

탄소중립단지 구현을 위한 LH 아파트 목조화 방안 기획 연구 Ⅱ

– 목재 OSC 외벽시스템 전환, 바닥충격음 대응전략 및 탄소회계 –

연구관리 2025-069호

탄소중립단지 구현을 위한 LH 아파트 목조화 방안 기획연구 Ⅱ

지은이 박성식·이영환·양홍석·권오준
발행인 정창무
발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원
주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99
홈페이지 <http://lhri.lh.or.kr>

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로써 공사나 정부의 공식적인 견해와
관계가 없습니다.

우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

탄소중립단지 구현을 위한 LH 아파트 목조화 방안 기획 연구 II

– 목재 OSC 외벽시스템 전환, 바닥충격음 대응전략 및 탄소회계 –

Application Strategy of Wooden Construction
for the Realization of Net-Zero in LH Apartment Complex

박성식 · 이영환 · 양홍석 · 권오준

참여연구진

연구책임

박 성 식 LH 토지주택연구원 연구위원

연 구 진

이 영 환 LH 토지주택연구원 연구위원

양 흥 석 LH 토지주택연구원 수석연구원

연구지원

권 오 준 LH 토지주택연구원 전임연구원

심의위원

김 영 훈 대진대학교 교수

박 희 준 전북대학교 교수

심 국 보 충북대학교 교수

이 성 진 산림청 목재산업과 과장

오 재 현 LH 광주전남지역본부 팀장

진 규 남 LH 토지주택연구원 선임연구위원

■ 연구 배경 및 목적

- 전 세계적으로 기후위기에 대응한 탄소중립 정책이 가속화하면서, 건축부문은 국가 온실가스 감축목표(NDC) 달성을 위한 핵심 부문으로 부각되고 있다.
- 우리나라는 2030년까지 2018년 대비 40%의 온실가스 감축을 목표로 설정하였고, 이 중 건물부문에는 32.8%의 감축목표가 할당되어 있다.
- 반면 우리나라 공동주택 건설사업은 여전히 철근콘크리트(RC) 중심의 체계에 의존하고 있어, 건축자재 전환을 통한 근본적인 탄소저감에는 한계가 존재한다.
- 목재는 생산·가공 단계에서의 탄소배출이 적고, 사용 기간 동안 탄소를 저장하는 대표적인 저탄소 건축자재로, 공장 사전제작 기반의 OSC(Off-Site Construction) 방식과 결합할 경우에 시공 효율성, 품질 균질화, 공기 단축 등의 장점을 동시에 확보할 수 있다.
- 그럼에도 불구하고 국내에서는 건축법규의 재료 중심 규제, 수입목재 탄소저장 효과의 NDC 미반영, 공동주택 바닥충격음 성능에 대한 우려 등으로 인해 목조건축 확산이 제한되어 왔다.
- 본 연구는 이러한 구조적 한계를 극복하기 위하여, LH 공동주택을 대상으로 한 목재 OSC 외벽 기술 개발, 수입목재 탄소저장 효과의 국가 감축실적 반영 방안, 목조 공동주택 바닥충격음 성능 확보 가능성을 종합적으로 검토하고, 이를 바탕으로 탄소중립형 LH 아파트 구현을 위한 기술 정책적 실행전략을 제시하는 것을 목적으로 한다.

■ PC 아파트 외벽의 목재OSC 외벽 대체기술

- 기존 PC 외벽을 대체할 수 있는 경골목구조 기반 2D 패널라이징 OSC 외벽시스템을 제안하였다. 제안된 외벽시스템은 구조체, 단열층, 방습·투습층, 기밀층, 외부 마감층을 복합적으로 구성하여 공동주택 외벽에 요구되는 주요 성능을 충족하도록 설계되었다.

- 국내 건축법령 및 관련 기준(내화, 내풍, 단열, 기밀, 구조접합, 마감재 화재성능 등)을 종합 검토한 결과, 목재 OSC 외벽은 단일재료 기준이 아닌 성능기반 설계 인증 체계를 전제할 경우 공동주택 적용이 기술적으로 가능함을 확인하였다.
- 특히 지역별 단열기준을 고려한 외벽단면 설계, 투습 방식을 고려한 습열설계, 금속 브래킷을 활용한 PC 구조체-목재패널 간 접합 개념 등을 통하여 구조적인 안정성과 시공성을 확보할 수 있음을 제시하였다.
- 전과정평가(LCA) 분석 결과, PC 외벽을 목재OSC 외벽으로 대체할 경우 외벽 단위면적 기준으로 유의미한 탄소배출 저감 효과가 발생하며, 공동주택 외피 전반에 적용 시 최대 30% 이상 수준의 외피 관련 탄소저감 가능성이 있는 것으로 분석되었다.
- 이는 목재 OSC 외벽이 단순한 대체 공법이 아니라 탄소중립 달성을 위한 핵심 기술수단이 될 수 있음을 시사한다.

■ 목조 공동주택 바닥충격음 차단성능 및 시사점

- 목조 공동주택 확산의 핵심적인 장애요인으로 지적되는 바닥충격음 문제에 대해 국내외 기준과 실험 결과를 분석하였다.
- 현행 공동주택 바닥충격음 기준(30세대 이상)은 철근콘크리트 구조를 전제로 설정되어 있어, 경량구조인 목조 바닥에는 구조적으로 불리하게 작용하고 있다.
- 국내 실험 사례 분석 결과, CLT 또는 목재 바닥 구조에 뜬바닥, 완충재, 차음천장을 복합 적용할 경우 현행 기준에 근접한 성능 확보가 가능함이 확인되었다.
- 다만, 이러한 구조는 두께의 증가 및 시공 복잡성의 한계를 가지므로, 향후에는 목조 구조 특성을 고려한 성능기반의 기준 정비와 함께 경량 고성능 바닥시스템에 대한 연구개발이 필요함을 제시하였다.

■ 수입목재 탄소저장 효과의 NDC 실적 반영방안

- 현재 국제 탄소회계(IPCC 가이드라인)는 수확목제품(HWP)에 대해 생산국 기준의 회계 방식을 적용하고 있어, 수입목재를 활용한 건축물의 탄소저장 효과는 우리나라 국가 온실가스 감축실적으로 인정되지 않는다. 이로 인해 목재의 활용 확대에 대한 정책적 유인과 제도적 정당성이 부족한 구조적 문제가 존재한다.

- 본 연구에서는 이러한 한계를 고려하여 단기·중기·장기 단계별 대응전략을 제안하였다.
- 단기적으로는 수입목재 활용에 따른 탄소저감 효과를 국가 인벤토리 외에 별도 항목으로 관리·보고하고, 기업 차원에서는 기술기반감축(TBM) 또는 ESG 성과로 인정하는 방안을 제시하였다.
- 중기적으로는 국제협력 사업 및 양자 협정을 통해 수입목재 탄소저장량에 대한 공동 인정 또는 상응조정 메커니즘의 적용 가능성을 검토하였다. 장기적으로는 IPCC 및 UNFCCC 차원의 국제 규범 개선 논의에 적극 참여함으로써, 소비국의 목재 탄소저장 기여를 제도적으로 반영할 수 있는 기반 마련이 필요함을 제안하였다.

■ 종합 결론 및 시사점

- 본 연구는 LH 아파트를 대상으로 한 목재기반 OSC 외벽 기술의 적용 가능성과 탄소저감 효과를 기술적·정책적으로 종합 검토하였다.
- 연구 결과, 목재 OSC 외벽은 공동주택의 외벽으로서 요구되는 성능을 충족할 수 있으며, 수입목재를 포함한 목재의 활용 확대는 건물부문의 탄소중립 실현을 위한 실질적인 감축 수단이 될 수 있음을 확인하였다.
- 앞으로는 성능 중심 건축기준으로의 전환, 목재 탄소저장 효과의 제도적 인정, 실증사업 기반기술 고도화를 통해 공공부문이 선도하여 목조건축 시장을 형성할 필요가 있다.
- LH 아파트 목조화 전략은 단순 건설기술 전환을 넘어, 건설산업의 공업화·저탄소 전환을 촉진하는 국가적 전략수단으로 기능할 수 있을 것이다.

주 제 어

목재 OSC, 목재 외벽, PC 아파트, PC 외벽의 목질화·목조화, 탄소중립, 목조 공동주택, 수입목재, NDC

차 례 Contents

제1장 서론

1. 연구배경 및 필요성	1
2. 연구목적	3
3. 연구범위 및 방법	4
4. 보고서의 구성	5

제2장 PC 외벽의 목재 OSC 외벽 대체기술 개발

1. 서론	7
1.1. 연구배경	7
1.2. 연구목적	8
1.3. 연구범위	9
1.4. 용어정의	10
2. 국내외 성능기준 검토	14
2.1. 국내 성능기준	14
2.2. 국외 요구 성능기준	22
2.3. 국내외 비교 및 시사점	32
3. 국내외 적용사례 분석	39
3.1. 목재 OSC 외벽의 개요	39
3.2. 국내사례 검토	41
3.3. 국외사례 검토	45
3.4. 국내 적용 가능성 검토	68
4. 목재외벽 구성안 제안 및 에너지성능 검증	73
4.1. 국내 적용가능한 자재 현황	73
4.2. 기후권역별 외벽 구성안 제안	82

4.3. 외벽 구성안 에너지성능 검증	91
5. 목재외벽 접합부 및 창호 시공방식 제안	113
5.1. 외벽패널 간 수평방향 접합	113
5.2. 외벽패널 간 수직방향 접합	116
5.3. 창호설치 시 주의사항	119
5.4. 창호운송 시 주의사항	120
6. 목재외벽과 PC외벽 종합비교	122
6.1. 벽두께	122
6.2. 중 량	123
6.3. 자재비	123
6.4. 환경영향	124
6.5. 요구성능	125
6.6. 종합비교	126
7. 소 결	129
7.1. 연구의 핵심	129
7.2. 기술적 결론	129
7.3. 종합결론	130
7.4. 제안사항	131

제3장 목조 공동주택 바닥충격음 차단성능과 기술현황

1. 개 요	133
2. 선행연구	134
2.1. CLT의 음향 물성치 특성	134
2.2. 바닥충격음 차단기술 개발 동향	135
3. 고층 목조건물 바닥구조 및 차음성능 사례	143
3.1. BC Tallwood House	143
3.2. Mjøstårnet	147
3.3. HoHo Vienna	151
3.4. Ascent MKE	155
3.5. 소결 및 시사점	158

4. 바닥구조 개발 방향 설정	159
4.1. 차음성능 수준 분석	159
4.2. 기술개발 요인 분석	160
4.3. 향후 기술개발 방향	162

제4장 수입목재 탄소저장 효과 NDC 실적 반영방안

1. 서 론	165
1.1. 검토배경	165
1.2. 문제제기	168
1.3. 목적 및 범위	170
1.4. 방법 및 구성	171
2. 탄소회계와 목조건축의 탄소가치	172
2.1. 온실가스 관리체계의 이해	172
2.2. 수확 목제품의 탄소회계	174
2.3. 목조건축 탄소감축 가치와 정량화 방안	178
3. 수입목재의 NDC 기여도 인정 방안	183
3.1. 단기전략 : TBM 인정 및 투명성 확보	183
3.2. 장기전략 : 국제기준 개선 및 양자 협력	187
3.3. 전략이행을 위한 MRV 체계 구축	189
4. 결론 및 정책 제언	191
4.1. 연구요약과 시사점	191
4.2. 정책실행을 위한 제언	192

제5장 결 론

1. 연구결과 요약 및 시사점	197
2. 정책 및 기술로드맵 제언	199
3. 후속 연구과제 및 최종 제언	201

부 록

국외 목재외벽 적용사례별 세부내용	205
국산 구조용 PB의 재료 및 구조 성능	241

표 차례 List of Tables

[표 2-1] 주거시설의 규모·부위별 내화성능 요구시간	15
[표 2-2] 기후지역에 따른 분류 및 외벽의 열관률을 기준	17
[표 2-3] 불연, 준불연, 난연 성능에 대한 시험 기준 및 방법	20
[표 2-4] 목재외벽에 요구되는 성능 항목과 기준	21
[표 2-5] 목재외벽에 대한 주요 국의 단열·기밀 요구성능 비교	28
[표 2-6] 목재외벽에 대한 주요 국의 요구성능 종합 비교	29
[표 2-7] 국내외 내화성능 기준 비교	33
[표 2-8] 국내외 내풍성능 기준 비교	33
[표 2-9] 국내외 단열 및 에너지성능 기준 비교	34
[표 2-10] 국내외 기밀성능 기준 비교	34
[표 2-11] 국내외 방습·투습성능 기준 비교	35
[표 2-12] 국내외 구조안정성 및 접합성능 기준 비교	35
[표 2-13] 국내외 외벽마감재 화재안전성 기준 비교	36
[표 2-14] 목재외벽에 대한 국내외 요구성능 비교 및 개선방향	38
[표 2-15] 목재외벽 패널의 유형	39
[표 2-16] 목재외벽 적용 국외사례 개관(북미지역)	66
[표 2-17] 목재외벽 적용 국외사례 개관(유럽지역)	67
[표 2-18] 목재외벽에 사용되는 목제품	73
[표 2-19] 목재외벽에 사용되는 중단열재	76
[표 2-20] 목재외벽에 사용되는 투습방수지	77
[표 2-21] 목재외벽에 사용되는 기밀재	79
[표 2-22] 목재외벽에 사용되는 외단열재	79
[표 2-23] 목재외벽에 사용되는 외단열재 고정방식과 자재	80
[표 2-24] 목재외벽에 사용되는 레인스크린 시스템 자재	81
[표 2-25] 목재외벽 구성안의 비교표	91

[표 2-26] 기후권역별 외벽 열관류율 요구기준	92
[표 2-27] 기후권역별 외벽 유효 열관류율 값 비교	99
[표 2-28] 실내 곰팡이 위험성 평가(Mold Index)	107
[표 2-29] 시뮬레이션 입력조건	109
[표 2-30] PC와 목재 외벽의 벽 두께 비교 (중부2지역 기준)	122
[표 2-31] PC와 목재 외벽의 중량 비교	123
[표 2-32] PC와 목재 외벽의 LCA결과 비교	125
[표 2-33] PC와 목재 외벽의 주요성능 비교	126
[표 2-34] PC와 목재 외벽의 종합 비교	127
[표 3-1] CLT와 RC 물성치 비교	134
[표 3-2] 국내 CLT 패널 바닥 적용현장 및 바닥충격음 차단성능	137
[표 3-3] CLT 슬래브 적용 실험실 바닥충격음 차단성능	139
[표 3-4] 목조 건축물 바닥시스템 단면구성 상세(Mjøstårnet)	148
[표 3-5] 목조 건축물 바닥시스템 단면구성 상세(Ascent MKE)	157
[표 3-6] 고층 목조 건축물 바닥시스템 및 차음성능 주요 특징 요약	159
[표 3-7] 국내 중량충격음 기준 달성을 위한 목조 바닥구조 설계안 조사결과	160
[표 3-8] 목조 바닥구조 바닥충격음 차단성능 설계 요인	161
[표 3-9] 목조 바닥구조 설계요인 변화에 따른 중량충격음 주파수 대역별 영향도	161
[표 3-10] CLT 목조 공동주택 바닥구조 개발 핵심 방향과 목표	163
[표 4-1] 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안	166
[표 4-2] 한국·일본·북미 목조건축 비중	170
[표 4-3] 국제 표준에 따른 기업 온실가스 분류체계(GHG Protocol)	173
[표 4-4] 수확된 목제품HWP 기본 반감기(IPCC GL 2019)	176
[표 4-5] 수확된 목제품HWP 탄소회계 방식(IPCC GL 2019)	176
[표 4-6] LCA 관련 국제 표준(ISO & European Standard)	180
[표 4-7] 건물부문 LCA 모듈별 세부내용	181
[부록표 1-1] 구조용 PB 및 타 판상재의 휨성능	241
[부록표 1-2] 구조용 PB 및 타 판상재의 압축성능	241
[부록표 1-3] 구조용 PB 및 타 판상재의 두께방향 면내 전단성능	241
[부록표 1-4] 하중방향에 따른 구조용 PB의 못접합부 성능	242

[부록표 1-5] 하중방향에 따른 OSB의 못접합부 성능	242
[부록표 1-6] 구조용 PB 경골벽체의 평균 수평하중 저항성능	242
[부록표 1-7] 구조용 OSB 경골벽체의 평균 수평하중 저항성능	242
[부록표 1-8] 구조용 PB의 바닥에서의 경간등급 확인을 위한 실험결과	243

그림 차례 List of Figures

[그림 2-1] 본 연구의 궁극적인 지향점	9
[그림 2-2] 벽 골조의 세부구조 관련 용어	11
[그림 2-3] 경골목구조 기반 목재 OSC외벽 패널의 기본 구성	40
[그림 2-4] 성남 목재외벽 오픈 패널 적용사례 (1)	41
[그림 2-5] 성남 목재외벽 오픈 패널 적용사례 (2)	42
[그림 2-6] 천안 현장시공 목재외벽 적용사례 (1)	42
[그림 2-7] 천안 현장시공 목재외벽 적용사례 (2)	43
[그림 2-8] 청담 현장시공 목재외벽 적용사례 (1)	43
[그림 2-9] 청담 현장시공 목재외벽 적용사례 (2)	44
[그림 2-10] 수유 현장시공 목재외벽 적용사례 (1)	44
[그림 2-11] 수유 현장시공 목재외벽 적용사례 (2)	45
[그림 2-12] 외벽 패널 구성	47
[그림 2-13] 오픈 패널 제작 전경	47
[그림 2-14] 클로즈드 패널 제작 전경	47
[그림 2-15] 현장 패널양중 전경	47
[그림 2-16] 현장 패널설치 전경	47
[그림 2-17] 현장 패널조립 전경	48
[그림 2-18] CLT바닥 양중 전경	48
[그림 2-19] 공장 패널제작 전경	50
[그림 2-20] 투습방수지 부착 전경	50
[그림 2-21] 현장 패널시공 전경	50
[그림 2-22] 골조조립 완료 전경	50
[그림 2-23] 층간부분 외벽단면 구성	51
[그림 2-24] 투습방수지 시공 전경	51
[그림 2-25] Crest 골조시공 전경	52
[그림 2-26] Crest CLT 바닥시공 전경	52

[그림 2-27] Hälsa CLT 클로즈드 패널 로봇가공 전경	54
[그림 2-28] Hälsa CLT 클로즈드 패널 마감재 시공	54
[그림 2-29] Hälsa CLT 클로즈드 패널 단열재·창호 시공	54
[그림 2-30] Hälsa CLT 클로즈드 패널 현장양중 (1)	54
[그림 2-31] Hälsa CLT 클로즈드 패널 현장양중 (2)	54
[그림 2-32] Hälsa CLT 클로즈드 패널접합 시공	54
[그림 2-33] Østerbrogade 패널 양중	56
[그림 2-34] Østerbrogade 패널 조립	56
[그림 2-35] Østerbrogade 패널 조립·보강	56
[그림 2-36] Østerbrogade 골조 시공	56
[그림 2-37] LCT one 패널 사전제작 전경	57
[그림 2-38] LCT one 패널 현장 양중 및 조립	58
[그림 2-39] LCT one 골조조립 타임랩스 시작 1일차	58
[그림 2-40] LCT one 골조조립 타임랩스 완료 8일차	58
[그림 2-41] Doktoren 클로즈드 패널 창호 자동설치 전경	60
[그림 2-42] Doktoren 클로즈드패널 현장 양중과 조립 전경	60
[그림 2-43] Doktoren 패널 고정용 앵글 브라켓 설치 전경	60
[그림 2-44] 국외 적용사례의 층수별 분포	63
[그림 2-45] 국외 적용사례의 패널유형별 분포	64
[그림 2-46] 국외 적용사례의 구조형식별 분포	64
[그림 2-47] 국외 적용사례의 단열성능 및 기밀도 분포	65
[그림 2-48] 구조재(규격재)의 공칭치수 및 실제치수	74
[그림 2-49] SPF 구조재의 등급마크 예시	75
[그림 2-50] 구조용 OSB·PB 품질표시 예시	75
[그림 2-51] 유리섬유 단열재	76
[그림 2-52] 스프레이 폴리우레탄폼	76
[그림 2-53] 일반형 투습방수지	77
[그림 2-54] 자착식 투습방수지	77
[그림 2-55] 배수형 투습방수지	78
[그림 2-56] 복합보드형 투습방수지	78
[그림 2-57] 외단열 고정을 위한 메탈 브래킷 시공사례	80

[그림 2-58] 목재외벽 구성안 제안 프레임웍	84
[그림 2-59] (기본형) 중부1지역에 적합한 목재외벽 단면	86
[그림 2-60] (기본형) 중부2지역에 적합한 목재외벽 단면	86
[그림 2-61] (기본형) 남부지역에 적합한 목재외벽 단면	87
[그림 2-62] (기본형) 제주지역에 적합한 목재외벽 단면	87
[그림 2-63] (고성능형) 중부1지역에 적합한 목재외벽 단면	88
[그림 2-64] (고성능형) 중부2지역에 적합한 목재외벽 단면	88
[그림 2-65] (고성능형) 남부지역에 적합한 목재외벽 단면	89
[그림 2-66] (고성능형) 제주지역에 적합한 목재외벽 단면	89
[그림 2-67] 캐나다 열관류율 산정기준	93
[그림 2-68] (기본형) 중부1지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	94
[그림 2-69] (기본형) 중부2지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	94
[그림 2-70] (기본형) 남부지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	95
[그림 2-71] (기본형) 제주지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	95
[그림 2-72] (고성능형) 중부1지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	96
[그림 2-73] (고성능형) 중부2지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	96
[그림 2-74] (고성능형) 남부지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	97
[그림 2-75] (고성능형) 제주지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과	97
[그림 2-76] WUFI 프로그램 내 벽체 구성	101
[그림 2-77] 서울지역의 태양복사 및 비바람 분포	101
[그림 2-78] (기준안) PC외벽의 총 수분함량	102
[그림 2-79] (기본형) 목재외벽 1안의 총 수분함량	103
[그림 2-80] (고성능형) 목재외벽 2안의 총 수분함량	103
[그림 2-81] 목재 외벽의 OSB 함수율	105
[그림 2-82] (기준안) PC외벽의 프로파일(제주지역)	106
[그림 2-83] (기본형) 목재외벽 1안의 프로파일(제주지역)	106
[그림 2-84] (고성능형) 목재외벽 2안의 프로파일(제주지역)	106
[그림 2-85] 에너지 성능 분석을 위한 3D 시뮬레이션 모델	109
[그림 2-86] PC 대비 목재외벽의 연간 냉난방에너지 요구량 평가결과	110
[그림 2-87] 못을 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합	114
[그림 2-88] 못스크류를 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합	114

[그림 2-89] Sherpa를 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합	115
[그림 2-90] Knapp를 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합	115
[그림 2-91] 앵글 브라켓을 이용한 외벽패널 간 수직방향 접합	117
[그림 2-92] 평철 브라켓을 이용한 외벽패널 간 수직방향 접합	118
[그림 2-93] 창호와 마감재 파손 방지를 위한 임시보강재 설치 예시	121
[그림 3-1] 고층 목조 건축물 전경(BC Tallwood House)	143
[그림 3-2] 목조 바닥구조 현장시공 절차(BC Tallwood House)	145
[그림 3-3] 목조 바닥구조 시공 및 설계도(BC Tallwood House)	146
[그림 3-4] 고층 목조 건축물 전경 및 주단면도(Mjøstårnet)	147
[그림 3-5] 목조 바닥구조 시공 전경 및 설계도(Mjøstårnet)	149
[그림 3-6] 고층 목조 건축물 전경 및 주단면도(HoHo Vienna)	151
[그림 3-7] 목조 바닥구조 시공 전경 및 설계도(HoHo Vienna)	154
[그림 3-8] 고층 목조 건축물 전경 및 주단면도(Ascent MKE)	155
[그림 3-9] 목조 바닥구조 시공 전경 및 단면도(Ascent MKE)	157
[그림 3-10] CLT 패널하부 노출형과 비노출형	159
[그림 4-1] 한국의 목재자급률 및 수입의존 현황	168
[그림 4-2] NDC, NIR, AFLOU, and LULUCF	175
[그림 4-3] 건물부문 LCA 모듈 및 경계구조(via. EN 15978)	181
[그림 4-4] 건물부문 LCA 효용성 및 HWP 탄소저장	181
[그림 4-5] RC와 목조 탄소감축 기여도 비교·평가 사례	182

제1장 서론

1. 연구배경 및 필요성

- 전 세계적으로 기후위기 대응을 위한 탄소중립 노력이 가속화하면서 건물부문의 탄소감축이 중요 과제로 대두하였다. 우리나라는 2030년까지 2018년 대비 40% 온실가스 감축을 국제사회에 약속한 바 있고, 이에 따라 건물부문에도 32.8%의 감축목표가 할당되어 있다.
- 이는 우리나라 건축산업 전반의 패러다임 전환 요구로 이어지고 있다. 건축산업은 최근 탄소중립 이행, 디지털 기술 도입, 산업 고도화라는 세 가지 변화의 교차로에 놓여 있다.
- 특히, 건물부문의 탄소중립 이행을 위한 전략으로서 목재를 건축자재로 활용하는 방안이 주목받고 있다. 목재는 생산과 가공 단계에서 탄소 배출량이 적고, 사용기간 동안에 탄소를 저장하며, 기존 철근콘크리트 대비 경량으로 시공 시 에너지 소모를 줄일 수 있는 친환경 자재이다.
- 또한 공장 제작 후 현장 조립하는 Off-Site Construction(OSC) 방식과 결합하면 건설공정의 효율성과 건축물의 품질을 높일 수 있어 건축산업의 디지털 전환 및 생산성 향상 측면에서도 유리하다.
- 이러한 이유로 북유럽과 북미 등 해외에서는 전체 주택 건축의 70% 이상에 경골 목구조 또는 CLT와 같은 구조용목재를 적용하고 있으며, 중고층 공동주택에도 목재 OSC 시스템을 광범위하게 활용하고 있다.
- 그러나 우리나라 현실은 목조건축 보급률이 매우 저조한 실정이다. 2023년 기준 신축 건물 연면적 중 목구조 비중은 일본 약 41.4%, 북미 약 10%인 반면에 한국은 약 2% 수준에 그치고 있다. 이는 탄소중립의 흐름에 뒤처진 수치로서, 목재 활용 확대를 위한 기술적·제도적 장애 요인이 복합적으로 작용한 결과이다.
- 첫째, 국내 건축관련 제 규정이 RC 위주의 재료 중심 기준에 머물러 있어 목재를

주요 구조재로 사용하는 것을 어렵게 만든다. 예를 들어 건축법령상 건축물 외벽에는 불연재를 쓰도록 규정하고 있어, 경량목재와 단열재 등이 복합된 목재 외벽패널은 현행 기준으로는 적용에 제약이 있다. 또한, 성능 위주의 건축 인증체계가 미비하여 목재 기반 신자재·신공법이 도입되기 어려운 환경이다.

- 둘째, 국내 목조건축에 사용되는 구조용 목재는 상당 부분을 수입에 의존하는데, 국제 탄소회계 규정상 수입 목재에 저장된 탄소는 목재 생산국의 감축 실적으로만 인정되고 목재를 활용한 소비국의 감축 실적에는 반영되지 않는 구조이다. 이러한 ‘생산국 접근법’에 따른 역설적인 회계 구조 때문에 목재를 활용해 탄소를 줄이려 해도 국가 감축 실적으로 인정받지 못하여 제도적 인센티브가 부족한 상황이다. 이로써 민간 차원의 목조건축 투자 동력이 약화되고, 국가 차원의 탄소중립 정책 추진에 걸림돌이 되고 있다.
- 셋째, 우리나라 공동주택의 층간소음, 특히 바닥충격음 문제는 목조화의 현실적 장벽으로 지목된다. 현재 공동주택은 중량충격음과 경량충격음에 대한 법정 차단 성능 기준을 충족해야 하는데, 이 기준은 철근콘크리트 슬래브 두께 210mm 전제로 마련된 매우 엄격한 수준이어서 경량구조인 목조 바닥으로 동등 성능을 확보하기 어려울 것이라는 우려가 크다. 더욱이 목조 바닥의 차음 성능을 향상시키기 위한 표준 설계방법 부재로 인해 건설사들도 목조 공동주택 적용을 망설이고 있는 실정이다.
- 이 밖에도 내화성능에 대한 우려, 국내 생산 인프라 부족, 사회적 인식 등의 요인도 목조건축 활성화를 저해하고 있다.
- 이러한 배경에서 본 연구는 LH 공사의 공동주택을 목조화하여 탄소중립 단지를 구현하기 위한 기술과 정책 방안을 모색하고자 추진되었다.
- 목재 기반 OSC 접목으로 기존 RC 위주의 아파트 외벽 시스템을 목질화함으로써 발생하는 탄소저감 효과와 성능 향상을 규명하고, 이와 동시에 목재 활용 확대를 가로막고 있는 제도적 장애요인을 해소할 수 있는 정책적 대안을 마련하는 것이 필요하다.
- 또한 목조 공동주택 확산의 선결 조건인 바닥충격음 성능 확보 기술을 점검하고 향후 기술개발 방향을 제시함으로써, 구조·환경·생활품질 등 측면에서 종합적인 목조화 추진 전략을 갖출 필요성이 제기된다.

2. 연구목적

- 본 연구는 LH 탄소중립 아파트 구현 전략 수립을 궁극적인 목적으로 하는 중장기 연구로서, 이번 2단계 연구는 세부목표를 아래와 같이 설정하여 진행하였다.
- 첫째, 프리캐스트 콘크리트(PC) 방식을 대체할 수 있는 목재 OSC 외벽시스템을 개발하여 기술적인 가능성을 제시한다. 기존 철근콘크리트 골조를 갖는 아파트에 적용할 수 있도록, 라멘 및 벽식구조의 유형별로 목재 패널의 구조적 연결기술을 고안하고 국내 건축기준과의 정합성을 확보하고자 했다. 목재 OSC 외벽의 내풍·내진·단열·방수·내화 성능을 종합 검토하면서, 산업적으로 활용 가능한 표준화된 외벽 패널 시스템을 제안하고자 한다.
- 둘째, 목조건축의 탄소감축 효과를 과학적으로 정량화하고 이를 국가 및 기업의 온실가스 감축 실적으로 인정받을 수 있는 방안을 모색한다. 국제 온실가스 회계 체계(국가 NDC 및 기업 GHG 프로토콜)의 동향과 수확목제품(HWP) 탄소저장량 산정 방식을 분석하고, 목재 활용에 따른 탄소저장 및 대체효과를 전과정평가(LCA)와 환경성적표지(EPD) 등을 통해 계량화하였다. 이를 토대로 목재 사용에 의한 감축분이 국가 온실가스 감축목표(NDC) 달성에 기여하도록 만드는 정책적 수단을 연구한다.
- 셋째, 수입 목재 활용에 따른 탄소저장 효과를 국내 감축실적으로 공식적으로 인정받기 위한 전략을 단기·중기·장기 관점에서 제시한다. 현행 국제 기준의 제약하에서 현실적으로 적용 가능한 기술기반감축(TBM) 인정 방안, UNFCCC에 대한 추가 보고(Additional Reporting), 국제규범 개선참여, 상응조정(Corresponding Adjustment) 메커니즘 활용 등 여러 대안을 검토해 단계별 이행전략을 도출한다.
- 넷째, 이상의 기술·정책 연구 결과를 종합하여 구체적인 실행 로드맵과 정책 제언을 마련한다. 관계 부처 협력, 법제도 개선, 국제 협력 사업 등의 추진 방안을 제시함으로써 연구 성과가 현실 정책과 사업에 반영될 수 있는 길을 제시하고자 한다.
- 다섯째, 목조건축 확산의 핵심 기술과제인 층간 바닥충격음 문제에 대해 국내·외 기술현황을 분석하고 효과적인 차단 구조와 개선 방향을 제언한다. 이를 통해 향후 목조 공동주택의 생활품질 확보 방안까지 포함한 종합적인 목조화 추진 전략을 수립하는데 본 연구의 목적이 있다.

3. 연구범위 및 방법

- 본 연구는 기술 분야의 연구와 제도·정책 연구를 병행하였다.
- 기술적 측면에서는 아파트 외벽을 중심으로 목재 OSC 외벽시스템의 설계 방안과 성능을 다루었다. 연구범위는 PC 아파트의 외벽 전반으로, 구조 하중을 지지하는 경우만이 아니라 비내력 외벽을 포함한다. 비내력 내벽이나 바닥·지붕 구조, 기초 등은 범위에서 제외하고 외벽 부분에 집중하였다.
- 우리나라 4대 기후권역(중부1·중부2·남부·제주)의 지역별 단열성능 요구기준에 부합하는 목재OSC 외벽 단면을 설계하고 비교·분석하였다. 성능 평가를 위하여 구조 해석(내풍, 접합부 강도 등), 열환경 해석(유효 열관류율 산출) 및 습열 해석(WUFI 기반 결로 및 곰팡이 위험 평가)을 수행하여 설계한 외벽 구성안의 성능을 검증하였다.
- 또한 국내외 관련 법규 및 기준을 조사하여 현행 제도 하에서 목재 OSC 외벽 적용 제약사항을 식별하고, 북미·유럽 등 선진 사례의 인증제도와 시험방법 등을 검토하였다. 사례 연구를 위해 국내·외 목재 외벽 적용 사례를 수집·분석하였고, 이를 통해 기술 개발의 시사점을 도출하였다.
- 바닥충격음 분야에서는 국내 공동주택 바닥충격음 차단구조에 대한 선행연구와 국내·외 기술개발 동향을 조사하였고, 국립산림과학원 등에서 수행한 CLT 바닥 구조 실험결과를 분석하였다. 이를 토대로 목조 바닥의 충격음 성능향상을 위한 설계 요소(충간구조 구성, 완충재 등)를 정리하고 향후 연구개발 필요사항을 도출하였다.
- 정책적 측면에서는 탄소회계 이슈를 중심으로 연구의 범위를 설정하였다. 수확된 목제품(HWP)의 탄소저장량과 관련한 IPCC 가이드라인, UN의 탄소회계 규범, 우리나라 NDC 보고체계를 분석하였고, 국가 온실가스 인벤토리와 기업 배출량 산정(Scope 1,2,3) 체계의 관계를 고찰하였다.
- 아울러 수입목재의 탄소저감 가치를 인정한 해외 사례나 국제 논의가 있는지 조사하고, 이해관계자 인터뷰 및 전문가 자문을 통해 대안에 대한 현실적인 타당성을 점검하였다.

4. 보고서의 구성

- 본 보고서는 총 5장으로 구성된다.
- 제1장 서론에서는 연구의 배경과 필요성, 목적 및 범위와 방법을 서술하였으며, 보고서의 전체 구성 및 전개 방향 등을 소개하였다.
- 제2장은 “PC 아파트 외벽의 목재기반 OSC 외벽 대체기술 개발”을 주제로 하여 국내외 성능 기준 및 법규를 검토하고 목재 OSC 외벽시스템의 설계 방안을 제시한다.
 - 여기에는 구조적 안전성(내풍·내진 성능), 단열 및 습기 대응, 화재안전 확보 방안 등 기술 요소별로 기존 PC 패넬 대비 목재패넬의 적용 가능성을 분석한 내용이 포함된다.
 - 아울러 국내 건축법상의 제약을 극복하기 위한 성능기반 인증 방안과 표준화 방향을 논의하고, 해외 사례를 통해 얻은 시사점을 정리한다.
 - 특히 본 장에서는 표준화된 목재 외벽 패넬 시스템을 하나의 솔루션으로 제안하면서 기존 PC 외벽과 대비되는 환경적·경제적 효과도 평가하였다.
 - 분석 결과, 제안된 목재 OSC 패넬은 부위별 복합구성(프레임 + 단열재 + 투습방수층 + 외장재)을 통해 지역별 에너지성능 기준을 충족하는 것으로 나타났으며, 공장제작 및 현장조립 방식으로 기존 공법 대비 공기 단축과 생산성 향상이 기대된다.
- 제3장 “목조 공동주택 바닥충격음 차단성능과 기술 현황”에서는 목조 바닥구조의 층간소음 문제를 집중적으로 다룬다.
 - 우리나라의 현행 바닥충격음 기준의 특성과 한계를 살펴보고, 목조 바닥구조의 음향 성능 실험 결과 및 국내외 기술 개발 사례를 정리하였다. 이를 통해 경량 목조 구조에서 중량충격음 성능 확보의 어려움을 분석하고, 복합바닥구조(튼바닥+천장 포함) 등의 대책으로 어느 정도 개선이 가능한지 평가하였다.
 - 예를 들어, 국내 실험에서는 CLT 패넬(두께 : 150mm)에 뜬바닥 구조(Floating Floor)와 차음천장을 결합하여 총 두께 약 516mm의 바닥구조를 구성한 결과, 경량충격음 44dB, 중량충격음 44~51dB 수준까지 성능을 확보한 사례가 보고되었다.
 - 이를 통해 목조 바닥도 보강을 통해 현행 기준 근접치까지 성능 향상이 가능함을 확인하였다, 다만 생활패턴을 고려한 추가 연구 필요성도 제기되었다. 본 장에서는 이러한 분석을 바탕으로 국내 기준 충족을 위한 바닥구조 설계방향과 향후 필요한 기술개발 과제를 제안하였다.

- 제4장의 “수입목재 탄소저장 효과의 NDC 실적 반영방안”에서는 국제 탄소회계 구조를 분석하여 수입목재 활용의 탄소저감 가치를 국내 감축실적으로 인정받지 못하는 문제점을 정리한다.
 - IPCC 지침에 따른 국가 온실가스 인벤토리에서는 국경 내 발생 배출·흡수만 인정되기 때문에, 수입한 목제품에 저장된 탄소는 모두 해외 생산국의 감축실적으로 귀속되고 있음을 밝혔다.
 - 이러한 구조적 한계를 극복하기 위한 정책 수단으로서, 단기적으로는 국내에서 목재 활용에 따른 감축분을 별도로 추가 보고하거나, 기업의 자발적인 감축활동(기술기반 감축, TBM)으로 인정하는 방안을 제시하였다.
 - 장기적으로는 국제 협력을 통해 목재의 탄소회계 기준을 개선하거나 상응조정을 통해 수입국에도 흡수량을 배분하는 전략 논의의 필요성을 제기하였다. 또한 이런 전략의 이행을 뒷받침할 모니터링·보고·검증(MRV) 체계 구축 방안을 상세히 다루었다.
- 제5장 결론에서는 주요 연구결과와 시사점을 종합 정리하고, 정책적 지원 방안과 기술로드맵을 단기·중기·장기로 구분하여 제시하였다. 또한 목조건축 활성화를 위한 향후 추가 연구과제 및 실행상 고려사항을 정리하였다.

제2장 PC 외벽의 목재 OSC 외벽 대체기술 개발

1. 서 론

1.1. 연구배경

- 우리나라 산업구조는 최근 “탄소중립, 디지털 전환, 산업 고도화”라는 변화 축을 중심으로 빠르게 재편 중이다. 건설사업 부문에서도 저탄소 자재로의 전환, 공정 효율화 및 고단열·고기밀화 등의 기술 확보가 필수과제로 부상하였다.
 - 정부는 「2050 탄소중립 녹색성장 기본계획(2023)」 수립으로, 국가 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년 대비 40% 감축하는 것을 목표로 설정하였다.
 - 이에 국토교통부는 건물부문 감축목표를 도전적 목표인 32.8%로 설정하였고, 이로써 주택부문의 ‘2050 탄소중립 실현’ 노력은 선택이 아닌 의무로 인식되고 있다.
- 목재는 대표적 저탄소 건축자재이다. 이산화탄소를 저장할 뿐 아니라, 자재 생산 과정에서 에너지 소모가 현저히 낮고 경량이면서 가공성도 우수하여 OSC 사업에 최적인 자재이다.
- 특히, Light-wood Frame(이하, 경골목구조) 방식은 규격화된 자재를 활용하여 절단·조립·단열·기밀 시공 등 공정을 자동화할 수 있어 건축물의 외벽을 공장에서 제작하고 현장에서 조립하는 건축방식으로 전환이 가능하다.
- 해외에서는 경골목구조의 이러한 특성을 반영한 목재 외벽시스템이 단독주택과 중저층 공동주택을 중심으로 폭 넓게 적용되고 있다.
 - 유럽과 북미에서는 전체 주거용 건축물의 70% 이상이 경골목구조 또는 CLT 기반의 패널라이징 시스템으로 시공되고 있다.
 - 일본도 세키스이 하이무(Sekisui Heim) 등 대형 주택건설기업을 중심으로 공장제작형 목재 외벽시스템을 제품화·상용화하고 있다.
- 목재 외벽시스템은 고단열성·고기밀성·통기성 외피 구조와 고품질, 공기단축 등 여러 장점으로 건축물의 품질과 에너지 효율을 동시에 향상시킬 수 있다.

- 반면, 우리나라는 목조건축 기술이 단독주택 수준에 머물러 있으며, 공동주택의 외벽에 적용할 수 있는 표준화된 목재 OSC 시스템이 부재한 상황이다.
- 특히, PC 외벽을 대체하기 위해서는 단열·기밀·내화·내풍 등 복합 성능을 동시에 확보해야 하지만 현재까지 이에 대한 종합적인 연구가 부족하다.
- 또한 현장 인력의 고령화, 인건비 상승으로 현장중심 시공체계에서 한계가 뚜렷해지고 있어, 공장 기반의 조립식 패널 시스템으로의 전환 필요성이 커지고 있다.
- 이러한 배경에서 본 연구는 기존 PC 아파트의 외벽을 대체할 수 있는 OSC 기반의 새로운 외벽시스템을 개발함으로써, 공동주택 건설부문의 탄소저감, 공기단축, 품질 균질화, 산업구조 혁신 달성에 기여하고자 한다.

1.2. 연구목적

- 연구의 목적은 PC(Precast Concrete) 아파트의 외벽을 목재 외벽시스템으로 대체하기 위한 기술적 타당성 검토와 성능기준을 확립하는 것이다(그림 2-1 참조).
- 즉, 현행 콘크리트 중심의 외벽 시스템을 탈피하여 경량·친환경·공장제작 기반의 목재 OSC 외벽시스템으로 전환할 수 있는 기술적·산업적 기반을 마련하는 데 본 연구의 초점을 둔다.
- 이를 위하여 현행 PC 외벽이 담당해 온 구조적 역할과 하중전달 체계를 분석하고 이를 OSC 외벽시스템으로 대체할 수 있는 설계 및 제작 기준을 정립하고자 한다. 이 시스템을 구성하는 벽 골조(Wall Framing), 단열층, 방수층 및 마감층 등 세부 요소별 성능을 검토하여, 구조적 안전성과 기능적 요구를 동시에 만족시키는 설계 기술을 도출한다.
- 다음으로, 목재 외벽시스템을 아파트에 적용하기 위해 요구되는 성능기준을 설정하고, 이를 검증하는 평가체계를 구축한다. 구조·단열·방수·화재·내구·시공성 등 여러 분야의 성능항목에 대해 국내외 기준을 분석하고, 시험 및 해석을 통해 성능 검증 방법을 제시한다.
- 이를 통해 목재외벽이 LH 아파트에 적용될 수 있는 최소 성능 수준을 정량적으로 제시하는 것을 목표로 한다.

- 아울러 본 연구는 목재 OSC 외벽의 현장 적용성을 확보하기 위해, RC 라멘구조 및 벽식구조 아파트에 적합한 접합기술을 개발하고, 이를 기반으로 국내 건축법규 (KS, KDS, 건축구조기준 등)와의 정합성을 확보하고자 한다. 이를 통해 표준화된 외벽 시스템을 제안하고, 시공성·조립성 및 품질관리 등 측면에서 산업적 활용이 가능한 수준으로 기술을 구체화한다.
- 마지막으로, 본 연구는 기술적 측면을 넘어 환경적·경제적 효과를 함께 평가한다. 즉, 기존 PC 외벽과 비교하여 온실가스 저감, 에너지 절감, 자원순환성 향상 등의 환경적 효과를 평가하고, 동시에 공기 단축, 생산성 향상, 비용 절감 등의 산업적 이점을 정량적으로 검토한다.

1.3. 연구범위

(1) 기술적 범위

- 연구범위는 아파트에 적용할 수 있는 경골목구조 기반 외벽시스템으로 한정한다. 매스팀버(CLT·GLT·LVL 등)를 적용한 시스템은 범위에서 제외한다.



[그림 2-1] 본 연구의 궁극적인 지향점

- 외벽시스템으로는, 골조를 포함하여 단열층·투습방수층·기밀층·레인스크린 등이 조합된 복합 외벽시스템을 다룬다. 그리고 Panelized Modular Sytem(2D형)를 연구대상으로 하며 Volumetric Modular Sytem(3D형)은 제외한다.
- 시스템의 성능 분야에서는 구조안전·단열·기밀·수밀·내화·내풍·유지관리·에너지 및 환경영향(LCA)으로 한정하여 검토한다.
- 시스템에 대하여 자중·풍하중·온도하중 등을 고려한 구조설계를 수행하되 정밀한 구조해석보다는 기술 개념의 설정 및 조합 체계(assembly system) 확립에 중점을 두고 연구를 진행한다.

(2) 공간적 범위

- 연구대상은 공동주택(PC 아파트)의 외벽 부위이다. 즉, 외벽 패널이 하중을 지지하거나 비내력형으로 기능하는 모든 유형의 외피를 포함하며, 내부 비내력벽체, 바닥·지붕 구조, 기초 등은 범위에서 제외한다.
- 설계 및 적용성 분석은 4개 기후권역(중부1·중부2·남부·제주)을 대상으로 하며, 각 권역의 열환경 특성에 따른 외벽체의 단면 조합을 비교·검토한다.
- 또한, 국내외 선행사례는 지상 5층 이하의 저층 주거건축물이나 지상 6층~12층 이하의 중층 주거용 건축물의 외벽체 시공 사례를 중심으로 검토한다.

(3) 절차적 범위

- 본 연구는 목재 외벽시스템의 중·장기적 개발 과정의 1단계 연구(기초 기술체계 확립 단계)로서 전체 연구 로드맵은 다음과 같이 구분한다.
 - 1단계(당해연구) : 시스템 구성요소 분석, 자재 조합기준 수립, 기후권역별 단면 구성 제안, 접합상세 설계, 시공 방식 도출
 - 2단계(후속연구) : 실물 모형(Mock-up) 제작, 열교·결로·기밀성 등 검증 시험, 구조·내화 시험 및 표준화 검토, 산업화·인증체계 구축
 - 3단계(사업화) : LH 실증단지 적용, 공장 생산라인 최적화, 외벽 모듈러 패널 상용화 모델 제시

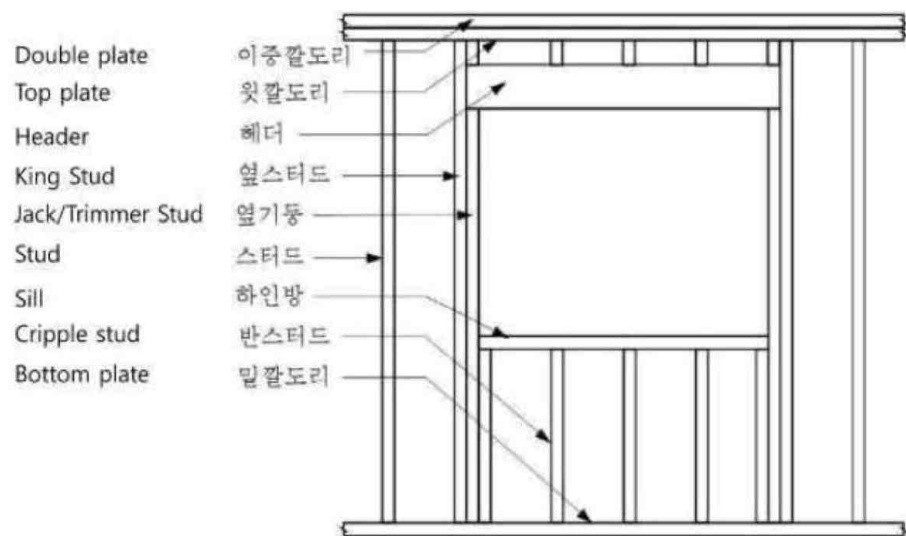
(4) 연구한계 및 유의사항

- 본 연구는 기술개념 및 설계체계 확립 단계를 연구로서, 실증실험·성능평가·LCA 결과는 포함하지 않는다. 또한 외벽과 구조체 (PC 슬래브, RC 프레임) 간 접합부 상세는 하중전달 메커니즘보다는 공법적·시공적 개념 수준에서 제시한다.
- 연구에서 제시하는 기후권역별 외벽체 구성안은 현행 「건축물 에너지절약 설계 기준」 및 「KDS 21 50 00」을 기준으로 구성하며, 향후 법령 개정이나 기준 변화에 따라 보정될 수 있다.

1.4. 용어정의

(1) 벽 골조 (Wall Framing)

- 벽 골조는 목재외벽 시스템의 메인 골조(뼈대)를 구성하는 프레임으로 정의할 수 있다. 이는 제재목을 일정한 치수로 컷팅하여 못으로 접합하는 방식으로 구성하며 하중지지, 외벽형태 유지 및 단열재·마감재 지지 등의 역할을 한다.
 - 관련 용어는 국영·영문이 혼용되고 있다. KS F 9002(경골목구조 시공 표준)에 의하면 골조는 스테드(Stud), 이중깔도리(Double Plate), 윗깔도리(Top Plate), 헤더(Header), 옆스터드(King Stud), 옆기둥(Trimmer Stud), 하인방(Sill), 반스터드(Cripple Stud), 밑 깔도리(Bottom Plate) 및 블록킹(Blocking) 등으로 구성된다.



[그림 2-2] 벽 골조의 세부구조 관련 용어 (KS F 9002)

(2) OSC (Off-Site Construction)

- 건축물의 주요 구성요소를 현장 외 장소에서 제작하고, 현장에 운반하여 조립하는 방식으로 진행되는 건축물 생산체계이다. 기존 현장시공(On-site Construction) 대비 품질관리, 공기단축, 환경성 등 측면에서 우수한 것으로 알려져 있다.
- 본 연구에서는 목재 외벽시스템을 공장에서 선 제작하고 현장에서 조립·설치하는 2D 패널라이징 또는 3D 모듈러 형태를 포함하는 개념이다.

(3) 패널라이징 시스템 (Panelized System)

- 벽체·바닥슬래브·지붕 등 건축물 구성요소를 평면 단위(Panel, 2D)로 선 제작 후 현장조립하는 OSC 방식으로, 공장에서 구조체·단열층·기밀층 등을 복합체로 구성하여 현장으로 운반 후 조립하는 방식을 말한다.
- 이는 볼륨형 모듈러 시스템(Volumetric modular system, 3D) 대비 설계유연성이 높아 더 자유로운 건축디자인 적용이 가능하다는 장점을 가진다.

(4) 오픈 패널 (Open Panel)

- 오픈 패널은 벽 골조와 벽 덮개재 등 구조체는 공장에서 선 제작하고, 단열·창호·내외장 등 공정을 현장에서 수행하는 벽체 패널을 말한다.

(5) 클로즈드 패널 (Closed Panel)

- 벽체를 구성하는 단열·창호·전기·설비 및 마감층의 일부를 포함하여 공장 제작의 범위와 완성도를 최대한 높여 제작하는 패널로 정의된다. 고층 건축물 또는 비계 설치가 어려운 현장조건에 유용한 패널제작 방식이다.

(6) 레인스크린 시스템 (Rainscreen System)

- 벽체 패널의 외단에 설치되는 이중 외피시스템이다. 빗물의 직접 침투를 방지하고 벽체의 수분배출 및 통기성을 확보하는 역할을 한다.
- 주로 통기층(ventilated cavity), 차수층(air barrier)으로 구성되며, 본 연구에서는 방부목이나 레인스크린 금속 패널, ZIP System 등 상용제품 사례를 포함한다.

(7) 방습층 (Vapor Barrier, Vapor Retarder)

- 실내 수증기가 단열층으로 침투하는 것을 방지해 결로를 억제하는 층을 말한다.

(8) 기밀층 (Air Barrier, Airtight Layer)

- 외벽체를 통한 공기의 누설을 차단하여 냉방·난방 에너지의 손실을 줄이는 층을 의미한다.

(9) 단열층 (Thermal Insulation Layer)

- 열전도 저항을 통해 실내외 열교를 방지하는 층으로서, 본 연구에서는 EPS, 유리 섬유, 스프레이폼 등을 포함한다.

(10) 투습방수지 및 자착식 투습방수지

(Breathable Waterproof Membrane & Self-adhered Membrane)

- 벽체 내 수분은 통과시키되 외부 빗물의 침투를 차단하는 기능성 시트를 말한다. 일반적으로 투습방수지는 스테이플로 고정하며 자착식 투습방수지는 접착층이 포함되어 공기층 간 누기 및 시공오차를 최소화할 수 있다.

(11) PC 외벽 (Precast Concrete External Wall)

- 공장에서 철근과 콘크리트를 타설하여 사전 제작한 외벽체 유닛으로서, 현장에서 조립·설치하는 콘크리트 패널을 말한다.
- 대량 생산 및 고강도를 장점으로 하지만, 중량이고 단열성능 확보에 한계가 있다. 본 연구에서는 목재 OSC 외벽의 비교대상 벽체 시스템이다.

(12) 목재 OSC 외벽 (Wood-based OSC External Wall)

- PC 아파트의 철근콘크리트 기반 외벽을 대체하기 위한 2D 패널형 벽체 유닛으로 목재를 메인 자재로 사용하는 OSC 외벽시스템을 의미한다.
- 목재 벽 골조를 기반으로 한 외벽시스템으로서, 구조적 안정성·단열성능·경량성 및 탄소저감 등 측면에서 우수하다는 장점이 있다.

