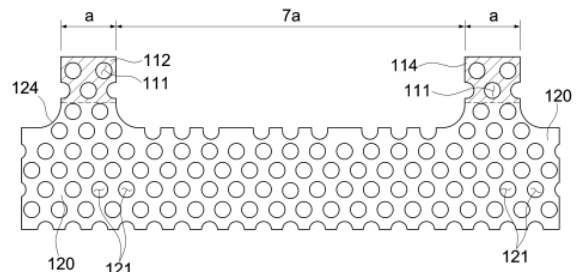
라. 정착 완료 상태 상세-단면도



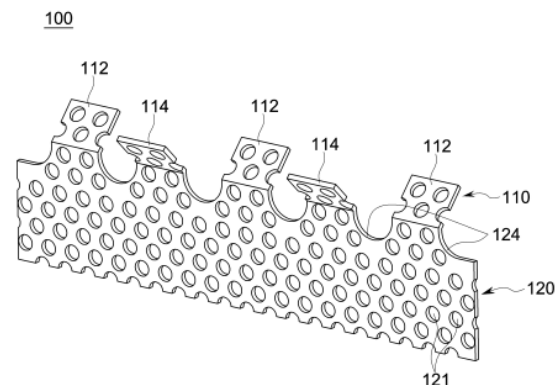
마. Y형 전단연결재-입면도



바. Y형 전단연결재- Type 1



아. Y형 전단연결재- Type 3



[그림 3-45] 전단설계법 상세

다. 설계 공법 특허 출원

출원번호통지서	출원번호통지서
관인생략	
출원번호통지서	
출원일자 2018.03.28	【발명의 설명】
특기사항 심사청구(무) 공개신청(무) 참조번호(SPI80010)	【발명의 명칭】
출원번호 10-2018-0035808 (특수번호 1-1-2018-0308164-38)	공학 목재 콘크리트 합성 구조물을 전단 연결재(SHEAR CONNECTORFOR CLT-CONCRETE COMPOSITE)
출원인명칭 세종대학교산학협력단(2-2005-011470-2)	【기술분야】
대리인성명 유병득(9-2007-0006605-1)	【0001】 본 발명은 전단 연결재에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 공학 목재와 콘크리트의 합성 효과를 향상시킬 수 있는 공학 목재 콘크리트 합성 구조물을 전단 연결재에 관한 것이다.
발명자성명 이기학 마이광 카이 박아은	【발명의 배경이 되는 기술】
발명의명칭 공학 목재 콘크리트 합성 구조물을 전단 연결재	【0002】 종래 공학 목재(engineered lumber)는 건축물의 구조재로 사용할 수 있도록 다수의 합성된(laminated timber)을 적층하여 형성된 것으로서, 친환경적이면서도 구조부재로 사용하기에 적합하다는 장점이 있다.
특허청장	【0003】 건축물에 사용되는 장 스펠(long span)은 대부분 플레이트 보(plate beam) 또는 일반 강재 트러스 보(truss beam)이다. 또한, 20m 이상의 장 스펠은 주로 일반 트러스 보가 적용된다. 그리고, 중 스펠은 일반 강강도 철근 콘크리트 보를 사용하고 있다. 더욱이, 콘크리트 슬래브는 일반적으로 압축 하중에 견디기 위해 목조 구조물과 결합된다. 이에 따라, 지속적으로 수요가 증가하고 있는 장 스펠 구조를 위해 새로운 재료가 요구되는 실정이다.
<< 안내 >>	
1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원변동통지서를 통해 확인하실 수 있습니다.	
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 설명, 납부자번호를 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다. 후납자번호 : 0131(가온코드)+ 접수번호	
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 「특허고려번호 정보보장(공정), 개인정보」를 제출하여야 하며, 이를 어실의 각은 공상적으로 받을 수 있습니다. 주최자(patent.gov) 접속 > 알림서지(다문로) > 특허료 지불구독비지 제5호 서지	
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.	
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허-실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다. 주 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr/특허비지5-PCT3 도리드 출원권 인정기간 : 특허-실용신안인 12개월, 상표-디자인인 6개월 이내 국민특허상시정당 선출권을 기초로 우리나라에 우선권주출원한 시, 선출권이 미정개성타이먼, 우선일 16개월 이내에 국민특허상시정당에 「전자적고청하기서(PROSA99)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.	
6. 본 출원서류를 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다. 출원번호 10-2018-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000	
7. 중립적인 직무수행과정에서 개발한 발명을 사자(가)에게 명확하게 공개하지 않은 경우, 특허법 제132조 제4항과 심사단계에서 특허거절결정되나 특허법 제132조 제4항에후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.	
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.	

출원번호통지서

출원번호통지서

32-4

[그림 3-46] 전단설계법 출원번호통지서

라. 목재료 비선형 유한요소 예측법 기술이전

[illegible]

[그림 3-47] 공학목재-콘크리트 합성슬래브의 목표성능 확보를 위한
전단연결재의 특성에 따른 휨강도 예측법 개발

3. 8m 장스팬 적용을 위한 공학목재-콘크리트 합성바닥구조시스템 개발 - 소결

공학목재-콘크리트 합성바닥구조시스템 개발은 연구 기획단계에서 목표로 했던 설계 성능 요구 사항을 성공적으로 연구완료 할 수 있었다.

현재의 개발 상황과 건설 업계의 시공사들의 관심이 증가함에 따라 장스팬을 적용한 합성구조시스템의 용량을 완전히 평가하기 위한 연구를 진행하였으며, 본 합성바닥구조시스템을 실용화하기 위해서는 실험적 검증이 필요했다. 세 가지 실험을 통하여 다음 결론을 제시한다.

- Ansys 유한요소모델 및 이론에 기초한 해석적 예측은 약 20 %의 여유 내에서 본 합성구조시스템의 시편의 휨 저항을 실제 저항성능보다 보수적이게 평가하였다.
- 경사 정착각을 가진 전단연결재 시편은 직각 전단연결재 시편과 비교하여 더 우수한 합성효과를 나타냈다. 이중 45°의 정착각을 가진 시편이 가장 효과적이었으며 최고의 강성, 강도 및 시공성을 보였다. 또한 콘크리트 두께는 또한 합성효과에 다소 영향을 미쳤으며 두꺼울수록 높은 휨강도를 가지는 것으로 나타났다.
- 모든 공학목재-콘크리트 바닥구조시스템시편의 기본 고유 진동수는 콘크리트를 양생하지 않는 시편보다 약 25 % 높다. 전단연결재의 종류 및 소요량에 관계없이 콘크리트 두께 100 mm부터 증가했다.
- 공학목재-콘크리트 바닥구조시스템시편은 일반적인 건축물 바닥을 위해 설계된 공학목재 바닥 시편과 비교하여 3 ~ 5 배 높은 휨 성능을 나타냄, 따라서 본 시스템의 합성효과가 나타났고, 고층 건물에 적용하기에 충분하다고 판단된다.
- 유한요소 예측법 및 이론을 기반으로 한 해석적 예측은 일반적으로 합성 재료 시편의 용량을 약 20 % 이내로 과소 평가했습니다. 깊이 대 비율 (18 이상)이 높은 공학목재 콘크리트 합성 재료 층의 경우 공학목재에서의 횡단면 효과는 덜 중요한 것으로 사료된다.

- 새로운 전단연결재는 시공성을 개선하였고, 다양한 유형의 합성 구조물에 적용될 수 있는 더 높은 전단저항과 연성을 나타냈다. 실험 결과를 토대로, 높은 강성 및 연성 거동을 달성하기 위해 Y 형 전단연결재의 각도는 약 30° 에서 45° 가 적절한 것으로 판단되었다.

■ 공동연구기관 : 강원대학교

4. 9층 목구조 건축물용 하이브리드 횡력저항시스템 성능기반 내진설계 매뉴얼 개발

가. 성능기반설계 대상시스템 기본 설계

성능기반설계를 수행할 대상 건물은 공학목재-하이브리드 구조시스템을 갖는 9층 근린생활 시설(사무소)이다. 대상구조시스템의 GLT 골조는 중력하중 100%에 대하여 설계하고, RC 전단벽은 중력하중과 지진하중 100%에 대하여 설계하였다. 각 부재의 설계를 위해 KBC2016을 참고하였다. 이에 따라 GLT 골조 및 연결부 설계는 허용응력설계법, RC 부재는 극한강도설계법으로 설계하였다. 또한 연구의 단순화를 위하여 풍하중의 영향은 생략하였다.

(1) 재료

(가) 철근콘크리트

- 콘크리트 압축강도(f_{ck}) : 24 MPa
- 철근 항복강도(f_y) : 400 MPa

(나) 구조용집성재

- 수종 : 국내 낙엽송
- 등급 : 대칭다른등급, 10S-30B

(2) 하중

(가) 중력하중

[표 3-13] 고정하중 및 활하중 (kN/m²)

층	RC 벽체 부분		GLT 골조 부분	
	고정하중	활하중	고정하중	활하중
기준층	5.34	3.50	4.80	3.50
지붕층	6.30	1.00	4.04	1.00

(나) 지진하중

- 지역계수 : 0.176 g (0.22 g의 80%)

- 지반분류 : SD 지반
- 중요도계수(IE) : 1.0
- 반응수정계수(R) : 5.0

(3) 부재 치수

[표 3-14] 부재 치수

부재	부재부호	단면크기 (mm)
보	G1	530 × 160
	G2	530 × 160
	G3	760 × 160
기둥	C1	360 × 360
	C2	300 × 300
	C3	480 × 480
RC 벽체		200

* RC 벽체 사이의 연결보는 600 × 200으로 통일

나. 성능기반설계를 위한 성능목표 설정

대상 건물의 용도는 근린생활시설(사무소)로, 내진 II 등급에 해당한다. 따라서 성능목표는 [표 3-15]에 따라 설계스펙트럼가속도의 1.0배에 대한 인명안전수준 및 설계스펙트럼가속도의 1.5배에 대한 붕괴방지수준을 성능목표로 한다. 설계스펙트럼가속도는 2400년 재현주기의 지진위험도로 정의한 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)의 2/3 수준을 의미한다.

[표 3-15] KBC2016의 내진등급 및 성능목표

내진등급	성능목표	
	성능수준	지진위험도
특	기능수행(또는 즉시거주)1)	설계스펙트럼가속도2)의 1.0배
	인명안전 및 붕괴방지	설계스펙트럼가속도의 1.5배
I	인명안전	설계스펙트럼가속도의 1.2배
	붕괴방지	설계스펙트럼가속도의 1.5배
II	인명안전	설계스펙트럼가속도의 1.0배
	붕괴방지	설계스펙트럼가속도의 1.5배

1) 사용자 또는 설계자의 성능목표수준에 따라서 정한다.

2) KBC2016 0306.3 지진위험도에서 규정된 조항에 따른다.

다. 내진성능평가를 위한 비선형모델 및 허용수준 결정

(1) 성능목표별 허용기준

설계스펙트럼가속도의 1.0배에 대한 인명안전수준과 설계스펙트럼가속도의 1.5배에 대한 붕괴방지수준의 성능을 만족하는지 판단하기 위한 성능목표별 허용기준은 [표 3-16]와 같다.

[표 3-16] 성능목표별 허용기준

구분			성능수준	
			인명안전	붕괴방지
층간변위각1)			1.5%	2.0%
RC 전단벽	전단	전단력2)	$0.75 \times \text{전단강도}(F_n)$	$1.00 \times \text{전단강도}(F_n)$
	휨	소성회전각3) 또는 단부 압축변형률	인명안전 허용기준	붕괴방지 허용기준
GLT 보-기둥 연결부	회전각4)		$0.75 \times \text{붕괴방지허용기준}$	$1.00 \times \text{붕괴방지허용기준}$
GLT 기둥	모멘트5)		축력에 따른 모멘트강도	축력에 따른 모멘트강도

1) KBC2016의 허용층간변위 규정에서 내진등급 II에 해당하는 값을 따른다.

2) 비선형동적해석 시 평균 요구전단력에 1.2배한 값을 RC 전단벽의 요구전단력으로 한다.

3) 대한건축학회 지침(2016) 또는 ASCE 41-13 참고하여 성능수준별 허용기준을 정한다.

4) GLT 보-기둥 연결부의 모멘트-회전각 관계 곡선에서 모멘트 강도가 급감하는 지점의 회전각을붕괴방지 허용기준으로 한다.

5) GLT 기둥의 모멘트는 하중지배거동으로 간주한다.

(2) 비선형 해석모델

(가) 재료 모델

• 재료 강도

- 구조용집성재

성능기반설계 대상시스템에 사용한 10S-30B, 대칭 다른등급구성집성재의 재료강도를 계산하기 위해 표 [3-17]과 같이 기준허용응력에 2.1을 곱하였다.

[표 3-17] 10S-30B에 해당하는 재료강도

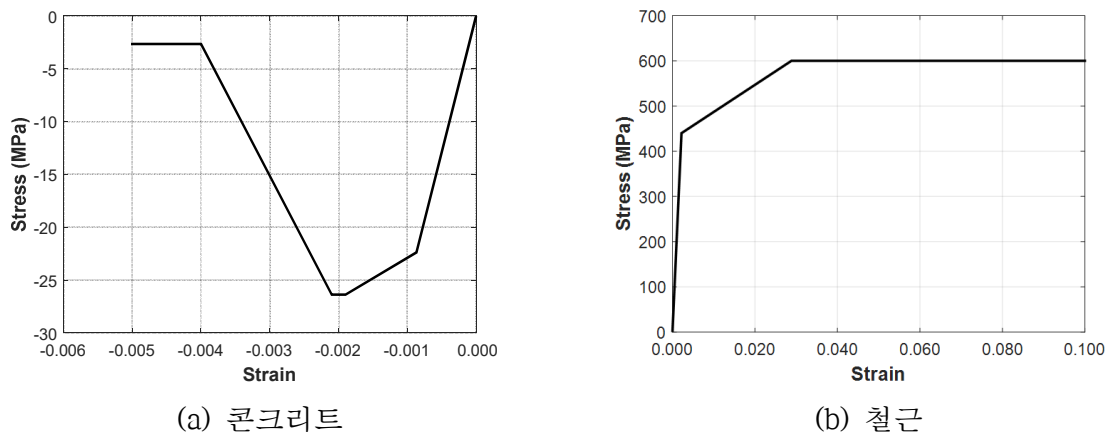
구분	기준허용응력 (MPa)		안전율	재료강도 (MPa)
휨	Fb,x-x	10	2.1	21.00
	Fb,y-y	7		14.70
축 하중	Ft	6.5		13.65
	Fc	7.5		15.75

- 철근콘크리트

철근 및 콘크리트의 재료강도는 KCI2012에 명시되어있는 설계기준강도에 기대강도계수를 곱한 기대강도로 하였다. 성능기반설계 대상시스템에 사용된 콘크리트 압축강도 및 철근 항복강도에 따라 기대강도계수는 1.10을 사용하였다.

- 콘크리트 및 철근의 재료 비선형 모델

콘크리트 및 철근의 재료 비선형 모델은 응력-변형률 관계로 모델링하였고 이는 [그림 3-48]과 같다.



[그림 3-48] 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 관계

(나) 부재 모델

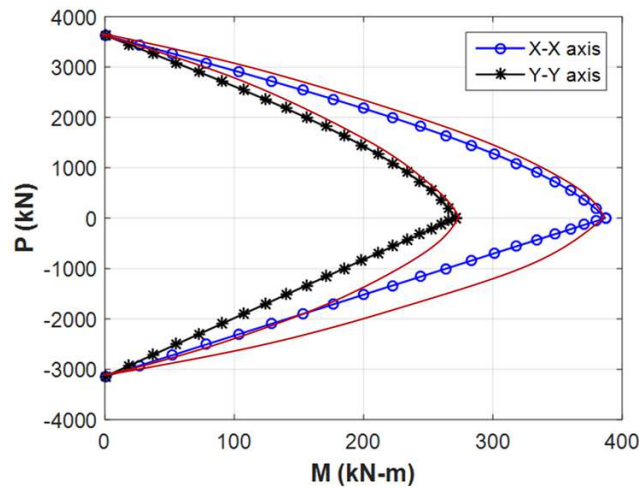
- 철근콘크리트 전단벽

벽체의 비선형 휨거동을 모사하기 위해 섬유모델(Fiber model)로 단면을 정의하여 균열에 따른 강성 저감이 고려되도록 하였다. 단면 정의는 앞서 언급한 콘크리트와 철근의 재료모델을 사용하였다. 섬유모델로 나타내는 비선형 휨 거동은 벽체의 면내방향으로만 유효하며 면외방향으로는 탄성이다. 면외방향의 휨 강성은 전단면 강성의 1/4로 정의하였다. 벽체의 전단속성은 탄성으로 모델링하였으며 전단탄성계수(G)를 입력하였다.

벽체의 소성힌지 영역은 벽체 길이의 1/2로 설정하였다. 또한 1층 벽체에 비선형 거동이 집중되는 것을 고려하여 2층 이상의 벽체는 탄성으로 모델링하였다.

- GLT 기둥 모델링

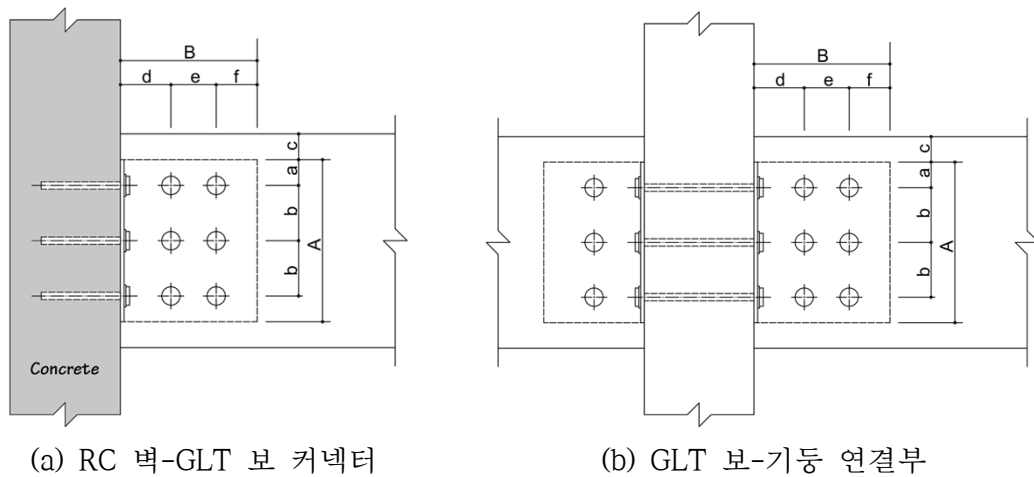
GLT 기둥은 해석 프로그램(Perform-3D) 상의 P-M2-M3 Hinge를 사용하여 모델링하였다. 대상 시스템의 내진성능을 평가하기 위해 입력한 GLT 기둥 PM 곡선의 예를 [그림 3-49]에 나타내었다. 본 연구에 사용한 해석 프로그램에서는 산정된 PM 곡선을 그대로 사용할 수 없기 때문에 이를 최대한 반영하여 [그림 3-49]의 실선과 같이 입력하였다.



[그림 3-49] GLT 기둥 PM 곡선의 예

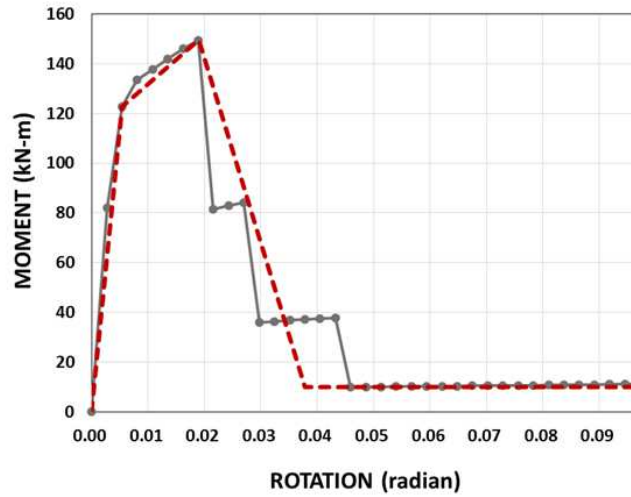
- RC 벽-GLT 보 커넥터 및 GLT 보-기둥 연결부

RC 벽-GLT 보 커넥터 및 GLT 보-기둥 연결부의 볼트 접합부 설계는 측면 접합과 정면 접합으로 이루어져있다. 이 중 비선형 모델은 측면 접합에 대해서만 작성되었다. 이는 여러 문헌 조사를 통해 커넥터나 연결부의 정면 접합부에서 앵커 또는 볼트가 뽑히기 이전에 측면 접합의 볼트 부근에서 집성재가 찢어지면서 단부 파괴가 발생할 것으로 판단하였기 때문이다. 따라서 정면 접합은 탄성으로 거동하고 비탄성 거동은 측면 접합에서만 발생하는 것으로 간주하였다. [그림 3-50]에는 커넥터 및 연결부의 측면 접합 상세를 나타내었다.



[그림 3-50] 커넥터 및 연결부의 측면 접합 상세

[그림 3-51]는 커넥터 및 연결부의 볼트 접합 상세를 고려하여 모멘트-회전각 관계를 산정한 것이다. 본 연구에서 사용한 계산식에 따르면 [그림 3-51]의 실선과 같이 볼트 및 주변의 거동에 따라 모멘트-회전각 관계의 기울기가 달라지지만 프로그램 내에 입력을 용이하게 하기 위하여 점선과 같이 간략화 하여 사용하였다.



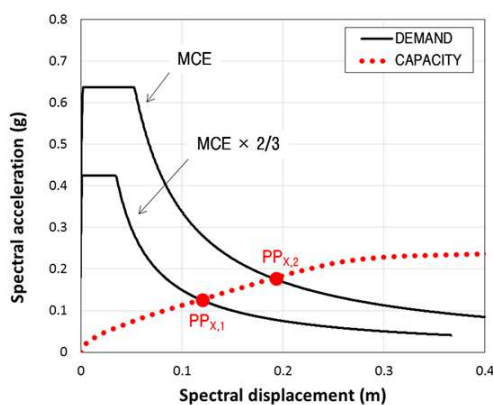
[그림 3-51] 커넥터 및 연결부의 모멘트-회전각 관계 예시

라. 내진성능평가를 수행하여 하이브리드 횡력저항시스템 설계 확정

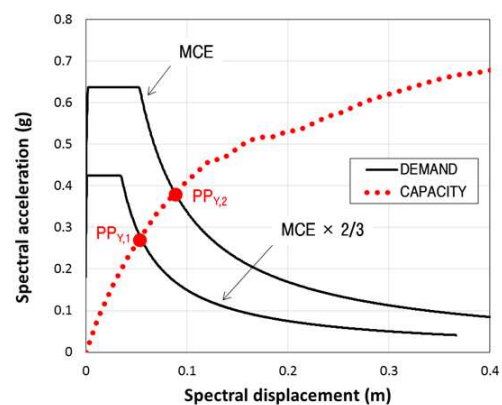
(1) 비선형정적해석을 통한 성능평가

(가) 횡하중 수직분포 및 성능점

비선형정적해석을 위한 횡하중 수직분포는 1차모드 형상에 따른 수직분포를 사용하였다. [그림 3-52]는 해석을 통해 얻은 대상시스템의 최하층 밑면전단력과 최상층 수평변위를 스펙트럼가속도(Sa)와 스펙트럼변위(Sd)로 변환한 역량스펙트럼 및 요구스펙트럼을 중첩하여 각 방향별로 나타낸 것이다. 여기에서 대상시스템은 양 방향 모두 역량스펙트럼과 요구스펙트럼의 교차 지점이 탄성영역에 위치하고 있음을 알 수 있으며 이에 따라 이 점이 대상시스템의 성능점(Performance Point, PP)이다.



(a) X 방향



(b) Y 방향

[그림 3-52] 역량 및 요구 곡선 (ADRS format)

(나) 비선형정적해석 결과 검증

- 목표성능 만족여부

- 최대 층간변위각

비선형정적해석에 따른 대상시스템의 최대 층간변위각 평가 결과는 [표 3-18]에 정리하였다. 이를 통해 대상시스템의 최대 층간변위각은 양 방향 모두 목표성능수준을 만족하였음을 확인할 수 있다.

[표 3-18] 최대 층간변위각 평가

지진위험도 (성능수준)	허용기준	성능점에서의 최대 층간변위각	
		X 방향	Y 방향
MCE × 2/3 (인명안전)	1.5%	0.50%	0.13%
MCE (붕괴방지)	2.0%	0.70%	0.18%

- 부재별 성능수준

커넥터 및 연결부, GLT 기둥, RC 벽체 각각에 대하여 목표성능을 보유하고 있는지 평가하였다. 이를 위해 각 부재별 성능점에서의 부재력을 산정하였고 허용기준과 비교하였다. 이때 부재력은 전 층에서 가장 큰 값으로 하였다. 그 결과, 모든 부재의 성능이 목표 수준을 만족하는 것으로 나타났다.

• 최소강도기준 만족 여부

최소강도기준은 초과강도계수(Ω)가 1.5 이상일 때 만족하는 것으로 판단하였다. Ω 은 설계 밀면전단력에 대한 최대 밀면전단력의 비율로 구하며, 이때 최대 밀면전단력은 RC 벽체의 붕괴 시점과 비교하여 구하였다. 즉, 역량곡선 상의 최대 밀면전단력 도달 전에 RC 벽체가 붕괴되는 것으로 판단되면 그 시점의 밀면전단력을 최대 밀면전단력으로 하였다. 이에 따라 산정된 Ω 은 [표 3-19]을 통해 알 수 있듯이, X방향에 대해 2.0, Y방향에 대해 2.8이므로 최소강도기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 3-19] 최소강도기준 만족

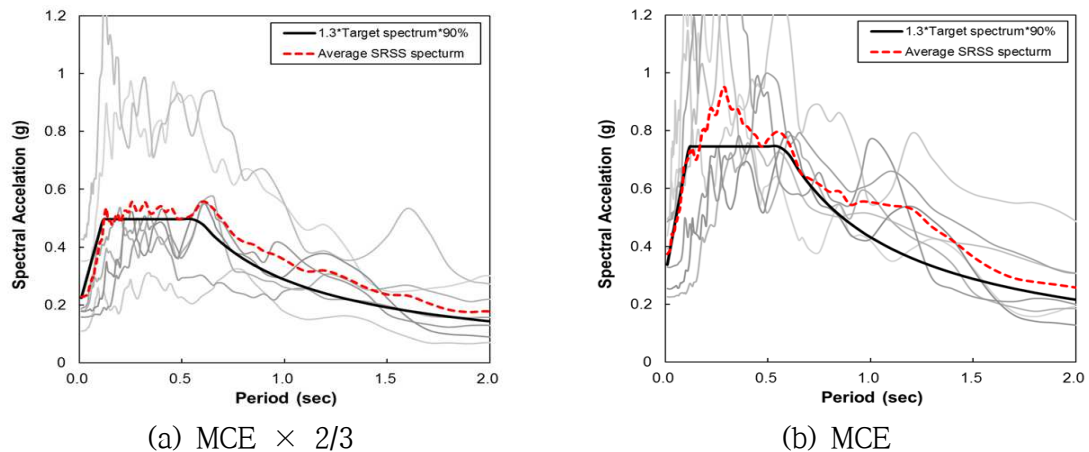
방향	설계 밀면전단력	최대 밀면전단력	초과강도계수 (Ω)
X	1062 kN	2077 kN	2.0
Y	1062 kN	2951 kN	2.8

(2) 비선형동적해석을 통한 성능평가

(가) 지반운동 선정 및 조정

대상시스템의 비선형동적해석을 위한 계측 지진기록 7쌍을 선정하였다. 지진기록 선정을 위한 목표 스펙트럼은 MCE의 2/3 수준과 MCE 수준으로 설정하였다. 규모는 6~7, 전단파속도 ($V_s, 30$)는 180~360 m/s로 하였다. 이와 같이 선정된 지진기록은 KBC에 부합하도록 목표 스

펙트럼의 1.3배보다 10% 이상 작지 않도록 보정하였다. [그림 3-53]에는 지진위험도에 따른 목표 스펙트럼, SRSS 스펙트럼 그리고 이들의 평균 스펙트럼을 나타내었다.