2. 국내외 성능기준 검토

2.1. 국내 성능기준

2.1.1. 개 요

- 목재OSC 외벽을 아파트에 적용하기 위해서는 「건축법」 및 하위 법령을 포함하여 「건축구조기준(KDS)」, 「건축물의 에너지절약설계기준」 및 「건축물의 피난·방화 구조 등의 기준에 관한 규칙」 등의 요구기준을 모두 충족해야 함
- 현행 철근콘크리트 기반 PC 외벽은 내화·내풍·단열·기밀·방수·구조적 안정성이 법·제도적으로 이미 검증되었음
- 이와 다르게 목재OSC 외벽은 국내 공동주택에 적용된 선례가 거의 없기 때문에 현행법에서 요구하는 기준의 정확한 해석과 적용방안을 명확히 하는 것이 필요
- 이에 본 절은 목재OSC 외벽을 현장적용하는데 필요한 성능 요구기준을 검토하고 그 결과를 항목별로 정리함

2.1.2. 내화성능

(1) 법적근거와 개요

- 「건축법」 제50조 및 「건축법 시행령」 제56조는 건축물의 주요 구조부 및 지붕은 화재에 일정 시간 견딜 수 있는 ‘내화구조’로 설치하여야 하고, 특히, 공동주택의 외벽에 대해서는 ‘방화구조’ 성능도 요구하고 있음. 이는 화재 발생 시 인접세대로 연소 확대를 방지하기 위한 목적임
- 그리고 하위 법령인 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」 제23조는 방화구조에 적합한 재료, 구조, 두께 및 시공방법을 국토교통부고시로 위임하여 자세히 규정하고 있음. 이에 의하면 공동주택 외벽은 다음 중 하나에 해당해야 함
 - 국토교통부장관이 정한 내화시험에서 차열 및 차염시간이 1시간 이상인 구조
 - 건축자재등 품질인정 및 관리기준(국토교통부고시 제2025-508호)이 규정한 내화성능 인정을 받은 복합벽체

- 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」의 별표 1은 공동주택 등 주거시설의 주요 구조부와 지붕 등에 대한 내화성능을 아래와 같이 요구하고 있음

[표 2-1] 주거시설의 규모·부위별 내화성능 요구시간 (단위 : 시간)

구 성 부 재 용 도		벽						보 · 기 등	바 · 다 · 지 붕 · 지 붕 틀	
		외 벽			내 벽					
		내 력 벽	비내력벽		내 력 벽	비내력벽				
			연소우려가 있는 부분			경계벽	승강기 · 계단실 수직벽			
용 도 구 분	용 도 · 규 모 총 수 / 최고높이(m)									
단 독 주 택	초과	2	1	0.5	2	2	2	3	2	1
공 동 주 택	12 / 50									
숙 박 시 설	이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
의 료 시 설	4 / 20 이하	1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5

출처 : 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」 별표 1 편집

(2) 적용시 고려사항

- 철근콘크리트조와 철골철근콘크리트조는 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」에서 성능 법규가 아닌 서술 법규를 통해 내화성능을 만족할 수 있도록 유도하고 있음
- 반면, 목재는 가연성 재료이기 때문에 목구조 자체만으로 내화성능을 확보하는데 한계가 있음. 단면이 큰 부재를 주로 사용하는 중목구조(보+기둥 방식)의 경우는 부재의 탄화층만으로 내화성능을 충족할 수 있지만 경골목구조 기반의 목재OSC 외벽은 복합형 내화구조로 설계하는 것이 일반적임
- 경골목구조 벽체의 경우는 과거에 목재 스티드(2"×6" 또는 2"×8") 골조 위 방화 석고보드 2겹(12.5mm×2)을 시공하여 내화구조로 인정받은 바 있으나, 현재는 그 인증기간이 만료된 상태로, 우리나라에서 범용적으로 채택할 수 있는 내화구조 인정서가 현재로서는 부재한 상황
- 한편, ISO 834-1(Fire-resistance tests ; Elements of building construction)와 KS F 2257-1(건축부재의 내화시험 방법)은 내화 시험체의 설치조건, 온도곡선, 열전달 측정방법 등을 평가하기 위한 ‘표준 화재시험 기준’을 명시하고 있음

(3) 시사점

- 현재 국내에는 CLT 또는 중목구조를 대상으로 한 내화시험 결과는 다수 존재함. 이에 반해 경골목구조 기반 외벽에 대해서는 기 언급한 대로 가용할 수 있는 내화구조 인정서가 부재한 상황
- 따라서, 본 연구에서 개발하고자 하는 목재 OSC 외벽 시스템을 공동주택 아파트 외벽에 적용하기 위해서는 공인시험기관(KCL·FITI 등)의 내화시험을 통한 인증 과정이 병행되어야 함

2.1.3. 내풍성능

(1) 법적근거와 개요

- 풍하중 설계는 「건축구조기준(KDS 41 10 00 : 2022)」에 따름
- 해당 기준에서는 설계기준 풍속(V_0), 지형·노출계수(K_z), 풍향계수(K_d), 중요도 계수(I) 등을 종합하여 설계풍압을 산정하도록 규정하고 있고, 기본식은 아래와 같음

$$q_z = 0.613 \times K_z \times K_d \times K_e \times V_0^2$$

- 특히 외벽 패널은 풍흡압(negative pressure)에도 노출되므로, 패널의 인발력 및 접합부 전단강도 검토가 필요함

(2) 적용시 고려사항

- RC 또는 PC 외벽의 경우 풍하중을 슬래브 및 골조를 통해 직접 전달하지만, 목재 OSC 외벽은 접합부를 통해 하중을 전달하는 메커니즘이므로 접합부의 강도 및 변형관리가 설계의 핵심요소임
 - 패널과 PC 구조체 사이의 앵커볼트 설계강도 : KDS 21 50 00에 따라 인발·전단 강도 검토 필요
 - 패널의 수평변위 허용한도 : 높이의 1/200 이하
 - 비대칭 풍흡압에 의한 이격 방지 대책 : 하부 고정, 상부 슬라이딩 조인트 권장

(3) 관련시험과 사례

- 우리나라는 목구조의 내풍성능 확보를 위한 요소에 대해 KS F 2153(목구조 철물 접합부의 전단 시험 방법), KS F 2156(목재 접합부 인발시험) 및 KS F 2089(목조 건축 덮개재료용 목질 판상재) 등으로 평가함
- 캐나다북미에서도 외벽 패널의 내풍성능은 ASTM E330(정압 풍하중 시험)으로 평가하며, 허용변위는 1/240 이하로 관리함

2.1.4. 단열성능

(1) 법적근거와 개요

- 단열성능은 「건축물 에너지절약 설계기준(국토교통부 고시 제2023-357호)」에 따라서 지역별 외벽 열관류율(U-value) 기준을 만족해야 함. 외벽의 열관류율은 재료별 열전도율(λ)과 두께(d)에 따라 다음 식으로 산정함

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}}$$

(2) 지역별 요구기준

- 위 고시는 우리나라 기후권역을 4개로 구분하여 지역별 성능 요구기준을 다르게 규정하고 있음
- 개발 대상인 목재 OSC 외벽의 경우, 주요 사용 용도가 공동주택이고 외기에 직접 면하는 조건이며, 이에 따른 요구 열관류율 값은 아래 표와 같음
- 현 기준은 지역별로 동일한 외벽 열관류율을 요구하지 않으므로, 지역별 열관류율 기준을 고려한 목재 OSC 외벽의 단면구성이 필요함

[표 2-2] 기후지역에 따른 분류 및 외벽의 열관류율 기준

구 분	적 용 지 역	외벽 열관류율 (W/m ² · K)
중부1지역	서울, 경기북부, 강원도	0.17 이하
중부2지역	충청권, 전북북부	0.20 이하
남 부 지 역	전남, 경남	0.27 이하
제 주 지 역	제주도	0.38 이하

(3) 설계적용시 유의점

- 목재 OSC 외벽은 구조체가 반복적인 스티드 (38×140~184mm)로 구성되므로 열교(thermal bridge) 발생 가능성이 높음. 이를 보완하기 위해 아래 조합 설계가 필요함
 - 내단열 + 외단열 복합 구성 : EPS, 글라스울, 압면, 스프레이폼 조합
 - 열교 차단재(열반사 단열재, ZIP 보드 등) 적용
- 또한, 「KS F 2278(단열재의 열전도율 시험방법)」에 따라 공인시험기관의 열전도율을 적용해야 하며, 설계 시 시공오차(±10%)를 고려하여 여유두께를 확보하는 것이 바람직함

2.1.5. 기밀성능

(1) 법적근거와 개요

- 기밀성능은 「건축물의 에너지절약 설계기준」 제7조 및 「KS F 2292(건축 부위의 기밀성 시험방법)」에 근거함
- 공동주택의 경우, 외피의 평균 누기량이 0.8회/h 이하(ACH@50Pa), 단독주택은 1.5회/h 이하를 권장함

(2) 설계시공시 유의점

- 기밀성능 확보를 위해서는 연속된 기밀층(air barrier)을 확보해야 하며, 다음의 사항을 고려해야 함
 - 투습방수지의 이음부는 자착식 테이프로 완전 밀봉
 - 콘센트, 전기배선, 창호틀 주변 등 취약부위의 보강
 - 목재 패널 간 접합부에는 압축형 기밀패킹 또는 실란트 적용
- 기밀시공의 품질은 블로어도어 테스트(Blower Door Test)로 확인이 가능하며 그 결과를 통해 개선항목을 도출함

2.1.6. 방습·투습성능

(1) 법적근거와 개요

- 「건축물 에너지절약설계기준」 제9조 및 「KS F 9016(건축자재의 투습저항 측정 방법)」은 벽체의 수분제어 설계에 대한 기준을 제시함. 수분 이동을 제어함으로써 결로 및 곰팡이 발생을 방지할 수 있음

(2) 적용원칙

- 외측에는 투습성이 높은 방수층 (SD값 0.1~0.5m 이하), 내측에는 수분 차단성이 높은 방습층(SD값 10m 이상)을 적용해야 하며, 이 때 벽체의 내부 결로온도비는 「KS F 2295」에 따라 0.7 이상 확보해야 함

(3) 기술적 고려사항

- 우리나라의 고온다습한 여름기후에서는, 외단열형 목재 벽체의 경우 역전식 결로(reverse condensation)가 발생할 수 있음
 - 여름철에는 투습방수지의 방향성을 외측으로 조정
 - 실내 상대습도 60% 이상 시 제습 환기장치의 연동을 고려
 - ZIP 및 WSB 시스템과 같은 자착식 투습방수보드를 적용하여 방수·투습·기밀을 일체화할 수 있음

2.1.7. 구조안전성 (외벽패널과 PC부재 접합부)

(1) 법적근거와 개요

- 목구조 설계는 「건축구조기준(KDS 14 20 00 : 2022, 목구조)」을, 접합부 설계에 관해서는 「KDS 21 50 00 : 2022(볼트 및 리벳 접합)」 및 「KDS 21 60 00 : 2022(용접접합)」을 참조

(2) 접합방식과 설계원칙

- 목재 OSC 외벽을 PC 구조체에 접합할 때에는 하중전달 경로를 명확히 해야 하며

일반적으로 다음 두 가지 방식을 사용함

- 직접 앵커 접합 : 금속 브래킷 또는 인서트를 통해 PC 구조체에 직접 체결
- 슬라이딩 브래킷 : 상하이격 조정이 가능하도록 상부를 슬라이딩 조인트로 구성
- 설계 시에는 다음의 사항을 검토해야 함
 - 인발력(풍하중, 지진하중)에 대한 안전율 ≥ 1.5
 - 전단력 전달경로 확보 (패널 프레임 → 브래킷 → 인서트 → PC 벽체)
 - 접합부 처짐 허용한도 : $L/200$ 이하
 - 시공오차를 고려한 조절 브래킷($\pm 15\text{mm}$) 적용

(3) 구조성능 검증시험

- 접합부 실험은 「KS F 2156(목재 접합부의 인발강도 시험)」 및 「KS B 1002(bolt 인장시험방법)」을 근거로 수행 가능
- 시험을 통해 패널 1체당 허용 인발하중(kN)과 전단하중(kN)을 도출하고, 풍하중 설계값과 비교하여 안전성을 검증함

2.1.8. 외벽마감재 화재안전성

(1) 법적근거

- 「건축법 시행령」 제61조(건축물의 마감재료)는 공동주택의 외벽 마감재는 불연 재료 또는 준불연재료를 사용하도록 규정하고 있음. 특히 3층 이상 또는 연면적 $1,000\text{m}^2$ 이상 건축물은 준불연 이상 등급의 외벽 마감재가 필수

(2) 시험기준과 등급

[표 2-3] 불연, 준불연, 난연 성능에 대한 시험 기준 및 방법

등 급	시험기준	주요 시험방법	비고
불 연	KS F ISO 1182	고온로 내 온도상승시험	750°C , 20분
준 불 연	KS F ISO 5660-1	열방출시험 (Cone Calorimeter)	$\text{HRR} \leq 8 \text{ MJ/m}^2$
난 연	KS F ISO 5660-1	동일	$\text{HRR} \leq 20 \text{ MJ/m}^2$

(3) 적용방안

- 목재 OSC 외벽의 외측 마감재로는 다음 재료들이 적용 가능함. 이러한 마감재를 적용함으로써 화재확산 방지와 법적 준수를 동시에 확보할 수 있음
 - 불연형 MgO 보드 (두께 9~12mm)
 - 시멘트 보드 (KS F 4753) • 불연 복합금속 패널
 - 불연 도료 또는 불연 마감처리 목재(표면 실리카 코팅 등)
 - 외단열을 계획할 경우, 불연 성능이 확보된 외단열 자재의 사용은 필수

2.1.9. 소 결

- 국내 여건 상 목재 외벽을 PC 아파트 외벽으로 적용하기 위해서는 성능인증 시험, 접합부 인증, 단열·기밀성능 평가 등 추가 절차가 필요함. 특히 내화인정은 법적 필수요건으로 실제 프로젝트 적용에 앞서 반드시 사전인증 획득이 필요

[표 2-4] 목재외벽에 요구되는 성능 항목과 기준

성능 항목	관 련 기 준	주 요 내 용
내 화 성 능	• 건축법 시행령 제46조 • 건축물방화구조규칙 • KDS 21 50 00 (내화구조기준)	• 12층 이하 아파트 외벽(비내력) : 1시간이상 내화구조 적용 • 목재 외벽은 석고보드 + 방화재료 조합으로 인증획득 필요 • KS F 2257에 따른 내화시험 결과 필요
내 풍 성 능	• KDS 41 10 15 (풍하중 산정) • 건축구조기준	• 구조적으로 풍압에 견디는 강도확보 • 외벽 패널 자체 및 부착 접합부의 강도/안정성 검토
단 열 성 능	• 건축물의 에너지절약설계기준 • KDS 31 70 00 (건축환경기준)	• 지역별 기준(중부1) : 0.15 W/mK 이하 • 목재 외벽은 단열재(글라스울, EPS 등) + 공법적용 필요
기 밀 성 능	• ZEB 인증기준 • 기밀성능 시험 (KS F 2292)	• 외기침투를 막기 위한 연속기밀층(방습지, 테이핑) 필수 • ZEB인증 등에서는 3.0 ACH 이하(단독주택 기준) 요구
방·투습성능	• KS F 2298 (투습방수지시험) • KS F 2277 (외벽단열성능시험)	• 외벽내부 결로방지 위해 투습방수지·레인스크린 적용 • 내부습기 배출과 외부수분 차단설계 필요
구조안전성	• KDS 14 20 00 • KDS 21 50 00 및 21 60 00	• PC 라멘구조와 목재패널 간 연결력 확보 • 슬리브볼트·앵커·브라켓 등 접합부의 상세 설계 필요
외벽마감재 화재안전성	• 건축법 시행령 제61조	• 적용대상 : 4층 이상 공동주택, 내화구조 건축물 중 외벽에 적용하는 마감재 및 건축물 외벽에 단열재를 사용하는 경우

2.2. 국외 요구 성능기준

2.2.1. 개 요

- 북미나 유럽에서는 이미 목재 외벽을 공동주택 및 중층 건축물에 다양한 방식으로 활용하고 있음. 또한 이들 국가는 목재를 주요 구조재로 사용하는 건축물에 대해 체계적인 성능 중심(performance-based) 기준을 적용하고 있음
- 특히, 내화·내풍·단열·기밀·방습·투습 성능과 구조접합부 및 외벽 마감재의 안전성 등을 종합적으로 관리하는 시스템을 갖추고 있음
- 본 절에서는 미국·캐나다·일본·유럽 등의 대표적 설계기준을 중심으로 성능항목별 규정을 비교·검토하고, 국내 적용 가능성과 시사점을 도출함

2.2.2. 미 국

(1) 기준체계

- 미국은 국제건축코드(IBC: International Building Code) 및 국제주거코드(IRC: International Residential Code)를 중심으로 건축물의 성능을 규정
- 목구조의 설계는 NDS(National Design Specification for Wood Construction), 에너지 성능은 IECC(International Energy Conservation Code), 방화·내화는 ASTM E 119 등 시험기준으로 관리

(2) 내화성능

- 기 준 : IBC Chapter 7(Fire and Smoke Protection Features), ASTM E 119 (Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials)
- 내 용 : 외벽은 층수와 용도에 따라 1 ~ 2시간 이상 내화성능을 확보해야 하며 비가연성 단열재나 석고보드 2겹 이상을 사용하는 복합형 구조를 인정
- 사 례 : 4 ~ 6층 규모의 Mass Timber 또는 경골목구조 공동주택(Light-frame Multi-family)은 Type III-A Construction(1시간 내화)으로 설계되고 스프링클러 시스템과 병행하여 법적 요구를 만족시킴

(3) 내풍성능

- 기 준 : ASCE 7-22(Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures)
- 내 용 : 기본풍속 130mph(58m/s, 허리케인지역 제외), 건물의 높이·형상·지형 등을 고려한 풍하중 산정식 적용
- 특 징 : 외벽 패널 시스템은 ASTM E 330(Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights, and Curtain Walls) 시험을 통해 정압하중 ± 3.0 kPa 수준의 내풍성능 검증을 수행

(4) 단열·기밀성능

- 기 준 : IECC 2021 (International Energy Conservation Code)
- 열관류율(U-value) 기준 : • Zone 5 (북부) : $0.045 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{F}$ ($\approx 0.26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)
• Zone 3 (남부) : $0.082 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{F}$ ($\approx 0.47 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)
- 기밀기준 : $\text{ACH} @ 50\text{Pa} \leq 3.0$ (단독주택 기준), ≤ 0.6 (ZEB, 패시브주택 수준)
- 적용방식 : 기밀층(air barrier)과 방습층(vapor retarder)의 분리 시공 및 자착식 투습방수시트 사용

(5) 구조접합·방습성능

- NDS는 금속 브래킷, 나사, 볼트, 네일 등의 허용하중 산정법을 명시하며, APA (Engineered Wood Association)에서는 외벽패널 접합에 대한 전단 및 인발강도 시험자료를 제공
- 방·투습 설계는 ASHRAE 160(Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings)에 따라 지역별 수증기투과율(SD)과 결로위험을 정량평가

(6) 마감재 화재안전성

- NFPA 268(Standard Test Method for Determining Ignitibility of Exterior Wall Assemblies)에 따라, 외벽 마감재는 Flame Spread Index(FSI) 25 이하를 목표로 하며, 준불연 등급 이상의 외장재 적용을 기본으로 함

2.2.3. 캐나다

(1) 기준체계

- NBCC(National Building Code of Canada)와 NECB(National Energy Code of Canada for Buildings) & CSA O86(Engineering Design in Wood)를 중심으로 목구조 및 외피 성능을 규정

(2) 내화성능

- NBCC Division B Part 3.2에 따라 목재 외벽은 1시간 이상 내화성능 확보가 필요하며, CAN/ULC-S101(Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials)에 따른 시험·인증을 받아야 함
- 스터드 벽체의 경우 15.9mm 석고보드 2겹 + 140mm 글라스울 + OSB 11mm 조합을 통한 60분 내화 인증사례가 존재

(3) 내풍성능

- NBCC 2020 Part 4(Structural Loads)는 풍속 1/50년 확률기준으로 25~45%를 적용하며 외벽 패널은 CSA S136(Cold-Formed Steel Structural Members) 또는 CSA O86의 목재 접합 설계식을 이용해 설계

(4) 단열 · 기밀 · 방습성능

- 기 준 : 외벽 RSI 기준은 Zone별로 2.97 ~ 4.23(즉, $U = 0.23 \sim 0.34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)
- 기 밀 : NBCC Division B 9.36.2.10에 따라 $\text{ACH} @ 50\text{Pa} \leq 2.5$ 이하
- 방 습 : 외벽의 내측에는 Vapor Barrier Class 1($\text{SD} > 50\text{m}$) 폴리에틸렌 시트를 외측에는 Vapor Permeable WRB(투습방수지)를 적용하도록 명시

(5) 구조안정성

- CSA O86-19(Engineering Design in Wood)에서 목재 패널 전단벽(shear wall) 설계법, 못·스크류의 허용 전단력 및 인발력 공식을 명시

- PC 구조체와의 접합과 유사한 조건에서는 nail plate, hold-down anchor, angle bracket 등의 금속접합부 성능시험 결과를 근거로 설계함

(6) 마감재 화재안전성

- 외벽의 외장마감은 CAN/ULC-S134(Fire Test of Exterior Wall Assemblies)를 통해 화염 확산 및 낙하물 발생 여부를 평가
- 공동주택에는 준불연 또는 불연 등급의 외장재만 적용 가능

2.2.4. 일 본

(1) 기준체계

- 일본은 건축기준법(建築基準法) 및 목조기술기준(木造軸組工法住宅の設計・施工指針, MLIT)을 통해 목재 구조물의 내화 및 내진 설계를 관리
- 특히, 목재 외벽의 비가연화 및 내화인정제도(準耐火構造認定制度)가 매우 발달되어 경골목구조 외벽의 적용 범위가 넓음

(2) 내화성능

- 준내화구조인정제도(準耐火構造認定制度)에서는 45분, 60분 내화인정을 받은 벽체의 사양을 대신인정구조(大臣認定構造)로 공개하고 있고, 이에 따른 구조용 OSB + 석고보드 + 압면 단열재 조합에 대한 인증사례가 다수 존재
- 일본 국토교통성(MLIT)의 ‘木造準耐火構造設計マニュアル(2021)’에 의하면, 스티드 간격 455mm, 단열재 100mm, 석고보드 12.5mm×2겹 구성 시, 60분 내화성능 확보가 가능

(3) 내풍성능

- 建築基準法施行令 第82条の6 및 建築物荷重指針(日本建築学会)으로 관리
- 이에 따라 표준풍속은 34%(도심) ~ 46%(해안)이며, 외벽 접합부의 인발강도 및 전단강도는 JIS A 3301 시험을 통해 평가

(4) 단열 · 기밀 · 방습성능

- 단 열 : 建築物省エネルギー法の 지역별 열관류율 기준은 $0.26 \sim 0.46 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- 기 밀 : C 値(공기누설량) $\leq 2.0 \text{ cm}^3/\text{m}^2 @ 50\text{Pa}$
- 방·투습 : 외측 透湿防水シート ($SD \approx 0.2\text{m}$), 내측 防湿気密シート ($SD > 10\text{m}$)를 적용함. 여름철 고습기 기후에 맞춰 투습방수층의 배치와 시공 방향을 세밀하게 관리

(5) 구조안정성

- 木造軸組工法構造計算指針(日本建築学会)은 패널 전단내력시험(JISA1414)에 근거한 허용내력식을 제시하고 접합철물(브래킷·앵커볼트)의 내력시험 데이터를 표준화

(6) 마감재 화재안전성

- 不燃材料·準不燃材料·難燃材料の認定基準(MLIT告示 1400号)에 따라, 외벽 마감재는 준불연이상 등급을 확보해야 하며, 木目調仕上げ 불연패널 등 다양한 인증제품이 존재

2.2.5. 유 럽

(1) 기준체계

- Eurocode 5(EN 1995-1-1 : Design of Timber Structures)를 중심으로 목구조 설계를 수행하며, 단열·기밀·방습은 EN ISO 6946 & EN 13165 등을 따름
- 화재성능에 관해서는 EN 13501-2(Fire classification of construction products and building elements)에서 Class A1 ~ F 등급으로 분류

(2) 내화·내풍성능

- 내 화 : EN 1365-1(Load bearing elements) 시험에서 REI 60, REI 90 등급 확보 시 공동주택 외벽으로 사용 가능

- 내 풍 : EN 1991-1-4(Actions on Structures – Wind Loads)에 따라 기본풍속 22~30%, 외벽 패널의 허용변형은 L/250 이하로 관리

(3) 단열 · 기밀 · 방습성능

- 단 열 : EN ISO 6946에 따라 열관류율 $U \leq 0.25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- 기 밀 : EN 12207(Air Permeability of Building Components)의 Class3 이상 (누기량 $\leq 1.5\text{m}^3 / \text{h}\cdot\text{m}^2 @50\text{Pa}$)
- 방 습 : EN 12572(Vapor Permeability)에서 벽체 구성에 따른 μ 값(투습저항 계수)을 규정하며, 내·외층의 SD값 비율은 10배 이상 확보하도록 권장

(4) 마감재 화재안전성

- EN 13501-1에 따른 분류 :
 - A1, A2 : 불연
 - B, C : 준불연
 - D 이하 : 가연
 - 공동주택 외벽에는 B-s1,d0 이상 등급 의무화
- 적용예시 : CLT 또는 Light Frame Wall 외측에 MgO보드, 미네랄울, 석고보드 조합으로 REI60 + B-s1,d0 인증 확보 사례 다수

2.2.6. 소 결

- 성능기준 검토 결과, 해외는 공통적으로 성능 중심(performance-based) 체계를 기반으로 하고 있어 개별 자재에 대한 관리가 아닌 외벽 시스템(assembly) 자체가 요구성능을 충족하면 그 사용을 유연하게 허용
- 반면에, 한국은 여전히 콘크리트·철강 등 비목재 중심의 ‘재료물성 규제형’ 기준에 머물러 있는 상황으로, 앞으로 목재 외벽의 제도적 수용성 확대를 위해서는 ‘성능 검증형’ 기준 및 제도 도입이 필요
- 내화성능은 모든 국가가 최소 1시간 이상을 요구하나, 한국은 「건축법 시행령」과 「건축물방화구조규칙」을 근거로 비목재 구조 중심의 인정제도를 운영 중임

- 반면 해외에서는 ASTM E 119, ULC-S101, MLIT 認定, EN1365 등 실물 벽체 조합(assembly)에 대하여 시험기반 인증제를 운영 중임. 특히 일본은 ‘준내화구조 인정제도’를 통해 목재외벽의 내화조합을 표준화하고 그 목록을 대외 공개
- 내풍성능은 우리나라가 계산식 중심(KDS 41 10 00)인 반면, 해외는 ASTM E330, EN 12179 등 실물시험을 병행하여 패널 전체의 구조적 거동을 검증
- 단열·기밀성능의 경우 각 국에 운영중인 저에너지 인증제와 직결됨. 특히 해외는 각 성능을 설계 값에 의한 검증이 아니라, 실측시험(Blower Door, Hot Box 등)을 통한 검증을 병행한다는 점에서 우리나라와 크게 차이

[표 2-5] 목재외벽에 대한 주요 국의 단열·기밀 요구성능 비교

국 가	법적근거 및 인증제도	단열·기밀 요구성능
한 국	- 에너지절약설계기준 - ZEB 인증제 (국토교통부)	[U 값] 0.17~0.38 W/m²·K (ZEB 1 : ≤ 0.15) [기밀] ACH50 ≤ 0.8 (ZEB 1 : ≤ 0.60)
미 국	- DOE, Zero Energy Ready Home - PHIUS+ Certified / Source Zero	[U 값] U ≤ 0.15 [기밀] ACH50 ≤ 0.6
캐 나 다	CHBA, Net Zero Home	[U 값] U ≤ 0.25 [기밀] ACH50 ≤ 1.0
일 본	ZEH 인증제 (경제산업성)	[U 값] U ≤ 0.20 [기밀] C値 ≤ 1.0
유 럽	EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)	[U 값] U ≤ 0.15 세계최고 수준의 [기밀] ACH50 ≤ 0.6 성능요구 기준임

- 방습·투습성능은 모든 국가가 “내측 방습, 외측 투습”의 원칙을 공유하고 있으나, 해외에서는 SD값(수증기 확산저항)의 정량화(내측 ≥ 10m, 외측 ≤ 0.5m)를 통한 관리가 진행 중임. 한국은 이러한 수치기준이 부재하며 향후 관련기준(KS 등)에 대한 정량화 개정이 필요
- 구조 안정성과 접합성능은 우리나라가 이론식 기반(KDS)인 반면에, 해외에서는 ASTM D1761, CSA O112, JIS A1414, EN 26891 등에 따라 접합부 실험을 병행 하고, 제조사 단위의 인증데이터를 설계에 활용
- 외벽 마감재의 화재안전성은, 우리나라의 경우 개별재료의 불연·준불연 등급을 요구하지만, 해외는 CAN/ULC-S134, EN 13823과 같이 외벽 어셈블리 전체에 대한 화재거동 시험을 시행함

[표 2-6] 목재외벽에 대한 주요 국의 요구성능 종합 비교

구 분	한 국 (KOR)	미 국 (USA)	캐나다 (CAN)	일 본 (JPN)	유 럽 (EU)
내 화 성능	• [기준] 외벽 1시간 이상 (건축법 승 제56조, 방화구조 규칙 제5조) • [시험] KS F ISO 834-1 KS F 2257-1	• [기준] IBC Ch.7 ASTM E 119 UL 263 • [요구성능] FRR 1~2hr	• [기준] NBCC 3.2, CAN / ULC-S101 • [요구성능] 45~60min	• [기준] 準耐火構造認定 制度 (建築基準法) • [시험] JIS A 1304, MLIT 認定	• [기준] EN 13501-2 EN 1365-1 • [등급] REI 60~90
내 풍 성능	• [기준] KDS 41 10 00 (풍하중 설계기준) • [풍속] 30 ~ 40 m/s 시험 (계산중심)	• [기준] ASCE 7 - 22 ASTM E 330 • [풍속] 25 ~ 58 m/s	• [기준] NBCC Part 4 • [풍속] 25~45 m/s	• [기준] 建築基準法施行令 第82条の6 • [풍속] 34~46 m/s	• [기준] EN 1991-1-4 • [풍속] 22~30 m/s
단 열 성능 + 건물에너지 성능인증제	• [기준] 에너지절약 설계기준 (국토교통부 고시) • [열관류율 U] 0.17 ~ 0.38 • [시험] KS F 2278 KS F 2295 • [인증] ZEB 인증제 (국토교통부) · 5등급 ~1등급으로 구분 (에너지절감 20~100% 수준) · 외벽 열관류율 ≤ 0.15 목표	• [기준] IECC 2021 ASHRAE 90.1 • [열관류율 U] 0.26 ~ 0.47 • [시험] ASTM C 1363 ASTM C C518 • [인증] DOE ZERH PHIUS (Passive House) · 벽체 열관류율 $U \leq 0.15$ · 기밀 ACH50 ≤ 0.6	• [기준] NBCC 9.36 NECB 2020 • [열관류율 U] 0.23 ~ 0.34 • [시험] CAN / CSA A440.2 • [인증] Net Zero Home Labelling (CHBA) · 벽체 열저항 $RSI \geq 4.0$ · 벽체 열관류율 $U \leq 0.25$ · 기밀 ACH50 ≤ 1.0	• [기준] 建築物省エネ法 • [열관류율 U] 0.26 ~ 0.46 • [시험] JIS A 1412-2 • [인증] ZEH 인증제 (경제산업성) · 외벽 열관류율 $U \leq 0.20$ · 기밀 C値 ≤ 1.0 ACH50	• [기준] EN ISO 6946 • [열관류율 U] 0.25 이하 • [시험] EN 12667 EN 12939 • [인증] EPBD NZEB / Passive House · 외벽 열관류율 $U \leq 0.15$ · 기밀 ACH50 ≤ 0.6
기 밀 성능 + 건물에너지 성능인증제	• [성능] ACH50 ≤ 3.0	• [기준] IECC PHIUS⁺ 2021 • [성능] ACH50 ≤ 3.0 (IECC) ACH50 ≤ 0.6 (PHIUS)	• [기준] NBCC 9.36.2.10 • [성능] ACH50 ≤ 2.5	• [기준] 住宅性能表示制度 (C値 평가) • [성능] C値 ≤ 2.0 (기본) C値 ≤ 1.0 (ZEH)	• [기준] EN 12207, EN ISO 9972 • [성능] ACH50 ≤ 1.5 (Class 3)

구 분	한 국 (KOR)	미 국 (USA)	캐나다 (CAN)	일 본 (JPN)	유 럽 (EU)
	• [시험] KS F 2292 ISO 9972 (Blower Door)	• [시험] ASTM E 779 ASTM E 1827	• [시험] CAN / CGSB-149.10	• [시험] JIS A 2201	
	• [인증] ZEB 인증제 (국토교통부) · ACH50 ≤ 0.6 (ZEB 1 요구기준) · 에너지공단 지정기관의 현장시험 필수	• [인증] DOE ZERH PHIUS (Passive House) · ACH50 ≤ 0.6 이하 필수	• [인증] Net Zero Home Labelling (CHBA) · 기밀 ACH50 ≤ 1.0	• [인증] ZEH 인증제 (경제산업성) · 기밀 C値 ≤ 1.0 ACH50 · UA 값 0.46 이하	• [인증] EPBD NZEB / Passive House · ACH50 ≤ 0.6 h⁻¹ · 열관류율 U ≤ 0.15 · 1차 에너지 ≤ 120
방 습 성능 투 습 성능	• [기준] KS F 9016 KS F 2295 · 내측 방습층 (SD ≥ 10m) · 외측 투습층 (SD ≤ 0.5m)	• [기준] ASHRAE 160, ASTM E96 · SD기준 : 내측 ≥ 10m · SD기준 : 외측 ≤ 0.5m	• [기준] NBCC 9.25 ASTM E 96 · Vapor Barrier Class 1~3	• [기준] 木造住宅技術基準 木造住宅技術基準 · 透湿防水シート 적용 (SD 0.2m 이하)	• [기준] EN ISO 12572, EN 12086 · SD기준 : 내측 ≥ 10m · SD기준 : 외측 ≤ 0.5m
구조안전성 (패널 접합)	• [기준] KDS 14 20 00 (목구조) KDS 21 50 00 (접합) • [시험] KS F 2156 (인발) KS B 1002	• [기준] NDS, ASTM E564 • [시험] ASTM D 1761 (Fastener) E 564 (Shear Wall)	• [기준] CSA 086 • [시험] CSA 0112 ASTM D 1761	• [기준] 木造軸組構造指針 • [시험] JIS A 1414 (전단) JIS B 1180 (볼트)	• [기준] EN 1995-1-1 • [시험] EN 26891 (Joint) EN 594 (Shear Wall)
외벽마감재 화재안전성	• [기준] 불연 · 준불연 (건축법 제 61조) • [시험] KS F ISO 1182 KS F ISO 5660-1	• [기준] NFPA 268 ASTM E 84 (FSI ≤ 25) • [시험] ASTM E 1354	• [기준] CAN/ULC-S134, S102 • [시험] Wall Assembly Fire Test	• [기준] 準不燃 以上 (国交省告示 第1400号) • [시험] JIS A 1321	• [기준] EN 13501-1 EN 13823 • [등급] B-s1,d0 이상

2.2.7. 국외 기준의 시사점

- 해외 주요 선진국은 목재 OSC 외벽을 이미 공동주택과 중층건물 외벽시스템으로 광범위하게 활용하고 있으며, 그 근거는 “성능 중심의 인증제도”와 “시험 기반의 표준화 체계”임. 이에 비해 우리는 재료 규제 중심의 법체계로 인해 목재 외벽의 법적 적용범위가 제한적인 상황
- 앞으로, 국내에서도 해외 내화시험(Assembly-based) 평가방식, WRB(Weather

① 성능중심 접근

- 미국·캐나다·유럽 모두 구조체의 재료가 무엇이든 요구성능을 만족하면 사용이 가능한 구조임
- 이는 국내의 ‘재료기반 규제(비목재 중심)’ 체계와 차별화되는 핵심 포인트로, 향후 법규 개정의 방향성을 제시함

② 시험인증 기반 기술인정제도

- 일본의 대신인정(大臣認定)이나 캐나다의 Listing System과 같이, 인증된 복합 외벽 구성체를 사전등록하여 사용함으로써 현장적용 시 절차가 간소화됨
- 우리나라도 “목재 OSC 외벽 표준단면 인정제도(가칭)” 도입이 필요함

③ 방습·투습·기밀·성능 통합관리

- 북미는 WRB 시스템을 중심으로 방수투습·기밀 성능을 동시에 관리함
- 한국 역시 단열층·기밀층·투습층의 연속성을 확보하는 복합재료 적용이 중요함

④ 화재안전성의 다층적인 대응

- 해외에서는 단순한 재료 등급이 아니라 전체 외벽 어셈블리(assembly) 차원의 화재시험을 실시함
- 이에 목재OSC 외벽도 단일재료가 아닌 복합단면(석고보드+단열재+외장재)의 성능을 종합적으로 평가해야 함

⑤ 기후권역별 단면 최적화

- 미국 및 캐나다는 IECC 및 NBCC를 통해 기후 존별 열성능 기준을 세분화하여 지역별 단열두께를 조정함
- 이는 한국의 4개 기후권역(중부1, 중부2, 남부, 제주) 분류와 동일한 방향으로 적용 가능함

2.3. 국내외 비교 및 시사점

2.3.1. 개 요

- 목재OSC 외벽시스템은 세계적으로 지속가능한 건축재료, 공업화, 시공 효율성, 탄소저감 효과를 인정받고 있음
- 그러나 이를 공동주택의 외벽시스템으로 활용하기 위해서는 각국의 법규·기준이 요구하는 내화, 내풍, 단열, 기밀, 방습, 구조안정성, 외벽 마감재 성능을 모두 충족해야 함
- 특히 이러한 성능 검증은 개별 재료 수준이 아닌 외벽 어셈블리(assembly) 단위의 성능 인증이 필요함
- 본 절에서는 2.1.(국내 기준)과 2.2.(해외 기준)에서 정리한 내용을 종합하여, 각 항목별로 국내·외 기준의 차이점과 시사점을 분석하였음

2.3.2. 내화성능 기준 비교

- 우리나라는 ‘내화구조 인정제도’가 존재하지만, 대부분 철근콘크리트·철골구조 중심으로 기준이 수립·운영되고 있음
- 반면에 일본과 캐나다는 목재 외벽 조합(스터드+석고보드+단열재)에 대한 공인 사양을 다수 보유하고 있으며, 목재 외벽에 대해 성능 인증형 내화구조 리스트화 제도를 운영함
- 따라서 국내에서도 향후 “목재 기반의 내화 복합외벽 인정 리스트” 제도 도입의 검토가 필요함

[표 2-7] 국내외 내화성능 기준 비교

구 분	국 내	해 외	분 석
법적근거	건축법 시행령 (제56조) 건축물방화구조규칙	IBC Ch.7, NBCC 3.2, MLIT 인정, EN13501-2	국내의 '비목재 구조' 중심 해외는 재료무관 성능기준
평가방법	KS F ISO 834-1, (내화시험 60분)	ASTM E119, CAN / ULC-S101, EN1365	시험체 구성 및 두께의 조합으로 인증
인증제도	국토교통부 고시, KCL 개별시험	인증리스트제(미국 UL, 일본 MLIT認定 등)	해외는 사전인증제 운영으로 절차 간소화

2.3.3. 내풍성능 기준 비교

- 국내 기준은 풍하중 계산식은 충분히 국제수준이지만, 패널 시스템 단위의 실물 시험 기반 검증제도가 부재함
- 미국·유럽에서는 완제품 단위의 외벽 패널에 대해 풍압·흡압시험(ASTM E330, EN 12179)을 수행하여, 접합부 및 패널 전체의 거동을 실측으로 평가함
- 목재 OSC 외벽도 풍흡압에 의한 인발·전단거동 검증이 필요하며, 향후 KS기준 신설(예: 목재 외벽 패널 내풍시험법)이 요구됨

[표 2-8] 국내외 내풍성능 기준 비교

구 분	국 내	해 외	분 석
설계기준	KDS 41 10 00 (풍하중)	ASCE 7, NBCC Part4, EN 1991-1-4	산정식 및 개념 유사
설계풍속	30 m/s (서울) 40 m/s (제주)	25 ~ 58 m/s	한국은 중간 수준
평가방법	이론 계산 중심	ASTM E330 시험 병행	해외는 정압시험을 통해 실물 패널의 변형 검증

2.3.4. 단열성능 기준 비교

- 한국은 지역별로 기준이 세분되어 있으나, 조합형 외벽시스템의 공식적인 열성능 인증제도의 부재로 인해 설계자의 개별적 계산에 의존하고 있음
- 반면에 캐나다·유럽에서는 “외벽시스템 단위의 공인 U-value” 데이터베이스를

구축하여, 생산자-설계자 간 정보공유가 체계화되어 있음

- 향후 목재 OSC 외벽 조합별 U-value 인증 DB화가 필요함

[표 2-9] 국내외 단열 및 에너지성능 기준 비교

구 분	국 내	해 외	분 석
기준근거	건축물의 에너지절약설계기준	IECC, NBCC, EU EPBD	해외는 모두 지역별로 U-value 세분화
U-value	0.17 ~ 0.38 W/m ² · K	0.17 ~ 0.30 W/m ² · K	유사 수준
특 이 점	재료별 열전도율 단일 기준	성능기반 · 조합별 인증	해외에서는 구조체, 단열, 마감 등 복합체별로 인증 가능

2.3.5. 기밀성능 기준 비교

- 한국은 이미 북미·유럽 수준의 기밀기준을 보유하나, 실제 시공단계 품질관리 및 현장시험 제도화 미흡이 문제임
- 캐나다·독일은 공인시험 의무화(건물 사용승인 시) 제도를 운영하고 있어, 향후 국내도 시공 후 블로어도어 시험을 표준화할 필요가 있음

[표 2-10] 국내외 기밀성능 기준 비교

구 분	국 내	해 외	분 석
기준근거	KS F 2292, 에너지절약설계기준	IECC, NBCC, EN 12207	유사 수준
성능기준	ACH@50Pa ≤ 0.8	0.6 ~ 3.0 (건물용도별)	국내 기준이 상대적으로 엄격
시험방법	블로어 도어 테스트	ASTM E779 EN ISO 9972	시험절차는 거의 동일

2.3.6. 방 · 투습성능 기준 비교

- 국내는 투습·방습에 대한 정성적 기준에 머물고 있으나, 해외는 수증기 확산저항 (SD) 값을 명확히 제시함으로써 재료의 선택과 결로위험 분석을 체계적으로 실시
- 따라서 국내에서도 KS F 기준 등을 개선하여 목재OSC 외벽의 설계에 적용할 수 있는 SD값 도입이 필요함

[표 2-11] 국내외 방습 · 투습성능 기준 비교

구 분	국 내	해 외	분 석
기준근거	KS F 9016, 에너지절약설계기준	ASHRAE 160, NBCC 9.25, EN 12572	해외는 상세한 설계지침 존재
설계원칙	내측 방습, 외측 투습	동일	동일한 방향성
시험기준	투습저항 (SD) 개념 미비	SD값 명확 제시	해외는 수치기반 관리

2.3.7. 구조안정성 · 접합성능 기준 비교

- 해외에서는 외벽 패널 접합부의 인발력, 전단력, 반복하중 거동을 제조사 단위로 시험·인증하여, 설계자는 인증 데이터를 바로 활용함
- 국내는 표준화된 시험 프로토콜이 부족하므로, “목재 OSC 외벽 접합부 표준시험 법 및 인증제도” 마련이 시급함

[표 2-12] 국내외 구조안정성 및 접합성능 기준 비교

구 분	국 내	해 외	분 석
근거기준	KDS 14 20 00 KDS 21 50 00	NDS, CSA 086, JIS A1414, EN 1995-1-1	모두 유사한 안전율 기반
평가방법	이론설계 중심	실험 + 해석 병행	해외는 실험 데이터 축적
접 합 부 인 증	부재별 검토	시스템 인증제	해외는 제품 단위의 인증 제도를 운영

2.3.8. 외벽마감재 화재안전성 기준 비교

- 현재 우리나라는 마감재 재료등급과 외벽시스템 전체의 화재거동(Flame Spread, Smoke Density)로 평가하고 있음
- 하지만 목재 OSC 외벽의 경우는 외벽 시스템 전체의 화재거동을 확인할 수 있는 시험조건이나 시험환경 등이 마련되어 있지 않음
- 이에 현실적으로는 외벽시스템 전체로는 인정받을 수 없고 마감재의 재료등급만으로 화재성능 요구기준 충족 여부를 확인할 수 밖에 없음
- 따라서 목재 OSC 외벽체의 복합체 기준 시험 및 인증체계 마련이 필요함

[표 2-13] 국내외 외벽마감재 화재안전성 기준 비교

구 분	국 내	해 외	분 석
기준근거	건축법 시행령 제61조	NFPA 268, CAN/ULC-S134, EN 13501-1	성능체계는 유사
성능등급	불연 또는 준불연	Class A~F / B-s1,d0 등	해외는 외벽 어셈블리 단위의 성능평가
시험방법	KS F ISO 5660-1 (Cone Calorimeter)	동일	동일하나 적용범위 차이

2.3.9. 종합 시사점

- 우리나라 건축법 체계는 여전히 재료 중심의 규정(“불연재료 사용” 등)에 머물러 있고, 이는 목재 OSC 외벽 시스템과 같은 복합형 경량구조 벽체의 실질적 적용을 제약하는 요인으로 작용
- 목재 OSC 외벽시스템의 적용 확대를 위해서는 현행 성능기준의 합리적인 보완이 필요함. 특히 내화성능과 외벽 마감재의 준불연 성능은 제도적 불확실성이 크고, 공장제작 기반의 OSC 특성을 충분히 반영하지 못하고 있어 개선 필요성이 높음
- 우리나라의 건축법 및 관련 고시는 목구조에 대해 구조유형별로 상이한 내화성능 인정 체계를 적용하고 있음
- 구조용 집성재(중·대단면 목구조)의 경우, 이미 표준내화구조가 제도적으로 마련 되어 있어, 해당 상세를 준용할 경우 별도의 내화성능 시험 없이 공장심사 및 품질 관리 확인만으로 내화구조 인정이 가능함. 이는 재료의 단면 탄화특성과 구조적 거동이 충분히 검증되었다는 전제 하에 제도적 신뢰가 형성된 결과임
- 반면에, 경골목구조의 경우에는 표준내화구조가 체계적으로 정립되어 있지 않아 동일한 벽체 구성이라 하더라도 현장별, 제조사별, 세부 자재 조합별로 반복적인 내화성능 시험을 요구받고 있는 상황임
- 이로 인해 공장 제작형 OSC 외벽임에도 불구하고 현장 적용 시마다 시험 부담이 발생하고, 동일 성능의 벽체라 해도 제조사 변경 시 재시험이 요구되며, 기술 축적 보다는 개별 프로젝트 단위의 비용·시간 부담이 누적됨
- 우리나라는 공동주택 및 중·고층 건축물의 외벽에 대하여 준불연 이상의 마감재

사용을 요구하고 있고, 이는 화재안전성 확보 측면에서 타당한 접근임

- 하지만 외벽시스템 전체의 성능보다는 마감재 단위의 재료 성능을 판단하고 있는 한계가 있어 목재 OSC 외벽과 같이 다층 복합벽체에 대해서는 실제 화재거동을 충분히 반영하지 못하고 있음
- 특히, 해외에서는 폭넓게 사용되는 ‘목재 외장재+방화층’ 조합이 우리나라에서는 제도적으로 배제되는 경향이 있음. 이는 시스템 단위의 성능평가(System-based performance evaluation)가 아닌 재료 단위의 규제(Material-based regulation) 방식에 기인한 것이고, 신기술 확산의 높은 장애요인으로 작용 중

① 실물시험 기반 설계검증체계 마련

- 미국과 캐나다는 풍하중, 화재, 접합 성능을 외벽패널 단위의 실물시험(ASTM, ULC, UL 등)을 통해 검증하고 있음
- 우리나라도 “목재 OSC 외벽 실물 성능시험 가이드라인 (KS 신설)”을 제정하여 향후 인증·인정 절차에 직접 반영할 필요가 있음

② 기후권역별 최적 단면설계 필요성

- 현재 우리나라는 건축물의 단열성능을 4개 기후권역(중부1, 중부2, 남부, 제주)으로 구분하여 관리하고 있음
- 따라서 캐나다의 “기후Zone별 RSI 기준”과 같이 각 권역에 최적화된 단열두께·단열재 조합·투습층 위치 등을 표준화하면 설계 효율성과 품질 일관성을 동시에 확보할 수 있음

③ 시공성·생산성 고려한 제도 연계

- OSC의 본질은 공업화와 시공 효율성임. 따라서 관련한 성능인증 제도는 현장 시공이 아닌 공장생산 기반의 인증제로 운영해야 함
- 이를 위해서는 “공장 단위의 인증(Factory Certification)” 제도를 병행 도입할 필요가 있음

[표 2-14] 목재외벽에 대한 국내외 요구성능 비교 및 개선방향

구 분	국내기준 특징	국외기준 특징	향후 개선방향
내 화 성 능	- 구조용 집성재 : 표준내화구조로 인정 - 경골목구조 : 현장인증·공장인증 반복시행	- 외벽시스템 단위 성능인정 - 표준상세나 외벽시스템에 대한 시험결과 재활용 가능	- 경골목구조 외벽에 대한 표준내화구조 체계 마련 - 외벽시스템 기반 인정체계 도입
내 풍 성 능	계산식 중심의 설계검토	실물시험 및 성능검증 병행	실물 내풍시험기준 신설(KS 등)
단 열 성 능	- 지역별 열관류율 기준만 존재 - 개별부재 중심의 평가체계	외벽시스템별 열관류율 인증	- 외벽시스템별 열관류율 DB 구축 - 외벽시스템 단위 인증체계 도입
기 밀 성 능	수치기준은 명확하지만 적용범위는 제한적	- 시공 및 품질관리 중심 - 건축물 전체 또는 Zone 단위 시험이 일반화	현장 기밀시험의 의무화 및 OSC 적용기준 마련
방 습 · 투 습	정성적 설계지침 중심	SD값 기반의 정량 관리	SD값 관리기준 도입 및 결로 시뮬레이션 의무화
구조안정성	접합부해석 위주 검토	접합부실험과 인증 병행	접합부 표준시험법 및 인증체계 마련
외벽마감재	- 재료등급(준불연) 중심 규제 - 개별 화재성능 중심의 판단	- 외벽시스템 단위 화재시험 - 외벽시스템 화재거동 평가	- 외벽시스템 단위의 화재안전성 인증체계 마련 - 재료중심 규제의 합리적 완화

3. 국내외 적용사례 분석

3.1. 목재OSC외벽의 개요

3.1.1. 기본개념

- 해외에서는 목재 외벽을 건축물의 주요 외피시스템으로 인식하고 있으며, 특히 OSC 기술 발전으로 목재 외벽은 구조적 안정성, 단열, 방습, 기밀 및 내화 성능을 통합한 고성능 외피시스템으로 진화하고 있음
- 목재 OSC 외벽은 공장에서 정밀하게 사전제작 후 현장 운송·조립되는 벽체로서 기후조건과 작업환경의 영향을 최소화하며 일정한 품질을 유지할 수 있음. 이로써 탄소저감, 공기단축, 시공안전성 향상 등 다방면의 장점을 제공함
- OSC 외벽시스템은 Panelized Modular Sytem(2D형) 및 Volumetric Modular Sytem(3D형)으로 대분되며, 해외에서는 건축 디자인의 다양성이 확보되고 운반 효율성이 높은 2D형을 공공건축·학교시설·공동주택 등에 폭넓게 적용하고 있음

3.1.2. 외벽시스템의 유형

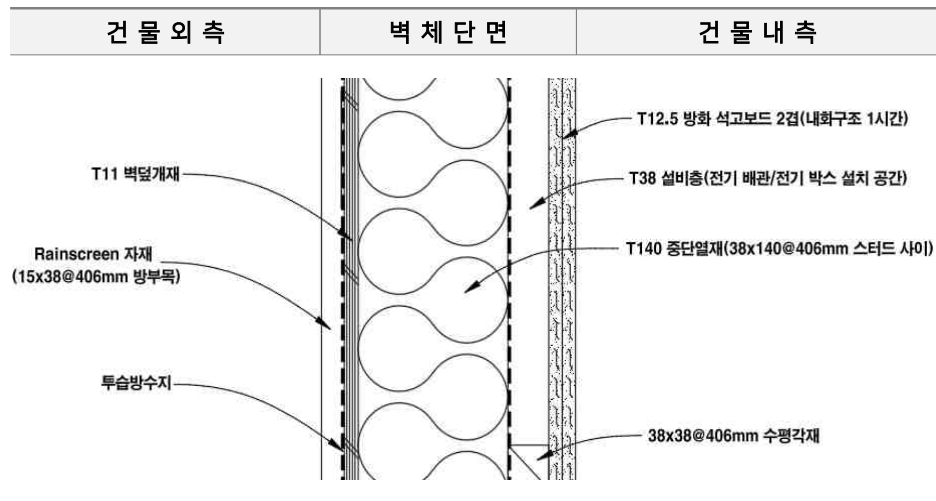
- ‘2D형 외벽 시스템’은 사전제작 수준에 따라 아래 표와 같이 2개 유형으로 구분됨. 유럽에서는 최근 RC 또는 CLT 구조체에 클로즈드 패널(Closed Panel)을 부착한 복합 시스템이 패널 단위의 교체 및 유지관리 용이성으로 적용이 확대되고 있음. 실무에서는 이를 “Panelized Hybrid Façade System”이라 칭함
- 클로즈드 패널은 최근 들어 고층 및 대형 목조건축에 가장 활발히 적용되고 있고 패시브하우스, 제로에너지 건축 등 고단열·고기밀 건물의 주요 외피 시스템으로 자리 잡고 있음

[표 2-15] 목재외벽 패널의 유형

구 분	개 요	특 징
Open Panel System	구조체와 OSB 등 일부 기본적인 구성만 공장에서 사전제작	경량, 운반 용이, 현장작업 유연성 높음
Closed Panel System	구조체, 단열, 창호, 전기설비까지 통합하여 공장에서 사전제작	품질 균일, 공기 단축, 기밀·단열 성능 우수

3.1.3. 구조 및 시공의 일반적 특징

- 목재 OSC 외벽은 일반적으로 다음과 같은 다층 구조로 구성
 - 구 조 층 : SPF, LVL, 집성재 등을 사용하며, OSB 또는 구조용 합판으로 전단강도 확보
 - 단 열 층 : 유리섬유, EPS, 스프레이폼 및 미네랄을 등 다양한 재료를 적용
 - 투습방수층 : 자착식 또는 일반형 투습방수지로 외부 빗물 침투 방지
 - 통기층 및 외장재 : 레인스크린 방식으로 배수·건조 기능을 확보



[그림 2-3] 경골목구조 기반 목재 OSC 외벽 패널의 기본 구성

- 시공은 대부분 공장제작 → 운반 → 크레인 양중 → 현장조립 순으로 이루어지며, 5층 이하에서는 비계(Scaffold)를 이용한 외부 설치가 가능하나, 6층 이상에서는 비계 없는 내부 고정식(Internal Fixing) 시공이 일반적
- 패널 간 접합부에는 EPDM gasket, sealing tape, airtight membrane 등을 사용해 기밀성과 방수성을 확보

3.2. 국내사례 검토

3.2.1. 개 요

- 국내에서는 경골목구조 기반 외벽체 시공이 주로 단독주택 및 소규모 공공건축을 중심으로 제한적으로 적용되어 왔음
- 본 연구에서는 사전 공장제작한 ‘오픈 패널(Open Panel)’ 및 목재 스티드+OSB를 현장에서 조립하는 ‘현장시공’ 방식으로 구분해 주요 사례를 정리함. 공식적으로 확인되지 않는 사례를 제외하고, 공장생산 오픈 패널 적용사례가 1건, 현장시공 방식은 3건으로 조사됨

3.2.2. 목재외벽 적용사례 (공장제작)

■ 성남 다가구주택 (3층, 연면적 414.46㎡)

- 본 프로젝트는 RC 라멘조 건물에 비내력 외벽을 경골목구조 오픈 패널로 적용한 사례임. 외벽 패널은 공장에서 사전 제작해 현장 반입 후 설치하였으며, 이를 통해 현장 작업량을 크게 줄이고 공기 단축 효과를 확인할 수 있었음
- 외벽 구성은 경골목구조 스티드, OSB 구조용 패널, 단열재, 방습·방수층을 포함한 전형적인 오픈 패널 방식으로 제작되었으며, RC 구조체와의 접합 디테일을 통해 혼합 구조(Hybrid system)의 가능성을 제시한 사례로 평가됨



[그림 2-4] 성남 목재외벽 오픈 패널 적용사례 (1)



[그림 2-5] 성남 목재외벽 오픈 패널 적용사례 (2)

3.2.3. 목재외벽 적용사례 (현장시공)

■ 천안 돌봄사회서비스센터 (4층, 연면적 1,482㎡)

- 이 프로젝트는 RC 라멘구조에 비내력 외벽으로 경골목구조 벽체를 적용하였음. 외벽 패널은 공장 제작되지 않고 전량 현장에서 조립함. 4층 건축물로 비교적 높은 규모임에도 경골목구조 외벽시스템이 적용 가능함을 보여준 사례임
- 특히, 스티드 세우기, OSB 시공, 방습·방수층 설치 등 모든 과정을 현장에서 직접 수행하여 공장 자동화 기반 OSC 적용의 한계와 미래 발전 방향을 확인하는 참고 사례라 할 수 있음



[그림 2-6] 천안 현장시공 목재외벽 적용사례 (1)



[그림 2-7] 천안 현장시공 목재외벽 적용사례 (2)

■ 청담 공동체주택 (5층, 연면적 536.56㎡)

- 이 프로젝트는 RC구조 건물의 비내력 외벽에 경골목구조 벽체를 현장에서 직접 제작하여 적용한 사례로, 국내 중·소규모 공동주택에서 경골목구조 외벽시스템의 실증적 가능성을 보여준 대표적인 현장시공 사례임
- 현장에서는 스티드 조립, 구조용 OSB 설치, 단열재 충전 및 방습·방수층 시공 등 전체 벽 골조 작업을 현장에서 수행하였음. 이는 공장제작 오픈 패널과 달리, 현장 여건 및 작업자의 숙련도에 따라 시공 품질이 크게 좌우되는 국내 현실을 반영한 방식이며 도심 내 협소 대지에서의 시공성 검증 측면에서 의미가 큰 사례임



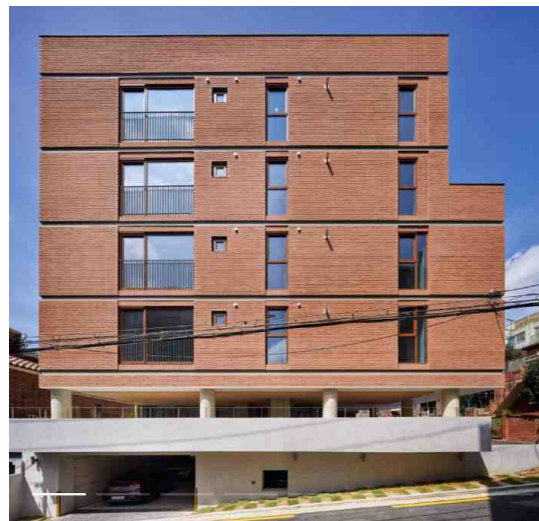
[그림 2-8] 청담 현장시공 목재외벽 적용사례 (1)



[그림 2-9] 청담 현장시공 목재외벽 적용사례 (2)

■ 수유 사회주택 (5층, 연면적 769㎡)

- 수유동 사회주택(‘나무벽집’)은 서울 소재 소형 공동주택으로, 사회주택의 목적에 맞추어 장기 임대형 주거복지 공간으로 계획된 프로젝트임. 지하 1층, 지상 5층, 대지면적 318㎡, 연면적 769㎡으로, RC 구조에 우드월(Wood-Wall) 시스템을 비내력 외벽으로 적용한 사례임



[그림 2-10] 수유 현장시공 목재외벽 적용사례 (1)



[그림 2-11] [※] 현장시공 목재외벽 적용사례 (2)

- 적용된 우드월 시스템은 경골목구조로 구성되었으며, 현장 여건에 맞춰 전 과정을 현장에서 제작·조립한 방식임
- 경골목구조는 도시 주거에서 요구하는 단열성능, 친환경성 및 시공성을 충족할 수 있어 공기단축 및 작업성 향상에 유리하며, 사회주택과 같이 상대적으로 자금과 시간에 제약이 있는 프로젝트에 적합한 시스템으로 알려져 있음
- 특히 기존 RC 중심의 외벽에 목재를 더함으로써 도심 다층 주택에서도 목조건축 기술의 적용 가능성을 보여준 대표적인 국내 사례로 평가됨
- 이 프로젝트는 사회적 주거 공간으로서 입주자 간 교류를 촉진하는 공간을 갖추고 있으며, 목재요소 도입으로 단순한 거주 기능을 넘어 공용 공간을 통한 커뮤니티 활성화에도 초점을 둔 사례임

3.3. 국외사례 검토

3.3.1. 개 요

- 북미, 유럽은 목재 건축의 역사와 산업 인프라가 잘 구축된 지역으로, 패넬라이징 기반의 OSC 외벽시스템을 이미 실용화 단계에서 운영하고 있음
- 특히 기후적 다양성과 에너지성능 규제 강화에 따라, 각국은 건식 조립식 외벽 기술을 현지 여건에 맞게 발전시켜 왔음
- 이 절에서는 지역별로 대표적인 중저층(5층 이하) 건식 외벽시스템 및 고층(6층 이상) 클로즈드 패넬 시스템의 사례를 중심으로 기술의 흐름을 검토함

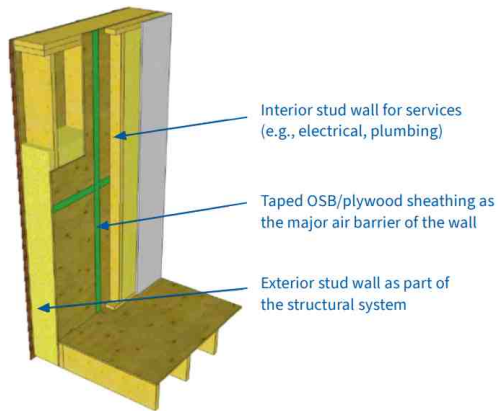
3.3.2. 북미지역 (캐나다, 미국)

(1) Vienna House (2025년 준공, BC주, 캐나다)

용 도	공동주택_임대 (Rental Apartment Community)	층 수 연 면 적	지상 7층 13,039 m ²
유닛구성	총 123 세대	단위유닛	면적범위 : 85 ~ 90 m ² (스튜디오 35m ² , 4룸 110m ²)
구조형식	Mass timber + Light Wood Frame (경량목구조) Hybrid - CLT Floor & Roof Panels - 경량목구조 외벽 및 내벽 - 하부 콘크리트 기초 (매스팀버 포디움 없음)		
참여업체	- 건축 : PUBLIC Architecture + Communication - 구조 : Wicke Herfst Maver Consulting Engineers - 외피설계 : Morrison Hershfield - 패시브하우스 컨설팅 : Steven Winter Associates / Introba - 시공 : Kindred Construction Ltd. - 패널제작 : TAG panles (총 1,638개 패널 공급)		
특이사항	- 캐나다 BC 주 정부 (British Columbia Housing Corporation)가 주도하고, 밴쿠버시 등이 협력하여 추진한 고성능·저탄소주택 실증사업 (Demonstration Project for Mass Timber and Passive House Housing)으로 공공자금으로 R&D·실증·사회주택을 결합한 목재OSC 데모프로젝트 - 외벽패널은 외장·창호·기밀층까지 완성된 클로즈드 패널 (Closed Panel) 형태로 공장제작 • 기밀성능 확보를 위해 실내측 구조용 OSB 조인트에 테이핑 처리 • 통기형 레인스크린 시스템 (ventilated cavity 25~40mm) + 내후성 외장재 • 패널간 수직접합 : 목재 맞댐형 조인트 + 금속 브래킷 체결 (볼트, 스크류) • 패널간 수평접합 : Simpson strongtie LTP4 철물 사용 • 패널간 접합부의 방수성능 : RAIN Chamber Test (비산수시험)으로 사전 검증 • 층간 수평접합 (바닥-벽 연결) : CLT 슬래브 상부에 금속 커넥터 삽입, 나사형 앵커로 외벽패널 체결		
전 경			

자료 : BC Housing

○ Vienna House의 외벽체 구성은 아래 그림과 같음.



실 내 측

- 16mm 방화 석고보드
- 89mm 구조재 사이 암면 단열재 (Rock wool)
- 15mm 구조용 OSB (이음부 기밀층을 위한 테이핑 처리)
- 235mm 구조재 사이 분사형 단열재 (Blown insulation)
- 13mm 구조용 합판
- 투습방수지
- 16mm 방부목 레인스크린 시스템
- 16mm Fiber Cement Cladding Panel 마감 (실외측)

[그림 2-12] Vienna House 외벽 패널 구성 (자료 : BC Housing)



[그림 2-13] 오픈 패널 제작 전경 (자료 : TAG Panels)



[그림 2-14] 클로즈드 패널 제작 전경 (자료 : TAG Panels)



[그림 2-15] 현장 패널양중 전경 (자료 : Naturally)



[그림 2-16] 현장 패널설치 전경 (자료 : Naturally)



[그림 2-17] 현장 패널조립 전경 (자료 : Naturally)

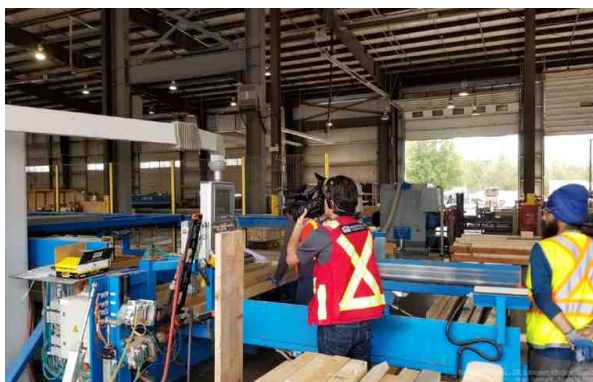


[그림 2-18] CLT바닥 양중 전경 (자료 : Naturally)

(2) 330 Goldstream Avenue (2021년 준공, BC주, 캐나다)

용도	공동주택_임대 (Affordable Rental Projects)	층수 연면적	지상 6층 6,121 m ²
유닛구성	총 102 세대 (스튜디오 50, 원룸 39, 2룸 1, 3룸 12 세대)	단위유닛	면적범위 : 약 60 m ² (3룸 기준)
구조형식	경량목구조 (Light Wood Frame)		
참여업체	- 건축 : Cascadia Architects - 구조 : RJC Engineers - 외피 / 기밀 / 에너지 컨설턴트 : RDH Building Science - 엔지니어링 (MEP) : Williams Engineering (전기 · 기계) - 일반시공 : Kinetic Construction - 패널제작 : ZyTech Building Systems - 패널설치 : Ron Anderson & Sons Ltd. - 외피시공 (레인스크린 / 마감) : Brytar Contracting		
특이사항	- 외벽패널은 경량골조 패널 형태로 공장제작 (prefabricated light wood-frame panels) - 외벽패널의 단면 (공식발표된 단면) : 약 300mm 두께 · 구조 프레임 내부에 batt insulation (약 89mm) 설치 · 구조 외면에는 12mm 판넬 (plywood sheathing) + sheathing membrane (air/vapor/moisture barrier) · 구조 외측에는 150mm 미네랄울 단열재를 별도 클립구조로 외부 부착 · 외장 마감은 레인스크린 클라딩 시스템 적용 · 기밀막 (air barrier membrane) 사전 적용 (pre-applied)		
전경			

자료 : Naturally



[그림 2-19] 공장 패널제작 전경 (자료 : Scius)



[그림 2-20] 투습방수지 부착 전경 (자료 : Scius)



[그림 2-21] 현장 패널시공 전경 (자료 : Scius)

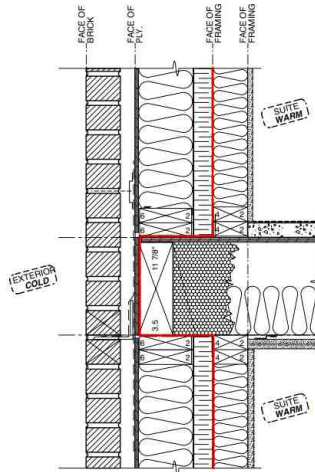


[그림 2-22] 골조조립 완료 전경 (자료 : BC Housing)

(3) The Heights (2018년 준공, BC주, 캐나다)

용도	공동주택_임대 (Market Rental)	층수 연면적	지상 6층 약 5,600 m ²
유닛구성	총 85 세대	단위유닛	면적범위 : 약 65.9 m ²
구조형식	경량목구조 + 콘크리트 포디움 하이브리드		
참여업체	- 건축 : Cornerstone Architecture - 구조 : Weiler Smith Bowers Consulting - C M : Peak Construction		
특이사항	- 캐나다 최대 규모의 패시브하우스 인증건물 중 하나 • 고도의 단열 및 기밀 설계로 난방에너지를 일반건물 대비 약 80 ~ 90% 절감하도록 설계 • 초고효율 3중창 및 24시간 공기순환 시스템 (HRV) 적용 - 외벽패널은 경량목구조 골조로만 구성된 오픈 패널 (Open panel) 구성 • 경량목구조 외벽패널 + 외단열 / 통기 레인스크린 시스템 조합		
전경			

자료 : Naturally



[그림 2-23] 층간부분 외벽단면 구성
(자료 : Passivehouse Canada)

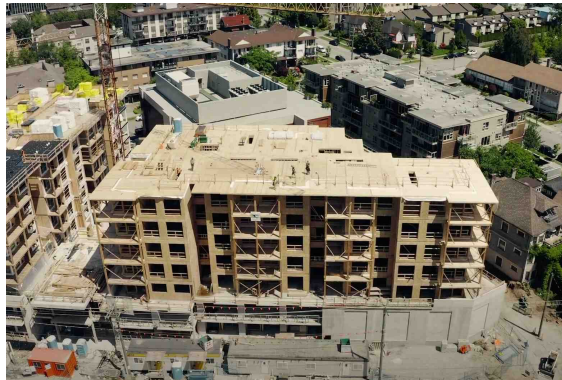


[그림 2-24] 투습방수지 시공 전경
(자료 : Passivehouse Canada)

(4) Crest (2021년 준공, BC주, 캐나다)

용도	공동주택_임대·분양 (Condos, Residential)	층수 연면적	지상 6층 15,124 m ²
유닛구성	총 178 세대 (Condominium 160, Town house 18)	단위유닛	면적범위 : 약 52 ~ 120 m ²
구조형식	Mass timber + Light Wood Frame (경량목구조) Hybrid		
참여업체	- 건축 : Integra Architecture Inc. - 구조 : London Mah & Associates Limited - 개발자 / 소유자 : Adera - 일반 시공자 : Adera (Developer as GC) - 패널제작 / 공급 : Mercer Mass Timber LLC		
특이사항	- 외벽패널은 경량목구조 골조로만 구성된 오픈 패널 (Open panel) 구성 - CLT 벽체 어셈블리 (fire wall 역할 포함) 설계 - 패시브하우스 수준은 아니지만, BC 주의 에너지 스텝 코드 Step 3 기준 만족		
전경			

자료 : Naturally



[그림 2-25] Crest 골조시공 전경 (자료 : Adera)

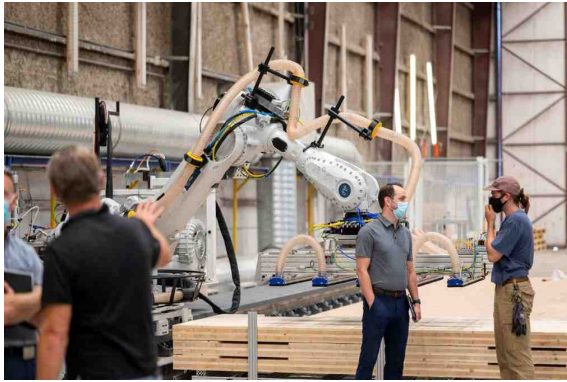


[그림 2-26] Crest CLT 바닥시공 전경 (자료 : Adera)

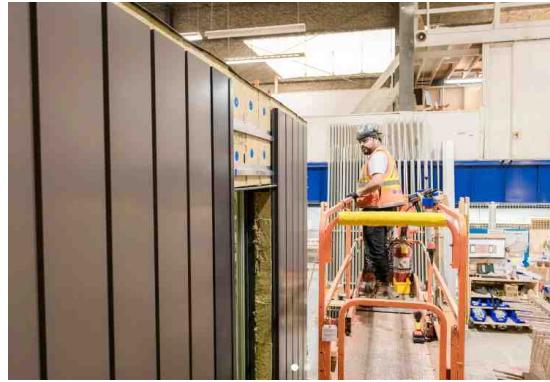
(5) Hälsa (2026년 준공예정, Ontario주, 캐나다)

용도	공동주택 _ 임대·분양	층수 연면적	지상 9층 약 5,500 m ²
유닛구성	총 65 세대 (60 Rental Homes)	단위유닛	면적범위 : 약 92 m ²
구조형식	Mass Timber + RC Hybrid (RC코어 + 중목구조 + 외벽 CLT 패널)		
참여업체	- 건축 : LWPAC Architects (Lang Wilson Practice in Architecture Culture) - 구조 : Moses Structural Engineers - 외피 : RDH Building Science - 개발·시행 : Windmill Developments + Leader Lane Developments - 시공·건축자재 : Intelligent City (구조 및 외피시스템 공급/설치)		
특이사항	- Ontario 주에서 가장 높은 프리패프 목조 주거단지 중 하나 • “One Planet Living” 가이드 라인을 따르며 LEED Platinum 인증과 패시브 하우스 (passive house) 수준의 에너지효율 확보가 목표 • 지열에너지 시스템 도입으로 탄소배출 제로 (Zero Emissions) 운영을 지향 • 로봇 및 AI 기술을 활용한 공장제작 방식을 통해 건설기간을 3 ~ 4개월 단축 - 패널화된 CLT 외벽시스템 적용 → 외장·단열·기밀층 일체형으로, 현장 비계없이 조립 가능 • 패널간 수직접합 : 패널간 실리콘 개스킷 + 멤브레인 겹침 + Z-바 및 스크류 체결로 기밀성능 확보 • 패널간 수평접합 : 상·하부 슬래브 또는 플로어 카세트와 강철 앵커 (anchor details)로 체결, 설치 전 슬래브 엣지에 가스켓·커브 (Curb) 준비 → 패널하부 고정 후 볼트 체결 • 모서리·코너접합 : L-shape Envelope Panel 제작으로 내·외부 코너 일체화 (현장절단 불필요) • 기밀·방수처리 : 공장시공된 멤브레인 + 현장 테이핑·실란트 보강. 조인트는 수직·수평 모두 겹침시공		
전경			

자료 : Intelligent City



[그림 2-27] Halsä CLT 클로즈드 패널 로봇가공 전경
(자료 : Intelligent City)



[그림 2-28] Halsä CLT 클로즈드 패널 마감재 시공
(자료 : Intelligent City)



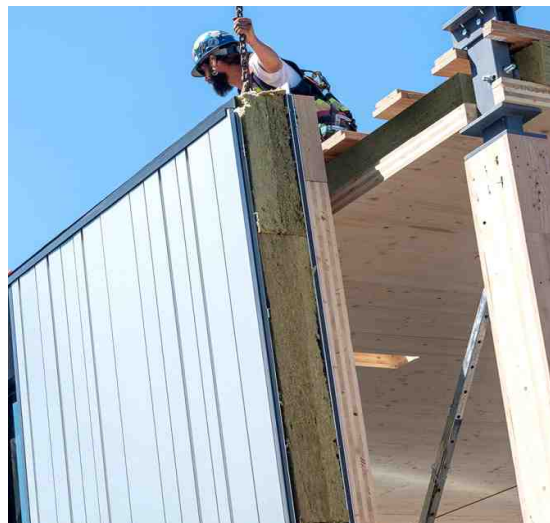
[그림 2-29] Halsä CLT 클로즈드 패널 단열재·창호시공
(자료 : Intelligent City)



[그림 2-30] Halsä CLT 클로즈드 패널 현장양중 (1)
(자료 : Intelligent City)



[그림 2-31] Halsä CLT 클로즈드 패널 현장양중 (2)
(자료 : Intelligent City)



[그림 2-32] Halsä CLT 클로즈드 패널접합 시공
(자료 : Intelligent City)

3.3.3. 유럽지역

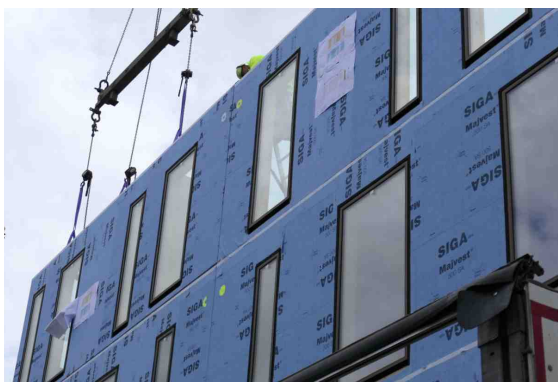
(1) Østerbrogade 190 (2026년 준공예정, 코펜하겐, 덴마크)

용도	기숙사_학생전용 (Rental Resinace House)	층수 연면적	지상 6층 약 1,700 m ²
유닛구성	총 20 세대 + 카페 (1층)	단위유닛	면적범위 : 30 ~ 42 m ² 원룸형 (14) + 투룸형 (6)
구조형식	- 5개 층 : GLT Frame + PC Slab + 경량목구조 (Light Wood Frame) - 1개 층 : 콘크리트 포디움 / 베이스		
참여업체	- 건축 : Vilhelm Lauritzen Architects - 설계·시공 : Ramboll & Aspect Structural Engineers - 건설업체 : LÖFTE Property Development - 목재패널 벽체 공급 : Hasslacher Group		
특이사항	- 덴마크 최초로 CREE 시스템을 도입하여 건설하는 건축물 - 이 시스템은 오스트리아 CREE사에서 개발한 목재와 콘크리트를 결합한 Hybrid 시스템으로서 기둥과 보에는 GLT를 사용하고 바닥 슬래브는 얇은 PC를 결합한 모듈식 시스템으로 화재 안전성, 소음 차단, 구조 안정성 등을 확보가능 - 구체적으로는 GLT 골조에 강재 커넥터, 파사드 멤브레인, 창호 등을 모두 설치하는 방식이며 건축계획 시에 콘크리트와 강재 보강요소를 함께 사용가능하도록 설계 (최대 30층까지 확장 가능) • PC slabs : 각층 바닥 구조체로 사용 • Steel connectors : 목재와 콘크리트 연결을 위한 금속 접합부 • Prefabricated timber wall panels : 비내력 외벽 및 내벽체용 • 외벽패널 시스템 : 공장제작된 클로즈드 패널 (Closed Panel) 적용		
전경			

자료 : Vilhelm Lauritzen



[그림 2-33] Østerbrogade 패널 양중 (자료 : CREE)



[그림 2-34] Østerbrogade 패널 조립 (자료 : Hasslacher)



[그림 2-35] Østerbrogade 패널 조립·보강 (자료 : Hasslacher)



[그림 2-36] Østerbrogade 골조 시공 (자료 : kraer)

(2) Life-Cycle Tower ONE (2012년 준공, Dornbirn, 오스트리아)

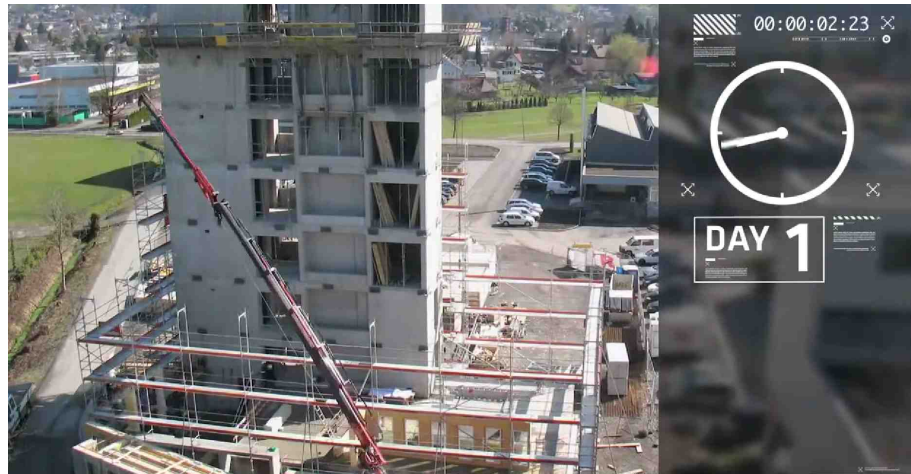
용도	오피스_임대	층수 연면적	지상 8층 (27m) 1,765 m ² (Usable Floor Space)
유닛구성	-	단위유닛	면적범위 : 100 ~ 1,600 m ²
구조형식	Hybrid Post-and-Slab 구조 - GLT 보 + GLT 기둥 + PC 슬래브 - 경량목구조 (Light Wood Frame) 벽체		
참여업체	- 건축 : Hermann Kaufmann ZT GmbH - 구조 : CREE GmbH / Rhomberg Group		
특이사항	- 오스트리아 정부의 "House of the Future Program" 실증 프로젝트 (Demonstration Building) • 8개 층 건물외벽 조립기간 : 8일 소요 - 외벽패널은 재생 금속패널 마감 + 노출 목구조 + 3중 유리창 (triple glazing) • 패널구성 방식 : 외장재 (재생 금속패널) + 통기층 + 투습방수막 + 목재 프레임 단열층 + CLT 또는 OSB 보강 + 내장 석고보드 마감 • 패널접합 방식 : GLT 기둥과 외벽패널 볼트 체결 + 패널간 Z-bar 연결 + 기밀 멤브레인 겹침처리 • 패널접합 재료 : 스테인리스 앵커볼트, EPDM 가스켓, 멤브레인 테이프, 실란트, 압축 단열패드 - LEED 플래티넘 및 패시브 하우스 표준 인증 획득 • 천장패널은 통합 냉난방 시스템 적용 • 바닥패널은 공동공간 방음형 (Cavity Floor System) 적용 • 패시브하우스 기준 (열회수 환기시스템, 자동 CO₂ 제어 환기)		
전경	 자료 : CREE  자료 : CREE		



[그림 2-37] LCT one 패널 사전제작 전경 (자료 : CREE)



[그림 2-38] LCT one 패널 현장 양중 및 조립 (자료: CREE)



[그림 2-39] LCT one 골조조립 타임랩스 시작 1일차 (자료: CREE)



[그림 2-40] LCT one 골조조립 타임랩스 완료 8일차 (자료: CREE)

(3) De Doktoren (2022년 준공, Antwerpen, 벨기에)

용도	주상복합 _ 임대 (Mixed-use, 주상복합 아파트)	층수 연면적	지상 22층 (81m) 약 10,248 m ² (GFA)
유닛구성	총 154 세대 (고층타워 : 주거용 + 지상1층 : 상업공간)	단위유닛	면적범위 : 45 ~ 150 m ² (1~2 베드룸 아파트 + 펜트하우스)
구조형식	- 골조는 RC조 - 외벽은 프리패브 목조 프레임 (Facade Timber Frame) 적용 - 패널은 알루미늄 마감재료와 결합 (외장 알루미늄 패널 외피)		
참여업체	- 건축 : Binst Architects - 구조 : Boydens Engineering - 시공 : BAM Interbuild - 외벽패널 : Machiels Building Solutions (목조 프레임 패널 제작설치)		
특이사항	- 목조 프레임 패널은 공장에서 완성된 상태로 제작되어 현장 반입 - 외벽패널의 길이를 3 ~ 10m 범위로 다양하게 제작 (모듈화에 대응) - 알루미늄 외장 패널로 마감 (목조 프레임 패널 + 금속 외장 결합) - 현장에서는 전체 건물 스캐폴딩 없이 Just-in-Time 방식으로 패널 납품·설치 - 동쪽측면의 11층 이상에는 상부 돌출 구조물의 지지를 위해 보조 가설구조 사용(support scaffolding) - 외벽패널 구성 : 외장마감 (금속패널) + 통기층 (30mm) + 투습 방수막 + 목조 스테드 (140mm + 단열재 충전) + OSB 보강 + 석고보드 또는 내장마감 - 패널접합 방식 • 수직방향 접합 : 금속 브래킷 및 볼트 체결 + 기밀테이프 겹침 시공 • 수평방향 접합 : 슬래브 엣지 앵커 + 단열재 열교차단 패드 삽입 • 코너부의 접합 : L-형 패널 사전제작 후 현장체결 • 패널접합 재료 : 스테인리스 브래킷, 앵커볼트, EPDM 가스켓, 멤브레인 테이프, 실란트, 압축 단열패드		
전경			

자료 : MBS



[그림 2-41] Doktoren 클로즈드 패널 창호 자동설치 전경 (자료 : MBS)



[그림 2-42] Doktoren 클로즈드 패널 현장 양중과 조립 전경 (자료 : MBS)



[그림 2-43] Doktoren 패널 고정용 앵글 브라켓 설치 전경 (자료 : MBS)

(4) The Fizz Utrecht (2021년 준공, Overvecht, 네덜란드)

용도	기숙사 _ 학생전용 (Student Housing)	층수 연면적	지상 16층 (49.5m) 약 26,500 m ² (GFA)
유닛구성	총 639 세대 (스튜디오 유닛 + 1층 상업공간)	단위유닛	유닛당 면적 : 약 21 m ²
구조형식	- 골조는 RC조 (RC-frame) - 외벽은 프리패브 목조 프레임 (Prefabricated Timber-frame Façade System) 적용		
참여업체	- 건축 : Team V Architecture - 구조 : Van Rossum Raadgevende Ingenieurs - 시공 : Van Wijnen - 외벽패널 : Machiels Building Solutions (MBS)		
특이사항	- 목조 프레임 외벽패널 시스템 (Timber-frame Façade Elements) 적용 • 총 12,000 m² 외벽패널 공장제작 후 현장조립 • 대규모 학생형 공동주택에 목재OSC 외벽을 적용한 대표적 고층 실증사례 - 외벽패널은 창호·단열·방수·외장마감이 사전완료된 상태로 납품되어, 외벽의 설치속도 향상 및 도심내 협소부지에 효과적으로 대응 • 외벽패널 구성 : 외장마감 (금속·합성패널) + 통기층 (30mm) + 투습방수막 + 구조목 프레임 (140mm, 단열재 충전) + OSB 구조판 + 석고보드 또는 내장마감 • 수직방향 접합 : 금속 브래킷 및 볼트 체결 + 기밀테이프 겹침 시공 • 수평방향 접합 : 슬래브 엣지 앵커 + 단열재 열교차단 패드 삽입 • 코너부의 접합 : L-형 패널 사전제작 후 현장체결 • 패널접합 재료 : 스테인리스 브래킷, 앵커볼트, EPDM 가스켓, 멤브레인 테이프, 실란트, 압축 단열패드		
전경			

자료 : MBS

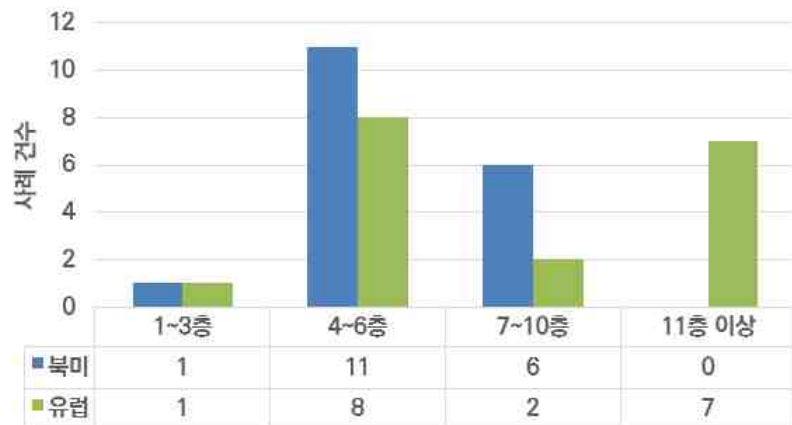
(5) Paju 2 Bürohoone (2020년 준공, Tänav 2, 에스토니아)

용도	오피스_임대 (Office Building)	층수 연면적	지상 16층 (55m) 9,059 m ² (사무동) + 5,889m ² (주차동, 3층 규모)
유닛구성	사무실 임대공간 (임대인의 요구에 따라 유연) + 주차장 (250대 규모) + 편의시설	단위유닛	-
구조형식	- RC구조 + 목재 하이브리드 (주요 골조는 RC, 내부 및 외피 일부의 목재 적용)		
참여업체	- 건축 : Allianss Arhitektid OÜ - 구조 : Ehitustrust / TalTech 협업 - 시공·발주 : Ehitustrust AS		
특이사항	- 외피의 일부에 목재 적용 + 고단열 창호 및 에너지 효율형 환기시스템 • 남향 파사드는 유리 커튼월, 북향은 단열복합 패널 마감 • 패널접합 방식 : 패널을 RC 슬래브에 메탈 앵커 및 브래킷으로 고정 • 패널접합 재료 : 스테인리스 앵커, EPDM 가스켓, 실란트, 열교차단 플레이트 - 에스토니아 최초 대형 친환경 오피스 중 하나 ("Wooden Office Building" 콘셉트 적용) • Tartu 시 친환경 건축 시범사업 (Near Zero Energy Pilot) 선정 • LEED Gold 예비 인증 (예상점수 79점) 및 Tartu Green City Plan 시범사업 연계		
전경			

자료 : Ehitustrust

3.3.4. 국외사례 분석

- 본 연구에서 검토한 목재 OSC 외벽 적용 국외사례는 총 36개로, 본문에서 언급한 10개 사례 이외의 내용은 부록에 첨부하였다. 분석 결과, 북미와 유럽 모두에서 4~6층 규모의 중저층 건축물에 적용된 사례가 가장 많은 것으로 나타났다.
- 북미지역에서는 4~6층 사례가 11건으로 가장 많았고, 7~10층 사례도 6건으로 확인되어 중층 규모까지의 적용 사례가 일정 수준 축적되어 있음을 확인하였다.
- 유럽 지역에서도 4~6층 사례가 8건으로 다수를 차지하였으나, 11층 이상의 고층 사례가 7건으로 비교적 많이 분포하고 있어, 유럽에서는 중·고층 건축물까지 목재 기반 OSC 외벽 적용이 확대되고 있는 경향을 보인다.
- 이는 목재 OSC 외벽이 저층 건축물에 국한되지 않고, 중층 이상의 공동주택까지 적용범위를 확장하고 있음을 시사한다.



[그림 2-44] 국외 적용사례의 층수별 분포

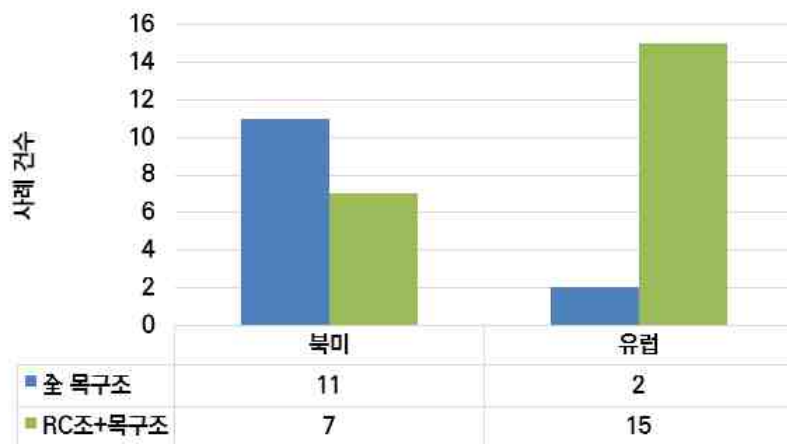
- 외벽 패널 유형을 지역별로 분석한 결과, 북미와 유럽 간 패널 적용 전략에 뚜렷한 차이가 나타난다. 북미 지역에서는 Open panel 방식이 17건으로 대부분을 차지하고 있으며, Closed panel 방식은 1건에 불과한 것으로 나타남. 이는 현장 시공 중심의 공법과 유연한 설계 대응을 중시하는 북미 건설 환경의 특성이 반영된 결과로 판단된다.
- 반면, 유럽 지역에서는 Closed panel 방식이 15건으로 압도적인 비중을 차지하고 있으며, Open panel 방식은 3건에 그친다.

- 이러한 결과는 유럽 지역에서 공장 제작 비중을 높여 품질 균질성, 기밀 성능, 시공 안정성을 확보하려는 경향이 강함을 보여주며, 파사드 시스템(facade system) 또는 파사드 요소(facade element)라고 불리는 중·고층 건축물 적용을 전제로 한 고도화된 OSC 외벽 시스템이 정착되고 있음을 시사한다.



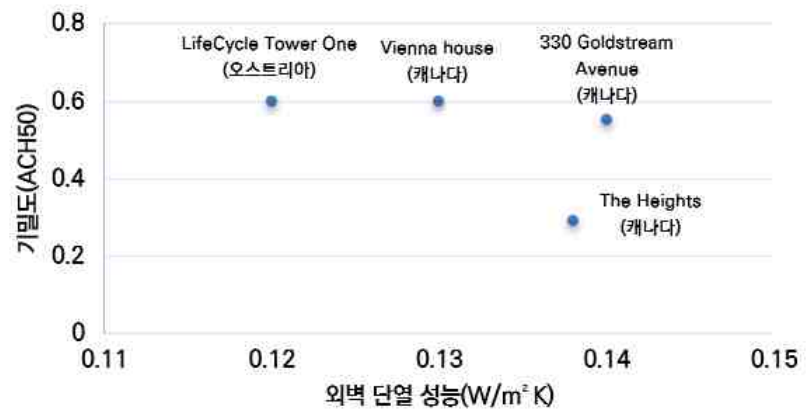
[그림 2-45] 국외 적용사례의 패널유형별 분포

- 국외 사례의 주요 구조 형식을 분석한 결과, 북미 지역에서는 순수 목구조(경골목 구조 등)가 11건으로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, RC 구조와 목재 OSC 외벽을 결합한 사례도 7건으로 나타난다.
- 반면, 유럽 지역에서는 RC 구조와 목재 OSC 외벽을 결합한 사례가 15건으로 대다수를 차지하고 있으며, 순수 목구조 사례는 2건에 불과하다.



[그림 2-46] 국외 적용사례의 구조형식별 분포

- 이는 유럽 지역에서 목재 OSC 외벽이 기존 RC 구조 시스템을 보완·대체하는 외피 시스템으로 활용되는 경향이 강함을 의미하며, 구조 안전성 및 내화 성능에 대한 요구가 높은 중·고층 공동주택 시장에서 RC + 목재 외벽 하이브리드 구조가 현실적인 대안으로 자리 잡고 있음을 시사한다.
- 전체 36개 사례에 대한 외벽 단열 성능과 기밀도 값을 모두 조사할 수는 없었으나, 일부 자료가 공개된 사례들을 정리하면 아래 그림과 같다.



[그림 2-47] 국외 적용사례의 단열성능 및 기밀도 분포

- 외벽의 단열성능(U-value)과 기밀성능(ACH50)의 관계를 분석한 결과, 전반적으로 우수한 단열 성능과 낮은 기밀도 값이 동시에 확보되고 있음을 확인하였다.
- 대상 사례의 외벽 열관류율은 약 0.12~0.14 W/m²·K 범위로 나타났으며, 이는 국내 공동주택 외벽 단열 기준을 충분히 상회하는 수준이다.
- 기밀성능도 ACH50 기준 약 0.3~0.6 수준으로, 고기밀 주택기준에 부합하거나 그 이상을 만족하는 사례가 다수 확인되었다. 특히, 공장제작 비중이 높은 사례일수록 기밀 성능이 안정적으로 확보되는 경향을 보이며, 이는 OSC 외벽 시스템이 현장시공 편차를 최소화하고 성능의 재현성을 확보하는 데 효과적임을 시사한다.

[표 2-16] 목재외벽 적용 국외사례 개관 (북미지역)

	유 형	국 가	도 시	건축물명	층 수	연면적	세 대	건축시스템		외벽패널		주거성능		준 공
								골 조 유형	목재의 골조구성	패 널 유형	구 조	단 열	기 밀	
1		캐 나 다	켄 싱 턴	Vienna House	7	13,039	123	All Timber	경목·CLT	Open panel	경골목	0.13	0.60	2025
2		캐 나 다	콜 우 드	330 Goldstream Avenue	6	6,121	102	All Timber	경목	Open panel	경골목	0.14	0.55	2021
3		캐 나 다	밴 쿠 버	The Heights	6	5,600	85	All Timber	경목	Open panel	경골목	0.138	0.29	2018
4		캐 나 다	밴 쿠 버	Crest	6	15,124	178	All Timber	경목·CLT	Open panel	경골목	-	-	2021
5		캐 나 다	리 치 몬 드	Remy Project	6	-	107	All Timber	경목	Open panel	경골목	-	-	2013
6		캐 나 다	토 론 토	Hälsa	9	5,500	60	RC Hybrid	중목·CLT	Closed panel	CLT	-	-	2026
7	공동주택	미 국	사크라멘토	1430 Q Apartments	8	15,116	73	RC Hybrid	경목	Open panel	경골목	-	-	2020
8		미 국	애틀랜타	Bell Terminus Apartments	8	25,550	355	RC Hybrid	경목	Open panel	경골목	-	-	2014
9		미 국	시애틀	Marselle	8	14,864	132	RC Hybrid	경목	Open panel	경골목	-	-	2009
10		미 국	쇼어라인	The Postmark Apartments	5	18,580	243	RC Hybrid	CLT·경목	Open panel	경골목	-	-	2020
11		미 국	덴버	Cirrus	7	26,640	292	RC Hybrid	CLT·경목	Open panel	경골목	-	-	2022
12		미 국	잭슨빌	Brooklyn Riverside Apartments	4	24,140	310	All Timber	경목	Open panel	경골목	-	-	2015
13		미 국	포틀랜드	The Canyons Apartments	6	10,219	70	All Timber	경목·CLT	Open panel	경골목	-	-	2020
14		미 국	오클랜드	Project One	4	1,579	9	All Timber	GLT·MPP·경목	Open panel	경골목	-	-	2021
15	주상복합	미 국	웨스트디모인	Junction Lofts	3	1,486	11	All Timber	GLT·MPP·경목	Open panel	경골목	-	-	2023
16		미 국	오스틴	The Duke	4	4,167	34	All Timber	CLT·GLT·경목	Open panel	경골목	-	-	2021
17		미 국	시우폴스	Railyard Flats	4	5,760	41	All Timber	CLT·GLT·경목	Open panel	경골목	-	-	2021
18	호텔	미 국	오스틴	Hotel Magdalena	4	4,336	89	RC Hybrid	CLT·DLT·경목	Open panel	경골목	-	-	2021

[표 2-17] 목재외벽 적용 국외사례 개관 (유럽지역)

	유 형	국 가	도 시	건 축 물 명	층 수	연면적	세 대	건 축 시 스템		외 벽 패 널		주 거 성 능		준 공
								골 조 유 형	목재의 골조구성	패 널 유 형	구 조	단 열	기 밀	
19	공동주택	영 국	런 던	Stadthaus	9	2,890	29	All Timber	CLT	Open panel	CLT	-	-	2009
20		에스토니아	타 르 투	Siili Apartment Building	6	-	-	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2014
21		노 르 웨 이	스타방에르	Lervig Brygge	18	21,000	200	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	0.41	2019
22		노 르 웨 이	보 도	The Bodø 360 Building	14	15,000	58	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2019
23		스 웨 덴	크니브스타	Knivsta Apartment Building	5	5,350	124	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2021
24		포 르 투 갈	기마랑이스	The First	5	2,000	22	PC Hybrid	경목·중목	Closed panel	경골목	-	-	2023
25		벨 기 에	앤 트 워 프	Groen Zuid Residential Care Homes	11	-	118	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2015
26		벨 기 에	앤 트 워 프	Renovation of Social Housing Block	16	-	129	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2022
27	주상복합	벨 기 에	앤 트 워 프	De Doktoren	22	10,248	154	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2022
28	기 숙 사	벨 기 에	뢰 번	Studentenhuisvesting Renosale	5	-	30	All Timber	경목	Closed panel	경골목	-	-	2016
29		네 덜 란 드	위트레흐트	The Fizz Utrecht	16	25,000	639	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2020
30		덴 마 크	코 펜 하 겐	Østerbrogade 190	6	1,700	20	RC Hybrid	경목·중목	Closed panel	경골목	-	-	2026
31		포 르 투 갈	베 자	Residência Universitária Beja	5	11,000	261	PC Hybrid	중목	Closed panel (PC+GLT)		-	-	2024
32		포 르 투 갈	발 렌 사	Residência Universitária Norte	3	1,200	32	PC Hybrid	중목	Closed panel (PC+GLT)		-	-	2025
33	호 텔	에스토니아	타 르 투	Hugo Stay Hostel	6	-	50	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2019
34	오 피 스	에스토니아	Paju tanav	Paju 2 Bürohoone	16	9,059	-	RC Hybrid	경목	Closed panel	경골목	-	-	2020
35		오스트리아	도 른 비 른	Life-Cycle Tower ONE	8	1,765	-	RC Hybrid	경목·중목	Closed panel	경골목	0.12	0.60	2012
36		벨 기 에	브 뤼 셀	Wood Hub	6	7,300	-	RC Hybrid	경목·중목	Closed panel	경골목	-	-	2023

3.4. 국내 적용 가능성 검토

3.4.1. 해외 사례의 기술적 특성

- 해외의 목재 OSC 외벽 적용사례를 분석한 결과, 북미보다는 유럽 지역에서 국내 적용 가능성이 높은 기술적 특성이 두드러졌음.
- 북미의 목조건축은 대부분 구조체 자체가 경골목구조(Light Wood Frame)로 구성되는 반면, 유럽의 사례들은 구조체를 철근콘크리트(RC) 또는 하이브리드 구조로 두고, 외피를 목재 기반 패널로 구성하는 비내력형 목재 외벽(façade panel system) 방식을 중심으로 발전하였음.
- 이러한 유럽식 접근은 구조체의 주요 하중을 콘크리트가 담당하고, 외벽은 단열·기밀·방수 성능을 통합한 조립식 목재 패널로 구성되어 있어, 한국의 RC 또는 PC 아파트 구조체에 직접 결합할 수 있는 구조적 호환성을 지님.
- 특히 오스트리아, 룩셈부르크, 덴마크, 벨기에 등에서는 정부 차원의 탄소중립 건축정책과 함께 목재 외피의 공장제작·조립화를 제도적으로 지원하고 있어, 외벽 중심의 목재 OSC 기술이 이미 상용화 수준에 도달해 있음.
- 대표적으로, 오스트리아의 LCT ONE (LifeCycle Tower ONE) 은 Glulam 기둥과 콘크리트 슬래브를 결합한 하이브리드 구조 위에 프리패브 목재 패널을 외벽으로 적용하여 “8층을 8일 만에 시공”한 사례로, 공기 단축과 시공 정밀도를 동시에 입증하였음.
- 룩셈부르크의 CREE Allegra 또한 Timber – Concrete Hybrid 구조를 기반으로, 프리캐스트 콘크리트 슬래브와 Glulam 프레임, 그리고 공장제작형 목재 외벽 패널을 조합한 시스템을 적용하였음.
- 이 프로젝트는 RC 구조체 외벽에 목재 패널을 결합한 고단열·고기밀 외피로, 한국의 “PC 아파트 외벽 대체형” 개발 방향과 가장 유사한 모델임.
- 또한 벨기에의 Doktoren 프로젝트는 높이 81m, 22층 규모의 초고층 주거건물에 비내력형 목조 외벽 패널(facade timber frame)을 적용한 사례로서, 공장제작 목조 패널을 크레인으로 인양해 현장에서 비계 없이 설치하는 JIT(Just-in-Time) 방식을 실증하였음.

- 이 프로젝트는 고층 RC 코어 구조체에 목재 외피를 결합한 유럽 최초급 사례로, 외피 공정의 산업화와 시공 자동화의 가능성을 동시에 보여줌.
- 이외에도 덴마크 코펜하겐의 Østerbrogade 190 프로젝트(CREE System), 캐나다 토론토의 Halsa 230 Royal York 프로젝트(Intelligent City) 등은 공장제작 CLT 또는 LVL 기반의 외벽 패널을 로봇 생산 공정으로 제작하여, 현장에서 크레인 인양 및 가이드핀 체결로 시공하는 디지털 패널라이징 방식을 적용하였음.
- 이러한 해외 사례들은 공통적으로 다음과 같은 기술적 특성을 공유함.
 - 첫째, 공장제작(prefabrication) 기반으로 외피 품질을 사전에 확보하고, 현장에서는 단순 조립만 수행함.
 - 둘째, 외장재·단열·방수·기밀층이 통합된 복합 패널 구조로 구성되어 있음.
 - 셋째, 비계 없는 시공 시스템을 통해 협소 부지나 도심 지역에서도 효율적으로 설치가 가능함.
 - 넷째, BIM 및 디지털 트래킹 기반 생산-시공 통합관리 체계를 도입하여 설계-제작-시공 간 오차를 최소화함.
- 결과적으로, 유럽형 목재 OSC 외벽시스템은 RC 또는 하이브리드 구조체에 적용 가능한 고성능 외피 기술 모델로서, 한국의 공동주택, 공공건축, 연구시설 등 다양한 분야에 현실적으로 도입 가능한 기술적 유사성을 갖추고 있음.

3.4.2. 국내 적용 가능한 기술요소

- 국내 여건을 고려할 때, 해외 사례에서 즉시 도입 또는 변형 적용이 가능한 핵심 기술 요소는 다음과 같음.

① 공장제작형 외벽 패널 시스템

- 외장재, 투습방수층, 단열층, 기밀층, 구조용 목재프레임이 하나의 복합 패널로 일체화된 구조임.
- 패널의 기본 단위는 폭 2.4~3.0m, 높이 8~9m 수준으로, 국내 운송 및 크레인 장비 조건에서도 충분히 제작 및 설치 가능함.

- 목재 소재는 기본적으로 규격재를 활용하며 추가적인 횡력 보강에 따라, CLT, LVL, Glulam 등 다양하게 적용 가능하며, 구조체 하중 분담 없이 외피 역할에 집중하므로 기존 RC 구조물에도 결합이 용이함.

② 고단열·고기밀 복합 외피 기술

- 유럽 사례의 공통된 특징은 열교 차단(thermal bridge cut-off), 기밀층 이중화, 통기층 확보를 통해 외피의 에너지 성능을 극대화한다는 점임.
- 패널 간 이음부는 개스킷, 실리콘 실란트, 멤브레인 테이프 등으로 3중 차단층을 형성하며, 현장에서의 조립 오차를 흡수하도록 설계됨.
- 이러한 외피체계는 국내 제로에너지건축물(ZEB) 달성 수준의 단열 및 기밀 성능을 달성할 수 있는 잠재력을 보임.

③ 비계 없는 현장 조립 및 JIT(Just-in-Time) 시공 방식

- 외벽 패널을 공장에서 완성한 후, 크레인으로 인양해 바로 설치하는 방식임.
- 부지 내 자재 적치 공간을 최소화하고, 제작-운송-설치를 실시간 연동하여 효율적인 공정을 실현함.
- 국내 도심형 공동주택 현장이나 리모델링 프로젝트에도 적용이 가능하며, 안전성과 공기 단축 측면에서도 유리함.

④ 디지털 기반의 설계·제작·시공 통합관리 기술

- 유럽의 주요 OSC 제조사는 BIM, CNC, 로봇가공 기술을 이용해 패널을 설계하고, 생산부터 운송·설치까지 전 과정을 데이터로 관리함.
- 설계 단계에서 조립순서, 패널 간 조인트 위치, 앵커링 디테일까지 사전 시뮬레이션이 가능하여, 공정 중 오차를 최소화함.
- 이러한 디지털 관리체계는 한국형 스마트건설 기술(스마트 팩토리, 디지털 트윈, QR 기반 공정관리 등)과의 연계 가능성이 높음.
- 이상의 기술 요소들은 한국의 목재 OSC 외벽 기술개발 과제에서 직접 적용 또는 단계적 도입이 가능한 실현 수준의 기술군으로 평가됨.

3.4.3. 국내 적용 시 고려사항

- 국내 적용을 위해서는 기술적·산업적 환경의 차이를 감안하여 다음의 사항들을 선행적으로 검토할 필요가 있다.

① 패널 규격 및 운송 한계 설정

- 국내 도로교통법과 운반장비 규격을 고려할 때, 패널 크기는 폭 3.0m, 높이 9.0m 이하가 현실적임.
- 이는 유럽의 일반 OSC 외벽 패널 규격과 거의 일치하지만, 공장 제작·운송·양중 동선을 통합 검토해야 함. 또한, 모듈별 분할 조립 시 이음부의 방수·기밀 상세를 표준화할 필요가 있음.

② 성능 평가 및 시험 기준의 국내화

- 외피 패널의 단열·기밀·투습·방수 성능은 유럽의 Passivhaus 또는 EN ISO 시험 체계를 적용하고 있으나, 한국에서는 KS 또는 KOLAS 인증체제로 이관 시 평가 절차의 차이가 발생할 수 있음.
- 이에 따라, 단열·기밀 성능은 KDS 31 70 00(단열설계기준) 및 국토부 ZEB 인증 기준에 맞춘 시험법으로 변환 적용이 필요함.

③ 공장 제작 및 품질 관리 시스템 구축

- 목재 OSC 외벽의 핵심은 일관된 공장 품질관리(QA/QC)에 있음. 현재 국내에는 대형 목조 패널을 대량생산할 수 있는 공장이 제한적이므로, 제조설비의 표준화 및 자동화(Press line, CNC cutting line, adhesive robot 등) 구축이 필요
- 또한, 공장 제작물의 현장 운송, 인양 및 설치 과정에 대한 품질검사 기준을 병행 마련해야 함.

④ 운송·시공 인프라 및 장비 확보

- JIT 방식의 효율성을 확보하기 위해서는 패널 운반 차량, 크레인, 리프팅 장비의 표준화가 필수적임.
- 또한, 도심지 현장에서의 패널 인양 안전기준, 설치용 가이드핀 및 브래킷 체계의 설계·인증이 병행되어야 함.

⑤ BIM 및 디지털 트래킹 기반 공정관리

- 해외 사례처럼 생산-운송-설치 데이터를 통합 관리할 수 있는 디지털 인프라가 필요함.
 - 패널별 시리얼 넘버링, QR 트래킹, RFID 기반 자재 관리 등은 향후 스마트건설과 연계 가능한 핵심 기술로, 공정 데이터와 품질관리 정보를 통합한 목재 OSC 외벽 디지털 관리체계의 구축이 요구됨.
-
- 유럽의 목재 OSC 외벽시스템은 한국의 철근콘크리트 및 PC 구조 건축물에도 적용 가능한 외피 중심형 조립식 건축 기술로서 기술적·산업적 실현성이 높다.
 - 북미의 목재 OSC 외벽시스템은 주로 바닥이나 기둥/보 구조를 목구조로 진행하는 경우나 경골목구조 기반의 5층 이하 저층 소형 목조 공동주택에 실현성이 높은 것으로 보여진다.
 - 특히, 프리패브리케이션 기반의 고단열 외피, 기밀·방수 통합 구조, 비계 없는 시공 및 JIT 운송 방식은 국내 건축시장에서도 충분히 구현 가능한 수준이다.