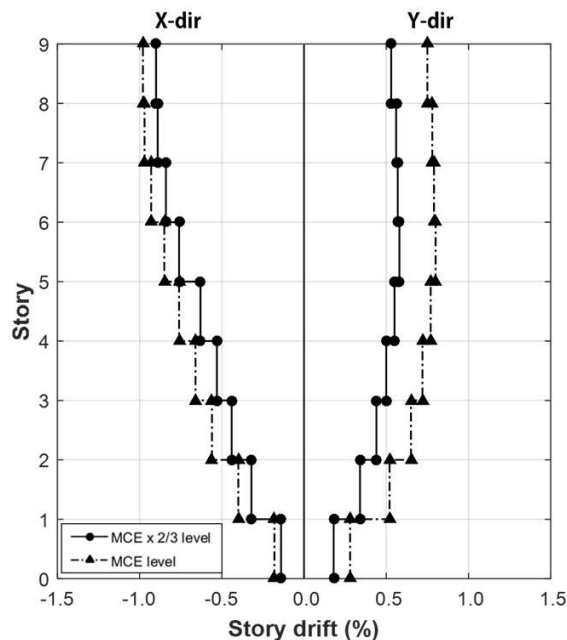


[그림 3-53] 선정된 지반운동의 스펙트럼

(나) 비선형동적해석 결과 검증

- 건물 전체 성능 평가 (층간변위각)

대상시스템에 대한 층간변위각 허용기준은 인명안전 수준과 붕괴방지 수준 각각 1.5%, 2.0% 이다. [그림 3-54]에는 MCE의 2/3 수준과 MCE 수준 지진파들에 대한 층간변위각 결과를 나타내었다. 이를 통해 모든 지진위험도에 대하여 층간변위각이 1.0% 이내로, 모두 허용기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.



[그림 3-54] 층간변위각 결과

- 부재별 성능수준

비선형동적해석을 통해 커넥터 및 연결부, GLT 기둥, RC 벽체 각각에 대하여 목표 성능을

보유하고 있는지 평가하였다. 여기에서는 7쌍의 지진파를 사용했기 때문에 최대응답을 평균하여 허용기준과 비교하였다. 그 결과, 커넥터 및 연결부의 회전각, GLT 기둥의 모멘트, RC 벽체의 소성회전각은 모두 목표 성능을 만족하였다. 그러나 RC 벽체의 전단에 대한 평가 결과, 다수의 벽체들에서 전단강도가 부족하여 목표한 성능을 보유하지 못하는 것으로 나타났다([표 3-20]의 음영 부분).

[표 3-20] 예제 건물의 RC 벽체 전단 DCR

Wall ID	MCE $\times$ 2/3 Level			MCE Level		
	$1.2 \times F_u$	$0.75 \times F_n$	DCR	$1.2 \times F_u$	$1.00 \times F_n$	DCR
W1-1	683	705	0.97	791	940	0.84
W1-2	1342	963	1.39	1541	1284	1.20
W1-3	1032	799	1.29	1127	1065	1.06
W1-4	1888	1151	1.64	1938	1535	1.26
W2-1	1514	752	2.01	1752	1002	1.75
W2-2	1836	611	3.00	1943	814	2.39
W3	114	353	0.32	126	470	0.27
W4	71	308	0.23	73	411	0.18
W5-1	559	446	1.25	630	595	1.06
W5-2	438	403	1.09	577	537	1.07
W11	682	564	1.21	718	752	0.95

(3) 재설계

비선형동적해석 결과, 일부 벽체의 전단성능이 부족한 것으로 나타나 목표 성능을 만족하지 못하였다. 따라서 대상시스템이 목표 성능을 보유할 때까지 재설계한 후 다시 비선형 해석 및 평가를 수행하였다.

(가) 방안 1 : 벽체 두께 및 수평철근량 증가

벽체의 전단강도 증진을 위해 모든 벽체의 두께를 기존 200 mm에서 300 mm로 늘렸다. 이와 동시에 벽체들의 수평철근량을 증가시켰다. KBC의 0507.4.4.에는 전단철근에 의한 전단강도(V_s)가 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)의 4배 이상이 되지 않도록 규정하고 있기 때문에 전단성능이 부족한 벽체들에 대하여 V_s 가 $4V_c$ 와 같도록 수평철근 간격을 줄였다. 이때 수평철근의 최소 간격은 100 mm로 하였다.

• 비선형정적해석 결과

최대 층간변위각 및 부재별 성능수준 모두 인명안전 수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 X 방향과 Y 방향의 초과강도계수(Ω)가 각각 2.6과 3.7로 최소강도기준 역시 만족하였다.

• 비선형동적해석 결과

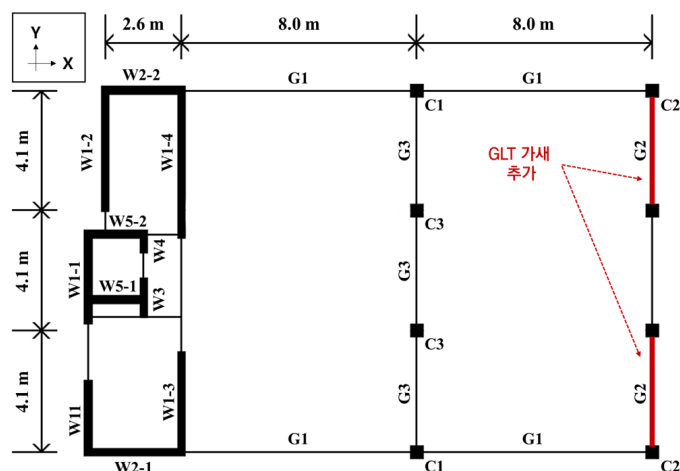
최대 층간변위각 및 부재별 성능수준 모두 인명안전 수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 나타났다. 특히 비선형동적해석에 의해 전단강도가 부족한 것으로 확인되었던 RC 벽체의 전단 DCR 결과는 [표 3-21]와 같다.

[표 3-21] 재설계 방안 1에 의한 RC 벽체 전단 DCR

Wall ID	MCE × 2/3 Level			MCE Level		
	$1.2 \times F_u$	$0.75 \times F_n$	DCR	$1.2 \times F_u$	$1.00 \times F_n$	DCR
W1-1	649	1126	0.58	918	1501	0.61
W1-2	1235	1538	0.80	1703	2051	0.83
W1-3	922	1276	0.72	1312	1701	0.77
W1-4	1765	1838	0.96	2442	2451	0.99
W2-1	1759	2092	0.84	2047	2789	0.73
W2-2	1670	1700	0.98	2396	2426	0.99
W3	112	563	0.20	157	750	0.21
W4	66	529	0.12	103	705	0.15
W5-1	618	713	0.87	744	950	0.78
W5-2	437	713	0.61	700	950	0.74
W11	589	900	0.65	779	1200	0.65

(나) 방안 2 : 가새 추가 및 수평철근량 증가

대상시스템은 [그림 3-55]에서 알 수 있듯이 RC 벽체가 평면의 한 쪽에 몰려있기 때문에 지진하중 작용 시 비틀림에 의한 횡변위 증가가 발생할 수 있다. 물론 앞에서 층간변위각 기준을 만족하여 안정성을 해치는 수준으로는 발생하지 않았다. 하지만 한 쪽으로 몰려 있는 RC 벽체들이 대부분의 횡력을 부담하여 전단강도가 부족한 것으로 나타났으므로, 평면의 비틀림을 완화하고 RC 벽체들의 횡력 저항 부담을 덜기 위해 평면에서 RC 벽체의 반대쪽에 GLT 가새를 추가하였다. 가새의 크기는 목구조 설계기준에 따라 $0.7E$ 의 하중조합으로 구한 축력을 요구력으로 하여 300×300 mm로 결정하였다. 가새를 추가했음에도 불구하고 전단강도 부족이 해결되지 않는 벽체들에 대해서는 전단철근 간격을 조절하여 전단강도를 증가시켰다.



[그림 3-55] 대상시스템 평면 및 가새 추가 위치

- 비선형정적해석 결과

최대 층간변위각 및 추가된 가새를 포함한 부재별 성능수준 모두 인명안전 수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 X 방향과 Y 방향의 초과강도계수(Ω)가 각각 2.7과 4.7로 최소강도기준 역시 만족하였다.

- 비선형동적해석 결과

최대 층간변위각 및 추가된 가새를 포함한 부재별 성능수준 모두 인명안전 수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 나타났다. 특히 횡력저항부재인 RC 벽체의 전단 DCR 결과 및 GLT 가새의 축력 평가 결과는 각각 [표 3-22]과 [표 3-23]에 나타내었다.

[표 3-22] 재설계 방안 2에 의한 RC 벽체 전단 DCR

Wall ID	MCE $\times$ 2/3 Level			MCE Level		
	$1.2 \times F_u$	$0.75 \times F_n$	DCR	$1.2 \times F_u$	$1.00 \times F_n$	DCR
W1-1	470	705	0.67	715	940	0.76
W1-2	918	1103	0.83	1344	1471	0.91
W1-3	658	799	0.82	1050	1065	0.99
W1-4	1141	1319	0.87	1718	1758	0.98
W2-1	1441	1530	0.94	2014	2040	0.99
W2-2	1198	1243	0.96	1606	1657	0.97
W3	76	353	0.22	106	470	0.23
W4	46	308	0.15	61	411	0.15
W5-1	469	836	0.56	569	1115	0.51
W5-2	317	836	0.38	472	1115	0.42
W11	486	564	0.86	624	752	0.83

[표 3-23] GLT 가새 축력 평가

지진위험도 (성능수준)	최대 인장력 & 압축력 (kN)		허용기준 (kN)	DCR
MCE $\times$ 2/3 (인명안전)	인장	208	921.4	0.23
	압축	313	1063.1	0.29
MCE (붕괴방지)	인장	443	1228.5	0.36
	압축	560	1417.5	0.40

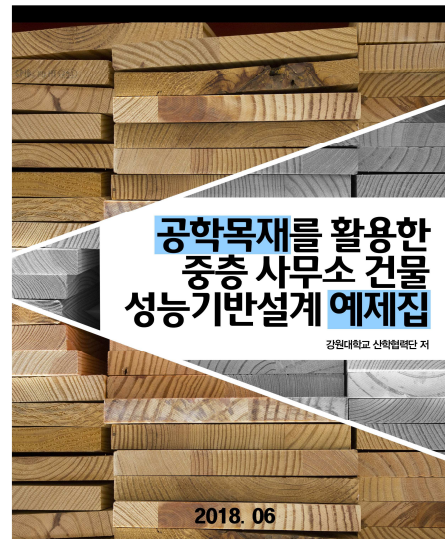
마. 하이브리드 횡력저항시스템 성능기반내진설계 예제 및 매뉴얼 작성

연구 결과를 토대로 공학목재를 활용한 중층 사무소의 성능기반설계를 수행하는 데에 참고할 수 있도록 ‘공학목재를 활용한 중층 사무소 건물 성능기반설계 매뉴얼’을 작성하였다(그림 3-56(a)). 이 매뉴얼의 적용은 구조용 집성재 골조와 철근콘크리트 보통 전단벽을 함께 사용하는 하이브리드 구조시스템으로 제한하였다. 또한 매뉴얼에는 일반적인 성능기반설계

의 절차 및 방법뿐만 아니라 공학목재 부재 설계와 연결부 평가 등에 대해서도 수록하였다. 예제집은 매뉴얼의 절차에 따라 9층 공학목재 골조-철근콘크리트 보통 전단벽 건물을 설계하는 전 과정을 담았다[그림 3-56(b)].



(a) 매뉴얼



(b) 예제집

[그림 3-56] 공학목재를 활용한 중층 사무소 건물의 성능기반설계 매뉴얼 및 예제집

5. 콘크리트-CLT 접합부의 하중전달능력 예측 방안 제시

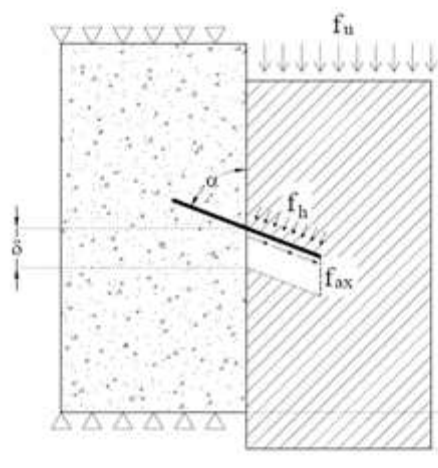
국내 및 해외에서 연구되고 있는 목구조의 접합부 설계는 일반적으로 목재-목재, 목재-강재의 결합에 따른 전단내력 산정을 통해 이루어지고 있다. 이 전단내력을 결정하는 최종 식의 형태는 모두 요한슨의 항복 이론 (Johansen yield theory) 또는 유럽항복이론에 기초하고 있다.

접합부에 사용되는 연결재의 종류에는 다우얼, 나사못, 레그나사못, 볼트 등이 주로 사용되는데, 엔지니어들은 KBC2016 또는 유로코드5 등의 현행기준들을 참고하여 접합철물과 나사못의 개수를 결정함으로써 접합부를 설계하고 있다. 그러나 기준 식들은 모두 목재-목재 또는 목재-강재 접합면에 대해서만 제공할 뿐, 콘크리트와 목재 사이의 마찰효과 및 파괴 메커니즘에 대해서는 언급하지 않았다. 또한 제안된 설계식을 이용하기 위해서는 수많은 환경적 변수와 가정 사항이 요구되어 보다 합리적이고 명확한 결과를 얻고자 하는 엔지니어들에게 많은 어려움을 주고 있다.

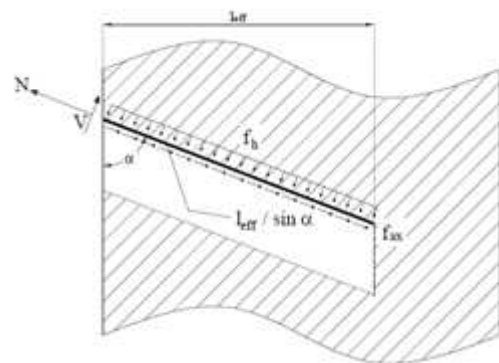
본 연구는 접합부의 내진성능을 확보하기 위한 방안을 마련하기 위해 앞서 콘크리트와 목재접합에 일반적으로 사용되는 경사못의 관입각도에 따른 하중전달특성을 알아보기 위해 진행되었다. 미국의 NDS, 국내의 KBC2016, 그리고 Eurocode5의 파괴모드를 참고하여 콘크리트와 목재 사이의 경사못에 대한 전단내력식을 제안하고 실험을 통해 검증하고자 한다.