4. 목재외벽 구성안 제안 및 에너지성능 검증

4.1. 국내 적용가능한 자재 현황

4.1.1. 개 요

- 현재 우리나라 목조건축 시장의 현실을 고려할 때, 목재 외벽시스템 제작 시 적용 가능한 자재는 대부분 북미나 유럽에서 수입한 자재로 귀결될 수 밖에 없음
- 본 절에서는 외벽 제작에 사용 가능한 자재를 ① 구조재, ② 단열재, ③ 투습·방수, ④ 기밀·방습, ⑤ 외단열재, ⑥ 레인스크린 자재, ⑦ 방화 석고보드 등 7개 범주로 구분하여 정리하였음
 - 제시한 자재는 국내 제조·유통이 가능한 자재로, 그동안 우리나라 경골목 및 중목 구조 주택건설 현장에서 비내력벽 또는 SIP(System Insulated Panel) 시스템 등으로 폭 넓게 적용되어 그 성능이 검증된 자재임

4.1.2. 목 재 (구조재, 벽덮개재)

- 외벽시스템 제작에 투입되는 목재품은 스티드·칼도라·헤더 등 벽 골조에 사용되는 ‘구조재’와 벽 골조 외측에 시공되는 ‘벽덮개재’로 대분할 수 있음

[표 2-18] 목재외벽에 사용되는 목제품

구 분	재 질 · 규 격	주요 성능	위 치 · 용도	비 고
SPF 구조재 Hem-Fir 구조재 국산 낙엽송 구조재	2"×2", 2"×4", 2"×6", 2"×8" (38×38, 38×89, 38×140, 38×184)	구조용, No.2 등급 이상 구조용, 국산목재	벽체 스티드, 헤더, 보강재	KS 인증 품목
구조용 OSB	1220×2440mm, 11.1mm	노출등급 EXPOSURE 1	전단벽체, 외피 보강	산림과학원 고시 부속서 9
구조용 PB (국산)	1220×2440mm, 11.1mm	ISO Moisture Re- sistance 1등급 이상	전단벽체	산림과학원 고시 부속서 7

- 구조재는 다양한 수종군과 수종의 자재가 있지만, 국내 시장에서는 대부분 북미나 유럽에서 수입된 SPF(Spruce-Pine-Fir) 규격재가 유통·사용하고 있음

- 이에 본 연구의 외벽 패널 구조체에는 SPF 규격재를 사용함. 이는 국내 목조건축에서 KS F 3020 및 ASTM C16 규격으로 표준화되어 있으며, 공장 자동화 생산에 적합한 경량 구조재이기 때문임
- 경골목구조에서는 통상 “투바이포 공법, 투바이식스 공법”이라고도 하는데, 이는 인치 단위인 공칭치수(Nominal Size)를 말하며, 실제 치수는 2”×4”의 경우에는 38×89mm이고, 2”×6”는 38×140mm를 말함
- 패널 제작 시에는 2”×4” 또는 2”×6” 구조재 시공간격을 주로 406mm(16”) 또는 610mm(24”)로 표준화하고, 각 부재의 체결은 주로 못을 박는 방식으로 수행함
- 이 구조재와 더불어 사용되는 목재는 일정 간격으로 시공된 구조재인 스테드 바깥쪽에는 전단벽체용이나 외피보강용으로 시공되는 벽덮개재가 있음



공칭치수(Nominal Size)	실제치수(Actual Size)
2"x4"	1-1/2" x 3-1/2" (38mmx89mm)
2"x6"	1-1/2" x 5-1/2" (38mmx140mm)
2"x8"	1-1/2" x 7-1/4" (38mmx184mm)
2"x10"	1-1/2" x 9-1/4" (38mm x 235mm)
2"x12"	1-1/2" x 11-1/4" (38mm x 286mm)

[그림 2-48] 구조재 (규격재) 공칭치수 및 실제치수

- 벽덮개재는 주로 구조용 OSB 또는 구조용 PB를 사용하며, 가로 및 세로 규격은 1220×2440mm이고, 벽덮개재로 주로 사용되는 구조용 OSB나 구조용 PB 두께는 11.1mm임

- 이러한 구조재와 OSB 및 PB는 구조적인 용도로 사용이 되므로, 산림청 국립산림과학원 고시에 의거하여 공인 시험기관에서 품질검사를 받고, 품질표시가 적혀져 있는 자재를 사용해야 함



[그림 2-49] SPF 구조재의 등급마크 예시

○ 한글표시

OSB - 일반용/보통(비구조용) - E ₀
11.1 × 1,220 × 2,440
중국, 한국상사, 2022.12.

○ 한글표시

구조용 파티클보드 - 20형 - E1
15 × 1,220 × 2,440
한국, 한국산업(주), 2022.12.

○ 영문표시

OSB - 내력용/내수 - SE ₀
11.1 × 1,220 × 2,440
캐나다, 한국상사, 2022.12.

SPB - 20 - E1
15 × 1,220 × 2,440
Korea, Korea Ltd., 2022. 12.

[그림 2-50] 구조용 OSB·PB 품질표시 예시

4.1.3. 단열재 (Thermal Insulation Materials)

- 외벽의 내부 충전 단열재는 경골목구조 스티드 사이에 삽입되는 중단열재를 중심으로 함
- 경골목구조를 기반으로 한 목재 OSC 외벽은 스티드가 일정 간격으로 시공되는 구조이므로, 기본적으로 스티드 사이에 주요 단열재가 설치되는 중단열 방식임
- 이러한 중단열재로 사용되는 단열재는 유리섬유 단열재, 암면 단열재, 스프레이 폴리우레탄폼 단열재가 있음

[표 2-19] 목재외벽에 사용되는 중단열재

구 분	재 질 · 규 격	주요 성능	위 치 · 용 도	비 고
유리섬유 단열재 (Glass Wool)	$\lambda \approx 0.034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	경제성 및 시공성 우수	외벽 스테드 사이에 중단열 (시공자 수작업)	Knauf, Isover, Owens Corning
암면 단열재 (Mineral Wool)	$\lambda \approx 0.034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	불연성, 흡음성 우수		Rockwool, 벽산
스프레이 폴리우레탄폼 (SPF, 고밀도)	$\lambda \approx 0.021 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	기밀성 우수, 방습성	외벽 스테드 사이에 중단열 (장비이용 주입)	Huntsman Building Solutions, Grizzly
스프레이 폴리우레탄폼 (SPF, 저밀도)	$\lambda \approx 0.034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	기밀성 우수		
셀룰로오스 단열재	$\lambda \approx 0.034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	흡음성 우수		하이셀



[그림 2-51] 유리섬유 단열재
(Knauf Insulation)



[그림 2-52] 스프레이 폴리우레탄폼
(Huntsman Building Solutions)

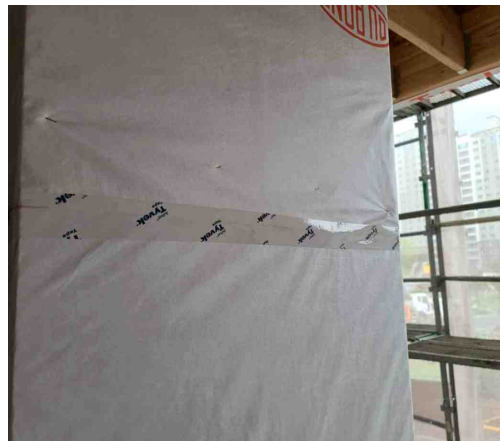
4.1.4. 투습방수지 (Weather-Resistant Barrier)

- 투습방수층 구성을 위한 투습방수지는 외벽의 수밀 및 결로방지 기능을 확보하기 위한 핵심 자재로서, 경골목구조 외벽에서는 OSB 또는 SPB 외측면에 직접 부착 또는 고정되는 시트형 멤브레인을 사용
- 이러한 투습방수지는 용어상으로는 방수라는 단어로 표기하나, 완전한 방수지는 아니고 습기는 투과시키는 자재임. 이에 투습방수지에서는 투습저항 값이 중요

[표 2-20] 목재외벽에 사용되는 투습방수지

구 분	재 질 · 규 격	주 요 성 능	위 치 · 용 도	비 고
일 반 형	Sd≈0.035m	투습 · 방수성능 확보	외벽 OSB·SPB 외측	DuPont Tyvek, Eurovent, SIGA
자 착 식	Sd≈0.035m	기밀성 강화, 시공정밀도 향상	외벽 OSB·SPB 외측	Proclima, GCP
배 수 형	Sd 0.10 ~ 0.19m	배수기능 포함	외벽 OSB·SPB 외측 (배수기능은 있으나 완전한 레인스크린 기능은 하지 못함)	Hydro Gap, Drainwrap
복합보드형	Sd≈0.035m	구조 · 기밀 · 투습방수 성능 통합, OSB·SPB와 일체형	OSB·SPB 일체형으로 스터드 외측에 시공	Huber ZIP Board WSB

- 투습방수지에는 타카핀(tacker pin)으로 고정하는 ‘일반형’과 한쪽 면에 접착제를 도포하여 구조용 OSB나 PB 면에 부착·고정하는 ‘자착식’이 있음
- 또한 구조용 OSB나 PB와 기능이 일체화된 ‘복합보드형 구조용 OSB 또는 PB’가 있고, 투습방수지의 표면에 돌기 면이 있어 물을 배수시켜줄 수 있는 유형도 있음
- 투습방수지는 통상 롤 형태로 현장에 반입되며, 각 투습방수지의 이음부위는 전용 테이프를 사용하여 이음 시공하며, 이 경우에는 주로 해당 투습방수지 제조사에서 제공하는 전용 테이프를 사용함



[그림 2-53] 일반형 투습방수지 (듀폰 Tyvek)



[그림 2-54] 자착식 투습방수지 (GCP)



[그림 2-55] 배수형 투습방수지 (Hydro Gap)



[그림 2-56] 복합보드형 투습방수지 (좌 : Huber, 우 : WSB)

4.1.5. 기밀층 및 방습층 (Air-tight & Vapor Barrier)

- 경골목구조 외벽의 내부면에는 기밀자재를 사용해 기밀·방습층으로 적용함. 이는 실내 수증기의 침투를 억제해 단열층 내부의 결로를 방지하는 역할을 함
- 방습층은 기본적으로 외벽의 내부면에 두는 것으로 함
- 하지만 기밀층은 외벽의 단면 구성에 따라 방습층과 동일한 자재가 되어 내부면에 둘 수도 있고, 외부면에 투습방수지를 활용하기도 하거나, 중단열재를 기밀성이 있는 자재를 사용할 수 있음

[표 2-21] 목재외벽에 사용되는 기밀재

구 분	재 질 · 규 격	주 요 성 능	위 치 · 용 도	비 고
기밀 테이프 / 기밀 멤브레인	가변 투습형 제품을 포함	기밀성능 확보, 이음부의 누기 차단	패널 이음부 및 개구부 주변	SIGA Rissan, ProClima Intello
액상형 기밀재 (Liquid Airtight Coating)	브러시 및 스프레이 시공	미세틈새 기밀 보강, 연속 기밀층의 형성	창호 주변 및 관통부	ProClima Aerosana

4.1.6. 외단열재 (Exterior Insulation Layer)

- 외단열층은 구조체 외부의 열교 차단과 결로 억제를 위한 주요 구성임
- 목재 OSC 외벽에서는 주로 경량 단열보드 또는 불연보드 형태로 적용될 수 있음
- 외단열 시에는 반드시 투습방수층 외측 설치, 통기층과의 조합이 필요

[표 2-22] 목재외벽에 사용되는 외단열재

구 분	재 질 · 규 격	주 요 성 능	위 치 · 용 도	비 고
XPS 보온판	KS M3808, 30~50T	내수성 및 압축강도 우수	외단열	일반 외단열재
미네랄울 보드	35~50T	불연성, 고층 적용 가능	외단열	내화성능 확보
열반사 단열재	알루미늄 적층 복합 시트	복사열 차단, 방습 · 투습 기능	외단열 보조	원코 Skytech
복합 단열보드 (ZIP-R System)	EPS + OSB 통합	구조 · 단열 통합	외벽 스테드 바깥쪽 시공	Huber ZIP Board

4.1.7. 외단열층의 고정방식 및 관련자재

(Fixing Method and Components for Exterior Insulation)

- 외단열층은 구조체 외측의 단열성능 강화를 위한 핵심 구성으로서, 단열재 자체의 성능뿐만 아니라 고정 방식(fixing method)에 따라 외벽 시스템의 열교(thermal bridge), 기밀성(air-tightness), 내구성(durability)이 좌우됨

- 경골목구조를 기반으로 한 목재 OSC 외벽에서는 단열재의 하중을 최소화하면서 열손실을 억제하는 비관통형 고정 시스템이 요구됨

[표 2-23] 목재외벽에 사용되는 외단열재 고정방식과 자재

구 분	재 질 · 규 격	주 요 성 능	위 치 · 용 도	비 고
① 목재 띠장 고정방식 (Batten System)	스터드 외측에 수직/수평 띠장을 설치하고 그 위에 단열재 및 레인스크린 고정	시공성 우수, 통기층 형성 용이	외 단 열 고 정	띠장 부위에서 열교발생 가능
② 비관통형 메탈 브래킷 (Thermal Break Bracket)	단열층 외측에 금속 브래킷을 설치하되, 스페이서 (EPDM/PU)로 구조체와 절연	열교 차단, 내구성 우수	외 단 열 고 정	부속 자재의 단가가 높음
③ 장기형 단열재 앵커 (Long Plastic Fastener)	단열재를 OSB등에 직접 체결, 헤드부 단열캡 부착	시공이 빠름, 경량 단열재에 적합	외 단 열 고 정	압착불균일 시 탈락 우려
④ 복합 서포트 레일 (Support Rail System)	단열재 + 레인스크린 통합용 알루미늄레일 적용	정밀도 높음, 고층에 적합	외 단 열 고 정	복잡한 시공, 비용 증가



[그림 2-57] 외단열 고정을 위한 메탈 브래킷 시공사례

4.1.8. 레인스크린 시스템 자재 (Rainscreen System Materials)

- 레인스크린 시스템은 외벽 외측에 통기층(ventilated cavity)을 두어 빗물의 직접 침투를 방지하고 외벽 내측의 수분 배출과 건조를 유도하는 구조임
- 본 연구에서는 목재 OSC 외벽의 수밀성과 내구성을 확보하기 위해 레인스크린 시스템을 필수 구성요소로 설정함
- 2023년 이후 공공건축 기준(KDS 21 50 00)에서 통기형 외벽(레인스크린 구조)이 허용됨
- 현재 국내에서는 방부목·HPL·금속재 중심으로 적용 가능하며, 목재 OSC 외벽의 외피시스템으로 기술적 호환성이 높음

[표 2-24] 목재외벽에 사용되는 레인스크린 시스템 자재

구 분	재 질·규 격	주요 성능	위 치·용 도	비 고
통기층 (배수층)	25~40mm 목재 또는 알루미늄 띠장	배수성·통기성 확보	레인스크린층	방부목 또는 금속 띠장
레인스크린 보드 (외피재)	방부목 사이딩, 세라믹 보드, HPL 패널, 알루미늄 루버	내후성·내수성 확보	레인스크린층	디자인·유지 관리 용이

4.1.9. 종합 정리 및 적용 방향

- 본 연구에서 다룬 목재 OSC 외벽시스템은 경골목구조용 표준 자재만을 활용한 Panelized System을 대상으로 함
- 구조재, 벽덮개재(구조용 OSB 또는 SPB), 단열재, 투습방수층, 기밀층, 마감재의 6층 레이어로 구성되며 모든 부재는 국내에서 상용조달이 가능함
- 향후 기술개발의 초점은 “공장 자동화 조립 + 클로즈드 패널형 품질관리 체계”에 두어야 함
- 이를 위해 각 자재 간 성능 조합(단열·기밀·내화)을 고려한 조합형 인증(assembly certification) 체계 마련이 필요함

4.2. 기후권역별 외벽 구성안 제안

4.2.1. 개 요

- 현행 「건축물의 에너지절약설계기준 (국토교통부 고시 제2023-859호)」은 국내 기후권역을 중부1, 중부2, 남부, 제주의 4개 지역으로 구분하고 있고 각 권역별로 외벽의 설계 열관류율 기준이 상이함
- 따라서 목재 OSC 외벽시스템의 경우도 기후권역별로 요구되는 단열두께, 방습·투습 성능, 외단열 조합이 달라지므로, 지역별 열환경에 적합한 표준 단면 구성이 필요함
- 이에 본 절에서는 우리나라의 기후특성, 구조성능 요구조건, 단열·방습 기준, 외부 마감재의 성능 요구기준을 종합 고려하여, 4개 기후권역에 적합한 목재기반 OSC 외벽의 단면 구성을 제안함
- 특히, 외벽은 건축물의 열적·구조적·내화 성능을 동시에 충족해야 하므로, 외벽의 단면 구성 시 아래 4개 항목을 기본 원칙으로 설정함

(1) 내화성능 충족

- 목재 기반 외벽은 「건축법」 및 관련 고시 기준에 따라 건축물의 층수에 대응하는 내화성능 확보가 필수적
- 건축물의 용도나 높이 등에 따라 적용 기준이 다르기는 하지만, 공동주택의 경우, 4층 이하인 경우는 최소 1시간의 내화성능, 5층 이상 ~ 12층 이하인 경우는 2시간 내화성능 확보가 필요
- 따라서 목재 OSC 외벽 구성 시 석고보드의 다층 적용, 내화성능이 검증된 구조재료의 사용, 조인트부 내화 보강 등을 통해 층별 내화성능 요구기준을 충족하도록 설계함

(2) 단열기준 충족 (건축물의 에너지절약설계기준)

- 기후권역별 외벽의 열관류율(U-value) 기준을 충족하는 것이 단면 구성의 핵심 요소임

- 중부 1지역, 중부 2지역, 남부, 제주 등 기후권역별 요구 단열성능이 상이하므로, 단열재 종류(광물섬유, 경질 단열재 등), 단열재 두께, 열교 차단 구조를 기후대에 맞게 최적화해야 함
- 특히 OSC 패널의 장점인 외단열 중심의 구성을 적용하면, 열교 억제에 유리하여 동일 성능을 보다 얇은 단면으로 구현할 수 있음

(3) 방습성능 충족

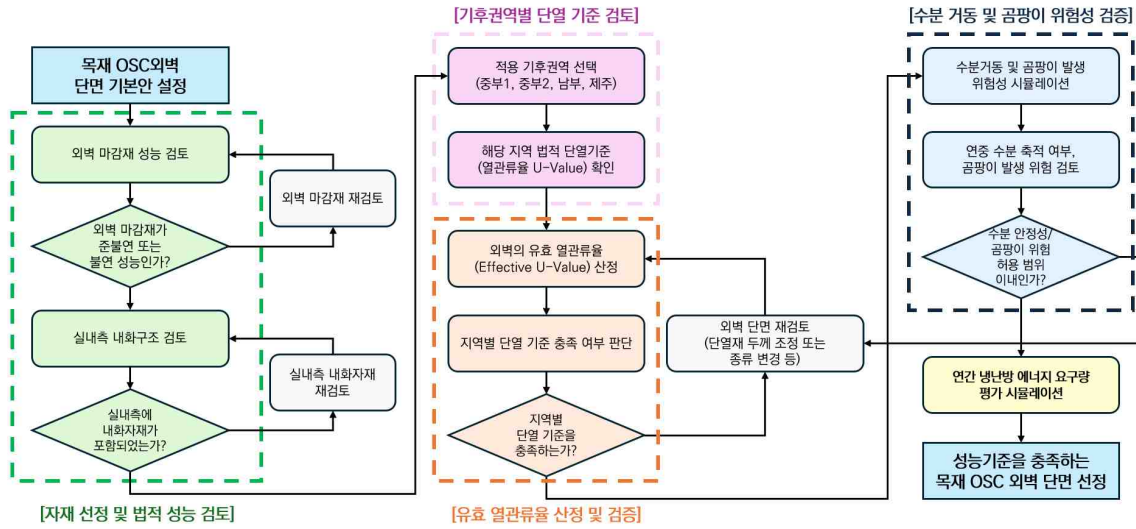
- 우리나라의 기후는 난방·냉방이 모두 필요한 냉난방 병행 기후이며, 여름철 고습 조건과 겨울철 건조 조건이 반복된다. 이에 따라 외벽 단면 구성에서는 수분 확산·응결 위험을 최소화하기 위한 방습 전략이 필요함
 - 외단열 적용 시 구조체 내부 온도 상승으로 결로위험 감소
 - 내측에는 방습층(Vapor Barrier) 또는 가변형 방습지(SD-variable membrane) 적용
 - 외측 WRB(투습·방수지)는 높은 투습성 + 우수한 내수성 확보
- 이러한 조합을 통해 장기적 수분 손상, 내구성 저하를 방지하고, 목재 구조특성상 중요한 건조성능(Drying Potential) 을 확보함

(4) 마감재 성능 충족

- 외벽 단면 구성은 외부 마감재의 성능 요구조건도 반드시 고려해야 함. 특히 목구조의 경우, 한계내력 요소가 외벽 외측의 구성에 좌우될 수 있으므로 다음 사항이 중요함
 - 「건축법 시행령」 제61조에 따라 목구조 골조 외측에 위치한 자재는 불연 또는 준불연 등급 사용 원칙
 - 통기층 확보를 통한 배수·건조 기능 보장
 - 고층·강풍 지역에서는 외장재의 내풍압 성능 검증 필요
- 이에 외장재(금속 패널, 시멘트 보드, 섬유 시멘트 사이딩 등)의 선택은 내화·내풍·내습 성능을 모두 충족하는 범위 내에서 결정되어야 함

4.2.2. 목재 OSC 외벽안 제안 프레임워크

- 본 연구에서는 기후권역별 목재 OSC 외벽 구성안을 객관적·합리적으로 도출하기 위하여 아래와 같이 외벽 단면 설계의 전 과정을 단계적으로 검증하는 의사결정 기반의 플로우차트를 적용함



[그림 2-58] 목재외벽 구성안 제안 프레임워크

- 먼저, 목재 OSC 외벽 단면의 기본안을 설정한 후 외벽 마감재의 화재 안전 성능과 실내측 내화구조 구성 여부를 검토함으로써 「건축법」 및 관계 법령에서 요구하는 최소 성능 충족 여부를 확인함
 - 외벽 마감재의 경우는 준불연 또는 불연 성능 충족 여부를 검토하였으며, 실내측에는 방화석고보드 등 내화자재의 적용 여부를 검증하였음
- 다음으로 적용 대상 건축물의 기후권역을 중부1, 중부2, 남부, 제주로 구분해 해당 지역의 단열기준을 확인하였으며, 제안된 외벽 단면 구성에 대한 유효 열관류율 (Effective U-Value)을 산정함
 - 이 때 열교의 영향을 고려한 유효 열관류율을 기준으로 지역별 단열성능 충족 여부를 판단하였음
- 지역별 단열기준을 충족하지 못할 경우에는 단열재 두께 조정 또는 단열재 종류 변경 등을 통해 단면 구성을 재검토하였으며, 이러한 검토 과정을 반복함으로써 지역별 단열기준을 만족하는 외벽 단면을 도출함

- 단열기준 검증 후에는 WUFI 시뮬레이션을 활용해 외벽 단면의 장기 수분 거동 및 곰팡이 발생 위험성을 평가함
 - 이 과정에서 연중 수분 축적 여부와 곰팡이 발생 가능성을 검토하여 수분 안정성이 확보되지 않는 경우에는 외벽 단면을 재구성하였음
- 마지막으로, 단열기준과 수분 안정성이 확보된 단면을 대상으로 냉·난방 에너지 요구량을 평가함으로써 에너지 성능을 종합적으로 판단함
- 이러한 절차를 통해 기후권역별 단열기준과 화재안전 성능, 내화성능, 장기 수분 안정성 및 에너지 성능 등을 모두 충족하는 목재 OSC 외벽의 단면 구성안을 최종 확정함

4.2.3. 기후권역별 외벽 구성안 도출

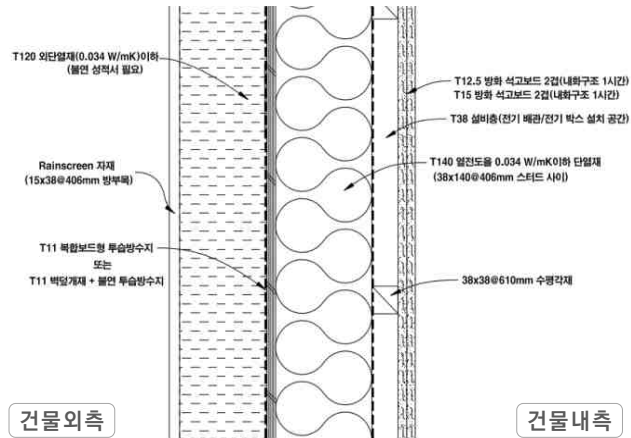
- 본 연구는 우리나라의 기후권역별 요구성능을 충족하는 목재 OSC 외벽시스템의 단면 구성안을 ‘기본형 1안’과 ‘두께 대비 고성능형 2안’ 등 2개 안으로 제안함
- 2개 안은 시스템의 구조형식과 기본 레이어 구성은 동일하되 단열성능의 수준 및 적용 가능한 에너지 기준의 차이에 따라 차이가 있음
- 이는 설계자 및 발주자가 대상 건축물의 용도, 층수, 사업여건에 따라 외벽 단면을 합리적으로 구성할 수 있도록 의도한 것임

① 기본형 1^단 중부1지역 요구기준 충족

외 단 열	T120 ($\lambda \leq 0.034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)	중 단 열	T140 (스터드 충전)
목표성능	혹한지 열관류율 기준 충족		
특 징	외단열 비중을 높여 열교 최소화, 동절기 결로 위험 저감에 유리		

자재조합·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T120 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스테드 @406mm
- T140 중단열재(0.034 W/mK 이하)
- 38 x 38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



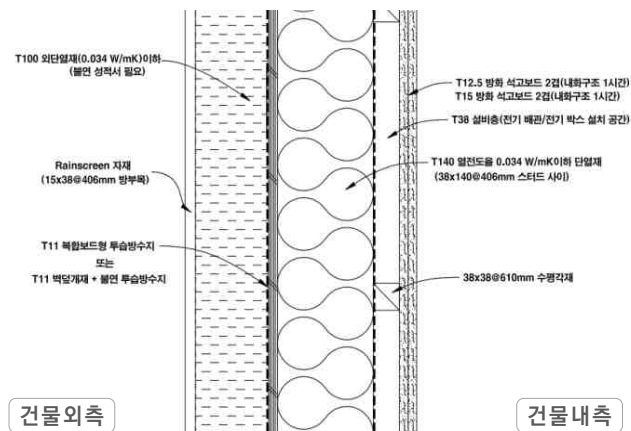
[그림 2-59] (기본형) 중부1지역에 적합한 목재외벽 단면

② 기본형 1^단 중부2지역 요구기준 충족

외 단 열	T100	중 단 열	T140
특 징	중부1지역 대비 외단열 두께를 합리적으로 감소, 현행 에너지 기준을 충족		

자재조합·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T100 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스테드 @406mm
- T140 중단열재(0.034 W/mK 이하)
- 38 x 38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



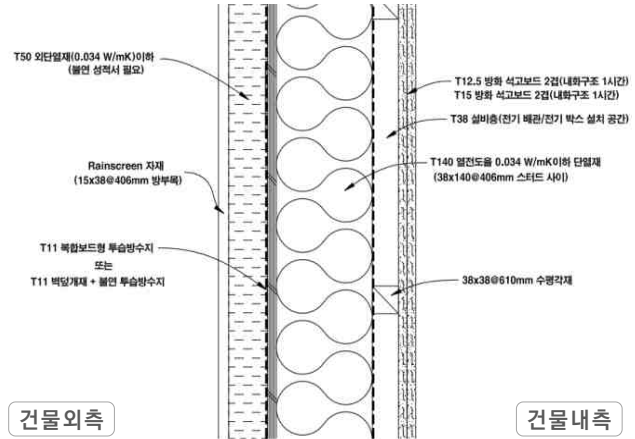
[그림 2-60] (기본형) 중부2지역에 적합한 목재외벽 단면

③ 기본형¹안 남부지역 요구기준 충족

외 단 열	T50	중 단 열	T140
특 징	난방부하보다 냉방·습기 대응이 중요, 외단열 두께를 줄이되 통기층과 방습성능 유지		

자재조합·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T50 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스테드 @406mm
- T140 중단열재(0.034 W/mK 이하)
- 38×38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



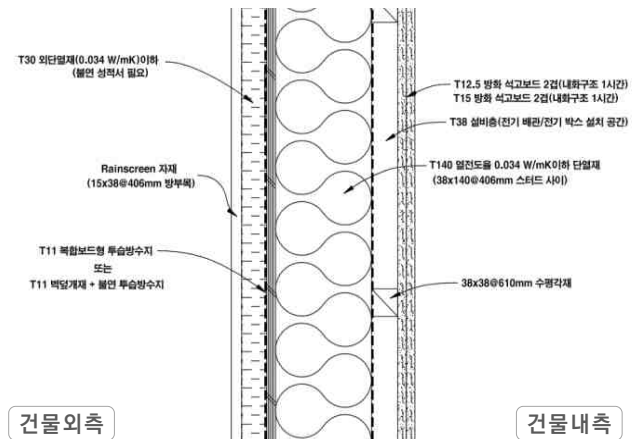
[그림 2-61] (기본형) 남부지역에 적합한 목재외벽 단면

④ 기본형¹안 제주지역 요구기준 충족

외 단 열	T30	중 단 열	T140
특 징	단열성능보다는 내습·내풍·내구성에 중점, 레인스크린 구성 필수		

자재조합·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T30 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스테드 @406mm
- T140 중단열재(0.034 W/mK 이하)
- 38×38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



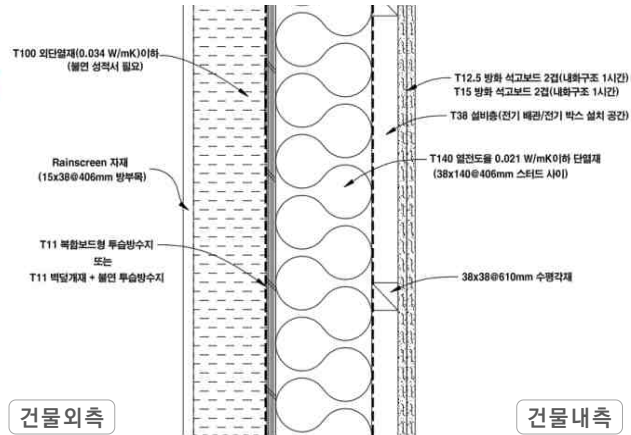
[그림 2-62] (기본형) 제주지역에 적합한 목재외벽 단면

⑤ 고성능형²안 중부1지역 요구기준 충족

외 단 열	T100	중 단 열	T140 ($\lambda \leq 0.021 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)
특 징	중단열을 고성능 단열재 적용, 동일 두께 대비 열관류율 대폭 개선		

자재조함·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T100 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스타드 @406mm
- T140 중단열재(0.021 W/mK 이하)
- 38 x 38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



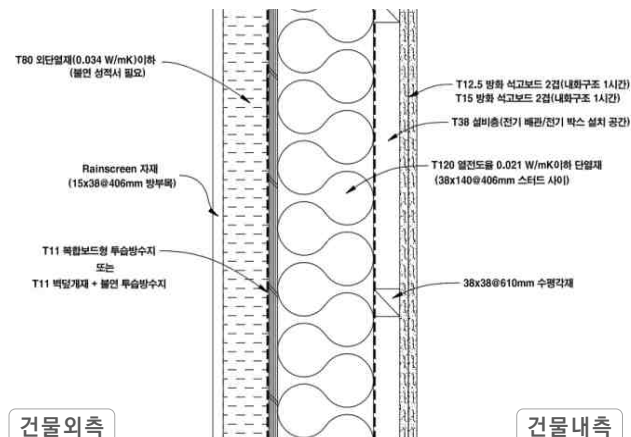
[그림 2-63] (고성능형) 중부1지역에 적합한 목재외벽 단면

⑥ 고성능형²안 중부2지역 요구기준 충족

외 단 열	T80	중 단 열	T120 ($\lambda \leq 0.021 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)
특 징	중단열을 고성능 단열재 적용, 동일 두께 대비 열관류율 대폭 개선		

자재조함·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T80 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스타드 @406mm
- **T120 중단열재(0.021 W/mK 이하)**
- 38 x 38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



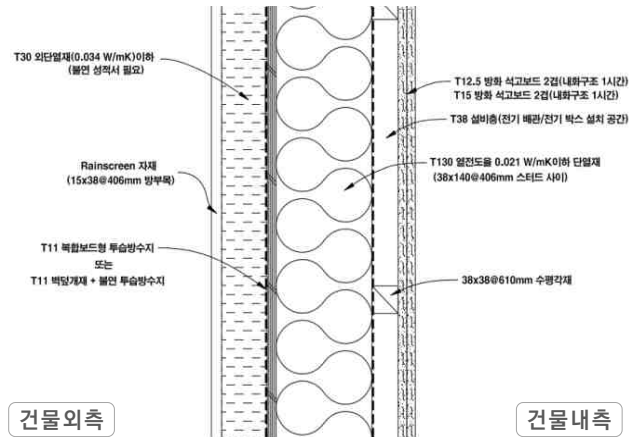
[그림 2-64] (고성능형) 중부2지역에 적합한 목재외벽 단면

7 고성능형²안 남부지역 요구기준 충족

외 단 열	T30	중 단 열	T130 ($\lambda \leq 0.021 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)
특 징	중단열을 고성능 단열재 적용, 동일 두께 대비 열관류율 대폭 개선		

자재조합·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T30 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스테드 @406mm
- **T130 중단열재(0.021 W/mK 이하)**
- 38×38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



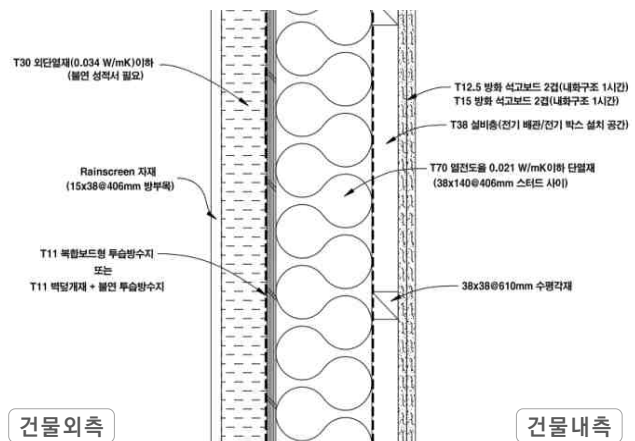
[그림 2-65] (고성능형) 남부지역에 적합한 목재외벽 단면

8 고성능형²안 제주지역 요구기준 충족

외 단 열	T30	중 단 열	T70 ($\lambda \leq 0.021 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)
특 징	결로 방지를 위해 외단열 유지, 중단열을 기준에 충족하는 수준 개선		

자재조합·요구성능

- 실외 마감
- 15×38mm 방부목(레인스크린층)
- **T30 외단열재(0.034 W/mK 이하) (불연 성적서 필요)**
- T11.1 복합보드형 투습방수지 또는 T16.1 벽덮개재 + 불연 투습방수지
- T140 38×140mm (2"×6") 스테드 @406mm
- **T70 중단열재(0.021 W/mK 이하)**
- 38×38mm (2"×2") @ 610mm 설비층
- T12.5mm 방화 석고보드 2겹 (1시간 내화구조 기준)
※ 2시간 내화구조 일 경우, 15mm 방화 석고보드 2겹
- 실내 마감



[그림 2-66] (고성능형) 제주지역에 적합한 목재외벽 단면

4.2.4. 기본형과 고성능형 차이

- 본 연구에서는 목재 OSC 외벽의 단면 구성을 ‘(1안) 기본형’과 ‘(2안) 두께 대비 고성능형’으로 구분하여 제안하였음
 - 이 2개 안은 기본 레이어의 구성이나 구조시스템은 동일하며, 성능목표에 따라 외단열 및 중단열 두께 (또는 단열재 성능 등급)를 조정하는 방식으로 차이를 둠
- 이를 통해 현행 기준을 충족하는 ‘보급형 설계’에서부터 향후 강화 기준(ZEB 등) 대응을 위한 ‘고성능 설계’까지 선택이 가능하도록 하였음

(1) 1·2안 공통구성

- 1안과 2안은 공통적으로 다음의 벽체 레이어 구성을 따름 (실내측 → 실외측)
 - 실내 마감(예: 석고보드)
 - 설비층(2×2 가로상, 전기/설비 배관 목적)
 - 구조체 : 2×6 스티드 @406mm
 - 중단열(스티드 충전 단열재)
 - 구조용 보드(OSB, SPB 등)
 - 투습방수층(WRB) 또는 복합보드형 투습방수지
 - 외단열(불연 단열재 적용)
 - 레인스크린(통기층 + 방부목)
 - 외장 마감(벽돌, 불연 외장재 등)
- 1안과 2안은 구조적인 안정성(스티드 + OSB / SPB), 방습·방수층(WRB), 통기층(레인스크린) 등 핵심 설계개념은 동일하며, 단열성능 설계에서만 차이가 있음

(2) 1·2안의 차별성

- (1안) 기본형 : 현행 에너지절약 설계기준 충족을 위해 상대적으로 큰 외단열 두께 (지역별 단열기준에 따른 차등)를 적용하고, 중단열은 기본 사양으로 유지
- (2안) 고성능형 : 외단열 및 중단열의 구성(두께 또는 고성능 단열재)을 조정하여 동일 또는 상향된 단열성능을 더 얇은 두께의벽체로 달성하도록 설계

[표 2-25] 목재외벽 구성안의 비교표

기후지역	구 분	외단열 두께	중단열 두께	벽 두께 (마감재 제외)
중부1지역	1안	120 mm	140 mm	~ 298 mm
	2안	100 mm	140 mm	~ 278 mm
중부2지역	1안	100 mm	140 mm	~ 278 mm
	2안	80 mm	120 mm	~ 238 mm
남 부 지 역	1안	50 mm	140 mm	~ 228 mm
	2안	30 mm	130 mm	~ 208 mm
제 주 지 역	1안	30 mm	140 mm	~ 208 mm
	2안	30 mm	70 mm	~ 138 mm

4.3. 외벽 구성안 에너지성능 검증

4.3.1. 개 요

- 우리나라 기후는 하절기의 고온다습·장마에 따른 장기 고습, 동절기의 큰 일교차 및 저온·건조 환경이 반복되므로 외벽의 열적·습열적 안정성 확보가 중요
- 특히 목재 기반의 외벽은 수분 변화에 민감하므로, PC 외벽과 비교하여 그 성능을 검증할 필요가 있음
- 본 절에서는 4.2에서 제안한 ‘기본형’과 ‘두께 대비 고성능형’ 2개 안을 대상으로 PC 외벽 대비 아래 3개 항목을 비교·분석함으로써 목재 OSC 외벽시스템의 적용 가능성을 검증함
 - ① 스티드 열교 및 구조체 특성을 반영한 유효 열관류율(Effective U-value)
 - ② 외벽 내부의 수분 거동 및 곰팡이 발생 위험성
 - ③ 외벽 구성 차이가 건물의 냉·난방 에너지 요구량

4.3.2. 유효 열관류율 산정

(1) 기후권역별 외벽 단열기준

- 국내 건축물 외벽 단열성능은 「건축물 에너지절약설계기준」에 따라 기후권역별

외벽의 직접 열관류율(U-value) 기준으로 관리되고 있음. 공동주택을 기준으로 외벽의 최대 허용 열관류율은 아래 표와 같이 구분됨

- 본 연구는 앞서 제안한 목재 OSC 단면이 해당 기준을 충족하는지 검증하기 위해 외벽 구성안 전체를 대상으로 기후권역별 유효 열관류율을 산정하였음

[표 2-26] 기후권역별 외벽 열관류율 요구기준 (단위 : $W/m^2 \cdot K$ 이하)

기후권역	대표지역	외벽 열관류율 기준
중부1지역	강원 일부, 경기 일부, 충북(제천), 경북(봉화, 청송)	0.15 $W/m^2 \cdot K$ 이하
중부2지역	서울, 대전, 세종, 인천, 강원 일부, 경기 일부, 충북, 충남, 경북, 전북, 경남 일부	0.17 $W/m^2 \cdot K$ 이하
남부지역	부산, 대구, 울산, 광주, 전남, 경북, 경남	0.22 $W/m^2 \cdot K$ 이하
제주지역	제주특별자치도	0.29 $W/m^2 \cdot K$ 이하

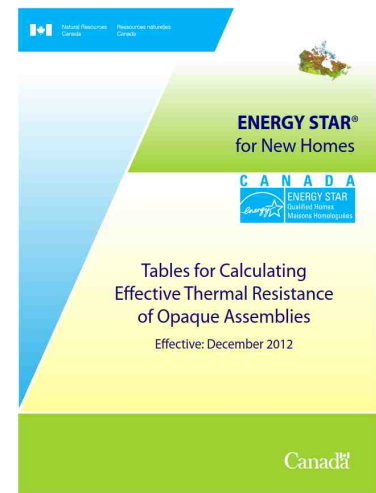
(2) 유효 열관류율 산정 필요성

- 목재 OSC 외벽은 경골목구조(light-weight wood frame)를 기본으로 적용하는 벽식 구조로서 외벽의 단면 내부에는 아래와 같은 열적 불균질 요소가 공존
 - 구조용 스테드 및 가로재 (목재 열교)
 - 단열재 충전부 (캐비티)
 - 외단열 및 내측 연속층
- 이러한 구조에서 목재 외벽의 성능을 단열재의 명목 열전도율만으로 평가할 경우, 열교에 의한 실제 성능 저하를 반영할 수 없음
- 따라서 '외벽 전체를 하나의 어셈블리(assembly)'로 보고 구조체와 단열부를 모두 고려한 유효 열관류율(Effective U-value) 산정이 필수적

(3) 유효 열관류율 산정기준 적용

- 현행 국내 기준(KDS, 에너지절약 설계기준)의 유효 열관류율 산정 관련 규정은 RC 구조나 단열 연속층이 명확한 외벽을 대상으로 한 것임
- 이에 경골목구조와 같은 병렬구조(parallel construction)에 대한 열관류율 산정 방법은 명확히 제시하고 있지 않음

- 유럽(EU) 역시 ISO 6946을 통해 외벽 열관류율 산정방법을 제시하고는 있으나 이 또한 균질한 단면 또는 단순한 열교보정 방식에 중점을 두고 있어 북미식 경골 목구조(OSB+스터드+캐비티 단열)의 상세한 병렬구조 반영에는 한계가 있음
- 본 연구에서는 캐나다 연방정부(Natural Resources Canada)의 공식 인정기준인 “Tables for Calculating Effective Thermal Resistance of Opaque Assemblies (ENERGY STAR® for New Homes 기준)”을 적용하였음
- 캐나다 기준은 아래 관점에서 본 연구 대상에 가장 부합함
 - 목재 OSC 외벽에 경골목구조를 기본 적용
 - 스테드·단열재 병렬구조를 전제로 한 구성
 - 프레임 및 캐비티 점유율을 명확하게 반영
 - 정부·에너지 인증 프로그램에서 공식 인정
- 이 기준 적용은 국내 기준 부재를 보완하면서 국제적으로 신뢰 가능한 방법을 채택한 합리적 선택이라 판단함



[그림 2-67] 캐나다 열관류율 산정기준

(4) 유효 열관류율 산정방법 개요

- “Series-Parallel(직렬-병렬) 계산법”을 기반으로 유효 열관류율을 산정
 - 외단열, 석고보드 등 연속층 : 직렬 합산
 - 스테드 구간과 단열재 충전 구간 : 병렬 계산
- 캐나다 기준에서는 스테드·단열재의 점유율을 반영하여 Frame-Cavity 부분의 유효 열저항 산정 후 이를 전체 외벽 어셈블리에 합산하는 방식을 사용
- 본 연구에서는 스테드 간격 406mm(16"), 골조 비율 23%, 중공층(Cavity) 비율 77%를 기준으로 산정

(5) 기본형¹안 유효 열관류율 산정결과

① 중부1지역 : 기준 충족 (요구기준 0.150 > 산정결과 0.148 W/m² · K)

중부 1지역 : 1안) 외벽 - 외단열재: 120mm, 중단열재: 140mm						
스터드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	120	0.030	3.6		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스터드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.034 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	140	0.029	2.611		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				6.755	0.148	
중부 1지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.150	단열 기준 충족

[그림 2-68] (기본형) 중부1지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

② 중부2지역 : 기준 충족 (요구기준 0.170 > 산정결과 0.163 W/m² · K)

중부 2지역 : 1안) 외벽 - 외단열재: 100mm, 중단열재: 140mm						
스터드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	100	0.030	3.0		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스터드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.034 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	140	0.029	2.611		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				6.150	0.163	
중부 2지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.170	단열 기준 충족

[그림 2-69] (기본형) 중부2지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

③ 남부지역 : 기준 충족 (요구기준 0.220 > 산정결과 0.216 W/m² · K)

남부 지역 : 1안) 외벽 - 외단열재: 50mm, 중단열재: 140mm						
스터드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	50	0.030	1.5		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스터드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.034 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	140	0.029	2.611		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				4.640	0.216	
남부 지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.220	단열 기준 충족

[그림 2-70] (기본형) 남부지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

④ 제주지역 : 기준 충족 (요구기준 0.290 > 산정결과 0.248 W/m² · K)

제주 지역 : 1안) 외벽 - 외단열재: 30mm, 중단열재: 140mm						
스터드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	30	0.030	0.9		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스터드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.034 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	140	0.029	2.611		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				4.035	0.248	
제주 지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.290	단열 기준 충족

[그림 2-71] (기본형) 제주지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

(6) 고성능형²안 유효 열관류율 산정결과

① 중부1지역 : 기준 충족 (요구기준 0.150 > 산정결과 0.148 W/m² · K)

중부 1지역 : 2안) 외벽 - 외단열재: 100mm, 중단열재: 140mm						
스티드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	100	0.030	3.0		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스티드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.021 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	140	0.047	3.223		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				6.762	0.148	
중부 1지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.150	단열 기준 충족

[그림 2-72] (고성능형) 중부1지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

② 중부2지역 : 기준 충족 (요구기준 0.170 > 산정결과 0.168 W/m² · K)

중부 2지역 : 2안) 외벽 - 외단열재: 80mm, 중단열재: 120mm						
스티드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	80	0.030	2.4		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스티드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.021 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	120	0.047	3.032		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				5.967	0.168	
중부 2지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.170	단열 기준 충족

[그림 2-73] (고성능형) 중부2지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

③ 남부지역 : 기준 충족 (요구기준 0.220 > 산정결과 0.219 W/m² · K)

남부 지역 : 2안) 외벽 - 외단열재: 30mm, 중단열재: 130mm						
스티드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	30	0.030	0.9		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스티드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.021 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	130	0.047	3.132		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				4.556	0.219	
남부 지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.220	단열 기준 충족

[그림 2-74] (고성능형) 남부지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

④ 제주지역 : 기준 충족 (요구기준 0.290 > 산정결과 0.266 W/m² · K)

제주 지역 : 2안) 외벽 - 외단열재: 30mm, 중단열재: 70mm						
스티드 규격재 - 38mm x 140mm (2"x6") : 열저항값 1.19 m ² K/W						
요소 Element	상세 Details	두께 Thickness	mm당 열저항값 RSI/mm	유효 열저항값 Effective RSI	유효 열관류율값 Effective U-Value	노트 Note
연속된 재료	실외표면열전달저항			0.043		
연속된 재료	외벽 마감재					
연속된 재료	시멘트보드	6				
연속된 재료	레인스크린용 방부목	15				
연속된 재료	열전도율 0.034 W/mK 이하, 발수성능, 불연 이상 성능 외단열재	30	0.030	0.9		
연속된 재료	외벽 덮개재	11.1	0.0098	0.109		
골조-중공층 Frame-Cavity	스티드 규격재: 38mm x 140mm (2"x6"), 406mm (16") 시공간격 중공층 단열재: 열전도율 0.021 W/mK이하 단열재 골조-중공층 비율: 골조 23%, 중공층 77%	70	0.047	2.340		
골조-중공층 Frame-Cavity	가로 각상(설비층): 38mm x 38mm (2"x2"), 610mm (24") 시공간격, 열저항값 0.32m ² K/W 중공층 단열재: 열저항값 RSI 0.18 (R1.02), 공기 골조-중공층 비율: 골조 20%, 중공층 80%		0.18	0.197		
연속된 재료	방화 석고보드(내화구조 1시간 12.5mm 2겹, 내화구조 2시간 15mm 2겹)	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	방화 석고보드	12.5	0.0063	0.079		
연속된 재료	벽지 Wallpaper			0.000		
연속된 재료	실내표면열전달저항			0.011		
총 유효값				3.764	0.266	
제주 지역 외벽 직접 열류율값 기준					0.290	단열 기준 충족

[그림 2-75] (고성능형) 제주지역 목재외벽 단면의 유효 열관류율 산정결과

- 외벽 어셈블리의 유효 열관류율 검증 결과, 본 연구에서 제안한 목재 OSC 외벽시스템은 1안과 2안 모두 전 기후권역에서 국내 단열 기준을 충족하였음
- 또한 캐나다 정부 공인 기준을 적용한 산정 결과는 경골목구조 외벽의 실제 열적 거동을 합리적으로 반영하며, 향후 국내 목재 OSC 외벽의 성능 평가 기준 마련을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단됨

(7) 유효 열관류율 산정결과 종합

① 중부1지역

- 이 지역은 가장 엄격한 외벽 단열기준($0.15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 이하)이 적용되는 지역임
- 기본형인 1안은 외단열 두께 120mm, 중단열 두께 140mm 구성으로서, RSI 6.755, U-value 0.148을 확보함
- 고성능형인 2안은 외단열 100mm로서, 20mm를 감소하였음에도 불구하고 고성능 단열재의 적용으로 RSI 6.762, U-value 0.148로 기본형인 1안과 동등한 에너지 성능을 유지함

② 중부2지역

- 이 지역은 중부1지역 대비 단열기준이 다소 완화된 지역임
- 기본형인 1안은 외단열 100mm, 중단열 140mm 구성으로 U-value 0.163을 확보함
- 고성능형인 2안은 외단열 80mm, 중단열 120mm → U-value 0.168로서, 외단열과 중단열을 모두 축소하였음에도 불구하고 기준(0.17)을 충족했고, 이를 통해 벽체 전체 두께가 약 40mm 감소함

③ 남부지역

- 이 지역은 난방부하가 상대적으로 낮고, 단열기준도 중부지역보다 완화된 지역임
- 기본형인 1안은 외단열 50mm, 중단열 140mm 구성으로 U-value 0.216으로 산정됨
- 고성능형인 2안은 외단열 30mm, 중단열 130mm → U-value 0.219으로, 2개안 모두 요구기준(0.22)을 충족함에 따라 외단열·중단열 두께를 소폭 줄임으로써 벽체를 슬림화할 수 있는 구성임

④ 제주지역

- 제주지역은 단열기준이 가장 완화된 대신에 고습·강풍·염해 환경에 대한 대응이 중요한 지역임
- 기본형인 1안은 외단열 30mm, 중단열 140mm → U-value 0.248으로 산정됨
- 고성능형인 2안의 경우 외단열 30mm, 중단열 70mm → U-value 0.266으로 중단열 두께를 절반 수준으로 감소시켰음에도 불구하고, 요구기준(0.29)을 충족함

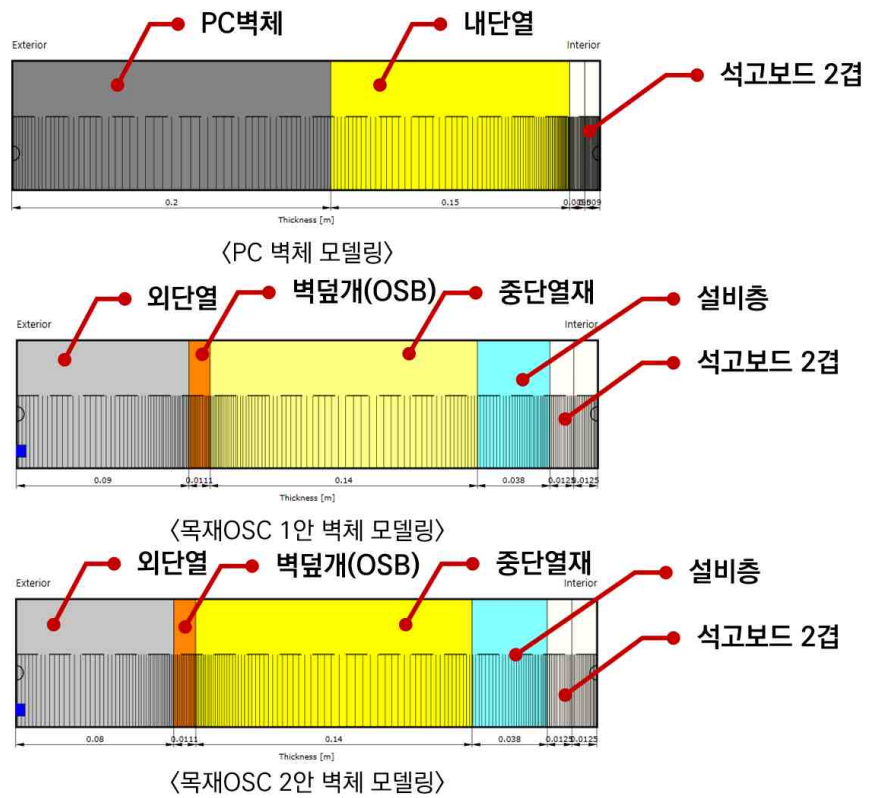
[표 2-27] 기후권역별 외벽 유효 열관류율 값 비교

기후권역	구분	외 단 열 (mm)	중 단 열 (mm)	벽 두께* (mm)	총 유효저항 (RSI)	열관류율 (U-value)	주요 차이점 요약
중부1지역	1안	120	140	~ 298	6.755	0.148	단열성능 최대 외단열 120mm 적용
	2안	100	140	~ 278	6.762	0.148	외단열이 20mm 감소하나 동일 기준 충족
중부2지역	1안	100	140	~ 278	6.150	0.163	중부1지역 보다 약간 완화
	2안	80	120	~ 238	5.967	0.168	외단열·중단열 모두 축소 경제성 우선 중시
남부지역	1안	50	140	~ 228	4.640	0.216	최소한의 외단열 및 두꺼운 중단열 유지
	2안	30	130	~ 208	4.556	0.219	외단열·중단열 소폭 감소
제주지역	1안	30	140	~ 208	4.035	0.248	외단열 최소 수준 중단열 140mm 유지
	2안	30	70	~ 138	3.764	0.266	중단열 절반 수준으로 감소 (140→70mm)