가. 지압파괴모드(Model)

지압파괴모드가 적용되는 경우는 콘크리트와 파스너가 상대적으로 CLT보다 높은 강성을 가지고 있는 상태로, 접합부에 하중이 작용할 때 CLT의 압축(지압)파괴가 우선적으로 발생하고 콘크리트와 파스너는 움직이지 않는다. 이 때 파스너는 CLT의 지압응력과 콘크리트-CLT 사이의 마찰력을 동시에 받게 된다. 지압파괴모드의 메커니즘은 [그림 3-57(a)]에 나타나 있다.



(a) Mechanism of an inclined screw of CLT-to-concrete connection by CLT bearing stress



(b) Stresses applied to an inclined screw embedded in CLT(bearing stress)

[그림 3-57] Bearing failure mechanism

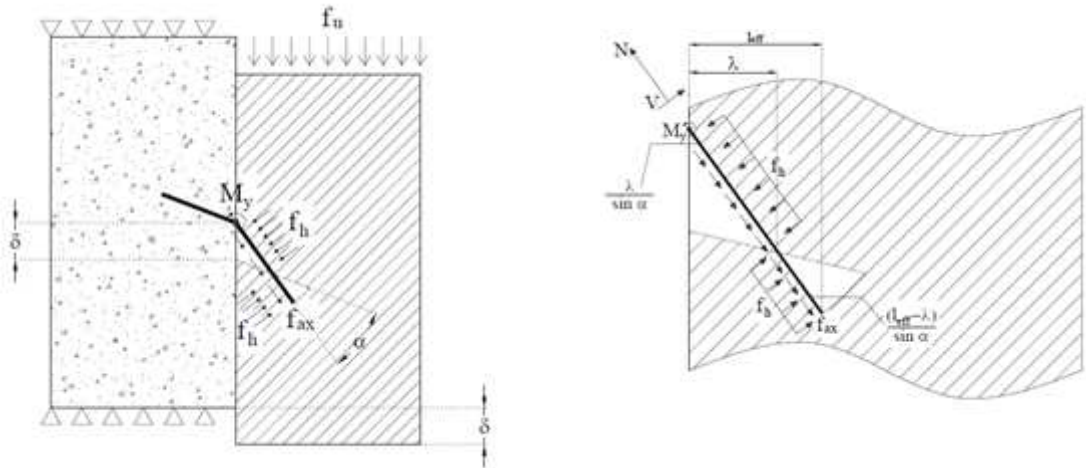
전단면에 작용하는 전단력과 경사못의 뿔힘으로 인해 발생하는 축력, 그리고 콘크리트 마찰력

으로 인한 저항력을 고려하여 지압파괴모드의 최대 전단내력은 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$f_{u,model} = dl_{eff} \left[f_{ax} \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \mu \right) + f_h \left(1 - \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \right]$$

나. 단일소성힌지에 의한 파괴모드(Mode2)

이 모드가 발생하는 주요 원인은 경사못에서 발생하는 단일 소성 힌지이다. CLT로부터 전달되는 지압응력에 의해 콘크리트와 CLT의 경계면에 위치한 경사못에 소성힌지가 발생하여 경사못이 항복하고, 연속적으로 CLT의 지압파괴가 발생한다. 해당 파괴모드의 메커니즘은 [그림 3-58]에 나타나 있다.



(a) Mechanism of an inclined screw of CLT-to-concrete connection forming a single hinge

(b) Stresses applied to an inclined screw embedded in CLT(single hinge)

[그림 3-58] A single hinge failure mechanism

콘크리트-목재 사이의 마찰력과 경사못의 뽑힘, 전단면에 작용하는 전단력으로부터 최대 전단내력을 다음과 같이 예측할 수 있다.

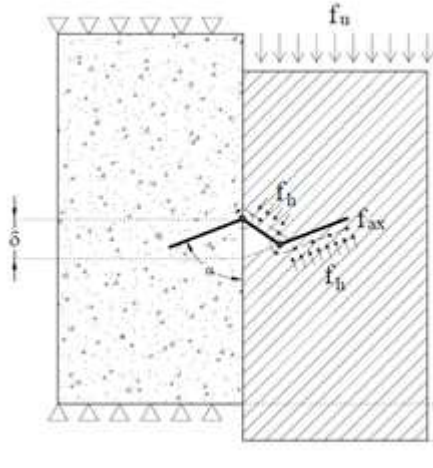
$$f_{u,model2} = \frac{dl_{eff}}{\sin \alpha} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \left(\sqrt{\frac{4M_y}{f_h dl_{eff}^2} \sin \alpha} - 1 \right)$$

다. 이중소성힌지에 의한 파괴모드(Mode3)

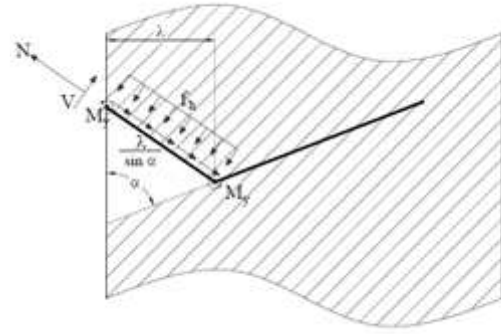
이 모드가 발생하는 주요 원인은 경사못에서 발생하는 이중소성힌지이다. 단일소성힌지와 같이 콘크리트와 CLT 경계면 위치에 소성힌지와 발생하며 파스너의 일부분이 CLT 내부에 구속되며 파스너의 중간부분에 추가적으로 힌지가 발생한다. 해당 파괴모드의 메커니즘은 [그림 3-59]에 나타나 있다.

콘크리트-목재 사이의 마찰력으로 인한 저항력과 경사못의 뽑힘, 전단면에 작용하는 전단력으로부터 해당 파괴모드에 대한 최대 전단내력을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f_{u, mode3} = 2 \frac{\sqrt{M_y d}}{f_h} \{f_{ax} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) + f_h (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)\}$$



(a) Mechanism of an inclined screw of CLT-to-concrete connection forming double hinge



(b) Stresses applied to an inclined screw embedded in CLT(double hinge)

[그림 3-59] Double hinge failure mechanism

라. 기존 설계식과 제안 설계식의 비교

목재-콘크리트 접합부의 전단내력을 예측할 수 있는 기존의 설계식과 제안식을 정리하여 [표 3-24]에 나타냈다.

[표 3-24] 기준별 접합부 전단내력 산정 식 비교

	전단내력 산정 식
제안식	$f_{u, mode1} = dl_{eff} \left[f_{ax} \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \mu \right) + f_h \left(1 - \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \right]$ $f_{u, mode2} = \frac{dl_{eff}}{\sin \alpha} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \left(\sqrt{\frac{4M_y}{f_h dl_{eff}^2 \sin \alpha}} - 1 \right)$ $f_{u, mode3} = 2 \frac{\sqrt{M_y d}}{f_h} \{f_{ax} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) + f_h (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)\}$
KBC2016	$Z'_a = \frac{(W'p)Z'}{(W'p)\cos^2 \alpha + Z' \sin^2 \alpha}$
Eurocode5	$\left(\frac{F_{ax, Ed}}{F_{ax, Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v, Ed}}{F_{v, Rd}} \right)^2 \leq 1$
NDS2015	$Z'_a = \frac{(W'p)Z'}{(W'p)\cos^2 \alpha + Z' \sin^2 \alpha}$

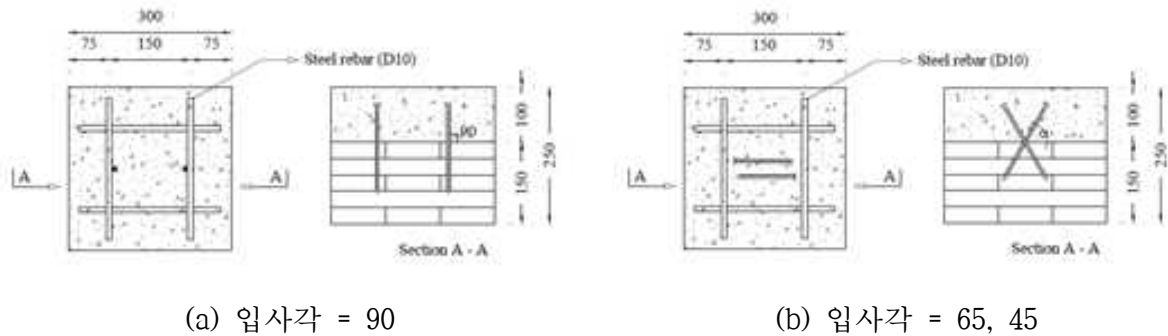
마. 콘크리트-CLT 전단실험

콘크리트-CLT의 연결재를 통한 접합에서 실제 발생하는 전단내력을 조사하여 내력을 예측하는 식의 정확도를 측정하기 위해 전단실험을 진행하였다.

(1) 실험체 제작 및 실험 구성

실험에는 총 3종류의 나사못 타입 파스너가 콘크리트와 CLT를 연결하기 위해 사용되었다. 모든 나사못은 Rothoblass 사에서 판매하는 제품이며 카탈로그 상의 모델명은 각각 TX40-VGS9160(이하 SC), CH17-KOP10160(이하 B), VB-7.5x100(이하 SFC)이다. 한 종류의 나사못에 대해서만 실험 결과를 도출하고 내력을 예측하였을 때는 주관적인 견해가 발생할 수 있으므로 여러종류의 나사못을 사용하여 각각의 결과를 비교함으로써 결과에 대한 객관성을 확보하였다.

실험체는 콘크리트-CLT의 전단성능 및 볼트의 거동 등을 파악하기 위해 콘크리트 슬라브와 CLT 블록이 결합된 형태로 제작되었다. 각 나사못 당 3개씩 총 9개의 실험체가 제작되었으며 모든 실험체의 가로 세로 길이는 300mm*300mm이다. 또한 CLT 블록의 두께는 150mm, 콘크리트 블록의 두께는 100mm 이다. 파스너는 선 타공된 CLT의 홀에 90, 60, 45도의 입사각으로 매립되었다. 입사각이 90도인 경우에는 직렬로 배치되었고 나머지는 병렬도 배치되었다. 실험체의 상세 도면은 [그림 3-60]와 같다.



[그림 3-60] 실험체 상세 도면

여기서 종류별 파스너의 길이(L)와 지름(d)은 다음과 같이 가정되었다: $L_{sc} = 160mm$, $d_{sc} = 9mm$, $L_b = 160mm$, $d_b = 10mm$, $L_{SFC} = 145mm$, $d_{SFC} = 7.5mm$. 각각의 실험체 명은 “파스너 종류-콘크리트두께-입사각” 으로 표현되었다. 제작된 실험체에 대한 구체적인 정보는 [표 3-25]에 정리되어 있다.

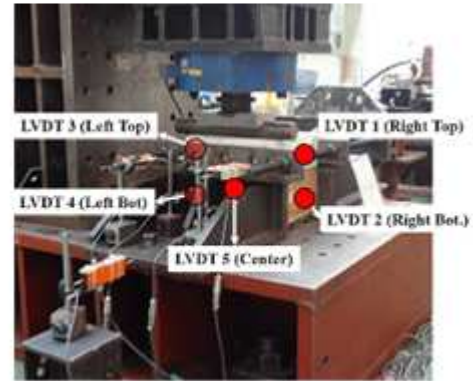
[표 3-25] Test specimen geometry

No.	Sample	CLT Thickness (mm)	Conc. Thickness (mm)	Fastener Type	Angle (degree)	Fastener Diam. (mm)	Length (mm)
1	SC-100-90	150	100	Type 1	90	9	95
2	SC-100-60				60	9	95
3	SC-100-45				45	9	95
4	B-100-90	150	100	Type 2	90	10	108
5	B-100-60				60	10	108
6	B-100-45				45	10	108
7	SFC-100-100	150	100	Type 3	90	7.5	100
8	SFC-100-60				60	7.5	100
9	SFC-100-45				45	7.5	100

실험체의 셋업 형태는 [그림 3-61(a)]에 나타나 있으며, 실험체의 상대변위를 측정하기 위해 설치한 LVDT의 셋업 형태는 [그림 3-61(b)]에 나타나 있다.



(a) 실험체 셋업

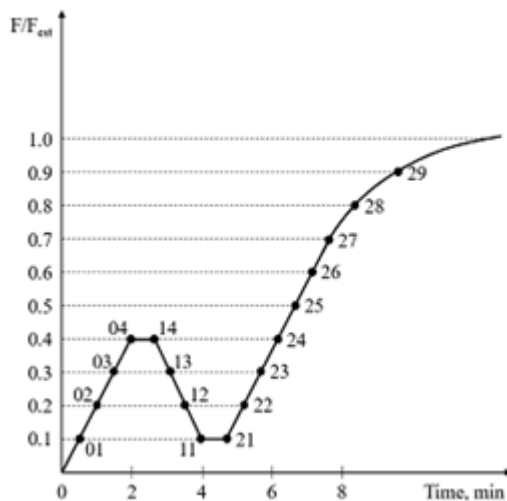


(b) LVDT 셋업

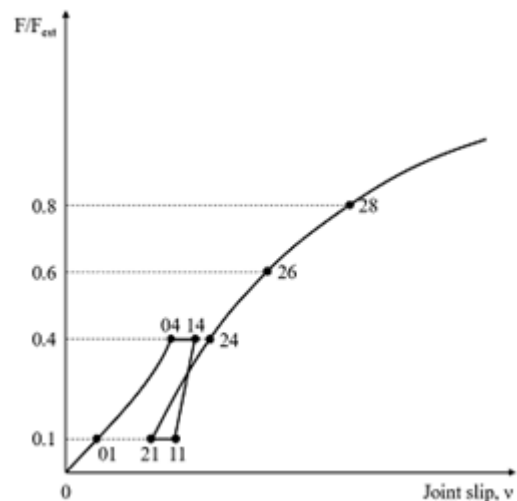
[그림 3-61] 전단실험 셋업

(2) 실험 절차

국내에는 실험에 대한 적절한 기준이 없기 때문에 본 실험의 하중 재하 순서는 유럽설계기준 (Eurocode 5)을 따랐다. 기준에 따르면 첫 번째 단계에서는 최대예상하중의 약 40% 수준까지 2분에 걸쳐서 가력이 되어야 하고 약 30 초 동안 유지되어야 한다. 그 다음 단계는 10% 수준으로 하중을 약 90 초에 걸쳐서 떨어뜨린 뒤 다시 30초간 유지하는 것이다. 마지막은 다시 샘플이 파괴가 될 때까지 재 가력 하는 단계이다. 이처럼 하중을 재하시키는 이유는 목재의 수축으로 인한 변형이나 접촉 면 사이의 초기 슬립에 의해 강성이 과소평가됨을 막기 위함이다. 이 하중 재하 순서를 그래프로 나타내면 [그림 3-62(a)]와 같다. 위 하중 절차를 따라 가력 했을 때 일반적으로 나타나는 Load-slip 그래프는 [그림 3-62(b)]와 같다.