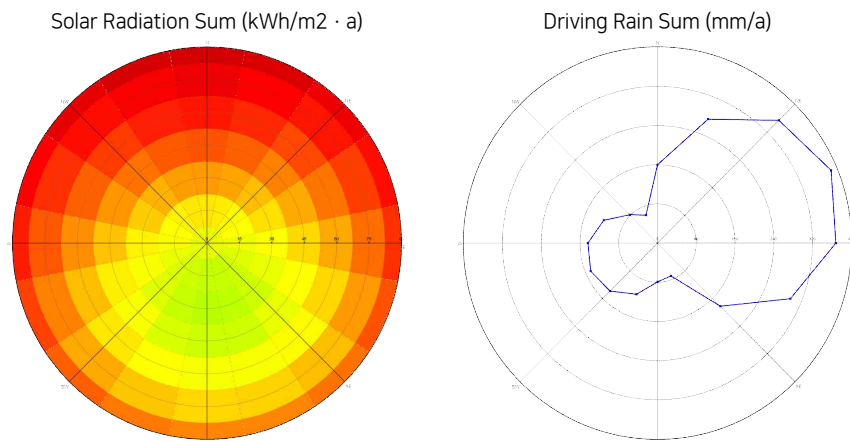
* 위에서 벽 두께는 마감재 두께를 제외한 수치임

4.3.3. 수분거동 및 곰팡이 발생 위험성

- 본 연구에서 습열(hygrothermal) 해석은 건물 부재 내부의 열·수분 이동을 비정상(Transient) 상태로 해석이 가능한 WUFI(Wärme Und Feuchte Instationär) 프로그램을 활용하여 수행하였음
- WUFI 프로그램은 외기 온도, 습도, 강우, 일사 및 바람 등 기후 인자를 반영하여 벽체 내부의 열·수분 이동을 시간 단위로 모사할 수 있어, 결로 발생 여부, 재료별 축적 수분량, 건조 특성 및 곰팡이 위험도 등을 정량적으로 평가할 수 있는 대표적 습열 해석 도구임
- 외기 기후조건은 WUFI 데이터베이스의 시험참조년(TRY, Test Reference Year) 기후 자료를 적용하였고, 중부1(대관령), 중부2(서울), 남부(대구), 제주(제주)의 4개 지역을 대상으로 ISO 15927-4 : 2005 기준(2000~2019년 기상청 관측자료 기반)에 따라 구성된 장기 평균 기후 데이터를 사용하였음
- 실내 조건은 벽체의 습열 성능 비교를 위해 온도 24℃, 상대습도 40~70%로 설정하였음
- 평가 방향은 북측과 동측으로 설정하였음. [그림 2-77]의 태양복사량 분포에서 확인되듯이 붉은색으로 표시된 저일사 방향에 해당되며, 연중 일사에 의한 건조 잠재력이 낮아 장기적인 습윤 지속 및 곰팡이 발생 위험이 큰 대표적 취약 방향임. 반면에 동측은 비바람(Driving Rain) 합이 가장 크게 나타나는 방향으로, 강우와 풍압의 영향으로 외벽 표면에 작용하는 습윤 하중이 최대인 조건임
- 이에 따라 본 연구에서는 기후적 취약 요인의 성격이 다른 대표 위험 방향(북측-저일사, 동측-강우하중)을 모두 고려하여 분석을 수행하였음
- 아울러 고층부(20m 이상)는 풍압 증가와 비산강우 영향이 확대되어 외벽의 습윤 위험이 저층보다 더 크게 나타나는 경향이 있으므로, 본 연구에서는 고층 조건을 중심으로 습열 안전성을 검토하였음

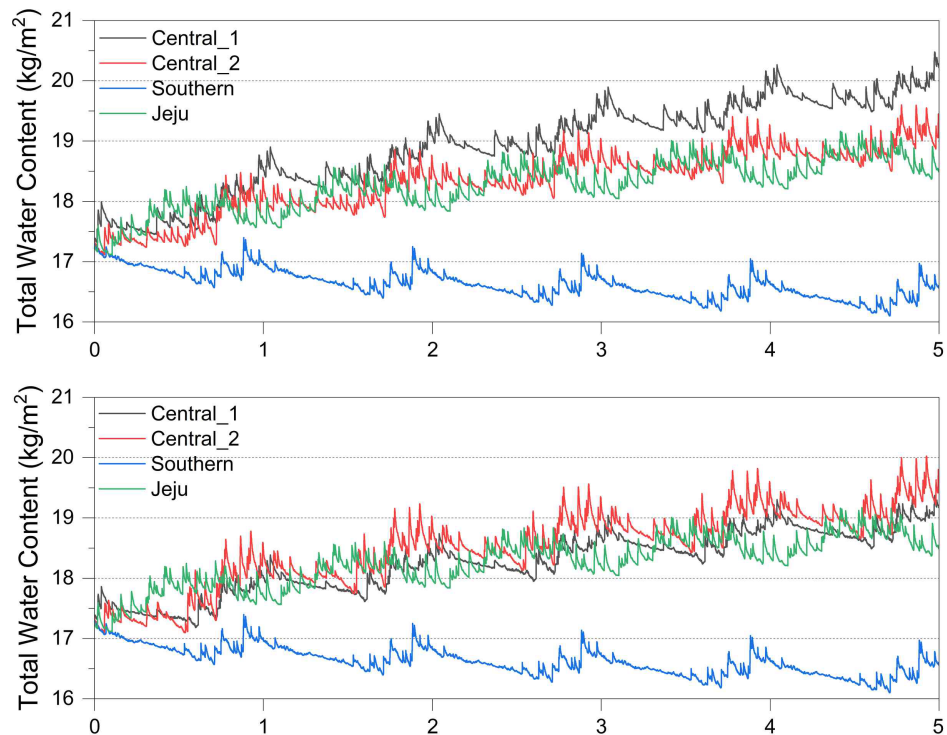


[그림 2-76] WUFI 프로그램 내 벽체 구성 (Assembly)

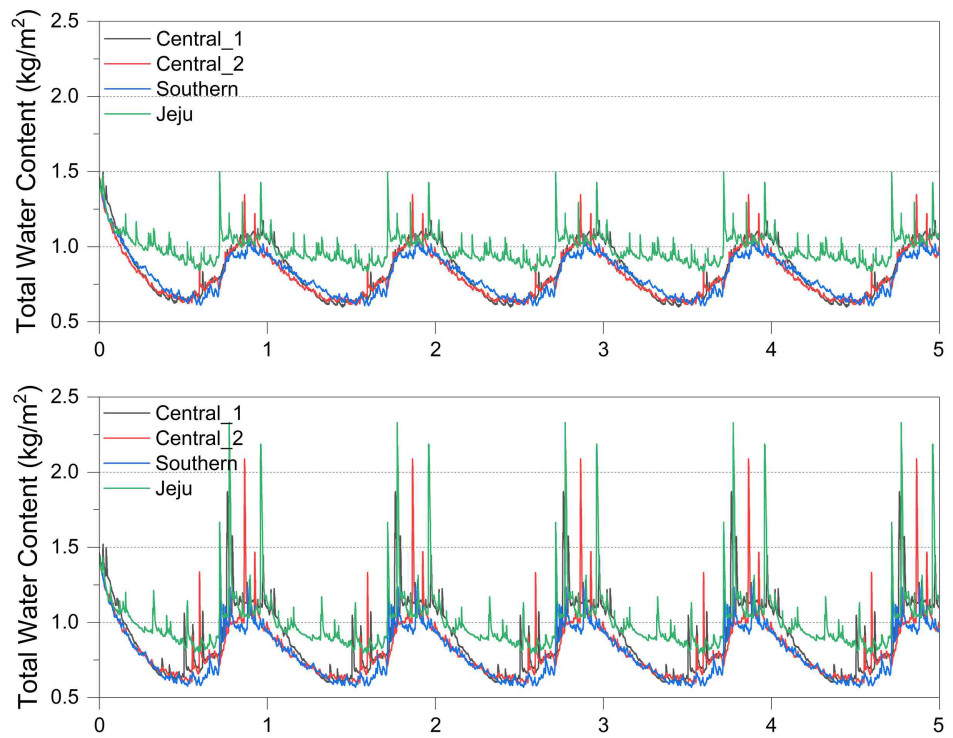


[그림 2-77] 서울지역의 태양복사 및 비바람 (Driving Rain) 분포

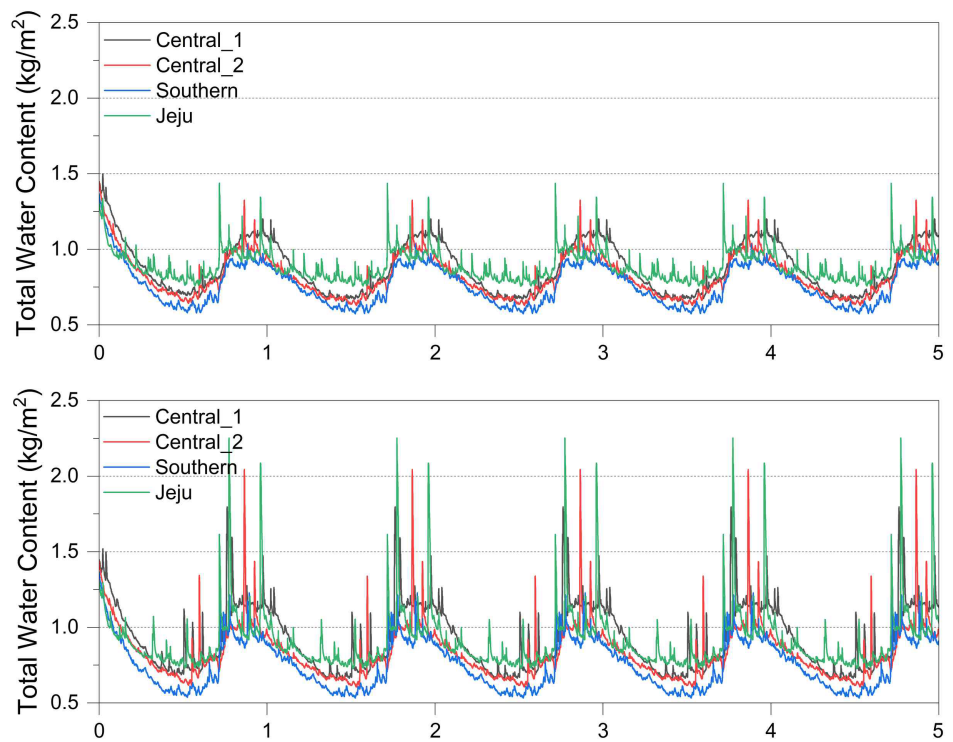
- 목재 OSC 외벽은 계절적 온·습도 변화에 따라 수분의 흡·탈착, 건조 지연, 단가·장기 결로 등 다양한 습열 반응을 보일 것으로 예상됨
- 이에 본 연구에서는 ① 총 수분함량(이하, TWC ; Total Water Content), ② OSB 함수율(M-%), ③ 실내 곰팡이 성장 위험을 주요 평가지표로 설정함
- 아울러 TWC 및 OSB 함수율 변화의 원인을 보다 명확하게 파악하기 위해, 대표 단면을 대상으로 벽체 내부의 온도·상대습도 분포(Profile)를 추가 분석하였으며 이는 계절별 열·수분 구배와 각 재료층의 건조 특성을 확인하는 보조적인 근거로 활용하였음
- 3가지 외벽에 대한 총 수분함량(TWC) 결과는 다음 [그림 2-78], [그림 2-79], [그림 2-80]와 같음



[그림 2-78] (기준안) PC외벽의 총 수분함량 : 5년간, (위) 북측, (아래) 동측



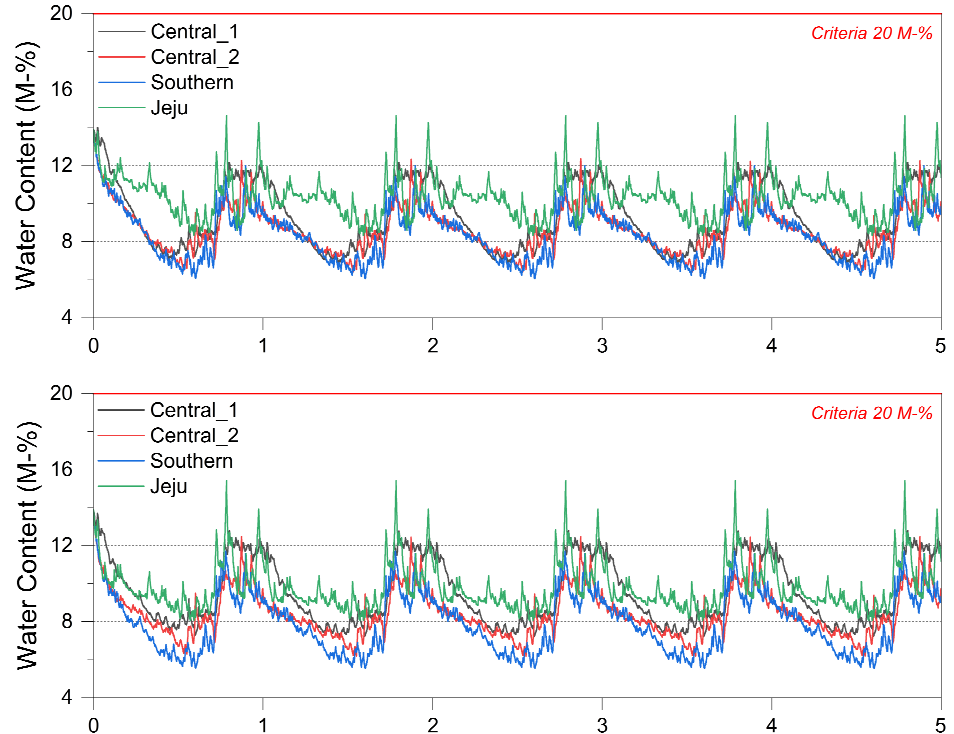
[그림 2-79] (기본형) 목재외벽 1안의 총 수분함량 : 5년간, (위) 북측, (아래) 동측



[그림 2-80] (고성능형) 목재외벽 2안의 총 수분함량 : 5년간, (위) 북측, (아래) 동측

- 기준안인 PC 벽체의 총 수분함량은 지역별로 다른 패턴을 보였으며, 중부1·중부2·제주지역에서는 5년간 점진 증가하는 명확한 누적 경향이 확인되었음. 이는 콘크리트 재료 특성에 따른 높은 수분 저장능력, 장기간 건조 지연, 그리고 고습·강우 환경의 반복이 복합적으로 작용한 결과로 판단됨
- 반면에 남부 지역(대구)의 PC 벽체는 분석기간 동안 완만한 감소 경향을 보였음. 남부지역은 중부 및 제주보다 겨울철 건조 기간이 길고, 여름철에도 강우·비바람 영향이 상대적으로 낮아 건조 조건이 우세한 기후적 특성을 갖고 있으며, 이로써 콘크리트의 초기 보유수분이 장기적으로 서서히 방출되면서 안정화되는 거동을 나타낸 것으로 분석됨
- 목재 외벽 구성 1안(암면, 유리섬유 조합)과 2안(암면, 경질폼 조합)은 PC 벽체에 비해 전체 TWC 수준이 매우 낮아 수분 저장량 자체가 작고 건조가 빠른 구조적 특성을 보였음. 2개 구성안 모두 계절적 흡습-건조 패턴은 존재하나 연 단위 누적 증가는 나타나지 않아 장기 건전성이 우수한 것으로 확인됨
- 지역별 변동폭은 제주지역에서 가장 크게 나타남. 하지만 이는 고온다습한 기후와 여름철 강우 영향에 따른 단기 습윤 이벤트가 잦기 때문이며, 장기 누적 없이 반복되는 안정적 파형을 보여 구조적 위험으로 이어지지는 않는 것으로 평가됨
- 북측 방향에서는 저일사 조건으로 인해 기본 수분수준이 상대적으로 높게 유지되었고, 동측에서는 Driving Rain 영향으로 순간적 수분 스파이크가 관찰되었으나 구성안 1과 2에서는 두 방향 모두 장기적인 위험 징후는 나타나지 않았음
- 종합적으로 PC 벽체는 지역에 따라서 장기 습윤 증가 또는 건조·감소가 혼재하는 거동을 보인 반면에, 목재 외벽 구성안은 지역 및 방위에 관계없이 장기적인 수분 누적이 없고 안정적인 습열 거동을 유지하는 것으로 평가됨

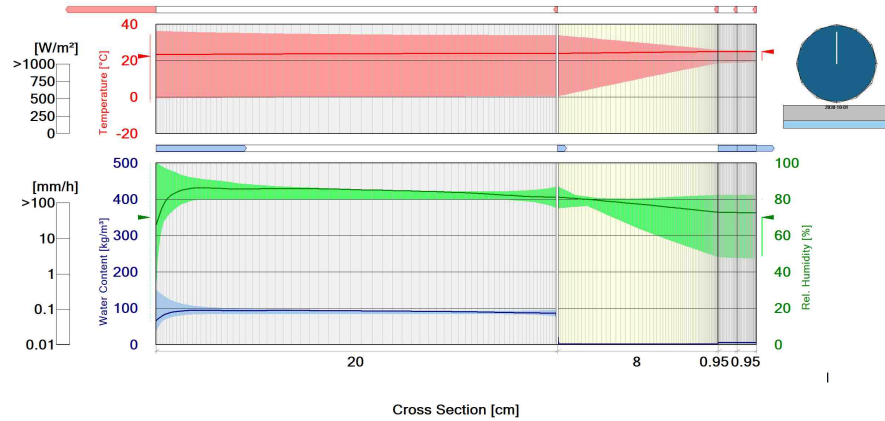
- 외벽 단면의 평면형(1-D) 습열 해석 시 목제품인 OSB는 함수율 변화에 민감하게 반응하며, 일정 수준을 초과할 경우 재료강도 저하·부패·곰팡이 성장 등의 문제가 발생할 수 있음. 이에 OSB의 함수율을 M-% 기준으로 분석하였고, 일반적으로 20%를 초과할 경우 위험성이 증가하는 것으로 판단함
- 국내 비바람 영향이 가장 크게 작용하는 보수적 조건(동측, 고층)으로 외벽의 습윤 하중을 평가함(그림 2-81). 모든 지역에서 OSB 함수율은 계절적 흡·탈습 패턴을 보였고 7~14% 범위에서 안정적으로 유지되었으며, 위험 기준인 20%를 초과한 사례는 전혀 없었음
- 제주지역은 기후 특성상 변동폭이 다소 컸으나 최대 약 13~14% 수준으로, 수분 축적에 따른 구조적 위험은 없는 것으로 확인되었음. 중부1, 중부2, 남부 지역은 변동이 더 작고 장기 증가 경향도 없어 수분 안정성이 우수하게 나타남
- 2개의 외벽 구성안은 함수율 변화 경향이 거의 동일하며, 단열재의 종류에 따른 OSB의 장기 습윤성능 차이는 크지 않는 것으로 분석됨



[그림 2-81] 목재외벽의 OSB 함수율 : (위) 외벽 1안, (아래) 외벽 2안

Location: Jeju; Test Reference Year 2020

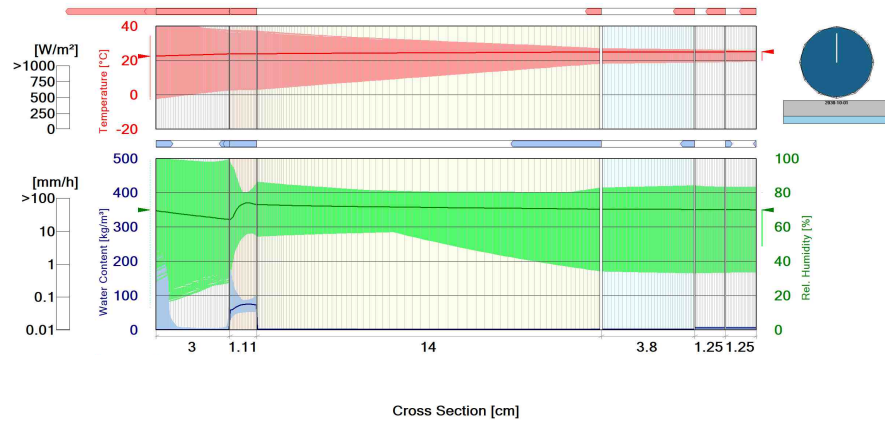
WUFI®



[그림 2-82] (기준안) PC외벽의 프로파일 (제주지역)

Location: Jeju; Test Reference Year 2020

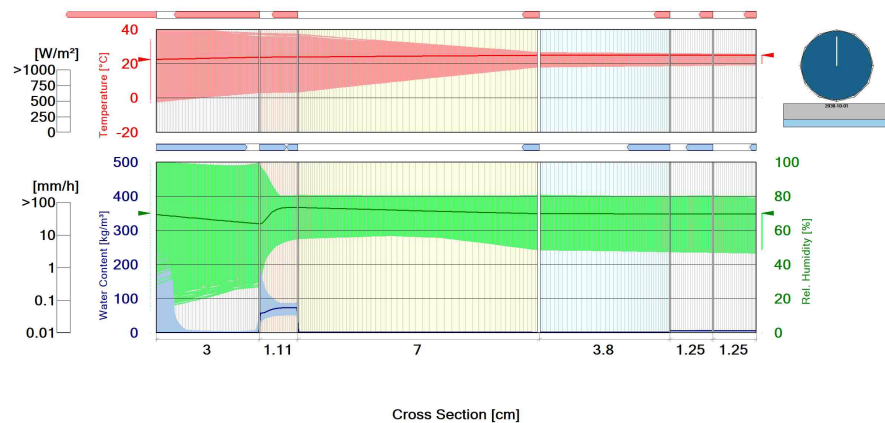
WUFI®



[그림 2-83] (기본형) 목재외벽 1안의 프로파일 (제주지역)

Location: Jeju; Test Reference Year 2020

WUFI®



[그림 2-84] (고성능형) 목재외벽 2안의 프로파일 (제주지역)

- 제주지역은 국내에서 연중 고온·다습, 장마에 따른 장기 고습 지속, 강한 Driving Rain 등이 중첩되는 가장 열악한 외기 조건을 가지므로, 벽체 내부의 온·습도 분포 및 수분 흐름을 평가하기 위한 가장 보수적 대표 지역으로 선정하였음. 이에 따라 WUFI의 단면 프로파일(Output profile)을 활용하여 벽체의 층간 온도 변화, 상대 습도, 재료별 수분함량을 정밀 분석하였음
- 기준안인 PC 벽체와 2개의 목재 외벽 모두에서 온·습도 프로파일이 안정적으로 유지되었으며, OSB 및 주요 구조층의 장기 수분 축적이나 결로 위험은 나타나지 않았음. 이는 개발된 OSC 외벽시스템이 혹독한 기후 조건에서도 습열적 안정성·내구성 측면에서 충분한 성능을 확보하고 있음을 보여주는 결과임
- 실내 곰팡이 발생 가능성은 Mold Index를 활용하여 평가하였음. Mold index는 재료 표면의 온·습도 조건을 기반으로 곰팡이 성장 잠재성을 0~6단계로 정량화한 지표로, 값이 높을수록 곰팡이 발생 및 재료 손상 위험이 증가함
 - 일반적으로 지수가 1 이하이면 위험성이 매우 낮고, 3 이상이면 육안으로 관찰 가능한 초기 성장, 4~6은 명확한 성장과 재료 손상 가능성이 있는 단계로 분류됨
- 본 연구는 이러한 기준을 적용하여 두 외벽 구성안의 곰팡이 위험성을 분석하였고 그 결과는 아래 표와 같음

[표 2-28] 실내 곰팡이 위험성 평가 (Mold Index)

지역	기준안				1안(암면, 유리섬유 조합)				2안(암면, 경질폼 조합)			
	북측		동측		북측		동측		북측		동측	
	g_m	MI	g_m	MI	g_m	MI	g_m	MI	g_m	MI	g_m	MI
중부1지역	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
중부2지역	0.42	0	2.96	0	0	0	0	0	0	0	0	0
남부 지역	19.3	0.04	19.3	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
제주 지역	29.9	0.06	29.9	0.06	6.83	0	26.6	0.05	0	0	1.05	0

g_m : 곰팡이 성장률 (mm/year), MI : 곰팡이 지수(-)

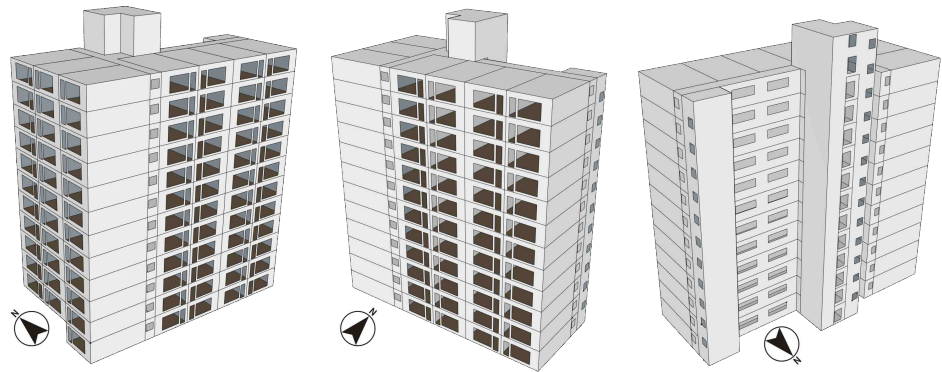
- 목재 외벽 1·2안은 모든 지역에서 북측·동측 조건에서 MI 가 0으로 나타나 곰팡이 성장 가능성이 매우 낮은 것으로 평가됨. 이는 2개 안 모두 내부면 온·습도 조건을 효과적으로 안정화하여 실내표면 결로나 고습환경이 형성되지 않았기 때문임

- 반면에, PC 벽체의 경우 일부 지역에서 곰팡이 성장률(gm)이 관찰되었으나, 이는 대부분 단기적 조건 변화에 기인한 것으로 MI는 모두 1 이하 수준으로 유지되어 실제 곰팡이 발생 위험은 매우 낮은 상태로 평가됨
 - 특히 중부2과 남부 지역의 동측, 제주지역 북·동측에서 gm 값이 다소 높게 나타났으나 MI가 0~0.66 수준에 머물러 장기적인 성장 조건은 형성되지 않는 것으로 분석됨
- 지역별로는 제주지역이 연중 높은 습도와 강한 Driving Rain 영향으로 gm이 가장 높게 나타났으나, 목재 외벽 1·2안에서는 모두 MI=0~0.05 범위로 유지되어 목재 외벽에서도 실내 곰팡이 발생 위험은 매우 낮은 수준임을 확인함
 - 특히 2안(압면, 경질폼 조합)은 모든 지역과 모든 방위에서 gm과 MI가 0으로 분석되어 가장 안정적인 결과를 보임
- 결과적으로 3개 외벽 구성 모두 실내 곰팡이 위험성은 매우 낮은 수준이며, 특히 목재 외벽 1안·2안은 목재 기반의 구조임에도 불구하고 실내 표면 곰팡이 발생에 대해 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단됨

4.3.4. 에너지성능 분석

- 에너지 성능 분석은 목재 외벽 안의 열·습열적 특성이 건물의 연간 냉난방 에너지 요구량에 미치는 영향을 평가하기 위해 WUFI Plus를 활용하였음
 - WUFI Plus 프로그램은 건물 전체의 열·수분 이동을 고려한 동적 에너지 시뮬레이션이 가능하여 일반적인 해석 도구에서 반영하기 어려운 습기의 영향, 재료의 함수율 변화, 자연 건조·습윤 과정이 에너지 부하에 미치는 영향을 동시 분석할 수 있는 장점이 있음
 - 특히 외벽 재료층의 습함수곡선, 수분확산계수 및 열전달계수 등이 시간에 따라 변화하는 현상을 모사할 수 있으며, 실내공기 상태(온·습도) 또한 재료의 습기 거동과 연계하여 계산할 수 있어 외벽의 성능 차이에 따른 에너지 요구량 변화를 더욱 현실적으로 평가할 수 있음
- 시뮬레이션 분석은 LH 평택고덕 아파트 107동(지상 12층)을 대상으로, 3D 건물 모델을 구성하여 수행하였음(그림 2-85 참고)
 - 실제 설계도서를 기반으로 건축 평면, 층고, 외피 구성, 창면적비, 입면 조건을 모델링하였고, 외벽을 제외한 창호·지붕·바닥·슬래브 등 기타 부위는 모두 설계안을 그대로 적용하여 시뮬레이션의 현실성과 일관성을 확보하였음

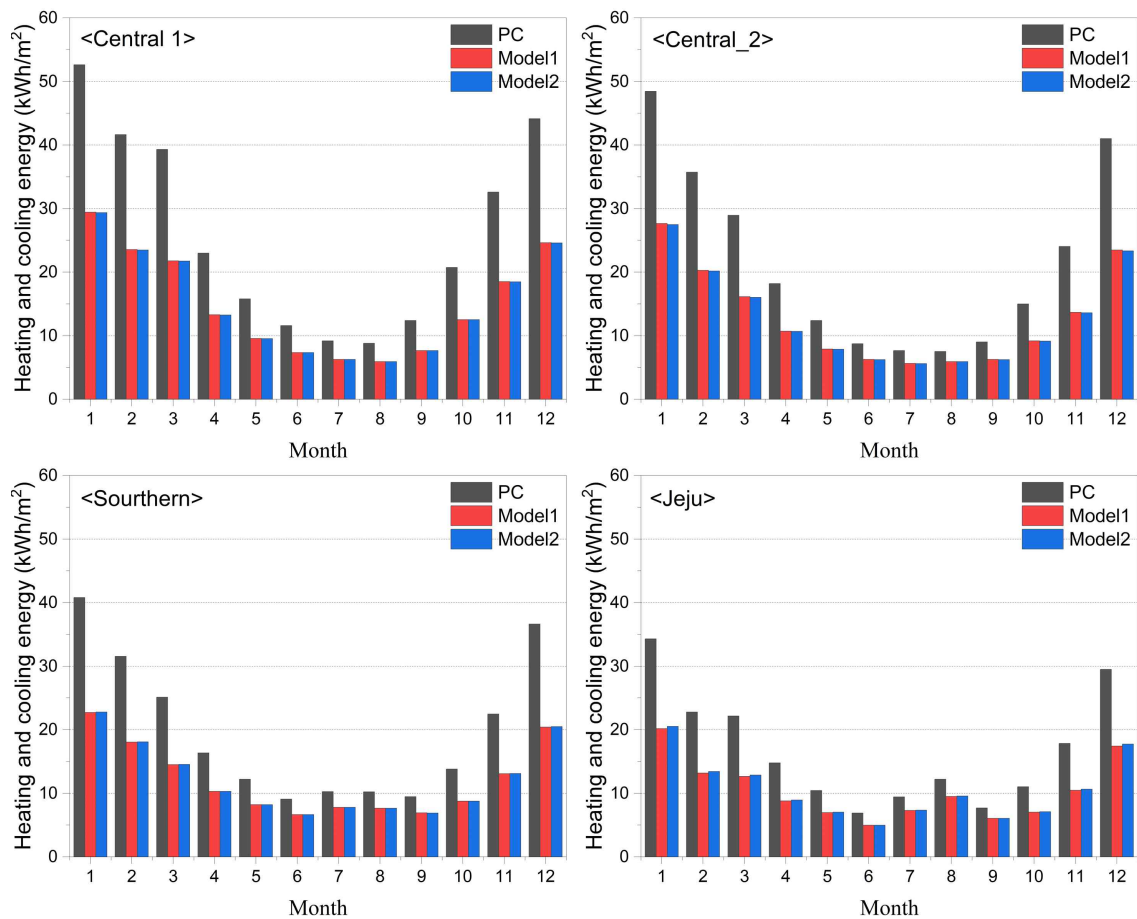
- 에너지 성능 분석시 외벽체 구성만을 변수로 설정하여 PC 벽체와 목재 외벽 1안·2안을 비교하기 위해 냉·난방 스케줄, 조명·기기 발열, 환기량 등 조건은 동일하게 설정하였음
- 실내 온·습도 조건은 앞서 습열 해석(4.3.3.)과 동일하게 EN 15026 기준에 따라 습도 부하 ‘High moisture load’를 선정하여 실외 조건에 따라 실내 온도 및 습도 프로파일을 생성하는 방식을 선정함. 이는 실내 온도 20~25℃, 습도 40~70%를 유지하는 조건임
- 목재 외벽은 구조 및 접합 방식 특성상 PC 외벽과 기밀성 수준이 다를 수 있으므로 이러한 차이가 실내 열환경 및 에너지 요구량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 유형별 침기량(n50 또는 ACH)을 구분하여 시뮬레이션에 적용하였음



[그림 2-85] 에너지 성능 분석을 위한 3D 시뮬레이션 모델

[표 2-29] 시뮬레이션 입력조건

실외기후	중부1지역 : 대관령, 중부2지역 : 서울, 남부지역 : 대구, 제주지역 : 제주				
실내기후	EN 15026 (High moisture load)				
실내사용프로파일	DIN EB ISO 13790 (Residential Building)				
기밀성능	PC외벽 : 3 ACH, 목재 OSC 외벽 : 1.5 ACH				
주요 부위별 열관류율 (W/m ² · K)	지역	벽체(간접)	바닥(직접)	충간바닥	지붕(직접)
	중부1지역	0.194	0.148	0.529	0.139
	중부2지역	0.234	0.159	0.529	0.141
	남부지역	0.293	0.190	0.529	0.170
	제주지역	0.408	0.272	0.529	0.247



[그림 2-86] PC 대비 목재외벽의 연간 냉난방에너지 요구량 평가결과 (중부1·중부2·남부·제주 지역 순)

- 시뮬레이션 결과, 목재 외벽(Model 1, Model 2)은 모든 지역에서 PC 외벽 대비 냉난방 에너지 요구량이 전반적으로 감소하는 경향을 보였음. 특히 난방 기간에는 Model 1과 2 모두에서 일관된 절감 효과를 나타냈으며, 이는 더 낮은 열관류율과 강화된 외피 기밀성에 따른 열손실 저감 효과로 해석됨
- 냉방에너지의 경우 감소폭은 지역별로 다르게 나타났음. 제주지역은 여름철 고온 다습한 기후 특성상 침기(Infiltration)와 높은 절대습도의 영향을 크게 받음에도 목재 OSC 외벽 적용 시 PC 외벽 대비 냉방부하가 감소하는 경향이 확인되었음
 - 월별 기준으로는 중부2, 남부지역의 일부 여름철에서 더 높은 냉방 절감률이 나타나는 등 지역별 편차가 존재하였음
- 난방에너지의 경우 네 지역 모두에서 OSC 외벽이 PC 외벽 대비 일관적이고 의미 있는 절감 효과를 보였음. 특히 난방 의존도가 높은 중부지역에서는 절감폭이 더

크게 나타났으며, 이는 목조벽체 특유의 낮은 열관류율과 구조층의 열용량 특성이 복합적으로 작용한 결과임

- 외벽 구성안 간 비교에서는 2안(암면, 경질폼 조합)이 1안(암면, 유리섬유 조합)에 비해 더 낮은 에너지 요구량을 일관성 있게 나타냈음. 이는 경질폼의 더 낮은 열전도율($0.021 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)과 우수한 기밀성·수분저항 특성으로 인해 열성능의 저하가 적고, 냉방기간에서도 외기 열 취득을 더 효과적으로 차단하기 때문으로 분석됨
- 결과적으로 목재 외벽 2안은 난방·냉방 모두에서 더 우수한 절감 효과를 보이며 장기적인 에너지 성능 측면에서도 보다 안정적인 대안으로 평가됨
- 종합적으로 냉방 에너지 감소폭은 지역별 기후·습도 조건에 따라 다르게 나타나지만, 냉·난방을 포함한 연간 총 에너지 요구량은 모든 지역에서 목재 OSC 외벽이 PC 외벽보다 낮은 수준을 일관성 있게 보였음
- 이는 고층 아파트의 외벽에 적용할 경우, 본 연구에서 제안한 목재 외벽시스템이 에너지 절감 측면에서 충분한 경쟁력을 가진다는 것을 시사함

4.3.5. 소 결

- 본 절에서는 PC 외벽을 기준으로 하여 목재 외벽 1안(암면, 유리섬유 조합)과 2안(암면, 경질폼 조합)의 열적·습기적·에너지적 성능을 종합적으로 분석하였음
- 분석 결과, 목재 OSC 외벽은 스티드의 열교를 고려하더라도 지역별 에너지절약 설계기준을 충족하였고, 경질폼을 포함한 2안은 가장 낮은 유효 열관류율을 보여 PC 외벽 대비 열손실 저감 효과가 가장 우수하였음
- 수분 거동 평가에서는 총 수분함량(TWC), OSB 함수율(M-%) 및 곰팡이 지수를 활용하여 장기 습열 안정성을 검토하였음
- 제주지역과 같은 외기 조건이 가장 불리한 환경에서도 목재 외벽은 내부 단면에서 장기적인 수분 축적이나 함수율 20% 초과가 발생하지 않았고, 곰팡이 지수도 전 지역·구성안에서 1 이하로 유지되어 실질적인 곰팡이 발생 위험이 매우 낮은 것을 확인하였음. 이는 목재 OSC 외벽이 국내 기후 조건에서도 충분한 습열 안정성을 확보할 수 있는 외벽시스템임을 의미함

- 에너지 성능 측면에서는 목재 외벽 구성안 모두 PC 외벽 대비 연간 냉난방 에너지 요구량이 감소하였고 특히, 난방기간에서 절감 효과가 크게 나타났음
- 냉방기간에서는 지역별 기후 특성에 따라 절감률이 다소 상이하게 나타났으나, 전반적으로 목재 외벽은 외기 열취득을 줄이고 실내 열환경을 안정화하는 데 유리한 것으로 분석되었음
- 또한 1안 대비 2안이 더 낮은 에너지 요구량을 일관성 있게 보였는데 이는 경질품 단열재의 열전도율이 더 우수하여 외피의 전체 열손실을 더 효과적으로 억제했기 때문으로 판단됨
- 종합적으로, 목재 외벽은 PC 외벽 대비 경량성, 시공 효율성, 구조적 건조성, 단열 성능 향상 가능성 등 여러 장점을 가지며, 열·습열적 안전성은 물론 에너지 성능을 모두 충족하는 것으로 나타났음
- 이는 목재 외벽시스템이 국내 기후 조건에서도 실용적이고 안정적인 대안이 될 수 있음을 보여주는 것이며, 향후 목조 건축의 확대 및 OSC 적용성 확보 측면에서도 경쟁력 있는 외벽 솔루션이라 판단됨

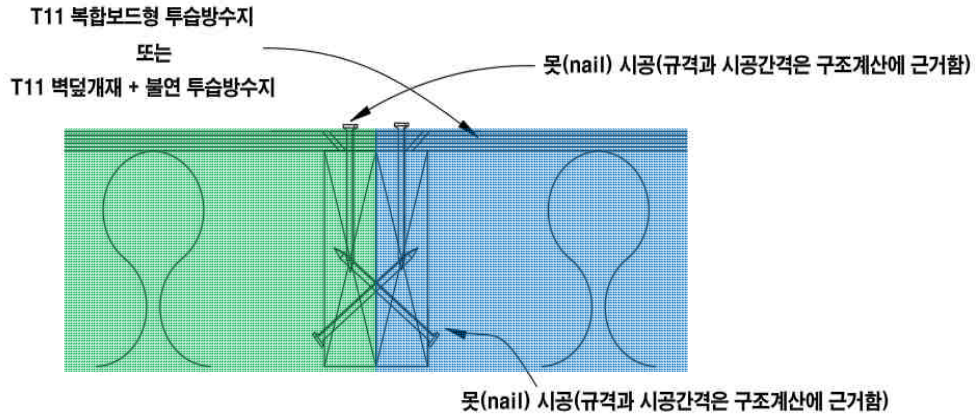
5. 목재외벽 접합부 및 창호 시공방식 제안

5.1. 외벽패널 간 수평방향 접합

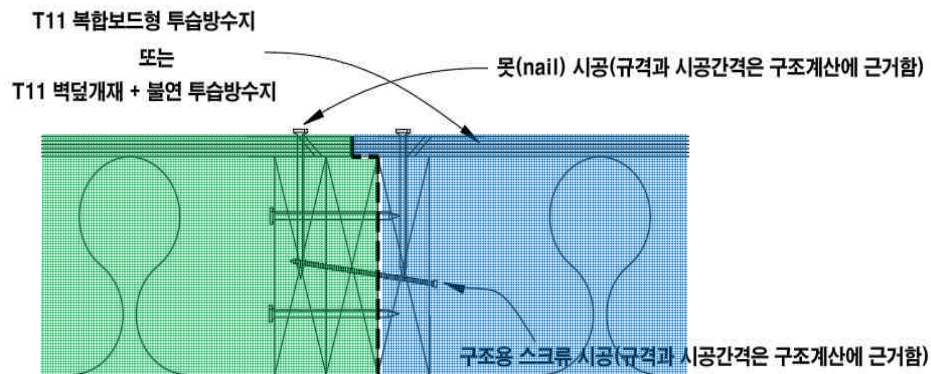
- 벽체패널의 수평방향 접합은 목재 패널라이징 공법의 가장 핵심적인 공정 가운데 하나로서 패널의 구조적 연속성을 확보하고 기밀·수밀 성능을 유지하는 데 결정적 역할을 함
- 특히 외벽패널은 단열재, 구조용 합판(OSB, SPB 등), 스테드, 방습·방수층 등 여러 자재로 구성되므로, 패널 간 접합부는 벽체의 전체 성능을 좌우하는 취약부위로 작용할 가능성이 높음
- 따라서 수평방향 패널 접합부의 설계 및 시공 시에는 구조적인 안정성, 기밀·수밀 성능, 방화성능 등 다양한 관점에서 종합적인 검토와 대안 마련이 필요함

5.1.1. 못 · 스크류를 활용한 기본 접합방식

- 못(nail)과 스크류(screw)를 이용한 접합은 목조 건축의 전통적인 방식이며 국내 현장에서도 가장 보편적으로 사용되는 방식임
- 이 방식에서는 벽체패널 단부의 스테드가 맞닿는 위치에 규정 간격으로 못을 타정하여 패널 간 이격을 방지하고, 스크류 체결을 통해 구조적 인발저항을 확보함
- 특히 수평방향 접합부는 상·하부 패널 무게가 집중되는 부위이므로, 체결 간격은 구조계산을 근거로 설정해야 하며, 일반적으로는 간격을 150mm 이하로 유지하는 것이 권장됨



[그림 2-87] 못을 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합



[그림 2-88] 못스크류를 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합

- 이 방식의 최대 장점은 시공이 단순하고 특수장비 없이도 시공이 가능하며, 벽체 패널 조립 시 오차 보정이 용이하다는 데 있음
- 하지만 작업자의 숙련도에 따라 품질 편차가 발생할 수 있고, 현장의 환경적 여건 (비, 습기, 온도)에 대한 영향을 직접 받는다는 한계가 존재
- 또한 접합부의 기밀성을 확보를 위해서는 방습·방수층을 연속되게 시공해야 하며 필요 시는 방수 테이프 또는 기밀 테이프 등을 추가 시공하여 기밀성능을 확보할 필요가 있음

5.1.2. 기성 철물을 활용한 정밀 접합방식

- 최근 유럽이나 북미에서는 공장제작 패널(Closed Panel 또는 Elemental Panel)을 현장에서 빠르고 정밀하게 조립하기 위한 목적으로 개발된 다양한 기성 접합철물이 사용되고 있음
- 대표적인 기성 제품으로는 Sherpa과 Knapp라는 시스템이 있고, 이들 접합철물은 패널제작 단계에서 스티드에 사전 설치되므로 현장에서는 단순히 끼워 맞추는 방식으로 체결할 수 있음



[그림 2-89] 기성 철물 Sherpa를 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합



[그림 2-90] 기성 철물 Knapp를 이용한 외벽패널 간 수평방향 접합

- 이 접합방식은 다음과 같은 장점을 가짐
 - 정밀도 향상 : 공장 사전 설치로 현장 오차를 최소화
 - 반복성 우수 : 동일 철물을 대규모 패널 생산에 효율적으로 적용
 - 기밀성 향상 : 패널 내부 구조체에 간섭을 최소화해 외피 성능을 유지
 - 현장의 설치속도 개선 : 현장에서는 별도의 못 타정 없이 바로 결합 가능
- 다만 이러한 접합철물의 설계는 구조계산을 기반으로 해야 하며, 접합철물 자체가 외벽 단열층을 관통하는 경우는 열교가 발생할 수 있으므로 외단열 적용 방식에 대한 사전 검토가 필수적

5.1.3. 수평방향 접합부 기밀 · 수밀성 확보

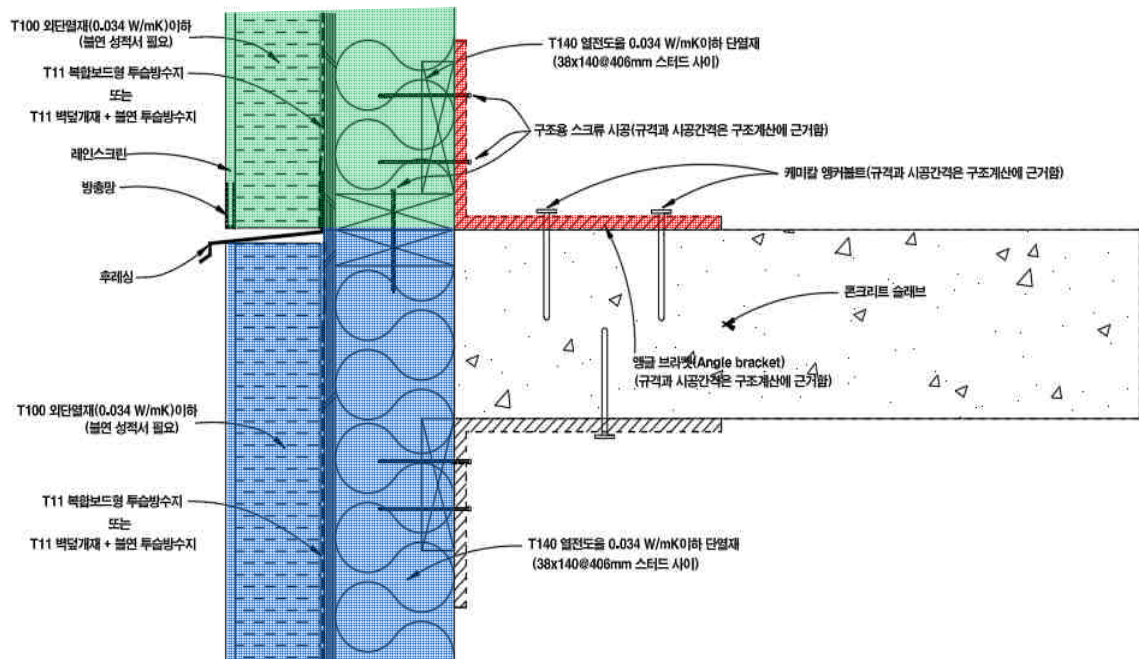
- 수평방향 접합부는 비, 바람, 미세한 외기 침투 등에 가장 취약한 부위이므로 기밀·수밀성 확보를 위해 아래 사항을 고려해야 함
 - 방습지·투습방수지의 겹침(overlap) 길이 확보
 - 기밀테이프 적용 후에 롤러를 이용한 압착시공
 - OSB, SPB 등 접합부에는 실런트(sealant) 처리
 - 기밀층(PE sheet 또는 스마트 베이퍼 컨트롤 레이어) 연속성 확보
 - 벽체패널 간 단차 방지를 위한 ‘패널 레벨 조정장비(Leveler)’ 사용
- 수평방향 접합부의 성능은 벽체패널 전체의 에너지 성능에 장기적·직접적 영향을 미치게 되므로, 공장제작 패널(Closed Panel) 방식에서는 접합부 표준화 및 상세 디테일 확보가 무엇보다 중요한 과제라고 판단됨

5.2. 외벽패널 간 수직방향 접합

- 벽체패널의 수직방향 접합은 패널이 바닥 슬래브, 기초 벽체, 층간 시스템과 접합 되는 구간으로, 건물의 수직 하중(Dead Load)과 수평 하중(Wind Load)을 모두 지지해야 함. 특히 다층 목조건축 또는 RC-목재 하이브리드 구조에서 수직방향 접합부의 성능은 전체 구조 안전성과 직결되는 부분임

5.2.1. 앵글 브라켓 접합방식

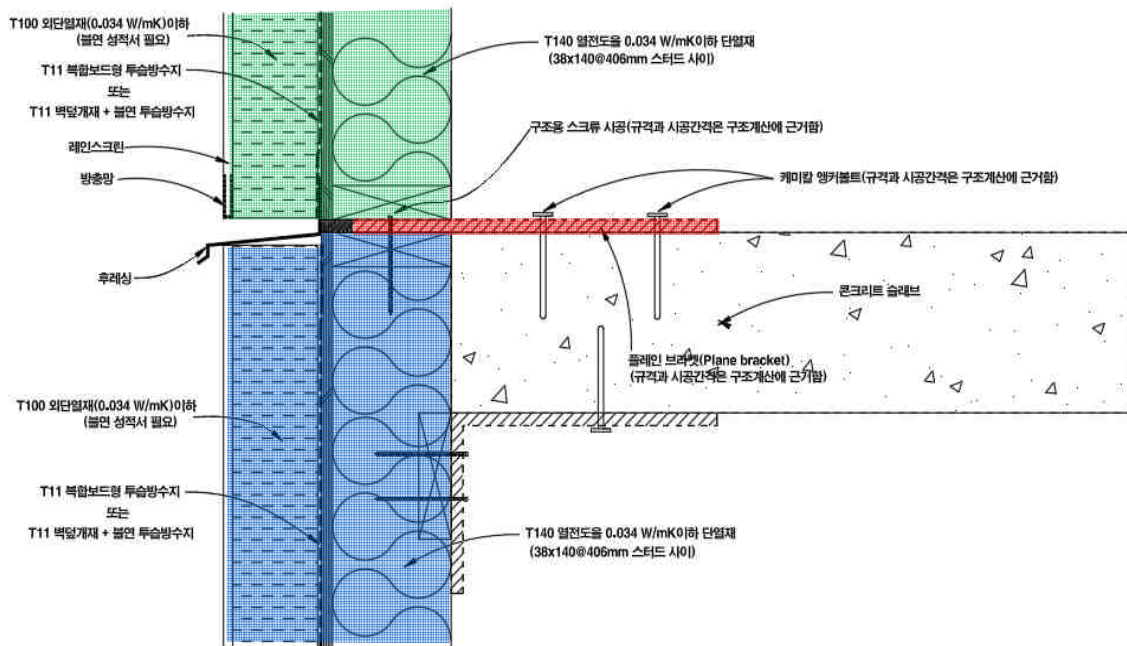
- 앵글 브라켓(Angle bracket) 방식은 금속 브라켓을 활용해 패널 하부와 슬래브를 직접 연결하는 방식으로, 전단 저항력과 인발 저항력이 뛰어나며 그 주요 특징은 다음과 같음
 - 전단 저항 : 패널이 미끄러지는 것을 방지
 - 인발 방지 : 바람에 의한 양력(Uplift)을 저감
 - 설치 용이 : 현장에서 즉시 체결 가능
 - 보수 용이 : 패널 교체, 보수 시 접근성이 우수
- 통상 이 접합방식에는 구조용 스크류가 함께 사용되며, 체결 간격은 구조계산으로 확인해야 함
- 특히, RC 슬래브와의 접합하는 경우에는 앵커볼트(chemical anchor 또는 wedge anchor)를 이용한 선행 체결이 필요할 수 있음



[그림 2-91] 앵글 브라켓을 이용한 외벽패널 간 수직방향 접합

5.2.2. 평철 브라켓 접합방식

- 평철 브라켓(Plane bracket) 접합방식은 벽체패널 단부와 슬래브 단면을 평철로 연결하는 방식으로 외관상 노출되는 브라켓이 적어 외관에 유리함. 또한 브라켓이 단열층을 관통하지 않는 배치가 가능하여 열교를 크게 줄일 수 있는 장점이 있음
- 그러나 이 방식은 앵글 브라켓 접합방식 대비 전단저항 성능이 낮을 수 있으므로, 아래의 사항을 정밀하게 검토해야 함
 - 구조용 스크류의 삽입 각도
 - 브라켓 간격
 - 하부 패널과 상부 패널의 하중 분배



[그림 2-92] 평철 브라켓을 이용한 외벽패널 간 수직방향 접합

5.2.3. 방수 · 단열 · 기밀성 확보

- 수직방향 접합부는 바닥 슬래브와의 접합이므로 누수 위험이 존재함. 따라서 다음 사항에 대한 검토가 필수적일 뿐 아니라 적절한 단열재 배치와 열교 차단을 위한 브라켓 시스템의 보완이 필요함

- 투습방수지의 연속적 겹침 및 투습방수지 이음부 테이핑 처리
- 레인스크린 적용을 통한 외벽 배수 통로 확보
- 하단부 플래싱(Flashing) 설치
- 기밀층 연속성 유지

5.3. 창호설치 시 주의사항

- 창호는 건물의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 구성요소 가운데 하나로, 기밀·단열·수밀·내구 성능 등에 직접적인 영향을 미침
- 특히 목재 OSC 외벽시스템에서는 창호 주변 프레이밍과 마감 처리 방식이 전체 시스템의 성능을 결정하므로 정밀한 시공관리가 필요

5.3.1. Rough opening 정확성 확보

- 창호 프레임과 창호 설치를 위해 외벽시스템에 미리 만들어 두는 개구부인 Rough opening(이하, RO)은 창호의 외경 대비 15~20mm 여유를 두고 제작해야 함
 - 통상적으로 Rough opening은 문이나 창호를 설치하기 위해 벽체 패널에 미리 만들어 두는 여유공간을 포함하는 개구부로 정의됨
- 이는 창호의 설치오차 흡수 및 팽창·수축에 대비하기 위한 것으로 RO가 정확하게 시공되지 않은 경우에는 창호의 개폐 불량, 기밀성능 저하, 하자 발생으로 이어질 가능성이 높음

5.3.2. 창호 주변 골조 보강

- 창호와 프레임의 하중은 킹스터드 또는 잭스터드를 통해 주변 골조에 전달되므로 창호 주변의 골조는 2-ply 이상의 목재를 중첩하여 구조적 강도를 확보해야 함
- 헤더(Header)는 창호의 상부 하중을 지지하는 구조요소이므로, 보수적인 설계가 요구되며 창호와 창호 프레임의 하중이 토대(Sill plate)까지 안정적으로 전달될 수 있도록 설계해야 함

5.3.3. 창호 주변 기밀 · 단열성 확보

- 창호의 코너 부분은 기밀성능이 가장 취약한 부분이므로, 고성능 기밀 테이프를 적용하여 시공하고, 열교를 방지하기 위하여 저팽창 우레탄폼 또는 탄성 충전재를 이용하여 틈새를 충전해야 함
- 기밀층과 투습방수층은 반드시 끊김 없이 RO 주변까지 연속되도록 시공해야 함

5.3.4. 창호 주변 누수 방지 디테일

- 목재 외벽에서 누수 하자는 대부분 창호 주변에서 발생하므로 다음과 같은 조치가 필수적임
 - 창호 하단 부위 플래싱(Drip Edge) 설치
 - 레인스크린 공간 확보
 - 방수 테이프 3단계 시공 : Bottom → Side → Top
 - 물길 정리를 위한 경사 처리

5.4. 창호운송 시 주의사항

- 공장에서 창호가 설치된 벽체패널을 운송하는 경우, 운송과 양중 과정에서 충격·변형·진동에 의한 손상이 발생할 가능성이 높음. 이에 따라 패널 보호를 위한 종합적인 운송 관리가 필요함.