(a) 하중재하 순서



(b) Load-slip 그래프

[그림 3-62] 하중재하 순서 & Load-slip 그래프

(3) 실험 결과

콘크리트-CLT 접합부의 구조적 특성을 알아보기 위해 Load-slip 관계 그래프와 유럽의 기준에 근거하여 연결재의 강성, 최대전단내력, 그리고 연성도를 측정하였다. 실험체별 측정된 강성,

최대 전단내력, 연성도는 각각 [표 3-26], [표 3-27], [표 3-28]에 나타나 있다.

[표 3-26] 실험체의 강성

No	Specimen	$K_{0.4}$ (kN/mm)	$K_{0.6}$ (kN/mm)	$K_{0.8}$ (kN/mm)
1	SC-100-90	6.01	4.62	4.01
2	SC-100-60	26.97	24.96	21.80
3	SC-100-45	90.55	45.34	26.46
4	B-100-90	11.71	5.00	4.62
5	B-100-60	265.65	56.07	32.98
6	B-100-45	305.5	155.39	75.93
7	SFC-100-100	7.18	3.71	3.47
8	SFC-100-60	366.76	78.19	25.77
9	SFC-100-45	452.06	102.80	51.53

[표 3-27] 실험체의 최대 전단내력

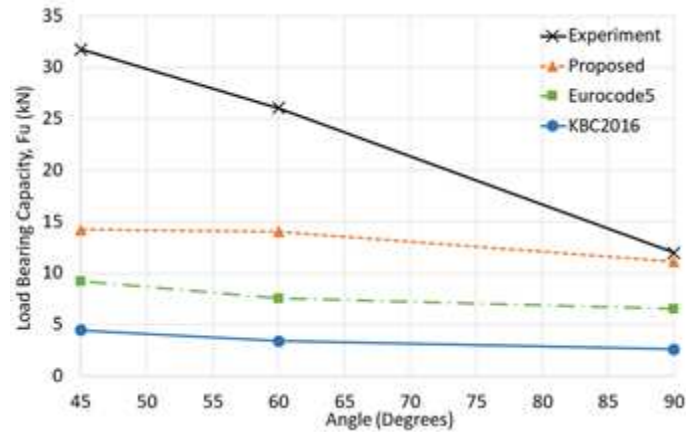
No	Specimen	F_{max} (kN)
1	SC-100-90	42
2	SC-100-60	26
3	SC-100-45	32
4	B-100-90	49
5	B-100-60	31
6	B-100-45	42
7	SFC-100-100	44
8	SFC-100-60	26
9	SFC-100-45	37

[표 3-28] 실험체의 연성도

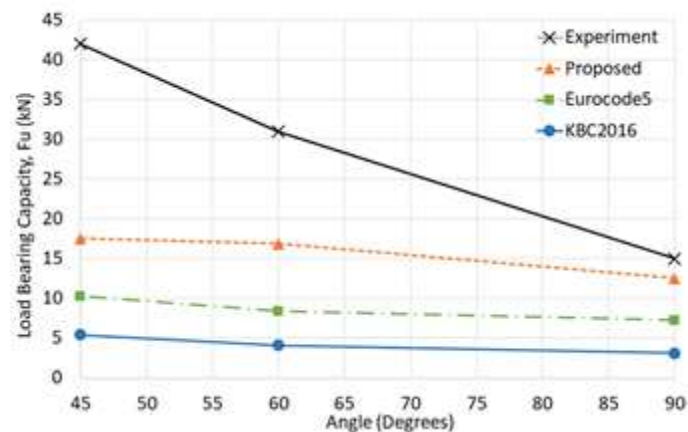
No	Specimen	S_y	s_u	D
1	SC-100-90	0.8	30.0	37.5
2	SC-100-60	2.1	25.1	12.0
3	SC-100-45	2.7	25.1	9.3
4	B-100-90	0.6	24.4	40.7
5	B-100-60	1.0	15.1	15.1
6	B-100-45	0.8	10.6	13.3
7	SFC-100-100	0.6	20.2	33.7
8	SFC-100-60	1.1	20.2	18.4
9	SFC-100-45	1.2	25.8	21.5

(4) 최대 전단내력 비교

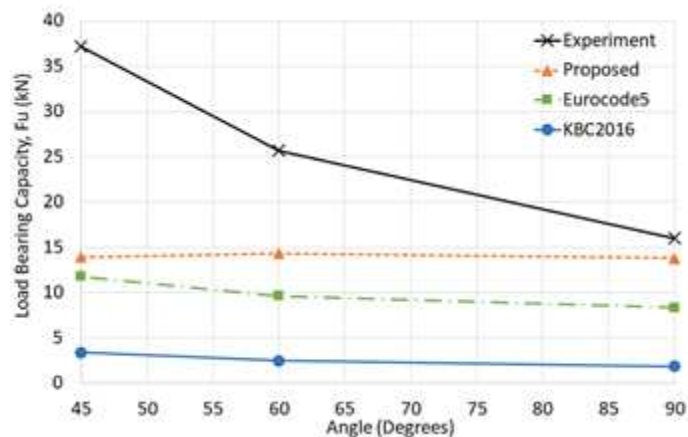
실험으로부터 측정된 콘크리트-목재 접합부의 최대 전단내력과 제안식 및 유로코드5, KBC2016 으로부터 계산된 전단내력을 비교하여 제안식의 정확성을 확인하였다. 모든 전단내력의 비교는 [그림 3-63]과 [표 3-30]에 나타나 있다.



(a) SC



(b) B



(c) SFC

[그림 3-63] 제안식, 유로코드5, KBC2016, 실험값에서 도출된 최대 전단내력 비교 그래프

[표 3-29] 제안식, 유로코드5, KBC2016, 실험값에서 도출된 최대 전단내력
비교 표

No	Specimen	Proposed <i>kN</i>	Eurocode5 <i>kN</i>	KBC2016 <i>kN</i>	Experiment (F_u) <i>kN</i>
1	SC-100-90	11.2	6.5	2.6	11.9
2	SC-100-60	14.0	7.5	3.4	26.1
3	SC-100-45	14.2	9.2	4.5	31.7
4	B-100-90	12.6	7.3	3.1	15.2
5	B-100-60	16.9	8.4	4.1	30.9
6	B-100-45	17.6	10.3	5.4	41.9
7	SFC-100-100	13.8	8.3	1.9	16.1
8	SFC-100-60	14.4	9.6	2.5	25.6
9	SFC-100-45	13.9	11.8	3.4	37.2

제안식으로부터 얻어진 전단내력은 가력 이전에 실험체에 어떠한 파괴모드가 발생할지 알 수 없기 때문에 가장 보수적인 파괴 메커니즘을 사용하여 산정되었다.

그래프 상에서는 실험체의 전단내력이 Eurocode5, KBC2016, 그리고 제안식이 예측한 전단내력 값을 훨씬 상회하는 값을 가지고 있는 것으로 나타났으며 나사못의 관입각도가 45도에서 90도로 가까워질수록 내력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 제안식으로부터 얻은 전단내력이 실험값에 가장 가까웠으며 Eurocode5와 KBC2016은 더 보수적인 값을 제공했다.

4.2 CLT 요소 설계 프로그램 개발

엔지니어의 보다 편리하고 직관적인 CLT 요소의 디자인을 위해 CLT 설계 소프트웨어를 자체 개발하였다. 압축을 받는 부재와 인장을 받는 부재에 대하여 각각 설계할 수 있도록 하였으며 상세 내용은 Cross-Laminated Timber handbook(U.S. Edition)을 참고하였다.

설계 소프트웨어는 Python 3.6 언어를 통해 개발되었으며 프로그램 구동 직후의 UI는 [그림 3-64]에 나타나 있다.

The screenshot shows the 'CLT Designer' window. It has four main sections: 'Geometry input', 'Loading conditions', 'Major axis input(parrel to grain)', and 'Minor axis input(perpendicular to grain)'. The 'Geometry input' section has fields for 'Total layer', 'hi', 'b', 'Length', and 'le'. The 'Loading conditions' section has radio buttons for various loading types. The 'Major axis input' and 'Minor axis input' sections have fields for material properties like $Fb0$, $E0$, $Ft0$, $Fc0$, $Fv0$, $Fs0$, $G0$ and their 90-degree counterparts. The 'Results for Bending Member' and 'Results for Compression Member' sections show calculated values. A diagram on the right shows the 'Cross-section of CLT' with dimensions b and h_i , and labels for the 'ith Layer', 'Minor strength axis', and 'Major strength axis'. The 'Calculate' button is highlighted.

[그림 3-64] CLT 설계 소프트웨어 실행 모습

UI의 공백란에 input data를 채워넣고 “Calculate” 버튼을 클릭하면 입력된 데이터에 대한 설계기준(만족/불만족) 여부를 즉시 계산해 보여준다. 만약 계산에 필요한 데이터가 입력되지 않은 채 “Calculate” 버튼이 클릭되었다면 데이터가 불충분한 곳에 “empty” 메시지가 출력된다 [그림 3-65].

This screenshot shows the same 'CLT Designer' window after the 'Calculate' button was clicked. The input fields in the 'Geometry input', 'Major axis input', and 'Minor axis input' sections now contain the word 'empty' instead of numerical values. The 'Results' sections also show 'empty' for some values. The 'Calculate' button is no longer highlighted.

[그림 3-65] “empty” 메시지가 출력된 프로그램

모든 데이터가 올바르게 입력되어 성공적으로 해석이 완료된 모습은 [그림 3-66]에 나타나있다.

CLT Designer

Geometry input

Total layer: 5

hi: 1,375 in

b: 12 in

Length: 240 in

le: 120 in

Major axis input(parrel to grain)

Fb0: 1950 psi

E0: 1700000 psi

Ft0: 1375 psi

Fc0: 1800 psi

Fv0: 135 psi

Fs0: 45 psi

G0: 106250 psi

Minor axis input(perpendicular to grain)

Fb90: 500 psi

E0: 1200000 psi

Fv0: 400 psi

Fs0: 135 psi

G0: 75000 psi

E90: 40000 psi

G90: 7500 psi

Loading conditions

☒ Uniformly distributed pinned

☐ Uniformly distributed fixed

☐ Uniformly distributed cantilevered

☐ Concentrated at midspan pinned

☐ Concentrated at midspan fixed

☐ Concentrated at quarter points pinned

☐ Concentrated at free-end cantilevered

☐ Constant moment pinned

Ks = 11.5 (CLT handbook, US edition)

Results for Bending Member

Fb+Seff: 124861.79 lb-in

Fs(lb/Q)eff: 2442.40 lb

EI app: 402008833.65 psi

EI app_min: 208401379.36 psi

Results for Compression Member

Cp: 0.89

Fc Cp Ap: 79230.59 lb

applied load: 70000 lb

Checking Capacity: OK

< Cross-section of CLT >

The diagram shows a cross-section of a CLT panel with width b and height h_i . It consists of multiple layers, with the i^{th} layer highlighted. The minor strength axis is perpendicular to the grain, and the major strength axis is parallel to the grain.

Calculate Exit

[그림 3-66] 해석 완료 모습

본 소프트웨어를 통해 CLT 요소를 보다 직관적이고 빠르게 설계할 수 있으며, 이미 설계가 완료된 부재 또한 간단한 입력만으로 검증할 수 있어 CLT에 친숙하지 않은 국내의 엔지니어들에게 많은 도움이 될 수 있다.

해석을 위해 필요한 모든 수식들은 파이썬 프로그램에서 다음의 알고리즘으로 구현되어 있으며 한국저작권위원회에 소프트웨어 저작물로 등록을 완료하였다.

```

#
# Start calculation (For Bending member)
#
while True:
    if empty_count != 0: break # 빈칸이 있을 경우 계산 X

    # Geometry input
    layer = int(self.layer.text()) # 총 레이어 개수 (홀수만 입력 가능)
    hi = float(self.hi.text()) # 개별 레이어 두께
    b = float(self.b.text()) # 단면 폭
    L = float(self.L.text()) # length
    le = float(self.le.text()) # length

    # Major axis input(parallel to grain)
    Major_Fb0 = float(self.Major_Fb0.text()) # 휨 강도
    Major_E0 = float(self.Major_E0.text()) # 탄성계수
    Major_Ft0 = float(self.Major_Ft0.text()) # 인장강도
    Major_Fc0 = float(self.Major_Fc0.text()) # 압축강도
    Major_Fv0 = float(self.Major_Fv0.text()) # 전단강도
    Major_Fs0 = float(self.Major_Fs0.text()) # Rolling shear strength
    Major_G0 = float(self.Major_G0_lab.text()) # 전단탄성계수 (PRG320 7p)

    # Minor axis input(perpendicular to grain)
    Minor_Fb90 = float(self.Minor_Fb90.text()) # 휨 강도
    Minor_E90 = float(self.Minor_E90.text()) # 탄성계수
    Minor_Fv0 = float(self.Minor_Fv0.text()) # 전단강도
    Minor_Fs0 = float(self.Minor_Fs0.text()) # Rolling shear strength
    Minor_G0 = float(self.Minor_G0_lab.text()) # 전단탄성계수 (PRG320 7p)
    Minor_E90 = float(self.Minor_E90_lab.text()) # 수직방향 탄성계수 (PRG320 6p)
    Minor_G90 = float(self.Minor_G90_lab.text()) # 수직방향 전단탄성계수 (PRG320 7p)

    # Loading condition
    Ks = float(self.Ks_lab.text()) # Ks

    # 1. Finding EI_eff (Effective Stiffness)
    layer_data = [] # layer_data = [i, E, z, A, EI, G, hGb]
    EI_eff = 0
    for i in range(0, layer):
        if i % 2 == 0: E = Major_E0
        else: E = Minor_E90
        z = abs(hi * (layer - 1) / 2 - (i) * hi)
        A = hi * b
        EI = E * b * hi ** 3 / 12 + E * A * z ** 2
        EI_eff = EI_eff + EI # EI_eff = sum(EI)
        layer_data.append([i, E, z, A, EI])

    # 2. Finding GA_eff (Effective Stiffness)
    hGb_sum = 0
    for i in range(0, layer):
        a = hi * (layer - 1)
        if i % 2 == 0: G = Major_G0
        else: G = Minor_G90
        if i == 0 or i == layer - 1: hGb = hi / (2 * G * b)
        else: hGb = hi / (G * b)
        hGb_sum = hGb_sum + hGb
        layer_data[i].extend([G, hGb])
    GA_eff = a ** 2 / hGb_sum

    # 3. Finding Fb * S_eff
    S_eff = 2 * EI_eff / (layer_data[0][1] * hi * layer)
    fac = 0.85
    Fb_S_eff = fac * Major_Fb0 * S_eff

```

```

# 4. Finding Fb * S_eff
lbQ = 0
half_layer = int(layer / 2) + layer % 2
for i in range(0, half_layer):
    E = layer_data[i][1]
    z = layer_data[i][2]
    if i == half_layer - 1: z = layer_data[i][2] + hi / 2
    EhZ = E * z * hi
    lbQ = lbQ + EhZ
lbQ_eff = EI_eff / lbQ          # in^2
Fs_lbQ_eff = Major_Fs0 * lbQ_eff # lb

# 5. Finding EI_app
EI_app = EI_eff / (1 + (Ks * EI_eff) / (GA_eff * L ** 2))
EI_app_min = EI_app * 0.5184

# -----
# Start calculation (For Compression member)
# -----

# 1. Finding EI_app_min
# 2. Finding Cp
Parallel_layer = round(layer / 2, 0) + 1
Ap = hi * b * Parallel_layer
c = 0.9

PcE = np.pi ** 2 * EI_app_min / le ** 2
Pc = Major_Fc0 * Ap

temp = PcE / Pc
Cp = (1 + temp) / (2 * c) - (((1 + temp) / (2 * c)) ** 2 - temp / c) ** 0.5

# 3. Checking column capacity
if self.applied_load.text() == "": applied_load = "None"
else: applied_load = float(self.applied_load.text())
elem_capa = Pc * Cp

if applied_load == "None": check_capa = "None"
elif elem_capa >= applied_load: check_capa = "OK"
else: check_capa = "NG"

```

[그림 3-67] 해석 part 파이썬 알고리즘



[그림 3-68] 저작권 등록증

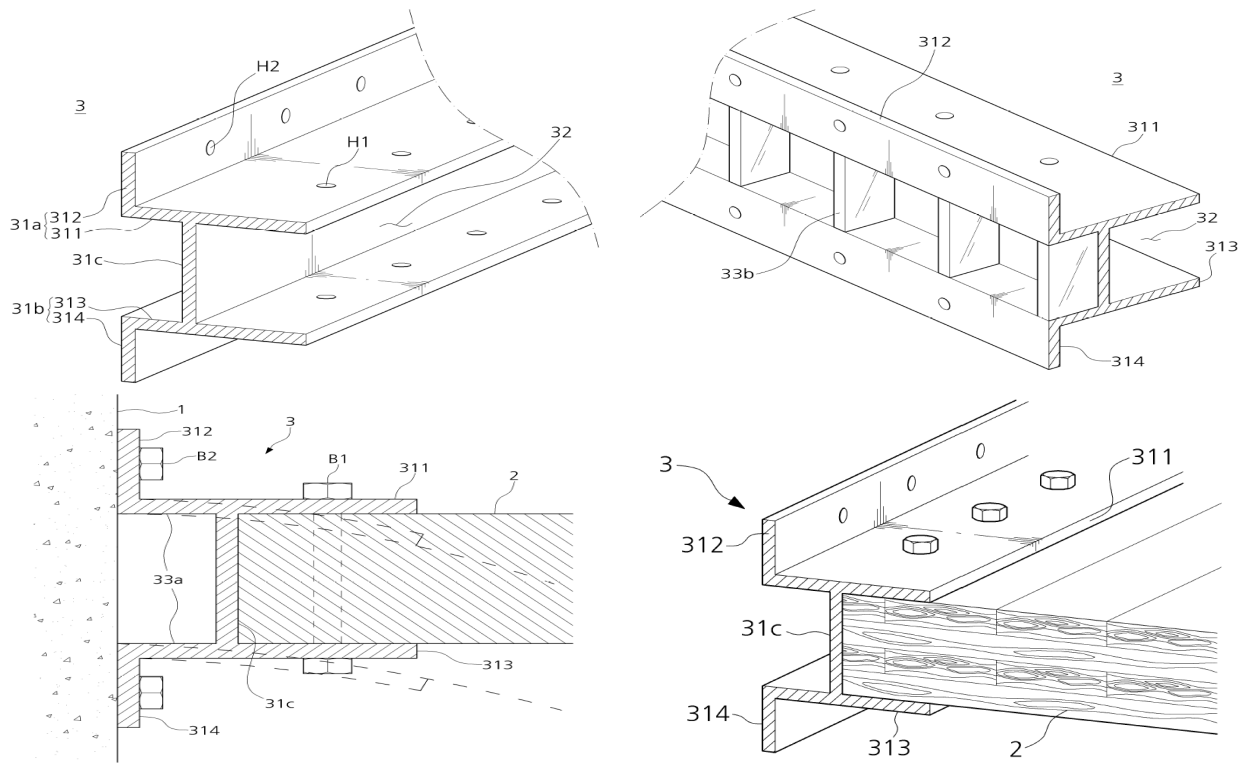
6. CLT-콘크리트 접합부의 내진성능을 향상시킬 수 있는 내진접합프레임 개발

목재가 사용된 구조물에서 하중을 원활히 전달하기 위해서는 접합부의 강성이 일정 수준 이상 확보되어야 한다. 그러나 국내의 기준은 접합부의 상세에 대해 대체로 못, 나사못, 다우얼 등의 핀 접합만을 다루고 있어 접합부의 강성을 충분히 확보하지 못하고 있다. 목재가 횡하중을 효과적으로 저항하기 위해서는 내진성능을 발현할 수 있는 특수한 접합부의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 철근콘크리트 전단벽과 슬래브 부재의 접합부에서 이들 부재의 접합을 용이하게 함과 동시에 충분한 연성과 에너지 소산 능력을 확보할 수 있는 내진접합 프레임을 개발하였다.

개발된 내진접합 프레임은 슬래브 부재에 우선적으로 결합된 상태에서 접합부를 콘크리트 전단벽에 결합하는 방식으로 시공되므로 슬래브 부재와 콘크리트 부재를 쉽게 결합할 수 있어 기존의 나사못, 볼트, 앵커 등을 이용한 시공보다 시공성이 우수하다. 또한 내진접합 프레임의 콘크리트 결합부측에 감쇠부를 구비하여 감쇠부의 소성 변형에 의해 접합부에서의 충분한 연성과 에너지 소산 능력을 확보할 수 있다. 감쇠부에는 웹부재가 추가로 구성되어있어 별도의 현치 부재 없이도 슬래브 부재를 지지할 수 있다.

발명된 내진접합 프레임은 2017년 10월에 출원 완료하였으며 현재는 등록 진행중에 있다. 프레임의 상세 도면은 [그림 3-69]에 나타나 있다.



[그림 3-69] 내진접합프레임 상세 도면

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 달성도	기여도 작성
1차 연도 (2016)	8m 장스팬 적용을 위한 공학목 재-콘크 리트 합성 바닥구 조시스 템 개발	공학목재- 콘크리트 바닥구조 시스템의 수직하중 지지능력 을 고려한 해석모델 개발	• 공학목재 바닥 판에 대한 수직하중 지지능력 산정 및 평가 • 바닥구조시스템의 형상비와 경간길이에 따른 해석 모델 개발	• 해석모델 개발을 통해 100% 연구목표를 달성함	• 공학목재 바닥판 설계에 대해서 엔지니어가 실무에 적용 및 검증할 수 있는 해석모델을 개발
		공학목재- 콘크리트 바닥구조 시스템의 대형스케 일실험을 통한 성능실험 연구	• 8m 장경간 확보를 위한 공학목재-콘크리트 합성바닥구조시스템의 대규모 실증 실험 • 수직하중 지지능력과 최대변위에 대한 DB 확보	• 대규모 실증실험을 통해 100% 연구목표를 달성함	• 대형스케일 실증 실험을 통해 합성 바닥구조시스템의 성능 검증함
	9층 목구조 건축물 용 하이브 리드 횡력저 항시스 템 개발	9층 목구조 건축물 적용을 위한 공학목재- 하이브리 드 횡력저항 시스템 개발	• 목구조 건축물용 횡력저항시스템 실험과 해석관련 선진 해외기술에 대한 기존 사례 조사	• 실험 논문 및 기존 사례 조사를 통해 100% 연구목표를 달성함	• 논문 및 기존 다층 목구조 건축물 사례 조사를 통해 구조기술자들에게 목구조 건축물용 횡력저항 시스템에 대한 참고 자료 제공
			• 목구조 건축물의 횡력저항시스템에 대한 연구자료수집 및 목구조 건축물용 횡력저항시스템 분류	• 연구 또는 실 사례 조사를 통해 100% 연구목표를 달성함	• 논문 및 기존 다층 목구조 건축물 사례 조사를 통해 구조기술자들에게 목구조 건축물용 횡력저항 시스템에 대한 참고 자료 제공
			• 목구조 건축물용 하이브리드 횡력저항시스템의 프로토타입 선정 및 프	• 공동연구자회의와 3차원 구조해석 프로그램을 이용한 비선형 동적해석을 통해 100% 연구목표를	• 공학목재 건물과 동일한 규모를 갖는 RC 건물의 구조적 성능과 탄소배출량 비교를 통해 국내

2차 연도 (2017)			로토타입 내진 성능평가 수행	달성함	중·고층 건축물에 공학목재 적용 가능 성 확인
			성능기반 내진 설계를 적용할 하이브리드 횡 력저항시스템 결정	성능평가 결과 분석 을 통해 100% 연구 목표를 달성함	국내 실정을 반영한 목구조 활성화에 최 적화된 횡력저항시 스템 마련
	9층 목구조 적용을 위한 공학목 재-하이 브리드 접합부 설계기 술 개발	합성 다이어프 램 면내강성 평가기술	- 내진설계적용 을 위한 9층 콘크리트-목조 하이브리드 예 제 건물의 다 이어프램 거동 평가 - 구조물의 층별 변위 및 거동 특성에 따른 안전성 검증	특허 출원을 완료하 여 특허 연구목표를 100% 달성함	다이어프램 접합부 응력 집중현상을 완 화시키기 위한 목재 브레이싱 특허 출원
		다이어프 램 수평 연결부 설계 기술	콘크리트와 공 학목재의 수평 연결부 (접합 부) 설계 기술 개발	- 설계예제 및 지침서 작성을 통해 기타(보 고서) 연구목표를 100% 달성함 - 소프트웨어 개발을 통해 연구목표를 100% 달성함	- CLT-콘크리트 접합 부 설계예제 및 지침 서를 제안함 - 부재의 사이즈를 최 적화할 수 있는 소프 트웨어를 개발함
	공학목 재-콘크 리트 합성패 널 바닥구 조시스 템 설계법 개발	공학목재- 콘크리트 합성패널 바닥구조 시스템 해설모델 검증	공학목재 바닥 판에 대한 강 도 및 변형능 력과 파괴모드 를 재현할 수 있는 해석모델 개발	기술이전을 통해 100% 연구목표를 달성함	공학목재-콘크리트 합성패널 구조시스 템을 엔지니어가 실 무에 적용 및 검증 할 수 있는 해석 모 델을 개발하고, 이 를 검증하여 설계기 술의 신뢰도를 확보 함
		공학목재- 콘크리트 합성패널 바닥구조 시스템 설계법 개발	현행설계기준 에 따라 형상 과 경간비에 따른 공학목재 -콘크리트 합 성패널 바닥 구조시스템 설 계 및 설계 절 차 정립	공학목재-콘크리트 합성패널 특허 출원 을 하여 연구목표를 100% 달성함	요구되는 목표성능 에 따라 합리적인 설계가 이루어질 수 있는 설계법 개발
	9층	9층	성능기반설계	KBC2016에 따라 대	하이브리드 횡력저항

목구조 건축물 용 하이브리드 횡력저항시스템 성능기반 내진설계 매뉴얼 개발	목구조 건축물용 하이브리드 횡력저항 시스템 성능기반 내진설계 매뉴얼 개발	대상시스템 기본 설계	상시스템의 기본 설계를 완료하여 100% 연구목표를 달성함	시스템의 기본 설계 가이드라인 제공
		• 성능기반설계를 위한 성능 목표 및 지진 하중 설정	• 연구 대상 건물의 내진등급에 대응하는 성능목표를 설정하여 100% 연구목표를 달성함	• 하이브리드 횡력저항 시스템을 갖는 9층 사무소 건물의 성능 목표 설정에 대한 참고 자료 제공
		• 내진성능평가를 위한 비선형모델 및 허용수준 결정	• 비선형 모델링의 범위를 결정하고 각 부재별 허용기준을 결정함으로써 100% 연구목표를 달성함	• 공학목재 부재, RC 부재, 연결부 등의 비선형 해석모델 작성 방법 및 각 부재의 허용기준 제시
		• 내진성능평가를 수행하여 하이브리드 횡력저항시스템 설계 확정	• 3차원 구조해석 프로그램을 이용한 비선형 해석 및 성능평가 결과 분석을 통해 100% 연구목표를 달성함	• 공학목재를 활용한 9층 사무소건물을 위한 하이브리드 횡력저항시스템 제공
		• 하이브리드 횡력저항시스템 성능기반 내진설계 예제 및 매뉴얼 작성	• 연구 결과를 바탕으로 매뉴얼 및 예제집을 작성하여 100% 연구목표를 달성함	• 개발된 매뉴얼을 통해 실무에서 활용 가능한 하이브리드 횡력저항시스템의 성능기반 내진설계 기술 보급 가능 • 예제집을 통해 구조기술자들이 다층 목구조 건물 설계에 쉽게 접근할 수 있도록 함
하이브리드 구조시스템 목구조 접합부 내진성 능향상 기술 개발	내진성능 향상 목구조 접합부 개발	• 하이브리드 접합부의 내진성능을 향상시키기 위한 내진 접합 프레임 개발	• CLT-콘크리트 접합부 실험결과 분석을 통해 논문을 작성하여 100% 연구목표를 달성함 • CLT 설계 소프트웨어 등록을 통해 100% 연구목표를 달성함 • CLT-콘크리트 내진 접합 프레임의 특허출원을 통해 연구목표 초과 달성함	• 콘크리트와 CLT를 연결해주는 접합철물의 하중전달 능력과 전단성능을 예측할 수 있는 방안 제안 • CLT의 요소를 설계할 수 있는 프로그램을 자체 개발 완료 • CLT-콘크리트 접합부의 내진성능을 향상시킬 수 있는 내진 접합프레임 개발
	하이브리드 목구조	• 내진접합 프레임의 성능검증	• 보고서 작성을 통해 기타(보고서) 연구목	• 내진접합프레임의 감쇠부를 설계하고 아

		내진 접합부 설계기술 개발	및 설계기술 개발	표를 100% 달성함	바쿠스 Cyclic 해석 을 통해 내진접합 프 레임의 에너지 소산 능력을 평가 함
--	--	-------------------------	--------------	-------------	--

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 공학목재와 하이브리드 구조시스템의 개발은 목조건축의 새로운 패러다임을 창조하여 건설시장의 규모와 범위를 확대하고 국가경제의 활성화에 기여함.