5.4.1. 창호 유리 및 프레임 보호

- 유리의 파손은 비용 손실뿐 아니라 프로젝트 지연으로 이어질 수 있으므로 예방 조치가 매우 중요함
 - 모서리 보호 캡 설치
 - 유리 보호 필름 부착
 - 이동 중 진동을 최소화하기 위한 패딩 적용

5.4.2. 패널 변형 방지를 위한 보강

- 창호가 설치된 패널은 일반적인 패널보다 강성이 낮아 변형의 위험이 높기 때문에 이를 방지하기 위한 임시 보강재(Temporary strong-back)를 설치해야 함
- 특히 벽체패널의 뒤쪽 또는 측면에는 직각 프레임을 보강하여 운송 중 흔들림을 최소화해야 함

5.4.3. 패널의 운송차량 적재방식

- 사전제작 벽체패널의 적절한 적재는 운송 중 변형 및 파손을 크게 줄일 수 있으며 또한 설치 단계까지 품질을 유지하는 데 매우 중요한 요소로 작용
 - 창호가 서로 마주보지 않도록 적재
 - 창호 유리가 외부 충격에 노출되지 않도록 충격흡수재 배치
 - 패널 하부가 바닥과 직접 맞닿지 않도록 지지블록 또는 고무 패드 사용



[그림 2-93] 창호와 마감재 파손방지를 위한 임시보강재 설치 예시

6. 목재외벽과 PC외벽 종합비교

6.1. 벽두께

- 외벽 패널의 두께는 건축물 외피성능을 좌우하는 핵심요소 중 하나로 단열성능뿐 아니라 실내 유효면적의 확보, 구조계획, 설비배치, 외관계획 전반에 영향을 미침. 특히 공동주택과 같이 반복적인 평면을 가지는 건축물의 경우 외벽 두께의 차이는 전체 연면적과 사업성에 직접적인 영향을 미침
- 기존 PC 외벽시스템은 일반적으로 200mm 두께의 PC 패널을 구조체로 사용하고, 실내측에 약 150mm 내외의 내단열을 적용하는 방식이 주를 이룸. 이 경우 구조체와 단열층이 분리되어 있어 전체 벽체 두께는 약 350mm 내외로 형성됨. 이는 구조적 안정성과 시공 표준화 측면에서는 장점이 있으나, 벽체 두께 증가로 인해 실내 면적 손실이 발생함

[표 2-30] PC와 목재 외벽의 벽 두께 비교 (중부2지역 기준)

항목	PC 외벽	목재 외벽
구조체	PC 패널 200mm	경골목구조 2×6 패널 140mm
단열층	내단열 150mm	패널 중단열 140mm + 외단열 100mm
총 두께	350mm 내외	289mm 내외

- 반면에, 목재 OSC 외벽시스템에서는 경골목구조 2×6 패널(약 140mm)의 내부에 중단열재를 충전하고, 외측에는 외단열을 연속적으로 배치하는 구조를 취함. 본 연구에서 제안한 중부 2지역 기준 단면의 경우는 중단열 140mm와 외단열 100mm 구성으로 PC 외벽과 동등 이상의 단열 성능을 확보할 수 있으며, 이 때 전체 벽체 두께는 약 289mm 내외로 감소함
- 이는 PC 외벽 대비 약 17% 정도의 벽체 두께 감소 효과에 해당하며, 동일 연면적 기준으로 환산할 경우에 실내 유효면적 증가로 이어짐. 반복 세대 수가 많은 공동주택에서는 이러한 차이가 누적되어 건축계획의 효율성에 큰 영향을 미침
- 또한 벽체 두께 감소는 단순한 면적 확보를 넘어 발코니, 복도, 설비 공간 계획의 유연성을 향상시키며, 외곽선 관리의 측면에서도 유리하게 작용함. 이는 고밀도 주거 및 도심형 공공주택 적용 시 중요한 설계적 이점으로 평가됨

6.2. 중 량

- 외벽패널의 중량은 구조 설계, 운송, 양중, 시공 공정 전반에 영향을 미치는 핵심 변수임. OSC 방식에서는 공장제작-운송-현장설치의 전 과정에서 외벽패널의 중량이 차지하는 비중이 큼
- PC 외벽은 콘크리트와 철근을 주요 재료로 사용하므로 1㎡ 당 약 450~550kg의 중량을 가짐. 이러한 고중량으로 대형 크레인 사용이 필수적이며, 운송 효율 저하, 기초 및 골조 설계 시 하중 증가, 지진 시 관성력 증가 등의 제약을 발생시킴
- 반면에, 목재 외벽은 경골목구조와 경량 단열재 및 마감재로 구성되어 1㎡ 당 약 55~80kg 수준의 중량을 가짐. 이는 PC 외벽 대비 약 15~20% 수준에 해당

[표 2-31] PC와 목재 외벽의 중량 비교

구 분	PC 외벽	목재 외벽
중 량 (㎡ 당)	450 ~ 550kg	55 ~ 80kg
상 대 비 율	100%	약 15 ~ 20% 수준
운송시 적재량 (25톤 트레일러 기준)	PC 패널 약 2~3장	목재 패널 약 8~12장

- 이러한 중량 차이는 지진하중 감소, 기초단면 축소 가능성, 상부구조의 하중 부담 감소 등 구조설계 측면에서 유리하게 작용함
- 아울러 25톤 트레일러 기준 운송 시 PC 외벽은 약 2~3장, 목재 외벽은 약 8~12장 적재가 가능하여 물류 효율성이 크게 향상됨. 이는 공사기간 단축, 운송 비용 절감, 현장 작업동선 단순화 등으로 이어짐

6.3. 자재비 (㎡ 당)

- ㎡ 당 자재비는 외벽시스템의 경제성을 평가하는 핵심 지표이지만 본 연구에서는 정량적 비교에 한계가 있었음. 특히 PC 외벽의 경우 프로젝트별 패널 규격, 철근 배근량, 마감 일체화 여부, 운송 거리 및 현장 여건 등에 따라 단가 편차가 매우 큼
- 이로써 본 연구에서는 ㎡ 당 자재비를 수치로 직접 비교하기보다는 비용 구조적 특성을 중심으로 정성적 분석을 수행함. PC 외벽은 제작, 운송, 양중 비용 비중이

크고 현장 여건에 따른 비용 변동성이 큰 반면, 목재 외벽은 공장 제작 중심의 공정 분리가 가능하여 표준화 및 양산 단계에서 비용 안정화 가능성이 높음

- 특히 목재 외벽은 향후 패넬 규격 표준화 및 자동화 공정 도입 시 단가 하락 여지가 크며 장기적 경제성 측면에서 높은 잠재력을 가짐

6.4. 환경영향 (LCA)

6.4.1. 평가개요

- 본 절에서는 PC 외벽과 목재 외벽의 환경영향을 정량적으로 비교·평가하기 위해 전과정 평가(이하 LCA, Life Cycle Assessment)를 진행하였음. 평가의 범위는 ISO 14040/44 기준에 따른 제조단계(A1~A3)로 설정(Cradle-to-Gate)
- 기능 단위는 외벽패넬 1m²이며, 평가지표는 GWP(탄소배출량, Global Warming Potential, kgCO₂eq/m²)임. 시스템 경계는 원재료 채취부터 제조, 공장 출하 단계까지로 설정함
- 제조단계 중심의 LCA는 외벽시스템 간 재료 구성 차이를 가장 명확히 비교할 수 있으며, 데이터 신뢰도가 높고 정책 및 연구 분야에서 널리 활용되는 방식임
- 특히 목재 외벽의 경우 생물기원탄소의 저장효과가 발생하므로, 제조단계 중심의 분석이 목재의 환경적 특성을 가장 잘 반영할 수 있음

6.4.2. 결과분석

- PC 외벽의 제조단계(A1~A3) GWP는 약 +120 kgCO₂eq/m², 목재 외벽은 화석 연료 기준으로 약 +13.3 kgCO₂eq/m²로 평가됨
- 여기에 생물기원탄소 저장 효과를 포함하면 목재 외벽은 약 -11.3 kgCO₂eq/m² 수준로 평가됨
- 이는 목재 외벽이 순(純) 탄소 흡수 외피로 기능함을 의미하며, PC 외벽 대비 약 1/9 수준의 탄소배출 특성을 가짐

[표 2-32] PC와 목재 외벽의 LCA결과 비교

구 분	PC 외벽	목재 외벽	비 고
주요 재료	콘크리트 + 철근 + 경질 PUR	구조목 + OSB + 암면/글라스울	내 · 외장 마감재 제외
구조체 / 단열 구성	200mm PC + 150mm PUR	100mm 암면 + OSB 11mm + 2×6 + 140mm 중단열 + 2×2 가로상	
1㎡당 추정 질량	약 480 ~ 500 kg	약 20 ~ 22kg 내외	목재외벽이 매우 경량
GWP (A1-A3, 화석배출만)	≈ 120 kgCO ₂ e/㎡	≈ 13.3 kgCO ₂ e/㎡	제조단계 기준, 목재외벽이 1/9 수준
└ 콘크리트/구조체	≈ 104	구조용 제재목 ≈ 2.1	
└ 단열재	PUR 150mm ≈ 15.7	암면 · 중단열합 ≈ 10.1	
└ 기타 (OSB 등)	-	구조용 OSB 11mm ≈ 1.1	
생물탄소 저장 (목재 · OSB)	0	약 -24.6 kgCO ₂ e/㎡	PC 외벽은 저장 없음
GWP (A1 - A3, 저장포함)	≈ +120 kgCO ₂ e/㎡	≈ -11.3 kgCO ₂ e/㎡	목재외벽은 순(-) 배출 외피가 됨

6.5. 요구성능

- 요구성능 측면에서 PC 외벽과 목재 외벽은 각각 장단점을 가짐. PC 외벽의 경우 구조체 자체로 2시간 내화성능 확보가 가능한 장점이 있으나, 단열 및 기밀 성능은 별도의 보완 설계가 필요
- 목재 외벽의 경우 방화 석고보드 상세 설계로 1~2시간 내화성능 확보가 용이하며 사전 제작으로 연속적인 단열·기밀 시공이 가능하여 에너지 성능 확보에도 유리
- 차음성능은 중량 구조의 특성상 PC 외벽이 우수하지만, 목재 외벽 역시 추가 차음 상세 적용을 통해 성능 확보가 가능함
- 내진성능 측면에서는 경량구조인 목재 외벽이 지진하중 감소 효과를 가지며, 이는 고층 및 중층 건축물 적용 시 중요한 장점으로 작용함

[표 2-33] PC와 목재 외벽의 주요성능 비교

항 목	PC 외벽	목재 외벽	평 가
내화성능	구조체 구성만으로 기본 2시간 용이	방화 석고보드 기반의 내화피복 설계로 1~2시간 성능 확보가 가능	동등성능 확보 가능
단열성능	단열 취약, 외단열필요	패널 일체형 고단열 (공장제작시 단열시공이 가능하여 품질확보)	목재 외벽이 우수
기밀성능	패널 간 이음부 취약 (기밀시공이 용이하지 않음)	기밀시공으로 우수한 성능 확보가 가능 (공장 사전제작으로 기밀시공도 용이)	목재 외벽이 우수
차음성능	중량구조로 우수	추가 차음재 및 상세 필요	PC 외벽이 우수
내풍·내진	중량 → 풍 진동 적음	경량 → 지진하중 감소 효과	용도별 선택 가능

6.6. 종합비교

- PC 외벽과 목재 외벽의 종합 비교 결과, 두 외벽시스템은 구조 형식과 시공 방식의 차이에 따라 성능 특성 및 적용 적합성이 상이한 것으로 분석됨. 본 절에서는 벽체 두께, 중량, 에너지 성능, 환경영향, 시공성 및 유지관리 측면에서의 비교 결과를 종합적으로 정리함
- 벽체 두께 면에서, PC 외벽은 구조체와 단열층을 포함할 경우 총 두께가 약 350mm 내외인 반면 목재 외벽은 중부지역 기준 약 289mm 내외로 구성 가능함. 이에 따라 동일한 건축 외곽선 조건에서 목재 외벽은 실내 유효 면적 확보 측면에서 유리함
- 중량 면에서는 PC 외벽이 1m² 당 450~550kg 수준인 반면 목재 외벽은 55~80kg 정도로 나타나 PC 대비 약 15~20% 수준임. 이러한 경량성은 운송 및 양중 효율을 크게 향상시키며 구조체에 작용하는 지진 하중 감소에도 기여할 수 있음
- 에너지 성능 측면에서, PC 외벽은 구조체 자체의 열전도 특성으로 인해 단열 성능 확보를 위해서는 별도의 외단열 시스템이 필요함. 반면 목재 외벽은 패널 자체에 중단열·외단열을 일체화한 구성으로서 열교 저감과 높은 단열성능 확보에 유리함. 실제 유효 열관류율(U-value) 산정결과에서도 목재 외벽이 우리나라 단열기준을 안정적으로 충족함을 확인함
- 기밀성능 측면에서도 차이가 확인됨. PC 외벽은 패널 간 접합부가 다수 존재하여

기밀성능 확보에 상대적으로 불리하며 현장 기밀시공에 의존도가 클 수밖에 없음
반면 목재 외벽은 공장제작 단계에서 기밀층을 일체화할 수 있어 기밀성능 확보가 용이하며 시공품질의 균일성 확보도 가능함

- 차음성능의 경우에는 중량구조인 PC 외벽이 기본적으로 우수한 성능을 보이지만 목재 외벽은 경량구조의 특성상 추가적인 차음 설계 및 보강이 필요함. 다만 이는 상세 설계 및 자재 보강을 통해 동등 수준의 성능 확보가 가능하다고 판단됨
- 내화성능 면에서는 PC 외벽이 구조체 자체로 2시간 이상 내화성능 확보가 용이한 반면에, 목재 외벽은 방화 석고보드 등 내화 보강을 통해 1시간 이상의 내화성능 확보가 가능함, 2시간 내화성능 확보를 위해서는 추가 보강이 필요함. 이는 건물 용도 및 규모에 따라 합리적인 선택이 가능한 부분이라 판단됨

[표 2-34] PC와 목재 외벽의 종합 비교

	항 목	PC 외벽	목재 외벽	주요 비교 결과
1	벽두께	350mm 내외	289mm 내외	목재 외벽이 약 17% 얇음
2	중 량 (kg/m)	450 ~ 550 kg	55 ~ 80 kg	목재 외벽이 15~20% 수준
3	자재비 (㎡ 당)			
4	LCA (전과정탄소배출량)	120 kgCO ₂ e/㎡	13.3 kgCO ₂ e/㎡	목재 외벽이 1/9 수준
5	LCA (탄소저장량 포함)	120 kgCO ₂ e/㎡	-11.3 kgCO ₂ e/㎡	
6	구조성능 (전단 · 내진)	우수 (중량 기반)	경량으로 지진하중 감소, 전단벽 설계 필요	목적에 따라 상호 보완
7	내화성능	기본 2시간 확보 용이	내화피복 설계로 1~2시간 성능확보 용이	성능보강 시 동등 수준
8	단열성능 (U-value)	별도의 단열층 필요	패널 일체형 고단열	목재 외벽이 우수
9	기밀성능	패널간 접합부 취약	공장 기밀시공으로 우수	
10	차음성능	중량구조로 우수	경량으로 추가보강 필요	PC 외벽이 우위
11	운반 · 양중	대형크레인 필요 (비용 큼)	경량장비 가능 (비용 소폭)	목재 외벽이 매우 유리
12	시 공 성	공정이 많고 시간 소요	조립식 패널, 공정 단순	목재 외벽이 우수
13	공사기간	상대적으로 장기간 소요	공기단축 가능성 높음	
14	유지관리 용이성	보수 어려움 (균열 · 접합수)	단열 · 기밀층 보수 용이	

- 시공성 및 공기 측면에서 목재 외벽은 사전 공장제작된 패널을 현장에서 설치하는 방식으로 공정이 단순하고 공기단축 효과가 큼. 반면, PC 외벽은 제작, 운송, 양중, 설치 과정에서 대형 장비와 장시간 공정이 요구되어 상대적으로 공사 기간이 길어지는 경향이 있음
- 유지관리 측면에서도 PC 외벽은 균열 및 접합부 열화에 따른 보수가 상대적으로 어려운 반면, 목재 외벽은 단열층 및 기밀층 보수 접근성이 비교적 용이하여 유지관리 측면에서 장점을 가짐
- 환경영향 측면에서 수행한 LCA 분석 결과, 제조단계(A1~A3)에서 목재 외벽은 PC 외벽 대비 온실가스 배출량이 약 1/9 수준으로 매우 낮게 나타남. 또한 목재 및 OSB에 의한 생물기원탄소 저장효과를 고려하면, 목재 외벽은 순(純) 탄소 흡수 외피로 기능할 수 있음. 이는 건설산업의 탄소중립 및 환경부담의 저감 측면에서 매우 중요한 의미를 가짐
- 이상의 내용을 종합할 때, PC 외벽은 차음성능·내화성능에서 장점을 가지는 반면 목재 외벽은 단열·기밀·환경성·시공성·유지관리 등 측면에서 전반적으로 우수한 성능을 보이는 것으로 분석됨
- 따라서 향후 공동주택 외벽시스템 적용 시, 건물의 용도, 규모, 성능 요구 수준을 종합 고려하여 이들 두 개의 벽체 시스템을 합리적으로 선택하거나, PC 구조체와 목재 외벽을 결합한 하이브리드 외벽시스템 적용을 모색하는 방안이 타당하다고 판단됨

7. 소 결

7.1. 연구의 핵심

- 본 연구는 기존 PC 아파트 외벽을 대체할 수 있는 목재 OSC 외벽시스템의 기술적 타당성과 국내 적용 가능성을 종합 검토하고, 이를 위한 외벽 구성안의 제안, 성능 검증 및 설계방향을 제시하는 것을 목적으로 수행하였음
- 이를 위해 국내 공동주택 외벽에 적용되는 성능 요구기준(내화, 내풍, 단열, 기밀, 구조 안전성, 마감재 화재 성능 등)을 체계적으로 정리하고, 해외 주요 국의 관련 기준 및 적용 사례와 비교 분석을 수행하였음
- 그 결과, 국내 기준 체계는 외벽 구성요소 단위의 성능 규정에는 충실하나, 경골목 구조와 같은 벽식구조 외벽 어셈블리의 전체 성능을 종합적으로 평가할 수 있는 기준은 미비함을 확인함
- 이에 본 연구에서는 경골목구조 및 공장제작 패널 적용 건축이 제도적으로 정착된 캐나다의 외벽 어셈블리 유효 열관류율 산정 기준을 적용하여 국내 기후 조건에 따른 외벽 단면 구성안의 에너지 성능을 정량적으로 검증하였음
 - 캐나다 기준은 벽체 내 열교 영향을 고려한 합리적인 산정 체계를 갖추고 있으며, 국내 기후 조건, 목재 OSC 적용 환경과 유사성이 높아 본 연구의 분석기준으로 적합하다고 판단하였음
- 아울러 캐나다 및 유럽의 중·저층 공동주택 사례를 중심으로 고단열·고기밀 외벽 패널의 기술적 특성, 공장 제작 방식, 패널 간 접합 구조 및 현장 시공 프로세스를 분석하여 국내 적용을 위한 기술적 시사점을 도출하였음
- 이를 바탕으로 국내 적용이 가능한 자재 조합과 기후권역별 외벽 단면 구성안을 제안하고, 모든 구성안에 대해 국내 건축물 에너지절약 설계기준을 충족함을 검증하였음

7.2. 기술적 결론

- 연구 결과, 기존 RC 및 PC 구조체와 목재 OSC 외벽시스템은 구조적으로 충분한

연계가 가능하며, 외피를 비내력 시스템으로 계획할 경우 적용성이 매우 높은 것으로 판단됨. 특히 기존 PC 구조체의 구조적 안정성과 목재 외벽의 경량·고성능 특성을 결합할 경우 합리적인 복합 외벽시스템 구축이 가능함을 확인하였음

- 단열, 기밀, 투습 및 방수 성능 면에서는 해외에서 검증된 조립식 외벽 패널 방식을 적용할 경우 국내 에너지절약 설계기준을 안정적으로 충족하거나 상회하는 성능 확보가 가능함. 공장제작 방식은 단열재의 시공 품질과 기밀 디테일을 일관되게 확보할 수 있어 현장 시공편차를 최소화하는 데 효과적인 것으로 평가됨
- 또한 패널 간 접합부, 패널-PC 구조체 접합부 및 창호 개구부 주변 상세 등에 대해 표준화된 설계 개념을 제시함으로써, 현장 시공성의 향상 및 품질관리 측면에서 실질적인 개선 효과가 기대됨. 이는 기존의 현장 습식 공정 위주의 외벽 시공 방식 대비 공정 단순화 및 공기단축에 기여할 수 있는 요소로 판단됨

7.3. 종합결론

- PC 대비 목재 외벽은 단열 및 기밀 성능, 환경영향(탄소저감) 면에서 전반적으로 매우 우수한 성능을 보이는 것으로 분석되었음. 특히 목재 외벽은 외단열을 포함 패널화된 벽체 구성이 가능해 열교 저감에 효과적이며, 고기밀 외벽시스템 구현에 유리한 구조적인 특성을 가짐
- 중량 측면에서는 목재 외벽이 PC 외벽 대비 현저히 경량화되어 운송효율의 향상, 양중장비 소형화, 설치속도 향상 및 구조체에 작용하는 지진하중 감소 등 부가적 효과가 기대됨. 이는 중·고층 공동주택의 시공성과 구조 안전성 측면에서 중요한 장점으로 평가됨
- LCA 분석 결과, 동일한 성능조건을 기준으로 할 경우 목재 외벽은 제조단계(A1~A3)에서 PC 외벽 대비 탄소배출량이 크게 낮은 것으로 나타났음
- 그리고 목재 외벽은 목재 및 OSB에 의한 생물기원탄소의 저장효과를 고려할 경우 순 탄소흡수 외피로 작용할 가능성이 있는 것으로 확인되었음. 이는 국가 탄소중립 정책 및 건설부문의 온실가스 감축 전략과의 연계 가능성이 매우 높은 기술적 근거라고 판단됨

7.4. 제안사항

- 앞으로 본 연구에서 제안한 기후권역별 외벽 어셈블리 구성, 접합부 상세 및 시공 방식을 토대로 실증 프로젝트(파일럿 프로젝트)를 통한 성능 검증 단계가 필요함
- 이를 통해 목재 OSC 외벽의 설계 단계의 성능 검증을 넘어 실제 시공 환경에서의 시공성, 품질 안정성, 에너지 성능 등을 종합 평가할 수 있을 것으로 판단됨
- 실증 프로젝트 결과를 토대로 설계·제작·시공 프로세스를 표준화할 경우는 국내 최초 PC 대체형 목재 OSC 외벽시스템으로의 상용화가 가능하며, 이는 공공주택 및 공동주택 분야를 중심으로 확산 적용이 가능함
- 이러한 노력은 건물부문의 탄소중립, 스마트건설 및 OSC 확산 정책과 연계하여 국가 차원의 외벽시스템 혁신 모델로 발전시킬 수 있을 것으로 기대됨

제3장 목조 공동주택

바닥충격음 차단성능과 기술현황

1. 개 요

- 탄소저감형 공동주택 건설을 위해서는 건축자재로 목재의 활용비율을 확대하는 전략이 필요하다.
- 특히, 공동주택에서 바닥 슬래브는 가장 넓은 면적을 차지하는 부분이므로, 바닥 슬래브는 건설 단계의 탄소저감 효과(즉, 내재탄소 저감효과)를 극대화할 수 있는 주요 대상이 된다. 즉, 목조화 전략 수립이 필수적인 대상이라 할 수 있다.
- 공동주택은 법적으로 바닥충격음 차단성능 기준을 반드시 충족해야 한다. 그러나 현재의 바닥충격음 차단성능 기준은 철근콘크리트(RC) 슬래브 210mm를 전제로 마련된 매우 높은 성능요구 수준이다. 따라서 목조 바닥 슬래브가 이 요구성능을 충족할 수 있을지에 대해서는 의문이 제기되고 있다.
- 아울러 목조 바닥 슬래브에 대해서는 충격음 차단성능을 확보하기 위한 표준화된 설계방법이 아직까지 제시되지 못하고 있다. 이는 건설사의 입장에서 목조 바닥 시스템을 적용한 공동주택의 도입에 더 신중한 태도를 취할 수밖에 없는 대표적인 이유이다.
- 따라서, 목조 공동주택 활성화를 위해서는 슬래브의 바닥충격음 차단성능 현황을 면밀히 분석하고, 이를 토대로 우리나라의 법적 요구성능 기준을 충족할 수 있는 설계방향을 구체적으로 수립하는 것이 필요하다.
- 이에 본 장에서는 목조 바닥시스템의 바닥충격음 성능에 관한 국내와 국외 현황을 검토하고, 우리나라 공동주택 적용을 위한 주요 고려사항 및 향후 기술 개발방향 등을 제시하고자 한다.

2. 선행연구

2.1. CLT의 음향 물성치 특성

- CLT는 ‘목재를 섬유방향이 직교하도록 여러 겹 적층하여 접착한 패널’이다. 철근 콘크리트(Reinforced Concrete ; RC)와 유사한 구조적 역할을 수행한다.
 - 통상 RC의 밀도는 약 $2,400\text{kg/m}^3$ 수준이나 CLT는 약 $400\sim 600\text{kg/m}^3$ 의 밀도 범위를 가진다. 즉, RC 대비 4~6배 정도 가볍기 때문에 건축물의 자중경감과 내진설계에 있어 큰 이점이 있다.
- CLT는 수종에 따라서 밀도와 탄성계수가 변하며, RC와 달리 하중 방향에 따라 다른 물성치를 보인다.¹⁾ RC는 높은 탄성계수를 가지면서 처짐에 유리하나 밀도 또한 매우 높다. 반면 CLT는 RC보다 탄성계수가 낮지만 밀도도 낮으므로, 중량 대비 강성 측면에서는 RC와 동등 이상의 효율성을 보여준다.
- RC 대비 CLT의 상대적으로 낮은 밀도와 강성은 ‘질량법칙(Mass law)’으로 인해 바닥충격음과 공기전달음 차단성능 측면에서 불리하게 작용한다.
- 특히, 저주파수 대역의 차음성능이 낮아 CLT 바닥체의 성능만으로는 차음대책 수립이 어렵다. 이에, ‘CLT 바닥의 상하부에 뜬바닥 구조와 천장구조를 결합’한 복합구조 설계하는 등 차음대책 수립이 필요하다.

[표 3-1] CLT와 RC 물성치 비교

물 성	CLT (목 재)		RC (철근콘크리트)
밀 도 (kg/m^3)	470		2,400 ~ 2,600
탄성계수 (Gpa)	x축	10.100	20 ~ 30
	y축	0.137	
	z축	0.137	
전단계수 (Gpa)	xy축	0.459	8.50 ~ 12.5
	yz축	0.074	
	xz축	0.459	
푸아송비	xy축	0.050	0.15 ~ 0.20
	yz축	0.300	
	xz축	0.050	

1) Kohrmann, M.(2017). “Numerical Methods for the Vibro-Acoustic Assessment of Timber Floor Constructions.” Technische Universität München (Doctoral dissertation, Dissertation, Germany).

2.2. 바닥충격음 차단기술 개발 동향

2.2.1. 국 내

- 바닥 슬래브는 건축물의 전체 연면적 가운데 가장 높은 비중을 차지한다. 따라서 목조주택에서 탄소저장량을 극대화하기 위해서는 바닥 슬래브의 목조화 비율을 높이는 것이 중요하다.
- 하지만 우리나라에서는 단독주택, 소규모 저층주택을 중심으로 목조주택 공급이 이루어짐에 따라, 현행 법상 바닥충격음 성능검사 대상에 해당하는 30세대 이상 공동주택을 대상으로 한 연구개발 사례는 전무한 상황이다.
- 공동주택에서 바닥 슬래브는 ‘안전성 관련 항목(구조적 안정성, 내화성능 등)’ 및 ‘주거성 관련 항목(바닥충격음, 단열성능 등)’ 모두를 만족하는 방향으로 설계가 이루어져야 한다.
 - 목조 바닥 슬래브의 구조적인 안정성과 바닥충격음 차단성능은 높은 상관성이 있다.
 - 법상 요구되는 높은 바닥충격음 차단성능 기준으로 실무에서는 필요 이상의 과도한 두께의 슬래브가 설계되고 있는 게 현실이다.
- 우리나라의 현행 바닥충격음 차단제도는 중량충격음과 경량충격음 요구성능을 모두 충족하도록 설계된 제도이다.
- 하지만, 대안설계의 관점에서 중량충격음과 경량충격음은 상반된 특성을 가진다. 중량충격음은 슬래브의 강성과 질량 등 구조체 설계에 지배적 영향을 받는 반면에 경량충격음은 완충재·마감재 등 충격 흡수자재를 사용함으로써 차단대책 설계가 가능하다.
 - 이러한 특징으로, 현 제도는 벽식 아파트에서 중량충격음을 차단을 위해 RC 슬래브를 210mm 이상 시공하도록 의무화하고 있다.
 - 아울러, RC 슬래브 상부에는 진동 제어를 위한 완충형 바닥시스템을 추가 설치하도록 규정함으로써 경량충격음을 제어하고 있다.
- 따라서, 목조 바닥슬래브를 공동주택에 적용하기 위해서는 우선적으로 목조 바닥 구조체 자체에 대해 중량충격음 차단성능을 구현하기 위한 적정 두께 설계방법이 정립되어야 할 것이라 판단한다.

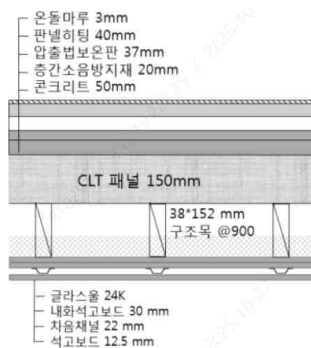
- 한편, HA et al.(2023)²⁾은 CLT 슬래브의 바닥충격음 차단성능을 분석하기 위해 잔향 실험실 조건에서 수종과 접합방식 및 두께에 따른 실험을 수행하였다.
- 실험 결과, 동일한 두께(150mm)의 CLT 슬래브는 수종이나 접합방식에 따른 성능 차이가 비슷한 수준인 것으로 확인되었다. 하지만 CLT의 두께 증가에 따른 바닥 충격음 차단효과는 뚜렷한 것으로 분석되었다.
 - CLT 두께를 150 → 450mm 까지 증가시킨 실험에서 중량충격음은 약 10dB(69→59dB), 경량충격음은 약 16dB(78→62dB) 감소했다. 두께가 30mm 증가할 때마다 중량충격음은 약 1.0dB, 경량충격음은 약 1.6dB 감소하는 것으로 확인되었다.
 - 이상의 결과를 기준으로 할 때, CLT의 두께만으로 중량충격음 최소 성능기준(49dB)을 만족하기 위해서는 약 740mm가 필요하다.
- CLT는 RC 대비 면밀도가 낮기 때문에 바닥충격음 차단성능이 저하되는 경향이 있다. 따라서, 고성능 완충재를 접목함으로써 CLT 슬래브 두께를 경감시키려는 연구도 진행된 바 있다.
- 이효진 외(2023)³⁾는 150mm 두께의 CLT 슬래브 상부에 설치되는 바닥 구조체의 면밀도 증가 효과와 함께, 완충재 적용에 따른 바닥충격음과 공기전달음 차음성능 변화를 파악하기 위하여 잔향 실험실 조건에서 연구를 수행하였다.
 - CLT 슬래브에 하중을 추가하기 위해 PC 패널을 두께별(50·75·100·125·150·210mm)로 적층하였고, CLT와 PC 패널 간 완충재 유무에 따른 성능 변화를 실험하였다.
 - PC 패널을 완충재 없이 CLT 상부에 적층한 조건에서는 PC 패널의 두께 증가에 따라 중량충격음과 경량충격음 모두 감소했고, PC 패널 두께 30mm 증가에 따라 중량충격음 약 2.4dB, 경량충격음은 약 2.7dB 감소한 것으로 분석되었다.
 - PC 패널 210mm 두께를 설치한 조건에서 중량충격음은 17dB(69→52dB), 경량충격음은 19dB(78→59dB) 감소했다. 완충재와 PC 패널 210mm 두께를 복합설치한 조건에서 중량충격음은 18dB(69→51dB), 경량충격음은 29dB(78→49dB) 감소했다.
 - 이는 완충재 설치에 따라 경량충격음이 큰 폭으로 저감되어, 완충재가 가벼운 충격의 제어에는 효과적임을 시사한다.

2) HA YS, LEE HJ, LEE SJ, SHIN JA, SONG DB. A Study on Floor Impact Sound Insulation Performance of Cross-Laminated Timber (CLT) : Focused on Joint Types, Species and Thicknesses. J. Korean Wood Sci. Technol. 2023; 51(5):419-430.

3) 이효진, 하연수, 이상준(2023). “구조용 직교집성판 슬래브와 상부토핑 조건에 따른 바닥충격음 및 공기전달음 평가”, 한국음향학회지, 42(6), 572~583.

- 김세종 외(2022)⁴⁾는 CLT 슬래브와 뜬바닥 구조 및 천장구조가 설치된 다층 목조 기숙사를 대상으로 한 바닥충격음 실험을 실시하였다.
 - 다층 목조 바닥구조의 두께는 총 516.5mm(CLT 150mm, 뜬바닥 구조 150mm, 천장구조 216.5 mm)로서 RC 바닥구조의 두께(490mm)와 유사한 수준으로, 경량충격음 약 44dB, 중량충격음은 44~51dB 수준인 것으로 분석되었다.
 - 이는 CLT 바닥구조의 공동주택 적용가능성을 보여준 사례이며, 바닥충격음 차단성능 향상을 위한 추가적인 기술개발의 필요성을 시사한다.

[표 3-2] 국내 CLT 패널 바닥 적용현장 및 바닥충격음 차단성능

대 상 현 장	바 닥 상 세	바 닥 충 격 음
[한그린 목조관] 		• 경 량 : 44 ~ 45dB • 중 량 : 44 ~ 51dB → 동일평면 3세대 측정 ※ 경량단위 : $L_{n,W}$ 중량단위 : $L_{iA,Fmax,V,T}$

2.2.2. 프랑스

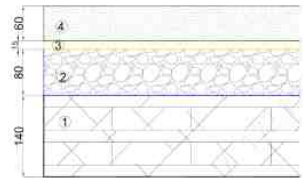
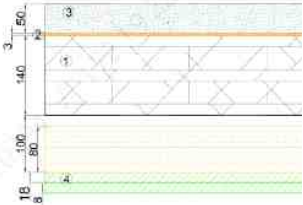
- ADIVBois는 중고층·도시 주거용 목조건축의 확산을 목표로 2015년 설립되었다.
 - ADIVBois는 Association pour le Développement des Immeubles à Vivre Bois(목재 기반 주거건축 개발협회)의 약자이다.
 - 협회 기술위원회는 목조건축이 규제 요건을 충족할 수 있도록 건축시스템을 정의하고 신뢰할 수 있는 음향성능 달성사례를 설계자에 제공하기 위한 연구를 수행하고 있다.
- 협회는 고층목조 건축물의 음향진동 문제를 종합 연구하기 위해 2019년 실물 3층 규모의 목업동(ADIVBois Acoustic Mockup)을 건설하였다.
 - 각 층당 4개 실로 구성된 이 실험실은 바닥구조의 성능뿐 아니라 구조적 접합부의 우회 전달(Flanking Transmission), 그리고 보·기둥 등 지지요소를 통한 진동 전달경로까지 광범위하게 연구하는 것을 목표로 설정하였다.

4) 김세종 외(2022), “목조 공동주택의 화재안전과 층간소음 저감”, 국립산림과학원, 연구보고서 22~25

- 목업동 건설에 앞서 2018년 CSTB는 뜬바닥 구조, 추가질량 보강, 뜬천장 구성을 통합하는 등 다양한 형태의 CLT 바닥구조에 대해 실험실 기반의 차음성능 연구를 진행하였다.
 - CSTB(Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)
- 이 연구를 통해 연구팀은 현장 목표성능을 달성할 수 있는 대표적 바닥구조 유형 2개를 선정하고, 이를 목업동에 적용하였다.⁵⁾
 - CLT 하부 노출형인 Floor 1의 경우에는, CLT 슬래브 하부면을 노출시킴으로써 미적 효과와 거주자의 웰빙 이점을 살리면서도 음향성능 확보를 위한 것임. 이 구조는 CLT 패널(140mm) + 완충재 + 시멘트 모르타르(70mm)를 포함하는 뜬바닥 시스템으로 구성되었다.
 - 뜬천장을 포함하는 Floor 2는 최고 수준의 차음성능을 목표로 한 것이며, 바닥 시스템 외에도 추가적인 차단 요소인 뜬 천장을 포함한다. 뜬천장 공기층 내부에 미네랄 울을 채워 공진을 방지하고 중고주파수 차음성능을 높였다.
- 이들 2개 바닥구조는 CLT 건축 설계자들이 자주 직면하는 상반된 설계 요구사항 즉, 목구조의 미적인 노출 및 최고 수준의 쾌적성 확보의 균형을 대변하는 대표적 솔루션으로 제시되었다.
- 해당 실험에서는 우리나라 중량충격음 4등급 수준을 달성하는 2개의 바닥구조를 제시하였고, 흡음형 천장구조의 설치로 높은 차음성능을 추가 확보할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.
- 목업동에서 수행한 이 바닥충격음 실험에서는 기존 실험실과 동일한 2개의 바닥 구조를 설치·측정하였으며, 실험실 대비 바닥충격음 차단성능이 저하되는 것으로 분석되었다.
- 이는 실험실 측정(ISO 10140)에서는 음향적으로 이상적으로 분리된 경계 조건을 사용하여 바닥판을 통한 직접 전달음(Direct Transmission)만을 평가하는 반면에 현장 목업실험(In-situ testing)은 실제 건물 구조 내에서 진행되기 때문에 소리가 바닥 외 경로, 즉 벽체, 기둥, 그리고 접합부를 통해 전달되는 우회 전달(Flanking Transmission) 효과가 측정 값에 포함되기 때문이다.

5) Guigou Carter, C.; Balanant, N.; Kouyoumji, J.-L. Acoustic Performance Investigation of a CLT-Based Three-Floor Building. Buildings 2023, 13, 1935.

[표 3-3] CLT 슬래브 적용 실험실 바닥충격음 차단성능 (Catherine 외, 2023)

공 법	바 닥 상 세	바 닥 충 격 음
CLT 패널 하부 노 출 형	 1—CLT panel 140 mm 2—Gravel 80 mm (106 kg/m²) 3—Resilient layer 15 mm 4—Concrete screed 60 mm	• 경 량 : 53dB • 중 량 : 47dB ※ 경량단위 : $L_{n,W}$ 중량단위 : $L_{iA,Fmax,V,T}$
CLT 패널 하부 비노출형 (천장마감)	 1—CLT panel 140 mm 2—Thin resilient layer 2 mm 3—Concrete screed 50 mm 4—Suspended ceiling with 2 BA18 with 80 mm of glass wool	• 경 량 : 51dB • 중 량 : 47dB ※ 경량단위 : $L_{n,W}$ 중량단위 : $L_{iA,Fmax,V,T}$

2.2.3. 일 본

- 일본 BRI(Building Research Institute)는 목조건축의 차음기술 개발을 위하여 2016년 6층 규모의 목업주택을 건설하였다.
- 이 실험규모 목업주택에서는 CLT 패널 바닥, 스트레스드 스킨 패널(Stressed Skin Panel) 바닥, LVL 패널 바닥 및 I-조이스트 바닥 등을 층별 설치하여 일본의 규제 조건 하에서 각 유형의 바닥성능을 엄격하게 실험·평가한다.
- 뱅머신을 이용한 실험 결과에서, 단일 CLT 패널 바닥은 구조적으로는 우수하나 중량충격음 차단성능은 주거용 기준을 충족하기 어려우며, 스트레스드 스킨 패널 바닥이 중량충격음 제어에 효과적인 것으로 분석되었다.
- 반면, 임팩트 볼을 이용한 중량충격음 실험에서는 LVL 패널 바닥이 가장 우수한 성능을 보인 것으로 나타났다.
- 특히, 해당 연구에서는 단일 목재 패널만으로는 중량충격음을 제어하는 것이 어려우며, 이중 건식바닥 등을 통한 추가저감 대책을 위한 후속 연구가 필요함을 언급하였다.⁶⁾

6) Hiramitsu, A., Tomita, R., Susumu, H., & Sato, M. (2019). Floor impact sound insulation of the six-story wood-frame model building (pp. 5007–5012). Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.

2.2.4. 캐나다

- 캐나다 NBCC는 공동주택 세대간 벽체 및 바닥에 대해 최소한의 차음성능 기준을 규정하고 있다.
 - NBCC는 National Building Code of Canada의 약자로 캐나다의 건축법규이다. 구조·화재·에너지·안전 등 건축 전반에 관한 국가 건축기준(모델 코드)을 제시한다.
- NBCC에서는 공기전달음 차단성능을 나타내는 최소 Sound Transmission Class (STC) 50과, 바닥을 통한 충격음 차단성능을 나타내는 최소 Impact Insulation Class(IIC) 50 이상을 요구한다.
- 이러한 법적 요구사항은 대형 목구조가 기존 중량 콘크리트 구조와 동등한 수준의 거주 쾌적성을 제공하여야 함을 의미한다.⁷⁾
- 목재 건축물의 차음설계에서 가장 중요한 기술적 고려사항은 통제된 실험실 조건(Laboratory testing)에서 측정된 성능(IIC)과 실제 건설현장에서 측정되는 성능(AIIC, Apparent Impact Insulation Class) 간에 발생하는 편차를 분석하고 관련 기술을 개발하는 것이다.
- 현장에서 측정된 차음성능은 접합부의 복잡성, 시공 오류, 품질 변화, 그리고 우회 전달 경로(Flanking Transmission) 등으로 실험실 결과보다 낮게 나타나는 것이 일반적이다.
- 이처럼 현장 차음성능이 하락하는 주 원인은 개별 부재의 직접적인 소음 전달 외에도, 우회전달음 경로를 통하여 소음이 우회하여 전달되는 현상에서 기인한다.
- 따라서, 이러한 현장성능의 하락을 상쇄하고 법규 미충족의 위험성을 줄이기 위해 캐나다 건축 가이드라인에서는 차음설계 시 NBCC 요구사항 보다 최소 5~10dB 높은 STC와 IIC 등급을 확보하도록 권고하고 있다.⁸⁾
- 한편, FPInnovations는 CLT Handbook을 발간·배포하는 등 캐나다 CLT 기술의 광범위한 채택을 촉진하는 데 중심적 역할을 수행하고 있다.

7) Candian Wood Council, <https://cwc.ca/articles/acoustics/> (2025.11월 접속)

8) Quirt, J. D., King, F., Nightingale, T. R. T., & Craig, B. (2006). Guide for sound insulation in wood frame construction, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.

- 2019년 전면개정된 CLT Handbook은 CLT의 구조설계, 화재안전, 그리고 음향성능을 포함한 다학제적이고 심층적인 정보를 담고 있으며, 이는 캐나다 건축 코드 및 표준에 반영된 최신 연구결과를 기반으로 한다.
- 특히 Handbook 9장에는 CLT 어셈블리의 음향성능에 대한 구체적 내용이 포함되어 있으며, 규정을 충족하는 구조적인 형태를 제안하고, CLT 바닥의 진동성능(Vibration performance)을 제어하기 위한 설계 방법론을 제시한다.⁹⁾
- NRC(National Research Council Canada)는 대형 목조건축의 구조 음향성능 예측에 있어 핵심적 역할을 수행한다. CLT 시스템에서의 겉보기 차음성능(AIIC 및 ASTC)을 정량적으로 예측·검증하는 연구를 수행하고 있다.
 - NRC 연구팀은 CLT 시스템의 복잡한 음향전달 경로를 예측하기 위해, 당초 RC조 및 및 조적조 건물용으로 개발된 ISO 15712(EN12354) 프레임워크를 목구조에 적용하고 그 유효성을 현장측정 데이터와 비교·검증하는 연구를 수행했다.
 - 이 연구는 바닥 토폭 및 벽 라이닝 유무에 따른 CLT 부재의 직접 전달성능뿐만 아니라 CLT 건축물 접합부에서의 구조 전달음(Structure-borne sound transmission)에 대한 광범위한 매개변수 연구를 포함한다.
 - 이러한 접근 방식은 CLT의 고유한 동적이나 이방성 특성을 기존의 엔지니어링 툴에 통합하여, 단순한 차음재 적용을 넘어서는 시스템 수준의 정밀한 음향설계가 캐나다 R&D의 주요 목표임을 시사한다.¹⁰⁾
- 또한, CWC 및 Wood Works Canada에서는 목조건축의 확산을 위하여 설계자·엔지니어·시공자를 위한 다양한 실무자료(설계 가이드·디테일)를 제공한다.
- CWC는 NBCC 부록에 포함된 STC, ASTC, IIC 등급 관련 지침 및 다양한 유형의 목재 스티드 벽과 바닥 어셈블리의 성능 데이터를 제공하여, 설계 실무에서 음향 요구사항을 효과적으로 충족하도록 지원한다.
- 특히, 바닥처리를 위한 구체적 옵션, 예를 들어 콘크리트 토폭이나 카펫 등의 추가 레이어가 경골목구조 바닥의 측면소음 차단성능을 개선하는데 어떻게 사용될 수 있는지에 대한 구체적 정보를 제시하고 있다.

9) FPInnovations, <https://web.fpinnovations.ca/clt/> (2025.11월 접속)

10) Schoenwald, S., Zeitler, B., Sabourin, I., & King, F. (2013, September). Sound insulation performance of cross laminated timber building systems. In INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings (Vol. 247, No. 3, pp. 4337-4346). Institute of Noise Control Engineering.

- 여기서, CWC(Canadian Wood Council)는 캐나다 목재산업과 목조건축을 대표하는 국가 단위의 산업협회이다. 목조건축 기술·표준 개발, 코드·정책 대응, 교육·산업 지원 및 WoodWorks Canada 운영 등 역할을 한다.
- Wood Works는 북미지역 목조건축(특히 중대형·비주거 건축)을 위한 무료 기술지원 프로그램이다. 주요 역할은 설계·구조·시공 기술 자문, 디테일, 가이드, 사례 제공, 교육·세미나 운영 등이다. Wood Works의 운영주체는 미국은 Wood Products Council이고 캐나다는 CWC이다.

3. 고층 목조건물 바닥구조 및 차음성능 사례

3.1. 사례¹ BC Tallwood House

3.1.1. 프로젝트 개요

- 브록 커먼스 톨우드 하우스(Brock Commons Tallwood House)는 밴쿠버 소재 브리티시 컬럼비아 대학교(UBC, University of British Columbia)의 캠퍼스 내에 위치한 18층 규모의 학생 기숙사이다.
 - 2017년 7월 준공되었으며, 준공 당시 세계에서 가장 높은 하이브리드 매스팀버 건축물이었다. 고층 목조건축의 시공 효율성과 구조적 성능을 극대화한 대표적 하이브리드 목조 건축물이다.
 - 구조적으로는 하이브리드 구조시스템을 채택하였고, 총 17개 층의 상부 구조는 CLT 슬래브와 GLT 기둥으로 이루어진 매스팀버로 구성되었다.
 - 건축물의 구조 안정성 확보를 위해 2개의 독립된 RC 코어부(엘리베이터 및 계단실)를 배치하였고, 저층부(1층)에는 콘크리트 포디움을 적용하여 내진성능 및 내화성능을 보장하였다.
- 이 건축물은 구조 안정성과 거주성 확보를 위해 순수 CLT 바닥 패널을 기반으로 하되, RC 및 다양한 보조재료를 복합적으로 적용한 바닥시스템을 채택하였다.



[그림 3-1] 고층 목조 건축물 전경 (BC Tallwood House, 캐나다)

3.1.2. 바닥시스템 및 차음성능

- 이 건축물은 하부(지하층1층)와 코어부(승강기·계단실)는 RC, 상부(3~18층)는 매스팀버로 구성되 있다. 상부는 ‘GLT 기둥 + CLT 바닥패널’로 이루어져 있으며 각 층에는 총 29개의 CLT 바닥패널을 설치하였다.
 - CLT 바닥패널은 5-Ply 제재목, 두께 169mm이다. 패널 간 접합부는 140×25mm 두께의 합판 스플라인(plywood spline)으로 시공했다. 패널의 상부는 콘크리트 토핑(40mm)을 타설하여 바닥구조의 자중과 강성을 증가시켰다. 이는 목조건축에서 발생하기 쉬운 처짐(deflection)과 진동(vibration) 문제를 완화하는 역할을 한다.
 - CLT 바닥패널은 RC코어 벽체에 매입된 강판에 스틸 레저 앵글(steel ledger angle)을 용접하고 나사로 고정하였다. 또한, 수평방향 전단력을 RC코어로 전달하기 위해 스틸 드래그 스트랩(steel drag strap)을 CLT 바닥패널 상부에 설치했다.
 - 이 철강 접합부는 수직력 및 전단력의 전달, 목조와 RC구조 간 변위차(differential settlement)의 보완을 동시 고려한 설계이다.
- 건물의 바닥구조는 STC(Sound Transmission Class) 52~54 수준을 달성하도록 설계되었으며, 이는 캐나다 건축법규(일반적으로 STC 55 이상 또는 IIC 55 이상 요구)의 최소 기준에 근접한 성능인 것으로 조사되었다.
 - 단일 CLT 패널만으로 이 수준의 차음성능을 확보하기 어려우므로, 다층 복합시스템(multi-layer composite system)을 적용하였다.
 - 콘크리트 토핑(40mm)은 바닥구조의 질량을 증가시켜 공기전달음 및 충격음을 효과적으로 저감시켰고, 공기층을 가지는 달대 천장과 카펫, 그리고 탄성 바닥재를 설치하여 충격음을 완화에 노력하였다.
 - 다층 천장 조립체는 CLT 패널 하부면에서 시작하여, 먼저 16mm 두께의 Type X 내습성 석고보드(GWB)를 설치했다. 이 위에 스틸 고정대(38mm 깊이)를 설치하고 스틸 리질리언트 바(19mm 직경)를 400mm 간격으로 배치하여 진동-소음을 저감하도록 설계했다. 그 위에 16mm TypeX 석고보드를 이중으로 추가 설치하고, 마지막으로 내부 마감재가 적용되어 완성하였다.
- 결론적으로, CLT 바닥패널(169mm) + 콘크리트 토핑(40mm) + 공기층(105mm)으로 구성된 총 314mm 두께의 복합시스템으로 설계함으로써 ASTC(Apparent Sound Transmission Class) 53~55dB 수준의 공기전달음 차음성능 및 AIIC(Apparent Impact Isolation Class) 53dB의 경량충격음 차단성능을 확보하였다.¹¹⁾

[그림 3-2] 목조 바닥구조 현장시공 절차 (BC Tallwood House, 캐나다)

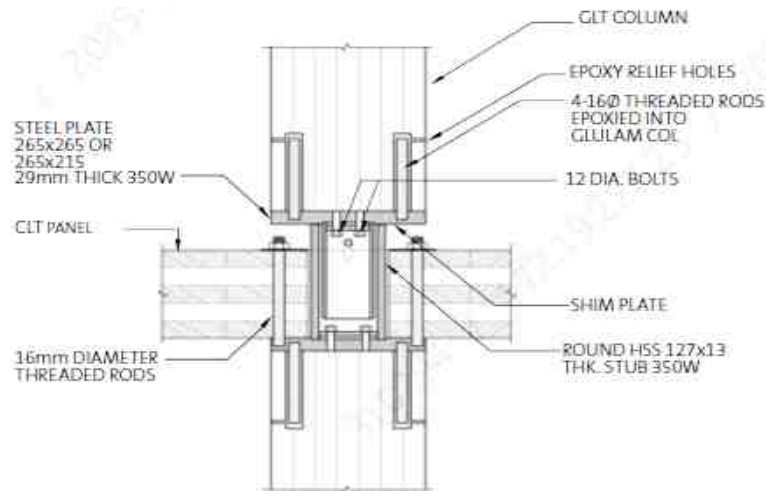


출처 : BC Tallwood House, DESIGN AND PRECONSTRUCTION OVERVIEW

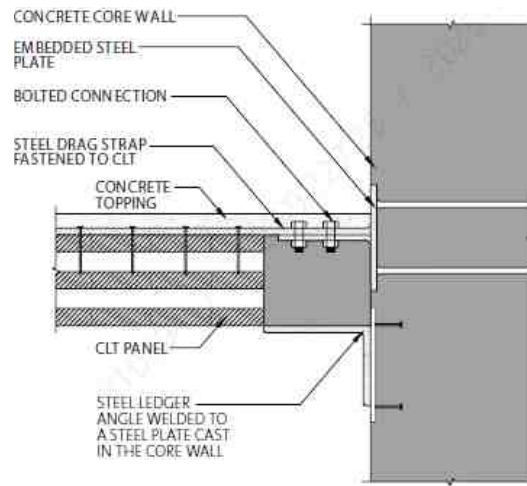
- 11) Hu, Lin J., Cuerrier-Auclair (2018) Samuel, Advanced wood-based solutions for mid-rise and high-rise construction : in-situ testing of the Brock Commons 18-Storey building for vibration and acoustic performances, Natural Resources Canada. Canadian Forest Service

[그림 3-3] 목조 바닥구조 시공 및 설계도 (BC Tallwood House, 캐나다)

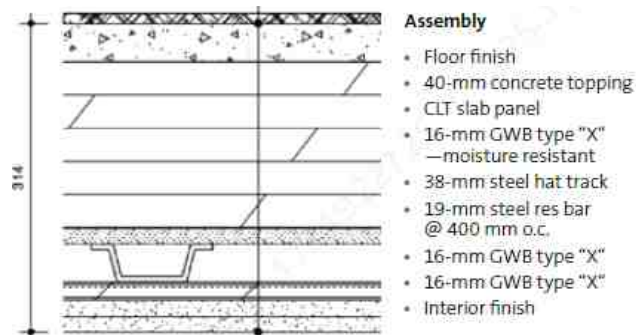
① 기둥 + 바닥 접합부



② RC코어 + CLT 접합부



③ CLT 바닥구조 단면상세



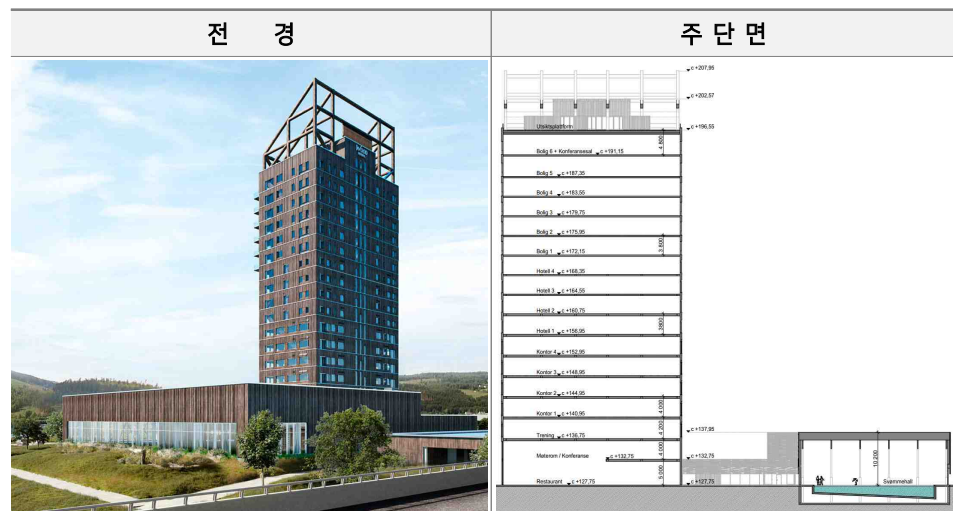
출처 : BC Tallwood House, DESIGN AND PRECONSTRUCTION OVERVIEW

3.2. 사례² Mjøstårnet

3.2.1. 프로젝트 개요

- Brumunddal에 위치한 이 건축물은 건축높이 85.4m로서, 2019년 3월 준공 당시 CTBUH에서 인증한 세계에서 가장 높은 목조 건축물의 기록을 세웠다.
 - 호텔 객실 72개, 아파트 33세대, 사무실, 레스토랑, 회의실 및 루프탑 테라스 등 다양한 기능의 복합용도 건축물이다. 설계는 VOLL Arkitekter, 시공은 HENT, 구조재는 지역 목재전문 기업인 Moelven Limtre가 담당하였다.
 - CTBUH(Council on Tall Buildings and Urban Habitat)는 초고층 건물의 정의 및 높이 기준 제시, 글로벌 고층건물 데이터베이스 운영, 기술·정책 연구 등을 담당하는 초고층 건물과 도시환경에 관한 국제적인 비영리 전문기관이다.
- 이 건축물의 가장 큰 특징은 주요 하중 지지부가 GLT 기둥과 보, 대형 트러스로 이루어진 전면 목조(All-timber building)라는 점이다.
- 일반적으로 고층 목조 건축물에서 필수 적용되는 RC 코어부 대신에 엘리베이터, 계단실 등 샤프트 또한 CLT 패널로 건설되었다.
- 바닥시스템으로는 저층부(2~11층)는 ‘목재 카세트 데크’를 고층부(12층 이상)는 ‘목재 + RC 하이브리드’ 바닥구조를 적용하였다. 이는 고층 건축물에서 풍하중을 제어하기 위한 것이다.