- 친환경재료이며 이산화탄소 저감에 큰 강점을 가진 목조건축을 활성화함으로써 국민의 거주와 일에 대한 삶의 질을 크게 높임
- 다층 목조구조물 설계에 대한 해외 선진국 사례를 중심으로 자료집을 제시 하여 국내 건축구조 엔지니어들이 목조구조물의 설계에 쉽게 접근할 수 있게 함으로써 다층 목조구조물의 국내시장 활성화에 도움을 줄 수 있음.
- 목조구조물을 대상으로 지진하중에 대한 KBC-기준의 근거가 부족한 상황에서도 성능 기반 내진설계를 적용하여 다층 목조구조물에 대해서도 잠재적으로 가능한 내진설계의 방법을 제시함
- 국내에는 건축 산업에서 가장 친환경적인 재료인 목재를 이용하여 구조물을 설계한 경험이 풍부한 엔지니어가 부족한 상황에서 다층 목조구조물의 예제 설계 자료를 제시함으로써 건축구조 엔지니어들이 다층 목조구조물의 설계에 쉽게 접근할 수 있게 함.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

국외 사례를 통해 본 공학목재 건물의 횡력저항시스템은 주로 벽체나 가새 형태로 이루어져 있다. 벽체는 CLT panel을 사용하기도 하지만 건물의 코어 부분을 RC 벽체로 계획하는 경우도 많다. 가새는 공학목재 가새와 철골 접합부를 사용하거나 철골 가새 또는 아예 건물 내부에 철골 가새 골조를 두는 경우도 있다. 공학목재 건물의 실제 해외사례에 대한 자세한 사항은 다음과 같다.

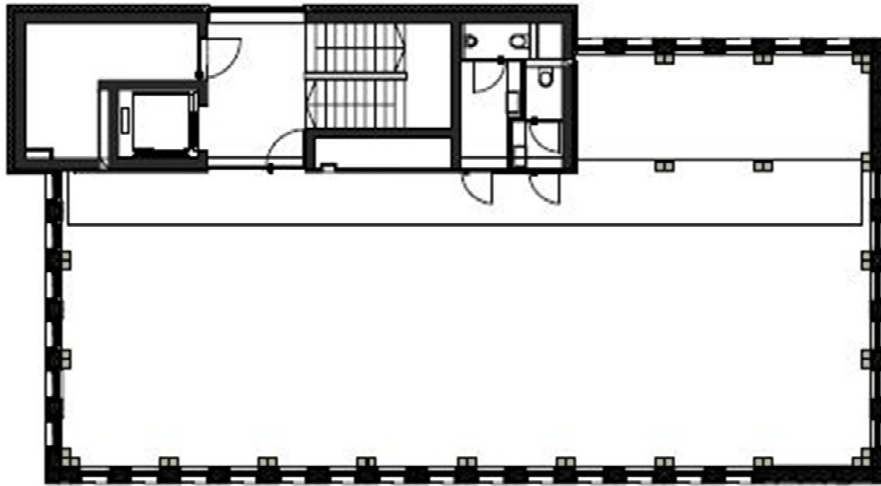
1. LCT One

[표 6-1] LCT One 개요

위 치	Dornbirn, Austria	
건물용도	Commercial Office	
층 수	8	
건물높이	27 m	
구조형식	Hybrid slabs	Wood Beam
		concrete slab
	Core wall	concrete
	exterior wall	load bearing glulam posts
		curtain wall



[그림 6-1] LCT One 외부 및 내부



[그림 6-2] LCT One의 평면도



[그림 6-3] LCT One 횡력저항시스템 - RC 코어 벽

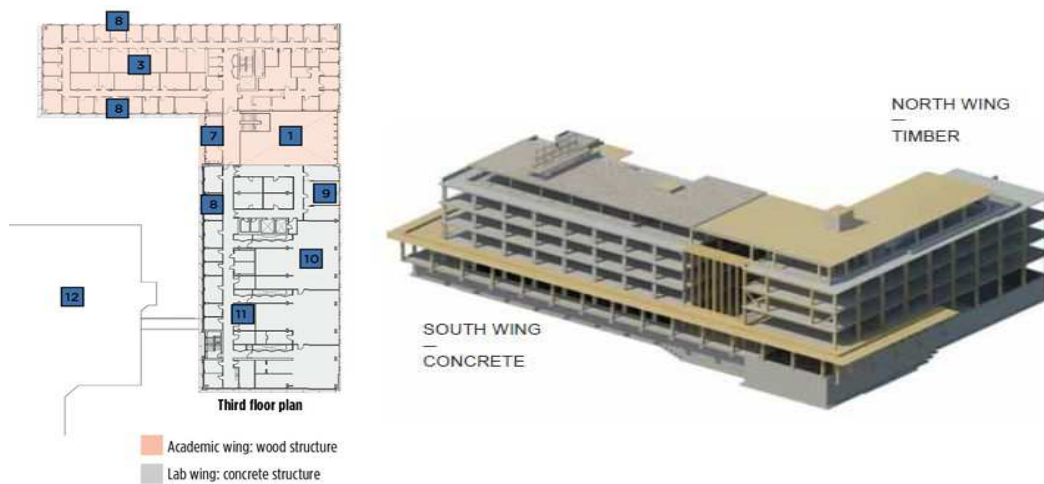
2. The Earth Sciences Building at UBC

[표 6-2] The Earth Sciences Building at UBC 개요

위 치	University of British Columbia, Vancouver, Canada
건물용도	Institutional
층 수	5
건물높이	22 m
구조형식	Glulam columns and beams
	Glulam chevron braced frame with steel connector
	Concrete core wall
	Special long-span, Composite Wood-steel trusses at one level



[그림 6-4] The Earth Sciences Building at UBC 외부 및 내부



[그림 6-5] The Earth Sciences Building at UBC의 평면도 및 구조형식



[그림 6-6] The Earth Sciences Building at UBC의 횡력저항시스템 - 역V형 가새골조와 트러스

3. Fondation CSN Building

[표 6-3] Fondation CSN Building 개요

위 치	Quebec, Canada
건물용도	Office building
층 수	6
건물높이	-
구조형식	Hybrid wood-concrete structure
	Glulam post and beam
	Concrete core wall



[그림 6-7] Fondation CSN Building의 외부 및 내부



[그림 6-8] Fondaction CSN Building의 횡력저항시스템 - RC 코어 벽

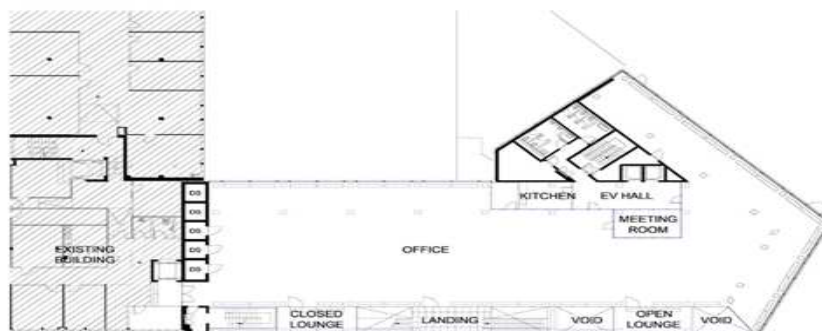
4. Tamedia office building

[표 6-4] Tamedia office building 개요

위 치	zurich, Switzerland
건물용도	Office building
층 수	6
건물높이	-
구조형식	Wood column and beam
	Wood brace



[그림 6-9] Tamedia office building의 외부 및 내부



[그림 6-10] Tamedia office building의 평면도

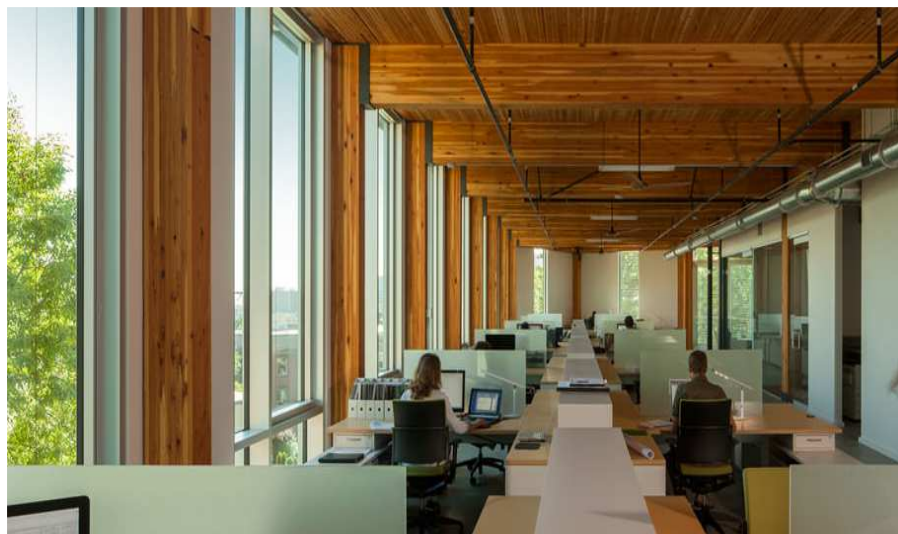


[그림 6-11] Tamedia office building의 횡력저항시스템 - 목재 가새

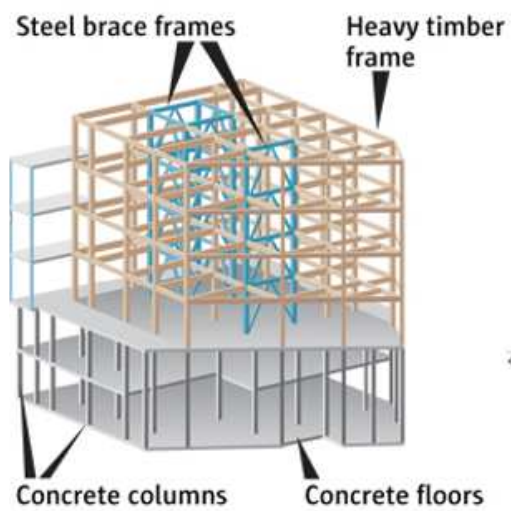
5. Bullitt Center

[표 6-5] Bullitt Center 개요

위 치	Seattle, Washington, USA
건물용도	Office building
층 수	6
건물높이	-
구조형식	Glulam post and beam (상층부)
	Concrete column and beam (하층부)
	Timber-concrete floor slabs
	Steel brace (보 및 기둥 모두 철골)



[그림 6-12] Bullitt Center의 외부 및 내부



[그림 6-13] Bullitt Center의 횡력저항시스템 - 철골 가새 골조

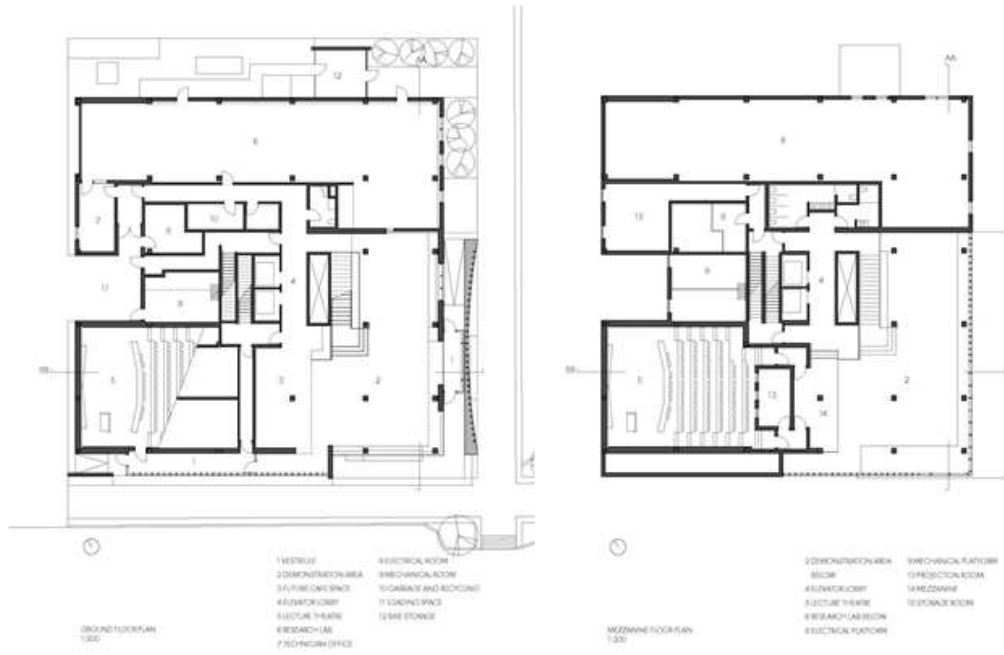
6. The Government of British Columbia's Wood Innovation and Design Centre

[표 6-6] The Government of British Columbia's WIDC 개요

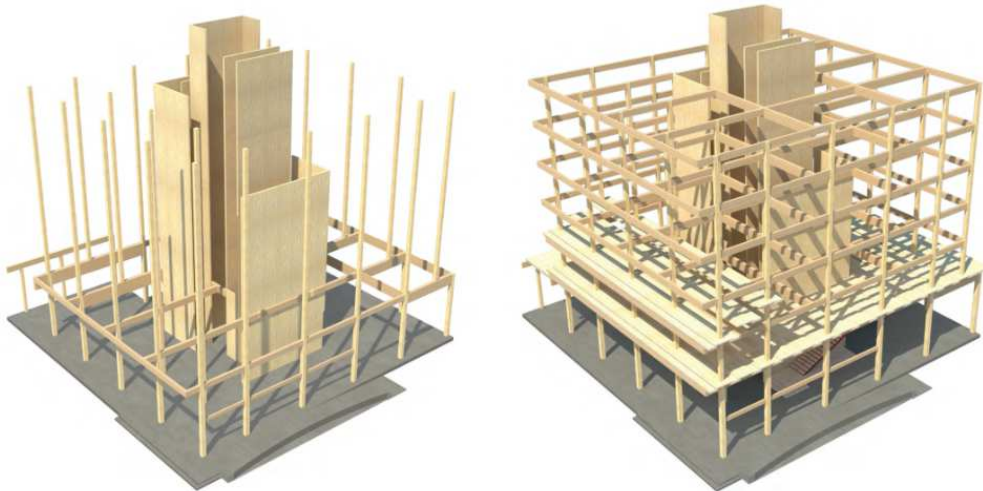
위 치	Prince George, B.C., Canada
건물용도	Office space; University academic programs
층 수	6
건물높이	29.5 m
구조형식	Glulam columns and beams
	CLT panel core wall
	LSL ledgers
	LVL structure mullions, LVL main entrance



[그림 6-14] The Government of British Columbia's WIDC 외부 및 내부



[그림 6-15] The Government of British Columbia' s WIDC의 평면도



[그림 6-16] The Government of British Columbia' s WIDC의 횡력저항시스템 - CLT 패널 코어 벽

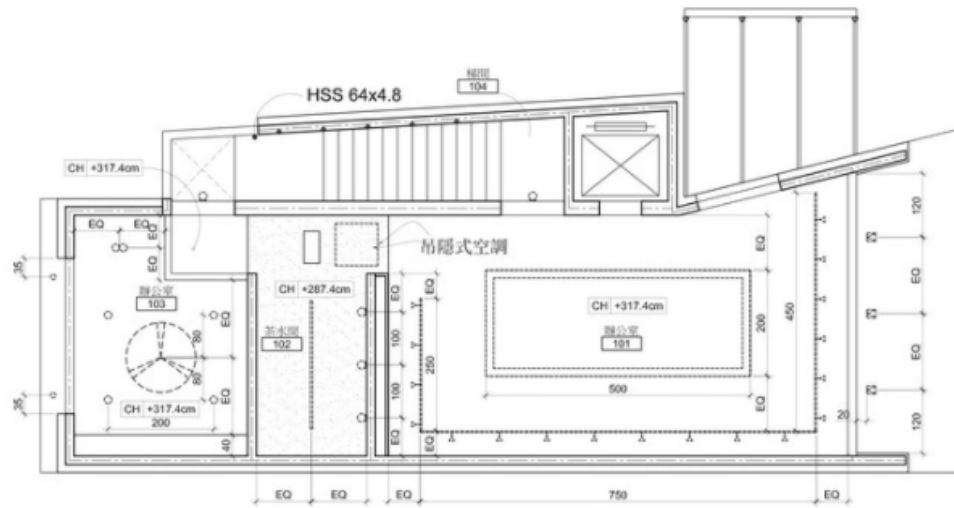
7. WoodTek HQ

[표 6-7] WoodTek HQ 개요

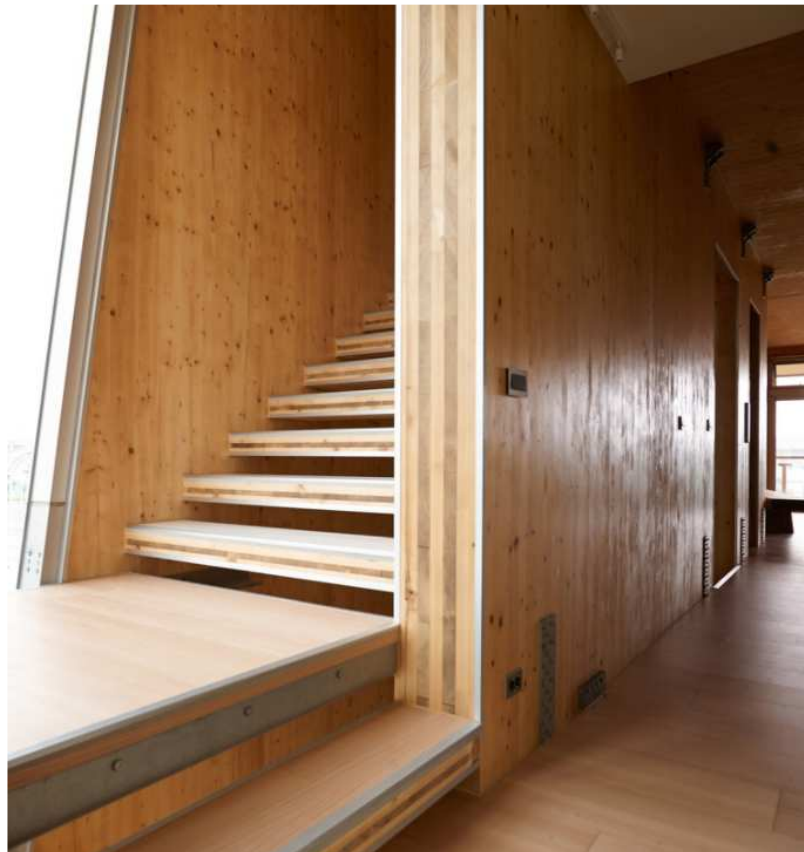
위 치	Taichung city, Taiwan
건물용도	Office building
층 수	5
건물높이	-
구조형식	CLT panel wall
	1F - Roof : CLT 구조
	지하 1층 : RC 구조



[그림 6-17] WoodTek HQ의 외부 및 내부



[그림 6-18] WoodTek HQ의 평면도



[그림 6-19] WoodTek HQ의 횡력저항시스템 - CLT 패널 벽체

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	최종성과물의 주요 내용이 목조건축의 활용성과 실용성 증진에 관계된 설계법과 공법등에 관한 것으로 공공성이 크고, 성과물이 실수요자들에게 새로운 시장창출과 경제적 활성화로 나타날 수 있으므로 일반등급으로 분류하고자 함.	

제8장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 연구실 안전조치 이행계획

1. 각 참여기관에서는 자체적으로 연구실 안전환경 관리자를 지정하여 운영하며, 기관의 안전점검 규정을 보유하고 있는 기관은 자체규정을 우선 준용하고 그 외의 참여기관은 아래의 규정을 준수함
2. 본 과제에서 각 참여기관의 안전환경 관리자는 분기1 회씩 연구실 안전점검을 실시

○ 연구실 안전 점검 체계 및 실시

1. 연구활동 종사자 및 연구실 안전사고예방을 위하여 교육훈련, 안전진단 및 후속개선 등의 일련의 안전조치 활동을 다음과 같이 이행
 - 1) 실험실 안전 점검
연간 1회 이상 의무적으로 반드시 실시
 - 2) 참여연구원의 교육훈련
매년 1회 이상 실험 실습실 안전교육 실시
 - 3) 실험실 안전점검 계획수립
실험 특성에 따라 유형별로 분류하여 일상점검, 정기점검, 특별안전점검, 정밀안전진단을 실시
 - 4) 실험실 환경개선사업 실시
실험실 안전사고 예방과 실험종사자 보호를 위해 안전장비 확충, 시설 및 설비, 노후 기자재 교체 등 실험실 환경 개선 유도

○ 비상사태

1. 안전점검 교육에 불참하는 연구원은 향후 연구 참여에 불이익을 가함으로 안전의식의 고취와 이에 대한 중요성을 인식하도록 함
 - (1) 비상사태 조직
 - 조직과 연락망을 편성해 관리
 - 비상연락망은 연구지원팀에 작성하여 관련 장소에 비치
 - 비상연락망은 사내, 사외를 포함하여 작성
 - (2) 비상사태 파악
파악된 비상사태는 발생빈도, 발생가능성, 피해 정도를 감안하여 비상사태 계획서를 수립
 - (3) 비상사태 교육 및 훈련
비상사태에 대해서 사전에 예방을 위해 주기적으로 비상사태 관련 교육을 실시
 - (4) 비상사태 종류
화재, 사고정전, Water Damages, 응급구호, 보건위생 등

제9장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번 호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Full-scale static and dynamic experiments of hybrid CLT-concrete composite floor	세종대 학교산학협력단	주저자	Constructi on and Building Materials	4.22	2018.03	단독 사사	SCI
2	논문	Experimental and numerical performance of shear connections in CLT-concrete composite floor	세종대 학교산학협력단	주저자	Materials and Structures	2.271	2018.06	단독 사사	SCI
3	논문	9층 공학목재 사무소 건물의 성능기반 내진설계	강원대 학교산학협력단	주저자	한국지진 공학회 논문집		2018.05	단독 사사	
4	기술 이전	공학목재-콘크리트 합성슬래브의 목표성능확보를 위한 전단연결재의 특성에 따른 휨강도 예측법 개발	세종대 학교산학협력단	주관 기관-연 구책임자	한국		2017.09	단독 사사	
5	특허	내진 접합 프레임 및 이를 이용한 전단벽-슬래브의 내진 접합 구조	(주)창민 우구조 건설탄트	주저자	한국		2017.10.26	단독 사사	출원

제10장. 기타 사항

없음

제11장. 참고 문헌

- [1] David Yeoh et al., Experimental tests of notched and plate connectors for LVL-concrete composite beams, J. Struct. Eng. 137 (2) (2010) 261-269.
- [2] Nima Khorsandnia, Hamid R. Valipour, Keith Crews, Experimental and analytical investigation of short-term behaviour of LVL-concrete composite connections and beams, Constr. Build. Mater. 37 (2012) 229-238.
- [3] David Yeoh et al., Preliminary research towards a semi-prefabricated LVL-concrete composite floor system for the australasian market, Aust. J. Struct.Eng. 9 (3) (2009) 225-240.
- [4] Jorgen G. Ollgaard, Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete, AISC Eng. J. (1971) 55-64.
- [5] EN, CENISO. 26891-Timber structures. Joints made with mechanical fasteners general principles for the determination of strength and deformation characteristics. ISO EN 26891 (1991).
- [6] Khai Mai Quang et al., Behavior of high-performance fiber-reinforced cement composite columns subjected to horizontal biaxial and axial loads, Const.Build. Mater. 106 (2016) 89-101.
- [7] Khai Mai-Quang et al., Reduction of reinforcement congestion in slender coupling beam using bundled diagonal bars, Mag. Concr. Res. (2017) 1-13.
- [8] European Committee for Standardization (CEN). (2004). Design of timber structures. Part 1-1: General—Common rules and rules for buildings. EN 1995—Eurocode 5, Brussels.
- [9] Erol Karacabeyli, Conroy Lum (Eds.), Technical Guide for the Design and Construction of Tall Wood Buildings in Canada, FPIInnovations, Pointe-Claire, QC, 2014.
- [10] ICC, International Building Code, International Code Council, Washington, DC, 2015.
- [11] Elzbieta Lukaszewska, Helena Johnsson, Massimo Fragiaco, Performance of connections for prefabricated timber-concrete composite floors, Mater. Struct. 41 (9) (2008) 1533-1550.
- [12] Elzbieta Lukaszewska, Massimo Fragiaco, Helena Johnsson, Laboratory tests and numerical analyses of prefabricated timber-concrete composite floors, J. Struct. Eng. 136 (1) (2009) 46-55.
- [13] Piero Gelfi, Ezio Giuriani, Alessandra Marini, Stud shear connection design for composite concrete slab and wood beams, J. Struct. Eng. 128 (12) (2002) 1544-1550.
- [14] Bruce L. Deam, Massimo Fragiaco, Andrew H. Buchanan, Connections for composite concrete slab and LVL flooring systems, Mater. Struct. 41 (3) (2008) 495-507.
- [15] Ario Ceccotti, Massimo Fragiaco, Saverio Giordano, Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection, Mater. Struct. 40 (1) (2007) 15-25.

-
- [16] Alfredo MPG Dias, FC Jorge Luís, The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams, *Eng. Struct.* 33 (11) (2011) 3033-3042.
- [17] Luis Filipe Jorge, Sergio Manuel Carvalho, Rodrigues Lopes, Helena Maria Pires Cruz, Interlayer influence on timber-LWAC composite structures with screw connections, *J. Struct. Eng.* 137 (5) (2010) 618-624.
- [18] A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections, *J. Constr. Steel Res.* 122 (2016) 110-121.
- [19] Lorenzo Boccadoro, Andrea Frangi, Experimental analysis of the structural behavior of timber-concrete composite slabs made of beech-laminated veneer lumber, *J. Perform. Constr. Facil.* 28 (6) (2013) A4014006.
- [20] Andrea Frangi, Markus Knobloch, Mario Fontana, Fire design of timberconcrete composite slabs with screwed connections, *J. Struct. Eng.* 136 (2) (2009) 219-228.
- [21] Jan Weckendorf, Ebenezer Ussher, Ian Smith, Dynamic response of CLT plate systems in the context of timber and hybrid construction, *Compos. Struct.* 157 (2016) 412-423.
- [22] ARTEMIS Testor. Aalborg, Denmark: Structural Vibration Solutions A/S; 2011. p. 1999-2011
- [23] CLT, Handbook Cross-laminated Timber, FPIinnovations, 2013.
- [24] Korea Forest Service. Development of Element Technologies for Large-scaled Timber Construction. c2008.
- [25] AIK. KBC2016. Korean Building Code-structural. Architectural Institute of Korea. c2016
- [26] Chu YR, Kim TW, Kim SR. A study on Potential of Engineering Wood for 9-story Office Buildings. *EESK J Earthquake Eng.* 2017;21(4):163-170
- [27] Pang SJ, Oh JK, Park MJ, Lee JJ. Development of Stochastic Model for Predicting the Bending Strength of Glued Laminated Timber.
- [28] ASCE. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings(ASCE/SEI 41-13). American Society of Civil Engineers. c2013
- [29] AIK. Guidelines for Performance-based Seismic Design of Residential Buildings. Architectural Institute of Korea. c2016.
- [30] Korea Infrastructure Safety Corporation. Seismic Evaluation/Rehabilitation of Existing Buildings. Korea Infrastructure Safety Corporation. c2013.
-

주의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.