[그림 3-4] 고층 목조 건축물 전경 및 주단면도 (Mjøstårnet, 노르웨이)



3.2.2. 바닥시스템 및 차음성능

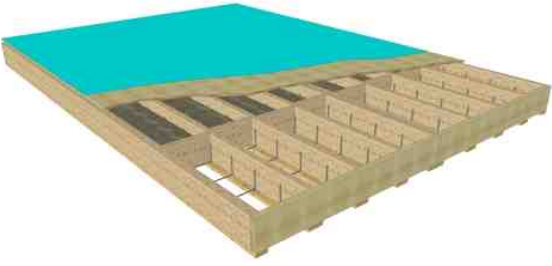
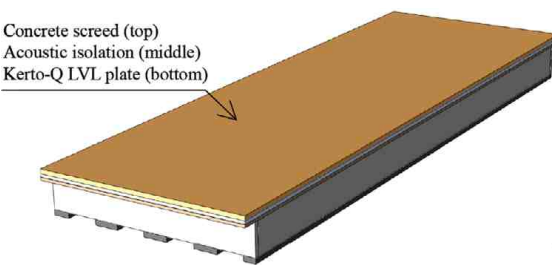
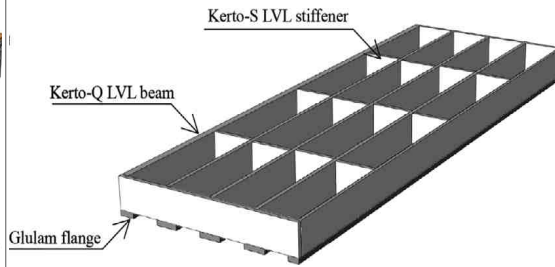
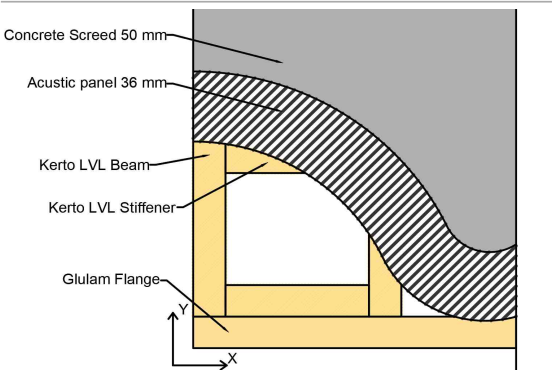
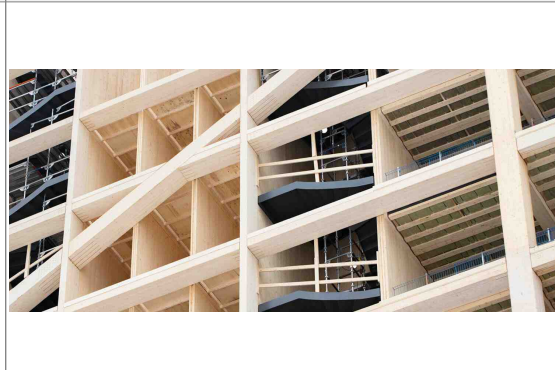
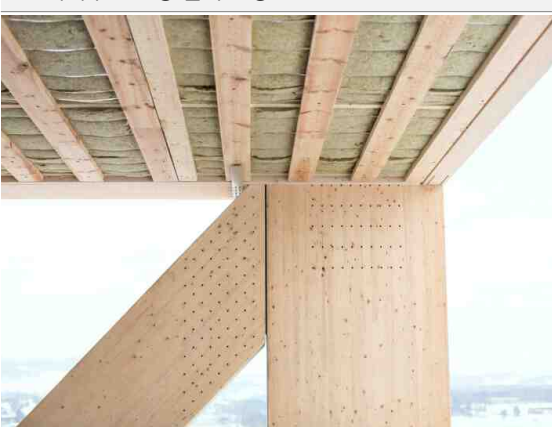
(1) 목조 바닥시스템 : Trä 8 (2~11층 적용)

- 이 시스템은 노르웨이 Moelven이 스웨덴 Metsä Wood의 “RIPA 데크 시스템”을 기반으로 한 혁신적인 목조 카세트 데크 시스템이다. 이 시스템의 특징은 GLT와 LVL을 효과적으로 조합하여 구조성능과 시공성을 극대화했다는 점이다.
- Trä 8에서 8은 이 바닥시스템이 최대 8m 스패를 구현할 수 있음을 나타낸 것이며 이는 기존 바닥시스템에 비해 현저히 긴 경간을 가능하게 한다. 건축물의 구조적 특성과 하중조건을 고려해 최대 7.5m 스패으로 적용되었다.
- 이 시스템의 구조적 특징은 상부 플랜지의 캔틸레버 메커니즘에 있다. LVL-C로 제작된 상부 플랜지는 바닥 카세트의 에지 빔에서 캔틸레버 형태로 연장되어 수직 하중을 직접 GLT 보로 전달하는 방식으로 작동한다.
 - 이러한 구조적 메커니즘은 여러 장점을 제공한다. 첫째, 바닥시스템이 GLT 보 사이의 공간에 완전 삽입될 수 있어 설치가 용이해진다. 둘째, 바닥시스템의 보 위로 돌출되는 높이가 LVL-C 플레이트의 두께인 31mm에 불과해 층고를 최소화할 수 있다. 이는 고층 건축물에서 매우 중요한 요소로, 18층 건축물에서 각 층 구조 높이를 수십 센티미터씩 절감할 수 있다면 전체 건물 높이를 크게 줄일 수 있기 때문이다.
 - 또한, 상부 플랜지와 GLT 장선을 접착제로 결합하여 복합단면을 형성함으로써 휨강도와 강성이 크게 향상되었다. 이는 처짐을 최소화하고 진동 특성을 개선하는 효과를 가져온다.
- 해당 목조 바닥시스템의 두께는 439mm로, 국내 공동주택의 바닥두께(약 490mm, 천장 포함)와 비슷한 수준인 것으로 조사되었다.

[표 3-4] 목조 건축물 바닥시스템 단면구성 상세(Mjøstårnet, 노르웨이)

구 성	폭 (mm)	높 이 (mm)	재 료 등 급
GLT 장선	66	360	GL28cs
LVL 상부플랜지	-	31	Kerto-Q
하부플랜지	148	48	C24
완 총 재	-	5	-
콘크리트 토퍼	-	50	-
천 장 재	-	-	-
총 높 이	490 mm		-

[그림 3-5] 목조 바닥구조 시공 전경 및 설계도(Mjøstårnet, 노르웨이)

① 바닥구조 구성도	② 바닥구조 하부면
	
③ 바닥구조 상부면 구성도	④ 바닥구조 구조체 구성도
Concrete screed (top) Acoustic isolation (middle) Kerto-Q LVL plate (bottom) 	
⑤ 바닥구조 구조체 구성도	⑥ 바닥구조 현장 설치 전경
	
⑦ 바닥구조 현장 설치 전경	⑧ 바닥구조 현장 설치 전경
	

출처 : Moelven Limtre AS, Mjøstårnet-Construction of an 81m tall timber building

(2) RC 바닥시스템 (12~18층 적용)

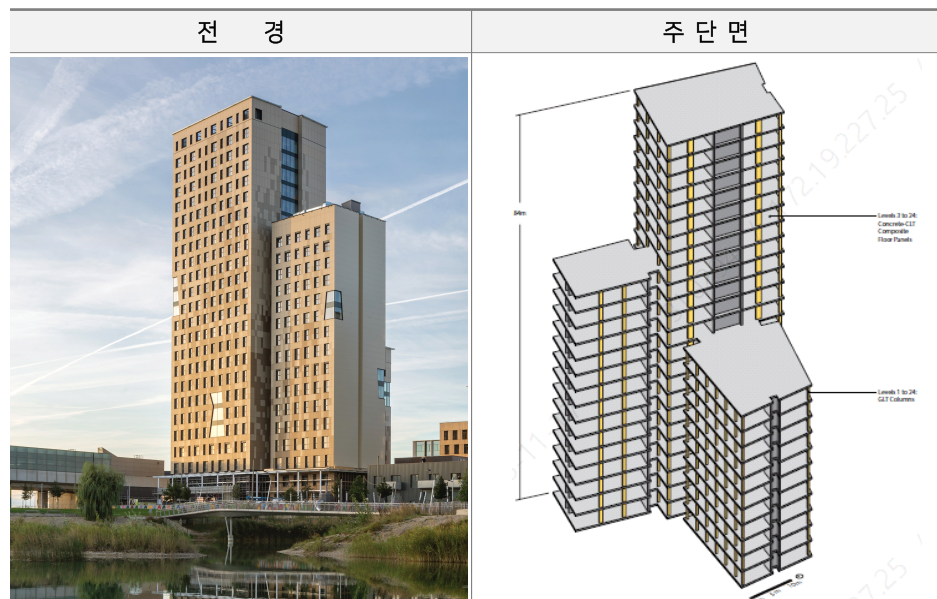
- Mjøstårnet의 상부 7개층(12~18층)은 300mm 두께의 RC 슬래브를 GLT 보가 지지하는 복합구조 시스템으로 설계되었다.
 - 이러한 시스템으로의 전환은 단순히 재료를 변경한 것이 아니라 건축물의 구조성능과 거주자의 쾌적성을 동시에 고려한 통합적 설계전략의 결과이다.
 - 건축물의 상부에 상당한 질량을 추가함으로써 풍하중에 의한 건축물의 동적 거동을 효과적으로 제어할 수 있다.
 - 특히 경량구조인 목조 고층 건축물의 경우는, 바람에 의한 진동과 가속도가 거주자에 불쾌감을 줄 수 있으므로 이 부분이 설계 관점에서 주요 과제인데 상층부 질량 증가는 이를 해결하는 효과적인 방법이다.
- 또한, 상부 7개층(12~18층)은 주거용 아파트(33세대)로 사용되는데 주거공간은 사무실이나 호텔보다 훨씬 엄격한 차음성능 기준이 요구된다.
- 300mm 두께의 RC 슬래브는 공기전달음과 충격음 모두에 대해 우수한 차음성능을 제공하여 거주자의 프라이버시와 쾌적성을 보장한다.

3.3. 사례³ HoHo Vienna

3.3.1. 프로젝트 개요

- HoHo Vienna는 2019년 준공 당시에 세계에서 가장 높은 목조 건축물 중 하나로 주목받았다. 건축높이 84m, 총 24층에 달하는 이 건축물은 오스트리아 비엔나에 위치하며 도심 고층 목조건축의 새로운 가능성을 제시하였다.
 - 이 건축물은 호텔 객실 119개, 아파트 24세대, 사무공간, 식당, 피트니스 및 웰빙 센터 등이 포함된 복합용도(Mixed-Use Program)로 계획되었다.
 - 구조적으로 HoHo Vienna는 중앙의 RC 코어부가 구조 안정성을 담당하고, 이를 둘러싸는 목구조가 바닥시스템과 외벽을 형성하는 방식으로 설계되었다. 이 하이브리드 방식은 각 재료의 장점을 최대한 활용하면서 단점을 상호 보완하는 효과를 가져왔다.
 - RC 코어부는 횡력 저항과 수직 안정성을 제공하고, 목조 부분은 경량성, 시공성, 친환경성에 기여하여 전체적으로 균형 잡힌 성능을 달성하였다.
- 기술적인 측면에서는 TCC(Timber-Concrete Composite) 바닥시스템의 적용이 핵심적 특징이다. 이 시스템은 목재와 RC를 구조적으로 결합하여 단일 재료로는 달성하기 어려운 성능을 구현하였다. 특히 차음성능과 진동 특성에서 현저한 개선 효과를 보였으며, 대형스팬 구현을 가능하게 했다.

[그림 3-6] 고층 목조 건축물 전경 및 주단면도 (HoHo Vienna, 오스트리아)



3.3.2. 바닥시스템 및 차음성능

- 이 프로젝트의 바닥구조는 MMK社에서 생산한 XC[®](X-Lam Concrete) 목재-콘크리트 복합(TCC) 시스템이 주를 이룬다. 이 시스템은 목재 구조요소 위 얇은 콘크리트 토핑을 구조적으로 결합하여, 목재와 콘크리트가 하나의 복합단면으로 작동하도록 설계되었다.
- TCC 시스템의 핵심 원리는 CLT나 GLT 패널의 상부에 콘크리트층을 접착·결합 시킴으로써 목재 단독보다 훨씬 높은 강성·강도를 확보하는 것이다. 이는 단순히 콘크리트를 목재 위에 올려놓는 것이 아니라, 전단 연결재를 통해 두가지 재료가 구조적으로 완전히 통합되어 복합거동을 하도록 한다.
 - 이 시스템은 구조적으로는 목재가 주로 인장력을 담당하고 콘크리트가 압축력을 담당하여, 각 재료의 강점을 최대한 활용하는 효율적인 구조시스템을 형성한다. 이를 통해 순수 목재 구조보다 약 30~50% 높은 강성을 확보할 수 있으며, 이는 처짐 감소와 진동 특성 개선으로 이어진다.
 - 특히, 이 시스템은 대형 스패ن 구현에 있어 장점이 명확하게 드러나는데, HoHo Vienna에서는 최대 8m 이상의 스패ンを 경제적으로 달성할 수 있었다. 이는 건축 계획에서 기둥을 줄이고 더 넓은 공간을 확보할 수 있게 하여, 사무실이나 상업 공간의 활용도를 크게 향상시킨다.
- 이 프로젝트의 TCC 바닥시스템은 프리패브리케이션 방식으로 제작되었다. 목재 부분은 공장에서 정밀 가공되어 현장으로 운반되고, 콘크리트 토핑은 현장에서 타설하거나 프리캐스트 형태로 설치되었다.
- 프로젝트의 구조시스템 면에서는 바닥 패널이 GLT 기둥 상부에 위치한 RC 보에 의해 지지되는 구조로, GLT 기둥이 수직하중을 담당하고 RC 보가 바닥 하중을 분산시키는 역할을 하도록 설계되었다.
- 직렬 요소들로 구성된 TCC 바닥시스템은 외곽 파사드층의 GLT 기둥으로 지지되며, 이는 전체적으로 효율적인 하중 전달 메커니즘을 형성한다. 각 기둥의 치수는 지지하는 하중의 크기에 따라 변화하게 되며, 하부층으로 갈수록 단면이 증가한다.
- 복합용도 건축물에 요구되는 최고 수준의 음향성능을 달성하기 위해, 복층 바닥 시스템(Multi-layered Floating Floor System)이 적용되었다. 이 바닥 조립체는

구조 슬래브 위에 7개의 레이어로 구성된 뜬바닥 구조를 추가로 포함하고 있으며 이는 목재 바닥 구조체의 음향적 취약점을 상쇄하기 위한 설계이다.

- 120mm 두께 콘크리트 토핑은 이미 상당한 질량을 제공하지만, 목재 프레임을 통해 전달되는 구조음과 저주파수 진동을 완전히 제거하기에는 불충분하다. 따라서 본 프로젝트에서는 ‘건식 스크리드(Dry Screed)’ 시공으로 추가질량을 부가한 다층 바닥시스템을 적용하여 진동 전달을 제어하였다.
 - Lindner NORIT와 이중 플로어 시스템을 사용한 것은 이 프로젝트의 빠른 건설 일정과 직접적으로 연관된다.
 - Lindner NORIT는 독일의 Lindner Group에서 개발한 건식 바닥시스템(Dry Screed System) 브랜드이다.
- XC ® 바닥시스템이 프리패브리케이션을 통해 건식으로 설치되며, 즉시 구조적 하중을 받을 수 있는 혁신을 제공하듯이, 그 위에 설치되는 뜬바닥 시스템 역시 건식공법을 채택해야 공정의 속도와 효율성을 유지할 수 있다.
- 습식 스크리드를 사용하면 수분 증발과 양생시간이 소요되지만 건식 스크리드는 필요한 질량(Inertial Mass)을 제공함과 동시에 건설속도를 저해하지 않는 중요한 기술적 선택이다.
- 본 프로젝트에 적용된 바닥시스템의 총 두께는 505mm 이며, 제조사인 MMK社の 실험결과에 의하면 해당 바닥시스템의 경량충격음($L'_{n,w}$)은 48dB 이하 수준이고 공기전달음(R'_w)은 62dB 이상 수준인 것으로 보고되고 있다.¹²⁾

12) MMK, “HOHO Vienna-Timber Concrete Composite Element Application”, Reference Project Documentation.
Available : <https://www.mm-holz.com/en/references/hoho-vienna>

[그림 3-7] 목조 바닥구조 시공 전경 및 설계도 (HoHo Vienna, 오스트리아)



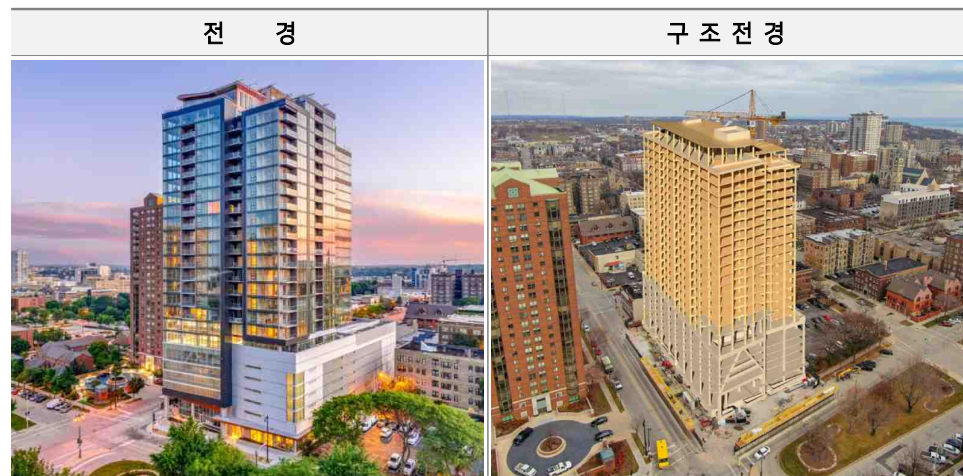
출처 : Lainer+Partner(2019), "HoHo Wien - Case Study", Rudiger Lainer+Partner Architektur, Vienna

3.4. 사례 4 Ascent MKE

3.4.1. 프로젝트 개요

- 미국 위스콘신주 밀워키에 위치한 Ascent MKE는 25층 규모의 럭셔리 아파트로, 2022년 9월 준공되었다. 이 건축물은 건축 높이 87m를 달성하며 준공 시점에는 노르웨이 미에스토르네(Mjøstårnet)를 넘어, 세계에서 가장 높은 매스팀버 하이브리드 건축물이라는 기록을 수립하였다.
 - 이 건축물은 “구조적 혁신과 환경적 책임을 결합하여 저탄소 건축의 미래를 제시”하는 것을 목표로 하였고, 259세대의 럭셔리 아파트와 다양한 편의시설을 제공한다.
- 건축물의 저층부(1~6층)는 포스트텐션 콘크리트 포디움이 자리하며, 그 위로는 19층 규모의 매스팀버 구조(7~25층)가 올라가는 형태이다. 매스팀버 구조부는 수직하중을 지지하는 GLT 보와 기둥, 그리고 CLT 슬래브로 구성되었다.

[그림 3-8] 고층 목조 건축물 전경 및 주단면도 (Ascent MKE, 미국)



3.4.2. 바닥시스템 및 차음성능

- 이 시스템의 핵심은 CLT 슬래브로, 일반적인 주거층(8~24층)에는 오스트리아산 스프러스로 제작된 5 Ply, 180mm 두께의 CLT 패널을 적용하였다. 다만, 더 높은 하중이 요구되는 편의시설 및 옥상 층에는 7 Ply, 240mm의 더 두꺼운 CLT 패널을 적용하여 구조적 요구 사항을 충족시켰다.

- CLT 패널 하부 노출로 거주공간에 자연스러운 목재 질감이 드러나도록 하였고, 패널 상부에는 주거품질 확보를 위해 필수적인 콘크리트 토핑을 설치하였다.
- 매스팀버 구조의 천장을 노출시키기로 결정했기 때문에, 음향성능을 향상시키는 모든 질량과 감쇠요소는 구조체 위에 위치하도록 했다¹³⁾. 먼저, CLT 패널 위에는 구조체에서 충격진동을 분리하기 위한 음향 방진매트(acoustical sound mat)를 설치했고, 이 탄성층은 충격음이 목재 슬래브로 직접 전달되는 것을 막는 역할을 수행하여 IIC(Impact Insulation Class) 성능을 높였다.
 - 방진매트 위에는 50mm 두께의 비구조용 집크리트(gypcrete) 토핑을 타설했으며, 이는 아래와 같은 필수기능을 동시에 수행하였다
 - 첫째, 추가질량을 제공하여 벽체나 바닥을 통과하는 공기전달음의 투과를 줄여 음향 성능을 높인다. 둘째, 구조용 CLT 슬래브 상부에 보호층을 제공하여 화재 방호성능을 지원한다. 셋째, 슬래브에 효율적인 온수난방시스템(hydronic radiant heating system) 튜브를 설치할 수 있는 기반을 제공하여 거주자에게 쾌적함을 제공한다.
- 매스팀버 구조는 그 자체로 구조적 성능을 제공하지만, 음향성능 확보는 콘크리트 건축과 비교하여 근본적인 도전과제를 안고 있다.
 - 일반적으로 5ply CLT 바닥패널은 마감재가 없을 경우 공기전달음 차단성능 즉, STC가 약 41에 불과한 수준이며, 이는 “미국 건축법규(IBC)에서 다세대 주택에 요구하는 최소기준인 STC 50”에 크게 미달하는 수치이다.
- 특히 CLT 천장을 노출시키려는 Ascent의 디자인 목표는 모든 음향 개선대책이 바닥시스템의 상부에 집중되어야 함을 의미한다. 이에 Ascent는 법적 최소기준(STC/IIC 50)을 초과하고 고급 주거시설의 기대를 충족시키기 위해 STC/IIC 60 이상의 성능을 목표로 하였다.
 - STC/IIC 60 등급은 큰 말소리 소음이 거의 들리지 않고 충격소음 불만을 최소화할 수 있는 우수한 차음성능 수준이다.
- 이러한 목표 달성을 위하여, CLT 패널 위에 방진매트와 집크리트 토핑 슬래브를 통합한 복합 바닥시스템을 적용하였다. Ascent 타워에 적용된 핵심 차음시스템은 Maxxon Acousti-Mat[®] 및 Gypsum Underlayment의 결합이다.

13) Fernandez, Alejandro, Jordan Komp, and John Peronto. "Ascent-challenges and advances of tall mass timber construction." International journal of high-rise buildings 9.3 (2020): 235-244.

- 완충재 위에 포설되는 석고계 모르타르인 Gypsum Underlayment는 경화하면서 추가 질량을 제공하여 공기전달음 차단성능을 높이는 데 기여한다.

○ 해당 바닥시스템의 현장 실측 데이터에 대한 정보는 없으나, Maxxon 社 자체의 실험실 실험결과에서는 STC 55~58dB, IIC 50~55dB 수준으로 추정된다.¹⁴⁾

[표 3-5] 목조 건축물 바닥시스템 단면구성 상세 (Ascent MKE)

구 성 요 소	기 능	주 요 자 재	두 겹
최종 마감재	심미성 및 내구성	카펫, 목재 바닥재, 타일 등	가 변 적
완충재 (경량석고계)	추가질량 및 평탄화	Maxxon Gypsum Underlayment	약 50mm
충격음 차단매트	진동 절연	Maxxon Acousti-Mat [®] Premium	약 9.5mm
슬래브 부재	수평지지 및 기초질량	CLT 패널	180~200mm (설계 따라 상이)
천장하부 마감	구조 노출	노출 CLT	-

[그림 3-9] 목조 바닥구조 시공 전경 및 단면도 (Ascent MKE, 미국)



출처 : Ascent-challenges and advances of tall mass timber construction

14) Maxxon, Fire & Sound Manual, DESIGNING FOR SAFETY & SOUND CONTROL

3.5. 소결 및 시사점

- 대부분 사례가 CLT 패널을 바닥슬래브로 사용하고, 그 위에 모르타르, 완충재 등 레이어를 복합 적용하고 있었다. 이는 CLT 패널만으로 고층 건축물에 요구되는 강성(처짐·진동) 및 차음성능을 충족하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.
- 공기전달음 차음성능의 경우는 STC 55~58dB(Ascent), ASTC 53~55dB(Brock Commons), R'_w 62dB(HoHo Vienna)로 조사되었다.
- 이는 우리나라의 세대간 경계벽 차음성능 등급과 비교할 때 1등급 수준이나, 통상적인 RC 바닥시스템의 공기전달음 차음성능이 R'_w 70dB 수준인 것과 비교할 때 그 성능이 상대적으로 낮은 상황이다.
- 본 연구에서 검토한 건축물의 경우, 바닥충격음 실험을 경량충격음만을 대상으로 하였고, 그 결과는 AIIIC 53dB(Brock Commons), $L'_{n,w}$ 48dB(HoHo Vienna), IIC 50~55dB(Ascent, 추정) 수준으로 나타났다.
- 이는 우리나라의 경량충격음 4등급 기준($L'_{n,w}$ 49dB 이하)에 근접하는 수준이지만 “실무에서는 2등급 이상의 현장 경량충격음 차단성능을 요구”하고 있음을 볼 때 추가적인 성능개선이 필요하다.
- 한편, Brock Commons, HoHo Vienna 및 Ascent 사례에서는 CLT 바닥패널의 하부면을 노출 설계하여 목재의 미적 효과를 최대화하는 디자인을 채택한 것으로 조사되었다.
- 이는 음향성능 개선의 부담을 바닥시스템의 상부에 집중시키는 결과를 가져오며, 우리나라 공동주택의 바닥충격음 관련 법적기준을 충족시키는데 있어 기술적 도전과제를 시사한다.
- 우리나라 공동주택 건설사업에 있어 바닥충격음 요구기준은 세계 최고 수준이라 할만한 매우 엄격한 수준이다. 해외와 다르게 중량충격음 기준 충족이 의무화되어 있으며, 이 기준은 RC 슬래브 두께 210mm를 전제로 한 것이기 때문이다.
- 이는 우리나라의 법제도에서 요구하는 저주파수 대역의 중량충격음 성능 확보가 여전히 고층 목조 공동주택 건설시장 활성화의 최대 기술적인 장애요인임을 간접적으로 보여준다.

[표 3-6] 고층 목조 건축물 바닥시스템 및 차음성능 주요 특징 요약

구 분	구조형식	바닥구조	바 닥 두 께	슬래브 하부면	차 음 성 능	
					바닥충격음	공기전달음
B.C. Tallwood (2017· 18층)	무량판 (GLT)	CLT 슬래브 + 콘크리트 토퍼 + 천장 공기층	314mm	CLT 노출형	경 량 : 53 (AIC) 중 량 : -	53~55 (ASTC)
Mjøstårnet (2019· 18층)	기둥 + 보 (GLT)	Glulam 장선 + 상부 플랜지 + 하부 플랜지 + 완충재 + 콘크리트 토퍼 + 천장재	490mm	천장 마감형	경 량 : - 중 량 : -	-
HoHo Vienna (2019· 24층)	기둥 (GLT) + 보 (PC)	CLT 합성슬래브 + 이중 바닥 + 완충재 + 코르크 펠트 + 콘크리트 토퍼(건식) + 마감재	505mm	CLT 노출형	경 량 : 48 (L'n,w) 중 량 : -	62 (R'w)
Ascent MKE (2022· 25층)	기둥 + 보 (GLT)	CLT 슬래브 + 콘크리트 토퍼 + 완충재	230mm	CLT 노출형	경 량 : 50~55 (IIC) 중 량 : -	55~58 (STC, 추정)

4. 바닥구조 개발 방향 설정

4.1. 차음성능 수준 분석

- 앞 절에서 선행연구와 국외 사례 검토를 통해 주거용 건축물에 적용 가능한 목조 바닥구조의 유형과 차음성능 데이터를 수집하였다.
- 주거용 건물에 적용되는 바닥구조는 하부 노출형과 비노출형으로 구분할 수 있다. 표 3-7은 앞서 수집한 데이터를 기반으로, 현행 바닥충격음 요구기준을 충족할 가능성이 있는 바닥구조 유형을 분석하여 정리한 것이다.

[그림 3-10] CLT 패널하부 노출형과 비노출형



[표 3-7] 국내 중량충격음 기준 달성을 위한 목조 바닥구조 설계안 조사결과

분 류	등 급	바닥 구조			출 처	
		유 형	구 성 층 (mm)	두 겹		
노 출	4등급	슬래브	CLT 740	740mm	하연수 외	L
		슬래브 + PC	CLT 150 + PC 210	360mm	이호진 외	L
		슬래브 + 뜬바닥	CLT 150 + 완충재 30 + PC 210	390mm	이호진 외	L
		슬래브 + 뜬바닥	CLT 140 + 자갈 80 + 뜬바닥 75	295mm	Catherine 외	L
	1 ~ 3	-	-	-	-	-
비노출	4등급	슬래브 + 뜬바닥 + 천장	CLT 140 + 뜬바닥 53 + 천장 136	329mm	Catherine 외	L
	3등급	슬래브 + 뜬바닥 + 천장	CLT 140 + 뜬바닥 150 + 천장 216	516mm	김세종 외	L
	1 ~ 2	-	-	-	-	-

* L : 실험실 결과, F : 현장 결과

- 분석 결과, 현행 노출형 바닥구조의 대부분은 4등급 수준에 머물고 있고, 이 또한 대부분 실험실 측정을 통한 결과이므로, 현장에서의 성능저하 가능성을 고려해야 할 것으로 사료된다.
 - 노출형의 바닥충격음 차단성능 향상 여부는 슬래브의 상부에 설치되는 뜬바닥에 의해 결정된다. 따라서 추가 하중의 부여 및 완충재 설치 등을 통한 차단성능 향상을 위한 전략 수립이 필요하다.
- 비노출형 목조 바닥구조는 천장이 추가적으로 결합된 형태로서, 현재 중량충격음 3~4 등급 수준의 기술을 확보한 것으로 분석된다.

4.2. 기술개발 요인 분석

- 우리나라 공동주택 건설환경은 해외와 달리 중량충격음 기준 충족이 의무화되어 있다. 이 기준을 충족하기 위해서는 특히 저주파수 대역의 차음성능을 확보하는 것이 필요하다. 이를 위해 구조체, 천장 및 뜬바닥 구조 등 모든 구성요소에 대한 정밀한 설계가 요구된다.
- 중량충격음 저감에 있어 CLT 바닥 패널은 1차적인 역할을 수행하며, 일반적으로 바닥판의 두께가 두꺼울수록 저감 효과가 높아진다. 하지만 현실적으로는 층고의 상승과 높은 단가라는 경제적·구조적 제약으로 인해, CLT 패널의 두께는 150mm~180mm(5~7 Ply) 범위에서 설계되고 있는 실정이다.

[표 3-8] 복소 바닥구조 바닥충격을 차단성능 설계 요인

구 분	구 성 요 소	제 어 방 식
구조체	CLT 패널	자체 구조만으로 차음성능 부족
	CLT 패널 + RC 합성바닥	슬래브 강성이 증가되나 차음재 보강 필요
튼바닥	완충재	낮은 동탄성 계수를 갖는 물성치 설계
	시멘트 모르타르	고하중 토피ng 설계 필요
	마감재	경량충격을 저감용 바닥마감재 선정
	공법	습식, 반건식, 건식
천장	진동절연재	달대 진동 절연재 설치
	흡음재	두꺼운 흡음재 및 넓은 면적 설치
	석고보드	무거운 석고보드 설치
접합부	구조체 연결재	기둥-내력벽-바닥 접합방식별 진동전달계수 차이 발생
	절연재	비내력벽-바닥 접합부 진동 절연재 설치
능동제어	TMD	바닥 하부 TMD 설치

[표 3-9] 복소 바닥구조 설계요인 변화에 따른 중량충격음 주파수 대역별 영향도 (Kohrmann·2017)

구 성 요 소	저 감 방 법	주 파 수 대 역 (Hz)		
		0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200
CLT 바닥	더 두꺼울수록	0	+	+
천장	천장 설치 전 대비 설치 후	+	+	++
천장 높이	더 두꺼울수록	0	+	+
천장 흡음재	더 두꺼울수록	0	+	+
천장 달대	달대 1.0m 간격 설치 전 대비	0	0	0
	달대 설치 간격이 넓을수록	+	+	0
튼바닥 구조	튼바닥 설치전과 비교하여	+	++/-	++/-

++ : 개선량 높음, + : 개선량 낮음, - : 증폭, +/- : 공진대역에 따라 개선 또는 증폭, 0 : 효과 없음

- CLT 패널의 강성 보강을 위해, CLT-RC 합성 바닥판을 제작하는 방안도 고려할 수 있으나, 이는 콘크리트의 물량 증가로 내재탄소량이 감소하여 탄소중립이라는 목조건축 본래의 목적과 상충될 수 있다는 딜레마를 안고 있다.
- CLT 패널 상부에 진동절연을 위한 완충재, 고하중 모르타르를 시공하는 뜬바닥 구조는 일반적으로 사용할 수 있는 효과적인 공법이다. 뜬바닥 구조는 저주파수 대역의 차음성능 향상에 기여하지만, 완충재와 모르타르 사이에 공진이 발생하여 오히려 성능이 저하될 수 있어 효과적인 공진 제어설계가 필수적으로 요구된다.

- CLT 바닥판 하부의 천장은 달대와 석고보드 등 건자재 중심으로 시공하는 경량 건식구조가 주를 이룬다. 따라서 바닥판과 천장면 사이의 진동절연 및 공기층 공진 제어가 그 핵심이다.
 - 공기층의 공진을 제어하기 위해서는 일정 두께 이상의 공기층 확보와 중공층 내부의 흡음재 설치가 필요하다. 추가적인 진동 제어를 위해 진동절연 달대 시공 및 달대 시공 간격 조정 등 중량충격을 제어설계 요소를 활용할 수 있다.
- 이러한 건축부재 중심의 설계 외에도 특정 공진 주파수에서 발생하는 증폭현상을 제어하기 위한 능동제어 방식도 적용할 수 있다.
 - 예로써 TMD(Tuned Mass Damper)를 타겟 제어 공진 파장을 고려한 위치에 설계하여 공진을 제어하는 방식이 있으나, 이는 현재 중량충격음 평가대역 이하에 더 효과적인 것으로 보고되어 주된 방안보다는 보조적인 방식으로 고려된다.
- 결론적으로, 목조 바닥시스템의 중량충격음 제어는 바닥 구조체, 뜬바닥 구조 및 천장구조 설계라는 3가지 건축적 요소를 통한 근본적 대응이 필요하다. 특히, 각 요소의 중량충격음 저감효과가 주파수 대역별로 차이가 있기 때문에, 국내 등급별 목표치 달성을 위한 최적 조합 및 설계방안 마련 연구가 필요한 상황이다.

4.3. 향후 기술개발 방향

- 우리나라는 목조 공동주택 바닥충격음 저감기술 개발을 위한 연구가 상대적으로 부족하다. 특히, 목조 공동주택의 바닥충격음의 성능 실태를 파악할 수 있는 준공 사례도 전무하므로, 연구 대부분이 시험실 중심으로 수행되었다.
- 선행연구의 보고와 같이, 측로전달음이 차단된 시험실 조건에서 도출된 성능시험 결과는 현장시험 결과 대비 유리한 측면이 있다. 이에 실제 현장에서의 적용성을 확보하기 위해서는 시험실 조건에서 바닥구조를 개발할 때 더욱 높은 수준의 성능 달성이 필요하다.
- 앞으로, 기술개발의 첫 단계는 국내 현장에서 이미 성능이 입증된 RC 바닥구조를 활용하는 것이다. 사전인정 바닥구조 제도를 통해 RC 실증주택에서 바닥충격음 1등급을 획득한 기술들이 공법별(습식·반건식·건식)로 개발되고 있으므로, 해당

인정바닥구조를 CLT 패널에 설치할 경우의 성능 평가가 우선적으로 진행되어야 될 것이다.

- 이에 더해, 고성능 천장구조가 접목된 복합 바닥구조에 대한 실험실 성능평가를 통해 추가적인 바닥구조 개발의 필요성을 검토하고 최적 솔루션을 도출하기 위한 연구가 필요하다.
- 한편, CLT는 상대적으로 면밀도가 낮아, 공기전달음 차음성능이 새로운 이슈로 부각할 수 있다. 이에 국내 공기전달음 차단성능 요구기준 부합 여부 등에 대한 검토도 병행하여야 하며, 이를 통한 층간소음 종합대책을 마련할 필요가 있다.
- 궁극적으로, 목조 공동주택 보급 활성화를 위해서는 우리나라의 제 여건에 맞는 표준화된 모델 제시가 필수적이다.
- 프랑스의 연구사례와 같이, CLT 기반의 바닥시스템 연구는 크게 하부 노출형과 비노출형으로 구분하여 각 유형별로 국내 바닥충격음 차단성능 기준을 충족하는 표준상세도 개발을 통해 목조 공동주택 확대를 위한 기술적 기반을 마련해야 할 것으로 판단된다.

[표 3-10] CLT 목조 공동주택 바닥구조 개발 핵심 방향과 목표

구 분	목표 및 과제	주 요 내 용	기 대 효 과
현장에서의 적용성 확보	현장에서의 성능 저하현상에 대응	우회전달음 차단된 실험실 환경을 고려해 현장 대비 더 높은 수준의 실험실 성능 달성목표 설정	실제 건축물에서 기준 충족 가능성의 증대와 리스크 최소화
기반기술 활용	사전인정바닥 제도와 연계평가	RC구조에서 1등급을 인정받은 습식반건식·건식 인정바닥구조를 CLT 바닥에 설치하여 성능 평가	검증된 기술 활용으로 개발시간 단축 및 신뢰성 확보
복합구조 개발	고성능 천장구조 시스템과 접목	인정바닥구조와 고성능천장구조가 결합된 복합 바닥구조체의 실험실 성능평가 진행	중량충격음 저감성능의 극대화 및 최적 솔루션 도출
종합 차음성능	공기전달음 관련 기준검토를 병행	CLT의 낮은 면밀도로 인한 공기전달음 이슈에 대비해 국내 차단성능기준 부합 여부를 검토	층간소음문제 종합대응 통한 거주품질의 향상
보급기반 마련	하부노출 유형별 표준상세도 개발	CLT의 하부 노출형·비노출형으로 구분해 국내 요구기준을 충족하는 상세도 개발	목조공동주택 보급확대 위한 기술표준 마련

제4장 수입목재 탄소저장 효과 NDC 실적 반영방안

1. 서 론

1.1. 검토배경

1.1.1. 기후위기와 파리협정 체제

- 전 지구적 기후위기는 더 이상 미래의 위협이 아닌 현재의 실존적 문제로 부상하였다. 산업화 이후 급증한 온실가스 배출로 지구 평균기온이 상승하고 이는 폭염, 홍수, 가뭄 등 극단적인 기상이변을 야기하며 인류의 생존과 지속가능한 발전을 심각하게 위협하고 있다.
- 이러한 위기에 대응하기 위해 국제사회는 2015년 파리협정(Paris Agreement)을 채택하며 새로운 기후체제를 출범시켰다. 파리협정은 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 2°C보다 현저히 낮은 수준으로 유지하고, 나아가 1.5°C 이하로 억제하기 위하여 노력한다는 장기목표를 설정하였다.
- 파리협정의 핵심은 각 당사국이 자발적으로 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution ; NDC)를 설정하고, 국제사회에 5년 주기로 제출하며 지속적으로 상향된 목표를 제시해야 하는 ‘진전의 원칙’에 있다.
 - 그리고 모든 당사국은 NDC 이행 상황을 정기적으로 보고하고 국제적인 검토를 받는 강화된 투명성 체계(Enhanced Transparency Framework, ETF)를 따라야 한다.
 - 이는 각국의 감축노력을 투명하게 공개하고 상호 신뢰를 바탕으로 전 지구적 목표를 공동으로 달성하기 위함이다.

1.1.2. 2030 NDC 및 2050 탄소중립

- 대한민국은 국제사회의 책임 있는 일원으로서 기후위기 대응에 적극적으로 동참하고 있다. 정부는 2021년에 “2030년까지 국가 온실가스 배출량을 2018년 대비

40% 감축”한다는 매우 도전적인 NDC 상향안을 UN에 제출하였다.

- 이는 기존 26.3% 감축목표에 비해 대폭 상향된 것으로, 우리나라의 강력한 기후 행동 의지를 보여주는 것이다. 나아가 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(이하, 탄소중립기본법)을 제정해, 2050년까지 탄소 순배출량을 ‘0’으로 만드는 ‘2050 탄소중립’을 법제화하였다.
- 이러한 목표를 달성하기 위해 정부는 ‘제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획’을 수립하고 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물 등 전 부문에 걸친 감축전략을 구체화하였다.
- 특히, 2030 NDC는 전환 부문에서 44.4%, 산업 부문에서 14.5%, 건물 부문에서 32.8% 등 부문별로 구체적인 감축목표를 할당하고 있어 각 부문의 혁신적인 감축 노력이 시급한 과제로 떠올랐다.

[표 4-1] 2030 국가 온실가스 감축목표 (NDC) 상향안

구 분	부 문	배 출 량 (백만톤CO ₂ eq)		감 축 률 (%)
		2018년	2030년	
배 출 량 총 계 (순배출량)		727.6	436.6	40.0
배 출	전 환	269.6	145.9	45.9
	산 업	260.5	230.7	11.4
	건 물	52.1	35.0	32.8
	수 송	98.1	61.0	37.8
	농 축 수 산	24.7	18.0	27.1
	폐 기 물	17.1	9.1	46.8
	수 소	-	8.4	-
	탈 루 등	5.6	3.9	30.4
흡수·제거	흡 수 원	- 41.3	- 26.7	-
	C C U S	-	- 11.2	-
	국 제 감 축	-	- 37.5	-

자료 : 2030 NDC 상향안 (2023.4) 재구성

1.1.3. 건물부문의 탄소중립 핵심역할

- 건물 부문은 전 세계 에너지 소비의 약 35%, 온실가스 배출의 약 40%를 차지하는 주요 배출원이다(Liu et al., 2025). 국내에서도 2018년 기준으로 약 5,210만 톤의 온실가스를 배출하여 국가 총 배출량의 상당 부분을 차지하고 있다.

- 특히, 자재 생산 과정에서 발생하는 내재탄소(Embodied Carbon)까지 고려하면 그 영향력은 더욱 커진다. 따라서 건물 부문의 탈탄소화는 국가 탄소중립 목표 달성을 위한 필수과제이다.
- 우리 정부는 제로에너지 건축물(ZEB) 의무화와 그린 리모델링 사업 확대 등으로 건축물 운영단계의 에너지 효율을 높이는 데 주력하고 있다. 그러나 건축물의 전 생애주기 관점에서 볼 때, 철근콘크리트·철골 등 탄소집약적 자재의 생산 및 시공 단계에서 발생하는 내재탄소의 비중도 무시할 수 없다.
 - 신축 건축물의 경우 내재탄소가 전 생애주기 탄소배출량의 30~50%에 이를 수 있다는 연구결과도 있다.
- 따라서 운영 단계의 에너지 효율 개선과 더불어, 자재 생산 및 시공 단계에서부터 탄소배출을 근본적으로 줄일 수 있는 저탄소 건축자재의 사용과 건설공법 혁신이 시급히 요구된다.

1.1.4. 목조건축의 탄소감축 잠재력

- 목조건축은 건물부문 탄소중립을 실현할 가장 유력한 대안으로 전 세계적 주목을 받고 있다. 목재는 다른 건축자재와 구별되는 독특한 탄소감축 특성을 지닌다.
- 첫째, 나무는 성장 과정의 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 자신의 몸에 탄소(C)의 형태로 저장한다. 이 목재를 건축자재로 사용하면 건축물의 수명 동안에 탄소를 격리하는 탄소저장고의 역할을 한다.
 - 통상, 목재 1m³에는 약 250kg의 탄소가 저장되며, 이는 이산화탄소 917kg에 해당한다.
- 둘째, 목재는 철근, 콘크리트 등 생산 과정에서 막대한 에너지를 소비하고 다량의 온실가스를 배출하는 자재를 대체하여 자재 생산 단계의 내재탄소를 획기적으로 줄이는 ‘대체 효과(Substitution Effect)’를 가진다.
 - 일본 이바라키현의 연구에 따르면, 동일 규모(38평) 주택을 건설할 때 목조주택의 CO₂ 배출량(26.9tCO₂)은 RC조(92.9tCO₂)의 약 29% 수준에 불과하다.
- 이처럼 목조건축은 단순히 배출을 줄이는 ‘저감(Mitigation)’을 넘어, 대기 중의 탄소를 적극적으로 제거하고 저장하는 ‘탄소제거(Removal)’의 역할을 동시에 수행하는 유일한 건축방식이다.

- 최근 서울 성북구에 건설 중인 국내 최초의 하이브리드 목조 아파트 사례는 RC조 대비 이산화탄소 배출량을 약 79.3% 저감할 수 있음을 보여주며 목조건축의 높은 잠재력을 입증하였다.
- 이처럼 목조건축 활성화는 건물 부문의 NDC 목표 달성에 결정적으로 기여할 수 있는 핵심 전략이다.

1.2. 문제제기

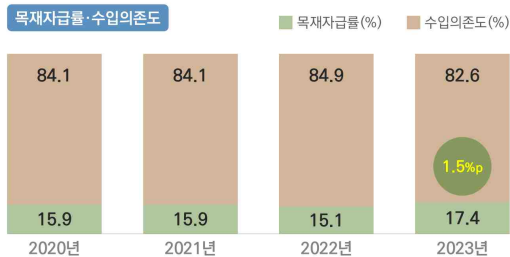
1.2.1. 목재 수입의존도 현황

- 목조건축의 탄소감축 잠재력에도 불구하고, 우리나라 목조건축 시장은 구조적인 한계에 직면해 있다. 바로 목재 자원의 절대적인 부족과 높은 수입 의존도이다. 2023년 기준으로, 우리나라의 목재 자급률은 17.4%에 불과하며 전체 수급량의 82.6%를 수입에 의존한다.
- 특히, 고층·대형 목조건축에 필수 자재인 구조용 집성판(CLT)과 집성재(GLT) 등 공학목재 대부분은 해외에서 수입된다. 그 범위를 건설용 목제품으로 한정할 경우 수입의존도는 90%를 상회하는 것으로 추정된다.

[그림 4-1] 한국의 목재자급률 및 수입의존 현황

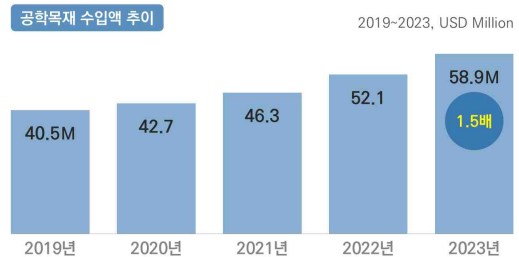
1 2020-2023 수입의존도

목재자급률은 15.9 → 17.4%로 상승, 수입의존도는 82~85% 수준



2 CLT·GLT 등 공학목재 수입동향

HS 4418 계열 가공목재 2023년 수입액은 USD 58.9M, 수입량은 22,255톤



3 우리나라 목재공급 총괄현황

산림청 '목재자급률 통계' (2020-2023), FAOSTAT Forestry

(단위 : 천㎡)

구분	2022년	2023년	증감비율	비고
목재수급량	28,471	26,608	△6.5%	
국산목재공급량	4,309	4,618	7.2%	목재자급률 2.3%p 상승 ('22)15.1 → ('23) 17.4%
목재수입량	24,162	21,990	△9.0%	
임목벌채허가량	4,742	4,632	△2.3%	
원목생산량	3,700	3,723	△0.6%	원목자급률 5.5%p 상승 ('22) 58.6 → ('23) 64.1%

- 이러한 상황이므로 목조건축 활성화와 시장 확대라는 목표를 달성하기 위해서는 필연적으로 수입목재 사용이 증가할 수밖에 없다.
- 그러나 현 국제 온실가스 회계체제에서는 이러한 전 지구적 온실가스 감축을 위한 목재 수입국의 노력이 제대로 인정받지 못한다.

1.2.2. ^{현행} HWP 회계기준의 한계

- 현행 국제 온실가스 회계기준의 한계로 목조건축의 탄소감축 기여도가 국가 공식 통계에 온전히 반영되지 못하는 문제가 존재한다.
 - 우리나라는 IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체) 가이드라인이 제시한 여러 방법 중 ‘생산국 접근법’을 채택하여 수확된 목제품(Harvested Wood Products ; HWP)의 탄소 저장량을 산정하고 있다. 이 방식은 목재를 생산하고 별채한 국가가 해당 목재의 탄소 저장량을 자국 흡수실적으로 계상하도록 규정한다.
- 이에 목재 자급률이 극히 낮고 수입 의존도가 절대적인 우리나라의 경우, 막대한 비용을 들여 수입목재를 활용하여 친환경 목조 건축물을 건설하더라도 그 핵심인 탄소저장 효과는 목재를 수출한 국가(예: 캐나다, 오스트리아)의 NDC 달성 실적으로 귀속된다. 다시 말해, 정작 목재를 소비하고 탄소를 저장한 대한민국의 NDC 실적으로 직접 인정받지 못하는 역설적 상황에 놓여 있다.
- 이는 목조건축 활성화를 통한 탄소중립 정책 추진의 동력을 저해하고, 기업들의 자발적인 저탄소 건축기술 도입을 가로막는 제약 요인으로 작용게 된다. “보이지 않는 감축” 노력에 대한 정책적 인센티브가 부재하기 때문이다.
- 이러한 문제는 목조건축 보급률이 높은 타 국가들과 비교할 때 더욱 두드러진다. 2023년 기준으로 신축건물 연면적에서 목구조가 차지하는 비중은 일본이 41.4%, 북미지역이 약 10%에 달하는 반면에 한국은 2% 수준에 머물러 있다(표 4-2).
- 높은 목재 수입 의존도와 불리한 탄소회계 기준이 결합됨으로써 목조건축 시장의 성장을 저해하고, 이는 다시 건물 부문 탄소감축 잠재력을 실현할 수 없는 악순환으로 이어지고 있다.
- 따라서 수입목재의 탄소저장 가치를 국내 감축 노력의 일환으로 인정받을 수 있는 전략적 접근이 시급하다.

[표 4-2] 한국 · 일본 · 북미 목조건축 비중

한 국 (2023년, 건축허가 기준)			일 본 (2023년, 건축허가 기준)			North America (2022년)	
구조재	연면적(천㎡)	비 중	구조재	연면적(천㎡)	비 중	구조재	비 중
RC조	85,000	63	RC조	22,596	20.9	Concete	47.0
S조	28,000	21	S조	38,337	35.4	Steel	34.0
SRC조	5,000	4	SRC조	1,535	1.4	Masonry	6.0
목 조	3,000	2	목 조	44,864	41.4	Wood	Light Frame 9.0
조적조	11,000	8	-				Mass Timber 1.0
기 타	3,080	2	기 타	979	0.9	Other	3.0
합 계	135,080	100 %	합 계	108,310	100 %	TOTAL	100 %

국토교통부, 통계누리 건축안허가 통계 (2023년 확정치) 및 분석
 국토교통성, 건축착공 통계조사 연보 (2023년)
 RBC Climate Action Institute, Mantle Development, 2022 · CBC News

1.3. 목적 및 범위

- 최종 목적은 수입목재를 활용한 목조건축의 탄소저장 가치가 국가 NDC 달성에 실질적으로 기여할 수 있는 정책적·제도적 방안을 모색하고 구체적인 실행 전략을 제언하는데 있다.
- 이를 달성하기 위한 세부 목표는 다음과 같다.
- 첫째, NDC, NIR 및 GHG Protocol의 Scope 등 국제적인 탄소회계 기준 및 수확 목제품(HWP)에 대한 탄소저장량 산정 방식을 심층 분석함으로써, 현행 방식이 목재 수입국에 미치는 구조적인 문제점을 진단한다.
- 둘째, 목조건축의 탄소감축 기여도를 객관화·정량화하기 위한 전과정평가(LCA), 환경성적표지(EPD) 등 기술적·제도적 방법론의 중요성을 탐구하고, 이를 기업의 ESG 경영과 연계하여 활용방안을 고찰한다.
- 셋째, 국제 회계기준의 제약 하에서 수입목재의 탄소저장 기여도를 인정받기 위한 구체적 실행 전략을 제시한다. 이는 기술기반감축 체계 인정, 추가 보고, 국제기준 개선 참여 및 상응조정 메커니즘의 활용 등을 포함한다.
- 넷째, 이상의 결과를 종합해 관계부처 협력, 법제화, 국제협력 시범사업 등 정책이 실질적으로 이행되기 위한 구체적 실행방안을 제언한다.

- 연구범위는 IPCC 가이드라인 및 UNFCCC 보고 체계를 중심으로 한 국가 단위의 온실가스 회계처리 체제와와 GHG Protocol에 기반한 기업 단위의 탄소 배출량 관리를 포괄한다.
- 이상의 연구를 통해, 목조건축이 우리나라의 2050 탄소중립 실현에 핵심 역할을 수행할 수 있는 기반을 마련하는 데 기여하고자 한다.

1.4. 방법 및 구성

- 본 연구는 국내외 학술논문, 정부 보고서, 국제기구(IPCC, UNFCCC)의 발간물, 관련 법령 및 정책 자료 등 문헌 연구를 중심으로 수행되었다.
- 특히, 국내외 선행 연구자료와 관련 발표자료를 핵심 참고자료로 활용하여 분석의 깊이를 더했다. 또한, 최신 국제 동향을 파악하기 위해 관련 웹 검색 자료를 보조적으로 활용하였다.
- 보고서는 총 4개의 절으로 구성된다. 1절 서론에서는 연구의 배경과 목적을 제시한다. 2절에서는 탄소회계의 기본 개념, HWP 회계처리 방식, 목조건축 탄소감축 가치의 정량화 방안을 분석하여 문제의 근원을 탐색한다. 3절은 연구의 핵심으로, 수입목재의 국가 NDC 기여도를 인정받기 위한 단기·장기 전략과 이를 뒷받침할 MRV체계 구축 방안을 상세히 검토한다. 마지막으로 4절에서는 주요 연구결과를 요약하고, 이를 바탕으로 정책 제언사항을 구체적으로 제시한다.

2. 탄소회계와 목조건축의 탄소가치

2.1. 온실가스 관리체계의 이해

- 온실가스 배출량을 관리하고 감축 목표를 이행하기 위한 회계체계는 국가 차원의 체계인 NDC와 기업 단위의 체계인 GHG Protocol(Scope)로 구분된다. 이들 두 체계는 목적과 범위에서 차이는 있으나, 전 지구적 온실가스 감축이라는 공동 목표를 위해 상호보완적인 역할을 수행한다.

2.1.1. 국가단위 : NDC & NIR

- NDC(Nationally Determined Contribution)는 파리협정 제4조에 근거하여 각 당사국이 자발적으로 설정해 5년마다 UN에 제출하는 국가 온실가스 감축목표로 국제법적 구속력을 지닌다.
- NDC의 산정과 보고는 각 국가의 영토경계(Territorial Boundary) 내에서 발생하는 모든 배출과 흡수 활동을 대상으로 한다. 즉, IPCC 가이드라인에 따라 국가 영토 내에서 직접 발생하는 배출량과 산림이나 도시 숲 등 공식적인 흡수원의 흡수량을 합산하여 순배출량을 계산한다.
- 각 당사국은 매년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report ; NIR)를 통해 전년도에 배출·흡수량 데이터를 UNFCCC에 제출해야 한다. 또한 2024년부터는 NDC 이행 및 달성 경과를 2년마다 ‘격년 투명성 보고서(Biennial Transparency Report ; BTR)’를 통해 보고하고, 국제적인 검토를 받게 된다.
- 이러한 과정에서 NIR에 반영되는 탄소흡수량은 NDC 목표 달성에 직접적으로 기여하는 것으로 인정된다. 결국 특정 활동의 탄소감축 효과가 NIR에 흡수량으로 계상되는지 여부는 한 국가의 탄소정책 우선순위를 결정하는 중요한 기준이 된다.

2.1.2. 기업단위 : GHG Protocol & Scope

- GHG Protocol은 WRI와 WBCSD가 공동으로 개발한 국제 표준으로서 기업에서 배출하는 온실가스를 체계적으로 관리하는데 도움을 주는 방법론이다. 즉, GHG

Protocol은 기업의 조직 경계(Organizational Boundary)에서 발생하는 온실가스 배출량을 체계적으로 측정·관리·보고하는 기준을 제공한다.

- 최근, GHG Protocol은 기업의 자발적인 탄소관리 및 ESG 경영의 핵심 도구로서 국제적으로 널리 활용되고 있다.
 - 여기서 GHG(Green House Gas, 온실가스)는 지구 대기온도를 상승시켜 온실 효과를 유발하는 기체로서 주 원인인 CO₂(이산화탄소) 외에도 CH₄(메탄), N₂O(아산화질소), HFCs, PFCs, SF₆ 등 다양한 기체를 포함한다.
 - WRI(World Resources Institute, 세계자원연구소)는 기후·환경·자원 분야 정책과 온실가스 기준을 연구·개발하는 글로벌 싱크탱크(연구기관)이다.
 - WBCSD(World Business Council for Sustainable Development, 세계지속가능발전기업협의회)는 지속가능경영을 추진하는 글로벌 기업의 CEO 중심 협의체로, 기업의 ESG·기후대응 전략 지원 및 지속가능경영 가이드·프레임워크 개발 등 역할을 한다.
- GHG Protocol에 의하면 기업의 온실가스 배출량은 그 발생원에 따라 아래 표와 같이 3개의 범위(Scope)로 분류된다.

[표 4-3] 국제 표준에 따른 기업 온실가스 분류체계 (GHG Protocol)

구 분	정 의 및 주 요 배 출 원
① Scope 1 직접배출	• 기업이 소유하거나 통제하는 배출원에서 직접 발생하는 배출을 말한다. (예 : 공장연소, 사내차량 운행) • 이론적으로 모든 기업의 Scope 1 배출량의 총합은 각 국가의 영토 내 직접배출량의 총합과 일치하여야 한다
② Scope 2 간접배출	• 기업이 구매하여 사용하는 전기·열 등 에너지 생산 과정에서 발생하는 간접적인 배출을 의미한다. • 이는 화력발전소 등 에너지 생산기업에서는 Scope 1 배출에 해당하지만 에너지를 소비하는 기업에게는 Scope 2 배출이 된다.
③ Scope 3 기타 간접배출	• 기업의 가치사슬(Value Chain) 전반 즉, 공급망에서 발생하는 간접적인 배출로, Scope 1과 2에 포함되지 않는 모든 간접배출을 포괄한다. • 여기에는 기업이 구매한 원자재 및 자본재의 생산, 제품의 운송, 임직원 출장, 판매제품의 사용과 폐기 단계에서 발생하는 배출이 포함된다. • 대부분 기업에서 Scope 3 배출이 전체 탄소발자국의 가장 많은 부분을 차지한다. • 이에 공급망 전체의 지속가능성을 제고하는 핵심 관리영역으로 간주된다.

2.1.3. 국가와 기업 회계체계의 상호관계

- 국가 NDC와 기업 단위의 Scope 체계는 서로 다른 경계와 목적을 가지고 있지만, 탄소중립이라는 공동의 목표 달성을 위해 상호보완적으로 작용한다.
- NDC가 국가의 영토 내에서 발생한 직접적인 배출과 공식적인 흡수원을 다루는 하향식(Top down) 접근이라면, Scope 체계에서는 각 기업의 활동과 관련한 직접·간접 배출을 포괄적으로 관리하는 상향식(Bottom up) 접근이다.
- 특히, Scope 3는 국가 NDC에서 포괄하지 못하는 영역을 기업의 책임 하에 관리하도록 유도하는 중요한 역할을 한다.
 - 예로써, 우리나라 기업이 해외에서 생산된 원자재를 수입해 제품을 만드는 경우, 해당 원자재 생산 과정에서 발생한 온실가스는 원자재 생산국의 NDC에 포함되지만, 우리나라 기업의 Scope 3 배출량에도 포함된다.
 - 이는 기업이 국경을 넘어 자신의 가치사슬(Value Chain) 전반 즉, 전체 공급망에 걸쳐 감축 노력을 기울이도록 하는 강력한 동기가 된다.
- 따라서, 수입목재를 활용한 건축물의 탄소저장 효과가 비록 현재 한국의 NDC에 직접 반영되지는 않더라도, 해당 건축물을 건설하거나 사용하는 기업의 Scope 3 배출량 산정 시에는 긍정적인 요소로 고려될 수 있다. 이는 본 연구가 제시할 단기 전략의 중요한 이론적 기반이 된다.
 - 예를 들어, 건축사업에 탄소집약 자재인 콘크리트 대신에 저탄소 자재인 목재를 사용하는 경우, Scope 3 하위 카테고리 가운데 구매한 상품 및 서비스(Category 1) 또는 자본재(Category 2) 관련 배출량을 줄이는 효과로 이어지고, 이는 ESG 보고서를 통해 외부에 공시할 수 있다.

2.2. 수확 목제품의 탄소회계

2.2.1. HWP와 탄소저장 특성

- 수확된 목제품(HWP ; Harvested Wood Products)이란 산림에서 벌채한 원목을 가공하여 생산한 모든 목재 제품을 의미한다. IPCC 가이드라인에서는 이를 크게 제재목(Sawn-wood), 목질 판상재(Wood-based panels), 종이와 판지(Paper &

Paperboard) 등 3개 범주로 분류하고 있다(IPCC GL 2019).

- 여기서 건축물에 주로 사용되는 구조용 목재, 내·외장재 및 가구 등은 제재목이나 목질판상재의 범주에 해당한다.
- IPCC에서는 나무가 성장하며 흡수한 탄소를 이 목제품에 그대로 저장하고 있고 이 저장량은 제품으로 사용되는 동안 대기에서 장기간 격리된 것으로 인정한다. 또한 이 탄소저장량은 NIR의 농업·산림·기타토지이용(Agriculture, Forestry and Other Land Use ; AFOLU) 부문 흡수실적으로 계상할 수 있다(그림 4-1).
- 한편, HWP에 저장된 탄소량은 시간 경과에 따라 제품이 분해되거나 폐기되면서 점진적으로 대기로 다시 방출된다. IPCC는 이러한 특성을 반영하기 위하여 HWP 유형별로 저장 탄소량이 절반으로 감소하는데 걸리는 시간 즉, 반감기(Half-life) 개념을 적용하고 있다.
- IPCC 가이드라인(2019)에서 정한 기본 반감기는 제재목은 35년, 목질 판상재는 25년, 종이·판지는 2년이다(표 4-4).
- 이는 HWP가 건축자재로 장기간 사용되면, 해당 목재에 저장된 탄소가 건축물이 사용되는 수십 년간 안정적으로 격리되는 탄소저장고(Carbon Sink) 역할을 할 수 있음을 IPCC에서 인정하고 있는 것이다.

[그림 4-2] NDC, NIR, AFOLU, and LULUCF



[표 4-4] 수확된 목제품^{HWP} 기본 반감기 (IPCC GL 2019)

제 품 군	IPCC 기준	한국 적용	비 고
제 재 목	35년	35년	• 제재목, 구조재 (CLT · GLT), 마감재 등
목 질 판 상 재	25년	25년	• 합판 (LVL), OSB, PB, 섬유판 (MDF/HDF)
종 이 · 판 지	2년	2년	• 그래픽, 위생, 포장용지 · 판지

2.2.2. HWP의 회계처리 방식

- 문제는 HWP에 저장된 탄소를 어느 국가의 감축 실적으로 인정할 것인가에 대한 회계처리 방식에 있다. 목제품은 국경을 넘어 활발히 거래되는 상품이므로, 탄소 저장량의 국가간 이중계산(Double counting)이나 누락(Non-counting) 방지를 위한 명확한 규칙이 필요하다.
- 이에 IPCC는 2006년 가이드라인과 2019년 개정판에서 각 당사국이 자국 상황에 맞게 선택할 수 있도록 세 가지 접근법을 제시하고 있다.

[표 4-5] 수확된 목제품^{HWP} 탄소회계 방식 (IPCC GL 2019)

구 분	회 계 주 체	장 점	단 점
생 산 국 접 근 법	목재 생산국 (목재 벌채국)	• 데이터 확보가 용이 • 이중계산 방지에 효과적 • 현재 다수 국가가 채택	• 목재수입국의 감축노력 미반영 • 소비기반 배출량 관리의 어려움
재 고 증 감 접 근 법	목재 소비국 (목재 사용국)	• 소비국의 실질기여 인정 • 목조건축 등 소비촉진 정책과 연계 용이	• 국가간 다른 방식 채택 시 이중 계산의 위험성 • 국내 HWP 재고량 통계가 필요
대 기 흐 름 접 근 법	실제 탄소흐름 발생국	• 이론적으로 가장 정확함	• 기술적 한계로 실 적용이 어려움 • 복잡한 추적시스템 필요

출처 : IPCC Guideline (2019) 관련자료를 바탕으로 재구성

(1) 생산국 접근법 (Production Approach)

- 목재를 생산(벌채)한 국가가 자국에서 생산된 원목으로 제조한 HWP의 탄소저장 변화량을 자국의 흡수/배출량으로 계상하는 방식이다. 즉, 목재가 수출되더라도 해당 목재의 탄소저장 효과는 생산국의 실적으로 귀속된다.
- 이 접근방식은 벌채 기록을 기반으로 하여 데이터 확보가 비교적 용이하고 국가간

이중계산을 원천적으로 방지하는 데 효과적이다.

- 이러한 이유로 현재 우리나라를 포함한 대부분의 국가가 채택하고 있다. 그러나 목재를 수입하여 사용하는 국가의 탄소감축 노력을 전혀 인정하지 못하는 명백한 한계를 지닌다.

(2) 재고증감 접근법 (Stock-Change Approach)

- 목재를 소비하는 국가가 자국 영토에서 사용되고 있는 HWP 재고(stock)의 연간 순 변화량을 자국 흡수배출량으로 반영하는 방식이다. 이 방식을 채택하면, 수입 목재가 국내 건축물에 사용되어 HWP 재고를 증가시키는 경우, 그 증가분만큼을 수입국의 NDC 흡수실적으로 계상할 수 있다.
- 이는 소비국의 실질적 감축 노력을 반영할 수 있다는 점에서 합리적이다. 반면에 모든 국가가 동일한 방식을 채택하지 않을 경우에 수출국(생산국)과 수입국(재고 증감)에서 동일한 탄소량이 중복 계상될 위험이 있다 (Matsumoto et al., 2019).

(3) 대기흐름 접근법 (Atmospheric-Flow Approach)

- 탄소가 실제로 대기 중에 배출되거나 대기로부터 제거되는 시점, 장소를 기준으로 회계처리하는 방식이다.
 - 예로써, 목재가 폐기되어 소각될 때 발생하는 이산화탄소는 그 목재를 소비한 국가의 배출량으로 산정된다.
- 이론적으로 가장 정확한 방식이지만, 국경을 넘나드는 수많은 목제품의 생애주기 전체를 추적하고 실제 탄소 흐름을 측정하는 것이 기술적으로 매우 어려워 현재 널리 채택되지 않고 있다.
- 현행 UNFCCC 체제에서는 각국이 이 세 가지 방식 중 하나를 자율적으로 선택할 수 있어, 국가 간 회계방식 불일치로 인한 이중계산 또는 누락 문제가 지속적으로 지적되고 있다(Matsumoto et al., 2019).
- 앞으로, 파리협정의 강화된 투명성 체계 하에서 HWP 회계방식의 통일 또는 상호 조정에 대한 국제적 논의가 더욱 중요해질 전망이다.

2.2.3. 생산국 접근법 채택과 그 한계

- 우리나라는 2020년 UNFCCC에 제출한 NDC 문서에서 수확된 목제품(HWP) 부문에 대해 생산국 접근법을 채택할 것을 명문화하였고, 이후 모든 공식 보고서(NIR)에서 같은 기준을 적용하고 있다.
- 이는 ‘자국에서 자란 나무를 수확하여 생산한 원목으로 자국에서 가공한 HWP에 포함된 탄소만을 해당 국가의 탄소저장량으로 인정한다’는 원칙에 따른 것이다.
- 이로써 발생하는 구조적 문제는 명확하다. 예를 들어 캐나다에서 벌채된 목재가 한국으로 수입되어 LH 아파트 건설에 사용되었다고 가정하자. 생산국 접근법에 따라 해당 수입목재에 저장된 탄소량은 캐나다의 HWP 흡수실적으로 계산되며 향후 건축물이 해체되어 목재가 폐기될 때 발생하는 배출량까지 캐나다 인벤토리에서 관리된다.
- 반면, 목재 수입국인 한국의 입장에서는 해당 목재가 물리적으로 국내에 존재하고 탄소를 저장하고 있음에도 불구하고, 공식적인 HWP 흡수실적 통계에는 아무런 변화가 없다. 현재 우리나라의 HWP 인벤토리에서는 오직 국산 목재로 만들어진 제품의 재고 변화만을 다루기 때문이다.
- 결과적으로, 수입목재를 활용한 우리의 탄소감축 노력은 NDC 이행 실적에 전혀 기여하지 못하는 ‘보이지 않는 감축(Invisible Mitigation)’이 되고 만다.
- 이는 우리나라 목재 자급률이 10% 대에 머물러 있고 건설용 공학목재 대부분을 수입에 의존하는 현실에서는 목조건축 활성화 정책을 적극 추진한다 하더라도 그 효과를 저해하는 근본적인 한계로 작용한다.
- 정부와 기업에서 목조건축을 확대 적용하려 해도, 그 성과가 국가 통계에 제대로 잡히지 않는다면 정책 우선순위에서 밀리고 투자 유인도 하기 때문이다.

2.3. 목조건축 탄소감축 가치와 정량화 방안

- 목조건축은 2050 탄소중립(Net-Zero) 달성을 위한 건물 부문의 핵심 전략이다. 단순히 배출을 줄이는 탄소 저감(Carbon Mitigation)을 넘어서 적극적으로 제거·저장하는 탄소제거(Carbon Removal)의 역할을 동시에 수행하기 때문이다.

- 이러한 목조건축의 탄소감축 가치는 ‘탄소 저장효과 + 대체효과’로 구분하여 평가할 수 있다.

2.3.1. 탄소저장과 대체효과

① 탄소저장 (Carbon Storage)

- 앞서 언급했듯이, 목재는 성장 과정에서 흡수한 이산화탄소를 고체 탄소의 형태로 내부에 저장한다. 목재는 건조중량의 50%가 탄소이며, 목재 1m³에는 평균적으로 약 917kg의 이산화탄소를 저장하는 효과가 있다.
- 건축물에 사용된 목재는 건축물 수명이 다할 때까지 탄소를 안정적으로 고정하여 대기 중 온실가스 농도를 낮추는 데 직접 기여한다. 이는 목조 건축물을 “도심 속 탄소저장고(Urban Carbon Sink)”로 만드는 핵심 기능이다.

② 대체효과 (Substitution Effect)

- 목재는 철근, 콘크리트, 알루미늄 등 생산 과정에서 에너지를 대량 소비함으로써 온실가스를 배출하는 탄소집약적 자재를 대체한다.
 - 포틀랜드 시멘트 1톤을 생산하는 데 약 860kg의 CO₂가 배출되는 반면에, 목재는 가공 과정의 온실가스 배출이 철강 생산의 1/350, 알루미늄의 1/1500 수준에 불과하다.¹⁾
- 따라서 동일 규모의 건축물을 목조로 지으면, 건설자재의 생산 단계에서 발생하는 내재탄소(embodied carbon)를 획기적으로 줄일 수 있다.
 - 한 연구에 따르면 목조주택의 내재탄소는 RC주택의 40% 수준에 불과하며(김용구 외, 2014), 목재 사용을 늘리면 상업용 건축물의 내재탄소를 평균 60%까지 줄일 수 있다는 분석도 있다(Canadq Think Wood, 2024).
- 이들 두 가지 효과를 종합하면 목조건축의 총 탄소감축 기여도를 평가할 수 있다. 예를 들어, 연면적 63m²(19평) 목조주택 1개 동은 약 17톤의 탄소를 저장하고, RC 구조를 대체함으로써 총 36톤의 탄소감축 효과를 가져온다(NIFoS 연구자료).
 - 여기서, 탄소저장량 17톤은 승용차 18대가 1년간 배출하는 이산화탄소량에 해당한다.

1) 권순일 외(2024), 전과정평가(LCA)를 이용한 건축자재별 환경영향 비교분석 ; 건축용 목재 및 콘크리트 종류별 중심으로, 대한환경공학회지, vol.46, no.10, pp. 570~581

- 이러한 목조건축 사업의 탄소감축 효과를 객관적으로 정량화하기 하기 위해서는 LCA 등 방법론의 도입이 필수적이다.

2.3.2. 전과정평가를 통한 정량화

- 목조 건축물의 탄소감축 기여도를 과학적으로 신뢰성 있게 평가하기 위한 표준적 방법론은 ‘전과정평가(Life-Cycle Assessment ; LCA)’이다.
- ISO 14040는 “특정 제품의 전 생애주기 동안의 투입, 배출 및 잠재적 환경영향을 수집·평가하는 것”을 LCA로 정의한다. 이는 특정 시점의 배출량만이 아니라 시간 흐름에 따른 총체적인 환경부하를 평가하여 진정한 의미의 친환경성을 판단하는 기준을 제공하는 도구이다.
 - ISO 14040의 LCA 4단계 : ① 목표·범위 설정
② 목록 분석 (LCI)
③ 영향 평가 (LCIA)
④ 해석 (Interpretation)
- 통상, 건물부문에서는 LCA가 원료 채취부터 자재생산·운송, 건설, 사용·유지보수, 해체·폐기 및 재활용에 이르는 전 생애주기에 걸쳐서 발생하는 모든 환경영향을 정량적으로 분석하는 도구로 정의된다(표 4-6 참조).
- 건물부문 LCA에서는 현재, EN 15978 및 EN 15804가 국제적인 표준으로 널리 통용되고 있다. 여기서는 건축물 생애주기를 아래 그림과 같이 5개 모듈(Module)로 구분하여 평가하도록 규정하고 있다.

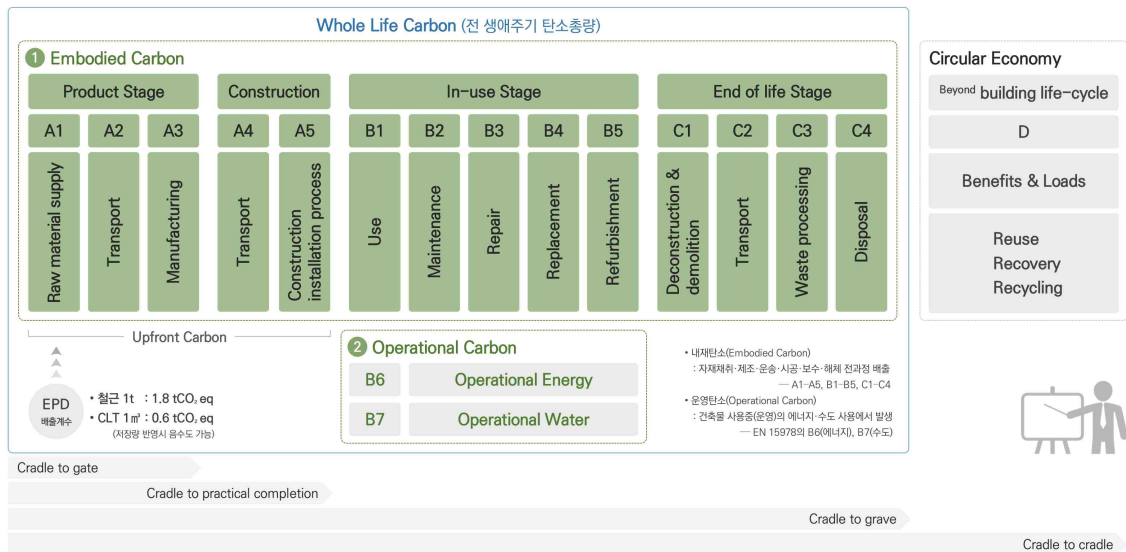
[표 4-6] LCA 관련 국제 표준 (ISO & European Standard)

구 분	기 준	정 식 명 칭	정 의
Environmental management 환경경영	ISO 14040	Life cycle assessment - Principles and framework	전과정평가(LCA)의 기본 원칙과 구조를 규정
	ISO 14044	Life cycle assessment - Requirements and guidelines	LCA를 위한 구체적인 요구사항과 방법론을 규정
Sustainability of construction works 건설공사의 지속가능성	EN 15978	Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method	건축물의 전과정 환경성을 평가하는 유럽 표준
	EN 15804	Environmental product declarations - Core rules for construction products	건축자재 EPD 작성기준을 규정하는 유럽 표준

[표 4-7] 건물부문 LCA 모듈별 세부내용

구 분	모 들	내 용
① 자재생산	A1 ~ A3	원자재의 공급·운송, 자재생산
② 건 설	A4 ~ A5	자재운송, 현장설치 및 시공
③ 사 용	B1 ~ B7	건축물의 사용, 유지보수, 수리교체, 리모델링 및 운영에너지 등
④ 수명종료	C1 ~ C4	건축물의 해체, 폐기물 처리·운반 및 처분
⑤ 재 활 용	D	재사용·재활용·에너지 회수 등으로 인한 잠재적인 환경 편익이나 부하

[그림 4-3] 건물부문 LCA 모듈 및 경계구조 (via. EN 15978)



[그림 4-4] 건물부문 LCA 효용성 및 HWP 탄소저장

1	설계·조달 의사 결정	구조(RC조·S조·목조·하이브리드), 물량·내구·해체 전략에 따른 전과정 차이를 공정하게 비교
2	규격·인증·발주 충족	EN 15978 & 15804, RICS WLC, LEED WBLCA, BREEAM 등은 생물기원 탄소저장의 '별도 보고'를 요구
3	투명성·그린워싱의 방지	목제품의 탄소저장은 운영배출·화석배출의 상쇄가 아님 → NDC 회계와 분리하여 중복계상을 방지(별도표기 必)
4	종료단계·순환설계 판단	DfD(해체·재사용), 모듈D 크레딧, 장수명 설계의 효과를 정량화하려면 저장·EoL(End of Life) 시나리오가 필요
5	ESG·금융·내부 탄소예산	자재구매(Scope 3)·탄소가격·공시지표 등 자료로 직접 활용(프로젝트 또는 기업의 책임경계에서 중요한 요소)
6	시간가치(Time value of carbon)	수확 목제품의(HWP) '초기탄소(Upfront Carbon) 저감효과'를 각국의 NDC 중간목표와 정합성 있게 평가

- 한편, 목조 건축물 LCA에서 특히 중요한 것은 '생물기원 탄소(Biogenic Carbon)' 저장의 정확한 회계처리이다.
- EN 15804에 의하면, 수확 목제품에 저장된 탄소는 원자재 공급 단계(A1)에서는 음(-)의 배출량(즉, 제거 및 저장)으로 계산하고, 수명종료 단계(C3~C4)에서는

양(+의 배출량으로 계산한다. 이는 목재가 소각되거나 매립되어 분해되었을 때 저장되었던 탄소가 다시 대기로 배출되기 때문이다.

- LCA에서는 이러한 과정을 통해 ‘목조 건축물의 탄소감축 기여도를 정량적으로 평가함은 물론, 건축물의 전체 수명주기 관점에서 환경영향과 탄소중립성을 보다 투명하게 보고할 수 있다.

2.3.3. 국내 LCA 프로그램 및 적용 사례

- 우리나라에서도 목조건축의 LCA를 지원하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 국립 산림과학원은 ‘목제품의 전과정 목록 데이터베이스(LCI DB)’를 구축하고 이를 기반으로, 2023년에는 목조건축물의 온실가스 감축 기여도를 손쉽게 산출하는 “간이 전과정평가 프로그램(Simplified-LCA)”을 개발·보급한 바 있다.
 - 프로그램은 국제 기준(EN 15978 & 15804)에 맞게 설계되었고, 건축물의 기본 정보만 입력하면 탄소저장 및 대체효과를 포함한 전 과정 환경영향을 평가할 수 있다.
- 이 프로그램을 활용하여 실제 건축물을 대상으로 분석한 결과를 소개하면 아래와 같다. 이 결과는 목조 건축물의 기후대응 우수성을 명확하게 보여주는 사례이다.
 - 국립산림과학원의 한 연구동 건물을 기존 RC에서 목구조로 설계를 변경하여 LCA를 수행한 결과, 자재생산과 건설 단계(A1~A5)에서 약 501tCO₂의 온실가스 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 탄소저장 효과(약 385tCO₂)와 대체 효과(약 116tCO₂)를 합산한 결과이다.
 - 또 다른 선행연구에서는 목조주택에 투입된 콘크리트를 건축용 목재로 대체할 경우, 62.21kgCO₂eq/m³의 저감효과가 있고 기존 RC주택을 목조주택으로 전면 전환할 경우에는 최대 36%의 탄소저감 효과가 있음을 시나리오 분석을 통해 확인하였다.

■ RC조·목조 각 1동 탄소배출량 산정



■ RC→목조 대체시 501tCO₂ 저감 임산자원이용연구부동



[그림 4-5] RC와 목조 탄소감축 기여도 비교·평가 사례 (국내 S-LCA 프로그램 활용)

- 최근 전 세계적으로 건축물에 대한 운영탄소 중심의 배출량 평가에서 나아가 자재 생산 과정의 내재탄소(Embodied Carbon)까지 포함하는 LCA 기반 관리가 점차 확대되는 추세이다.
- 이러한 LCA 기반의 정량 데이터는 건축물의 환경성을 객관적으로 입증하고 이를 녹색건축인증(G-SEED)이나 환경성적표지(EPD) 제도와 연계시킬 경우 정책적 인센티브를 제공하는 근거로 활용할 수 있다
- 특히, 이는 다음 장에서 구체적으로 다룰 ‘기술기반 감축성과 인정체계’를 운영할 때 핵심적인 측정도구가 될 것이다.

3. 수입목재의 NDC 기여도 인정 방안

- 앞서 검토한 바와 같이, 현행 ‘생산국 접근법’ 하에서는 목재 수입 의존도가 높은 우리나라의 목조건축 활성화 노력이 국가 NDC 달성에 직접적으로 반영되기는 어려운 구조적 한계가 있다.
- 이 장에서는 이러한 제약을 극복하고 수입목재의 탄소저장 가치를 실질적인 국가 차원의 감축 기여로 인정받기 위한 단계적이고 전략적인 방안을 단기 및 장기 과제로 나누어 제시하고자 한다.

3.1. 단기전략 : TBM 인정 및 투명성 확보

- 국제 회계기준을 즉시 변경하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 단기적으로는, 현 제도의 틀 안에서 수입목재의 탄소감축 기여도를 공식적으로 측정·기록하고 투명하게 관리하며 비공식적으로나마 그 가치를 인정받는 체계를 구축하는 것이 현실적인 대안이다.
- 이는 ‘기술기반 감축(Technology Based Mitigation ; TBM)’ 성과로 인정 받을 수 있는 기반이 될 수 있다.
 - 여기서 기술기반 감축은 신기술 적용이나 기존 기술을 활용하거나 개선하여 온실가스 배출량을 줄이는 접근 방식이며, 우리나라의 NDC나 2050 탄소중립 전략에서 가장 큰 비중을 차지하는 축이다.

- 기술기반 감축성과(Technology Based Mitigation Outcomes)는 기술적인 수단을 활용하여 실제 온실가스 배출량 감축효과를 정량·정성적으로 산정한 결과를 말한다. 이는 기업의 ESG 관점에서 매우 강력한 평가 요소로 활용할 수 있다.

3.1.1. TBM 인정체계 구축

- 우선, 목조건축의 탄소저장 및 대체효과를 기술기반 감축(TBM)성으로 인정 받기 위한 제도적 기반을 마련해야 한다.
- 이는 공식적인 NIR과는 별개로 특정 기술이나 프로젝트가 가져오는 감축효과를 정량화하고 인증하는 체계이다. 구체적인 방안은 다음과 같다.

(1) LCA 의무화 및 연계강화

- 공공기관이 발주하는 건축물을 시작으로 일정 규모 이상의 목조건축 사업에 대해 LCA 수행을 의무화하여야 한다.
- 이를 통해 산출된 프로젝트 단위의 정량적 감축 실적(탄소 저장량과 대체효과)을 인증하고 데이터 베이스로 구축한다.
- 또한, 환경부 환경성적표지(Environmental Product Declaration ; EPD) 제도와 연계하여 제재목, CLT, GLT 등 수입 목제품의 탄소저장량을 명시하도록 하고 EPD 인증제품 사용 시 인센티브를 제공한다. 이는 제품 또는 자재 단계에서 탄소 정보를 투명하게 공개하는 중요한 수단이 된다.

(2) 녹색건축 인센티브 제공

- 현행 국토교통부 녹색건축인증(G-SEED)제도와 제로에너지건축물 인증 평가 시 목재 사용량 및 LCA를 통해 산출된 ‘저장탄소량’의 가점을 대폭 상향하여야 한다.
- 이는 건축주와 설계자가 초기 설계 단계부터 목재 사용을 적극적으로 고려하도록 유도하는 강력한 시장 인센티브가 될 것이다.
- 또한, 환경부의 탄소포인트 제도와 연계하여 목조건축물의 건축주나 거주자에게 포인트를 지급하는 등 직접적인 보상방안을 마련하는 것도 민간의 자발적 참여를 유도하는 방안이 될 수 있다.

(3) TBM 크레딧제도 도입검토

- 장기적으로는, TBM을 통해 인증된 탄소 감축실적을 ‘탄소 크레딧’으로 전환하여 활용하는 방안을 검토할 수 있다.
 - 예를 들어, 이 크레딧을 온실가스 배출권 거래 시장(K-ETS)에서 외부사업 감축량으로 인정 받거나, 기업의 자발적 탄소시장(Voluntary Carbon Market ; VCM)에서 거래할 수 있도록 허용하는 것이다.
- 이는 수입목재를 활용한 감축 노력을 경제적 가치로 전환하여, 관련 기술 개발과 시장 활성화를 촉진하는 선순환 구조를 만들 수 있다.

3.1.2. 추가보고를 통한 투명성 확보

- TBM 인정으로 축적되는 수입목재의 탄소저장량 데이터는 NIR과 BTR 등 온실가스 실적보고 과정에서 투명하게 공개하여야 한다.
- 공식적인 감축실적으로 계상되지 않더라도 UNFCCC에 제출하는 NIR과 BTR에 부록(Annex)이나 별도의 장(Informative Chapter)을 신설하고, 이를 통해 “추가보고(Additional Informative Report)” 형태로 보고하는 전략이다.

[참고정보] 수입 HWP를 포함한 국가 총 HWP 탄소저장량 변화

이 보고서의 공식 HWP 탄소저장량은 IPCC Guideline에 따른 생산국 접근법으로 산정함. 참고로, 국내에서 소비된 수입 HWP를 포함한 국가영토 내 총 HWP 탄소저장량의 순 변화는 다음과 같음

- ▶ 대한민국의 총 HWP 탄소저장 순 증가분 : +A톤 CO₂eq
 - 국산 HWP 기여분 (공식 NIR에 계상) : +B톤 CO₂eq
 - 수입 HWP 기여분 (비계상 참고정보) : +C톤 CO₂eq

㉠ 수입 HWP 기여분(C톤)은 해당 목재의 생산국 인벤토리에 이미 계상되었으므로 본 보고서에서는 이중계상을 방지하기 위해 정보제공 목적으로만 기술

- 이러한 추가보고 전략은 아래와 같은 중요한 의미를 갖는다.
 - 첫째, 국제사회에 대한민국의 실질적인 기후 행동 노력과 정책적 의지를 가시적으로 보여줄 수 있다. 둘째, 목조건축 활성화 정책의 성과를 정량적으로 추척하고 평가하는 공식적인 기록을 남길 수 있다. 셋째, 향후 HWP 회계기준 변경을 위한 국제 논의에서 우리나라의 입장을 뒷받침하는 중요한 근거 자료로 활용될 수 있다.

- 특히, 이는 현행 생산국 접근법의 이중계상 우려를 명확히 해소하면서 우리나라의 주장을 투명하게 전달하는 효과적인 외교 수단이 될 것이다.

3.1.3. 기업 ESG 경영 및 공시 연계

- 국가 단위의 공식실적에는 잡히지 않는 감축노력이라도, 기업 단위에서는 중요한 성과로 인정받을 수 있다.
- 최근 강화되는 ESG 경영 및 공시 의무화 추세는 수입목재 활용 가치를 부각시킬 새로운 기회를 제공한다. LH와 같은 건설 공기업이나 민간 건설사는 수입목재를 활용한 친환경 프로젝트의 탄소감축 성과를 지속가능경영보고서나 ESG Report 등에 정량적으로 기재할 수 있다.
 - 예로써, 건축물 LCA를 통해 “A 프로젝트에서 수입목재를 사용하여 기존 RC조 대비 500톤의 CO₂ 배출을 저감하고, 해당 건축물에 300톤의 CO₂를 저장하였다”는 사실을 구체적으로 명시하는 것이다.
 - 이는, ‘기업 가치사슬 전반의 배출량을 관리하는 Scope 3 감축 활동’의 일환으로 평가 받을 수 있다. 특히, 구매한 상품 및 서비스(Category 1), 자본재(Category 2) 부문에서 탄소집약적 자재를 저탄소 목재로 대체한 성과로 인정받을 수 있다
- 이같은 ESG 공시는 투자자·금융기관·소비자 등 이해관계자에게 기업의 ‘탄소중립 친환경경영 노력을 어필하고 기업 가치를 제고’하는 효과적 수단이 된다.
- 또한, RE100, SBTi 등 글로벌 이니셔티브에 참여하는 기업에게는 Scope 3 감축 목표 달성을 위한 실질적인 수단이 될 수 있다.
 - SBTi(Science Based Targets initiative)는 기업들이 온실가스 감축목표를 과학적인 근거(IPCC 기준)에 따라 설정하도록 유도하고, 그 감축실적을 객관적으로 검증·인증하는 글로벌 이니셔티브이다.
 - 기업에서는 이를 통해 IPCC 경로(1.5℃ 등)에 맞추어 감축목표를 설정하고 그 실적을 과학적으로 검증함으로써, 동 기업의 ESG 경영 노력에 대한 투자자·시장의 신뢰성을 확보하는데 도움이 된다
- 정부에서는 기업이 이러한 활동을 적극 수행할 수 있도록 “LCA 기반 탄소저장량 산정 표준 가이드라인(가칭)” 등을 제공하고, 우수사례를 발굴하여 홍보하는 등 지원책을 마련하여야 한다.

3.2. 장기전략 : 국제기준 개선 및 양자 협력

- 단기전략이 현행 제도의 틀에서 가능한 대안을 모색하는 것이었다면, 장기적으로 문제의 근원을 개선하는 전략도 필요하다.
- 보다 긴 호흡으로 국제 회계기준 자체를 개선하려는 노력은 물론, 국가 간 협력을 통해 수입목재 탄소저장량을 공식 감축실적으로 인정받기 위한 근본적 해결책을 추진해야 한다.

3.2.1. 국제기준 개선논의 참여 : 재고증감법 도입 주장

- 정부는 기후환경부(NIR 총괄), 국토교통부(건축정책 총괄), 산림청(HWP 통계) 등 관계부처가 참여하는 공동 대응팀을 구성해 UNFCCC나 IPCC의 HWP 회계 기준 관련 작업 또는 협상 과정에 적극 참여해야 한다.
- 이 과정에서 목재 순수입국으로서 입장을 명확히 하고 생산국 접근법이 소비국의 실질적인 기후행동을 왜곡·저해하는 한계를 논리적으로 지적해야 한다.
- 궁극적인 목표는 목재 소비국이 자국의 HWP 재고 변화량을 감축실적으로 인정 받는 ‘재고증감 접근법(Stock-Change Approach)’을 국제 표준으로 채택하도록 유도하거나 또는 최소한 각국이 생산국 접근법과 재고증감 접근법 가운데 하나를 선택하되 상호 간에 이중계산을 방지할 수 있는 조정 메커니즘을 함께 도입하도록 하는 것이다.
 - 예로써, 모든 국가가 동일한 접근법을 사용하도록 의무화하거나, 서로 다른 접근법을 사용하는 국가 간 목재 거래에 대해서는 별도의 보고 및 조정 절차를 마련하는 방안을 제안할 수 있다(Matsumoto et al., 2019).
- 이러한 주장은 한국과 같이 산업구조상 목재의 수입 의존도가 높은 일본, 중국 및 다수의 유럽 국가의 공동 이익에도 부합한다.
- 이에 유사한 입장을 가진 국가와 연대해 공동으로 제안(Joint submission)하는 등 국제적인 공감대를 형성하고 외교적 영향력을 높이는 노력이 중요하다.
 - 이 과정에서, 앞서 단기전략으로 제시한 ‘추가 보고’를 통해 축적된 데이터는 이러한 주장의 설득력을 높이는 핵심적인 근거자료가 될 것이다.

3.2.2. 파리협정 제6조를 활용한 양자협력

- 국제기준 개정이 장기간 소요되는 과제임을 감안할 때, 보다 능동적이고 선제적인 방안으로 파리협정 제6조에서 규정한 ‘자발적·협력적 접근법’을 활용하는 전략을 모색해야 한다.
- 파리협정 제6.2조는 당사국들이 양자 또는 다자협정을 통해 온실가스 감축실적을 상호 이전할 수 있는 “Internationally Transferred Mitigation Outcomes(ITMO, 국제적으로 이전된 감축성과) 메커니즘”을 허용하고 있다.
- 이 규정을 활용해 캐나다·오스트리아·에스토니아 등 주요 목재 수출국과 양자협력 모델을 구축하는 방안을 추진할 수 있다. 구체적인 시나리오는 아래와 같다.
 - ① 목재 수입국(예: 한국)과 목재 수출국(예: 캐나다) 간 “HWP의 탄소저장량 이전에 관한 양자협정(MOU)”을 체결한다.
 - ② 한국은 캐나다에서 수입한 목재를 사용하여 건축을 하고, 해당 건축물에 저장된 탄소량을 LCA 등 합의된 MRV 방법론에 따라 정량적으로 산출한다.
 - ③ 산출된 탄소저장량(예: 10만 톤 CO₂)에 대하여 캐나다는 NDC 실적보고 시 해당 흡수량을 자국의 흡수실적에서 차감하고(이하, 상응조정), 그 사실을 UNFCCC에 보고한다.
 - ④ 한국은 상응조정을 통해 캐나다에서 이전받은 저장량(예: 10만 톤 CO₂)을 NDC 달성실적에 합산하여 보고한다.
- 이 협력 모델의 핵심은 감축실적이 양쪽 국가에 중복계산되는 것을 방지하기 위한 ‘상응조정(Corresponding Adjustment)’이다. 수출국이 자국의 실적에서 포기한 만큼만 수입국이 가져오는 것이고, 이로써 전 지구적 총 감축량에는 변함이 없기 때문에 환경적 건전성(Environmental integrity)을 담보할 수 있다.
- 이러한 모델은 수출국의 입장에서도 이점을 가질 수 있다. 예를 들어, 우리나라가 탄소저장량 이전에 대한 대가로 재정 지원을 제공하거나 고부가가치 건설용 목재 시장을 안정적으로 확보해주는 등의 반대급부를 제공할 수 있다.
- 또한 지속가능한 산림경영(Sustainable Forest Management ; SFM) 인증을 받은 목재에 대해서만 ITMO 거래를 허용함으로써 양 국가 모두의 지속가능한 발전에 기여하는 상호이익 모델을 구축할 수 있다.

- 정부는 이러한 ITMO 시범사업을 추진하기 위해 주요 목재 수출국과 외교채널을 구축하고, 기술적·절차적 세부사항을 논의하기 위한 실무 협의를 시작해야 한다. LH 탄소중립 아파트 시범사업(가칭)과 같은 공공 프로젝트를 이러한 국제협력의 테스트 베드로 활용하는 것도 좋은 방안이 될 수 있다.

3.3. 전략이행을 위한 MRV 체계 구축

- 기 제안한 단장기전략이 성공적으로 이행되고 국제적 신뢰를 얻기 위해서는 수입 목재 탄소저장 효과를 측정(Measurement), 보고(Reporting), 검증(Verification)하는 일관되고 투명한 체계(이하, MRV 체계) 구축이 전제되어야 한다.
- “측정하지 않으면 관리할 수 없다”는 상식적 원칙처럼, 신뢰할 수 있는 데이터가 없이는 어떠한 정책적 인정도 불가능하기 때문이다.

3.3.1. MRV 체계의 필요성

- MRV 체계는 온실가스 감축 활동의 결과를 투명하고 신뢰성 있게 관리하기 위한 일련의 절차를 의미한다.
- 이는 기후변화협약 체제에서 감축실적의 신뢰도를 담보하는 핵심 요소로서, 파리협정의 강화된 투명성 체계(Enhanced Transparency Framework ; ETF)에서도 그 중요성이 강조되고 있다(UNFCCC, 2024).
 - 측 정 (Measurement) : 감축 활동으로 인한 온실가스 배출량 또는 흡수량의 변화를 정량화하는 과정이다. 이를 위해서는 일관된 방법론, 데이터 및 배출·흡수 계수 등이 필요하다.
 - 보 고 (Reporting) : 측정된 결과를 정해진 형식과 절차에 따라서 관련 기관(예 : 정부, UNFCCC)에 보고하는 절차다. 보고서는 산정방법, 데이터 출처, 불확실성 등 투명한 정보 공개를 포함해야 한다.
 - 검 증 (Verification) : 보고된 결과가 정확하고 신뢰할 수 있는지, 독립적인 제3자가 평가하고 확인하는 과정이다. 이는 데이터의 객관성을 확보하고 이해관계자의 신뢰를 얻기 위해 필수적이다.

- 수입목재의 탄소저장량에 대한 명확한 MRV 체계가 없다면, 앞서 언급한 “추가 보고”는 단순한 주장으로 치부될 수 있고, ITMO를 통한 국제적 거래는 이행할 수 없을 것이다. 따라서 체계적인 MRV 시스템 설계와 이행기반 마련은 모든 전략의 출발점이라 할 수 있다.

3.3.2. 수입목재 탄소저장량 측정

- 수입목재 탄소저장량을 정확하게 측정하기 위해서는 해당 데이터의 수집과 산정 방법론의 표준화가 필요하다.

(1) 데이터 수집체계 구축

- 우선, 건축물에 사용된 수입목재의 종류(제재목, CLT, GLT 등), 부피 또는 중량, 원산지 등 데이터를 프로젝트 단위로 정확하게 수집·관리하는 시스템이 필요하다.
 - 이는 관세청의 수입통관 데이터, 건축 인허가 시 제출되는 자재 명세서, 시공사의 자재 발주 및 사용 기록 등을 연계하여 구축할 수 있을 것으로 보인다.
- 최근 주목받고 있는 블록체인 기술을 활용하면, 원목의 벌채부터 가공, 수입, 최종 사용에 이르는 전 과정 데이터를 위·변조 불가능한 형태로 투명하게 추적 관리할 수 있어 데이터의 신뢰성을 획기적으로 높일 수 있다(ForesTrust, 2024).

(2) 탄소저장량 산정방법론 표준화

- 수집된 목재 사용량 데이터를 기반으로 저장된 탄소량을 계산하는 표준 방법론을 정립해야 한다. 이는 IPCC 가이드라인에 따라 다음과 같이 산정할 수 있다.
 - 탄소저장량(tC) = 목재량(m³) × 밀도(t/m³) × 건조중량비 × 탄소함량비(기본 0.5)
 - CO₂저장량(tCO₂) = 탄소저장량(tC) × 3.67(CO₂/C, 44/12 분자량비)
 - 이 때, 사용되는 밀도, 건조중량비, 탄소함량비(함유율) 등 계수는 산림과학원의 연구 결과와 국제 통용 값을 비교·검토하여 국가 표준계수로 고시해야 한다.
- 나아가, 목재 사용으로 인한 ‘대체 효과’까지 측정하기 위해서는 기 언급한 LCA 방법론을 적용하여, 동등한 기능의 RC조 건축물 대비 감축량을 산정하는 절차를 표준화해야 한다.

3.3.3. 투명한 보고 및 검증 체계

(1) 보고체계 (Reporting)

- 프로젝트 단위로 산정된 수입목재의 탄소저장량은 “목조건축 탄소저장 인증서 (가칭)”와 같은 형태로 발급, 건축주에 제공할 수 있다. 또한 이 프로젝트 단위의 데이터를 국가 차원의 데이터로 통합, 관리하기 위해서는 “목조건축 탄소저장량 등록부(가칭)” 운영도 필요하다.
- 이들 데이터는 앞서 제안한 NIR ‘추가 보고’의 근거자료로 활용되며, 기업에서는 ESG 공시에 유용하게 활용될 수 있다. 또한, ITMO 거래를 추진하는 경우에는 이 등록부가 UNFCCC의 국제 등록 시스템과 연계되어야 한다.

(2) 검증체계 (Verification)

- 산정된 탄소저장량의 신뢰성을 확보하기 위해 독립적인 ‘제3자 검증 절차’를 도입해야 한다. 예로써, 국내 온실가스 검증기관이나 LCA 전문 검증기관이 데이터의 타당성, 계산 방법의 적절성 및 국제기준 부합 여부 등을 검증하고 결과 보고서를 발행하는 체계를 마련해야 한다.
- 특히, HWP 저장량 ITMO와 같은 국제 거래를 위해서는 상대국과 상호 인정할 수 있는 검증기관 및 검증절차를 사전에 합의하는 것이 필수적이다.
- 이러한 강력한 MRV 체계의 운영은 수입목재의 탄소저장 효과에 대한 국내·외적 의구심을 해소하고, 이를 신뢰할 수 있는 감축성으로 인정받게 하는 가장 근원적 인프라가 될 것이다.

4. 결론 및 정책 제언

4.1. 연구요약과 시사점

- 본 연구는 2030 NDC 및 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 핵심 전략으로서 목조건축의 중요성을 확인하고, 목재 수입 의존도가 높은 국내 현실에서 수입목재의 탄소감축 기여를 국가 감축실적에 반영하기 위한 다각적 전략을 제시하였다.

- 현행 IPCC 가이드라인에 따른 ‘생산국 접근법’ 기반의 HWP 회계기준은 목재를 수입하여 탄소를 저장하는 소비국의 기후행동 노력을 제대로 평가하지 못하는 명백한 한계를 가지고 있으며, 이는 목조건축 활성화 정책의 추진 동력을 약화하는 핵심 제약요인으로 작용하고 있음을 밝혔다.
- 이에 본 연구는 현행 제도의 틀 안에서 실행 가능한 단기 전략과 근본적인 해결을 위한 전략을 단계적으로 제시하였다. 단기적으로는 LCA 기반의 객관적 데이터 측정·기록 체계를 구축하고, 이를 ‘기술기반감축(TBM)’ 성과로 인정하며, NIR의 ‘추가 보고’ 및 기업의 ESG 경영에 활용하는 방안을 제안하였다.
- 이는 “측정하지 않으면 관리할 수 없다”는 원칙에 입각하여, 수입목재의 탄소저장 가치를 공식적 데이터로 가시화하고 그 가치를 비공식적으로나마 인정받기 위한 첫걸음이다.
- 장기적으로는 국제 회계기준 개선 논의에 적극 참여해 ‘재고증감 접근법’ 도입을 주장하고, 이와 함께 파리협정(제6조)의 상응조정 메커니즘을 활용한 양자협력 모델을 모색함으로써 수입목재 탄소저장량을 공식적인 국가 감축실적으로 인정받기 위한 근본적 해결책을 제안하였다. 또한, 이러한 전략의 신뢰성을 담보하기 위한 강력하고 투명한 MRV 체계 구축의 중요성을 강조하였다.
- 본 연구의 가장 큰 시사점은 목재를 단순한 건축자재가 아니라, 건축산업의 탄소 흐름을 재구성하고 기후변화에 대응하는 ‘핵심 솔루션’으로서의 인식전환을 촉구했다는 점에 있다. 탄소를 저장하는 건축은 미래 세대를 위한 지속가능성을 저장하는 일이며, 수입목재의 탄소저장 가치를 국가적 자산으로 인정하는 것은 이러한 패러다임 전환을 완성하는 마지막 퍼즐이 될 것이다.
- 마지막으로 본 연구가 제안한 전략들이 정부의 과감하고 지혜로운 정책적 대응을 통해 구체화되어, 목조건축이 국가 탄소중립 정책의 한 축으로 확고히 자리매김할 수 있기를 기대한다.

4.2. 정책실행을 위한 제언

- 건축산업에서 수입목재의 탄소저장 가치를 국가 NDC 달성에 실질 기여하도록 하기 위해, 본 연구의 분석 결과를 바탕으로 구체적 정책 실행방안을 제안한다.

4.2.1. 관계부처 협의체 구성 및 역할 정립

- 수입목재 관련 정책은 여러 부처의 소관 업무가 복합적으로 얽혀져 있어 부처 간 칸막이를 허물고 유기적으로 협력하는 것이 무엇보다 중요하다.
- 이를 위하여 환경부(온실가스 인벤토리 총괄, 국제협상), 국토교통부(건축·주택 정책, 녹색건축인증), 산림청(목재산업 및 HWP 통계)이 참여하는 '목조건축 탄소 회계 상설 협의체'를 국무조정실 또는 탄소중립녹색성장위원회 산하에 구성하여 운영할 것을 제안한다.
- 이 협의체에서는 데이터 공유 및 정책 연계를 강화하고, 다음과 같은 핵심 역할을 수행해야 한다.
 - (목표설정) 수입목재를 포함한 목조건축의 탄소저장량 관리 및 NDC 기여를 위한 공동의 목표와 로드맵 수립
 - (통합관리) 부처별로 분산된 데이터(수입통관·건축허가·목재이용 통계 등)를 연계하여 수입목재를 활용한 건축물의 탄소저장량 통합 관리체계 (MRV) 구축 주도
 - (정책연계) 공공부문 목조건축의 탄소저장 효과 인증제도 마련, G-SEED 등 기존 제도와 연계 강화, NIR을 통한 비계상 감축실적 공동 보고
 - (공동대응) IPCC, UNFCCC 회의에서 HWP 회계기준 개선을 위한 공동 대응 전략 수립 및 이행

4.2.2. 법제화를 통한 실행력 확보

- 정책의 지속성, 실행력을 담보하기 위해서는 관련 내용을 법률에 명문화하는 것이 필수적이다. 국회에서 논의 중인 「목조건축물 활성화 및 지원에 관한 법률」 또는 기존 「탄소중립기본법」 및 「녹색건축물 조성 지원법」 개정을 통해 다음의 사항을 반영할 것을 제안한다.
- ① 탄소저장량 측정·보고 의무화 : 공공건축물 및 일정 규모 이상 민간 건축물에 대해 목재 사용량과 그에 따른 탄소저장량을 LCA 방법론에 따라 의무적으로 측정하고 보고하도록 규정한다.

- ② 인센티브 법적근거 마련 : G-SEED 기준에 저장탄소량 평가항목을 신설하고 이를 용적률 완화, 세제혜택 등 인센티브와 연동하는 법적 근거를 마련한다.
- ③ 국가 통계 관리 근거 마련 : 온실가스 종합정보센터(GIR) 배출량 산정 지침에 ‘목조건축 대체감축효과 산정방법’을 포함하고, 국산 및 수입을 포함한 HWP 탄소저장량 변화를 국가 보조지표로 관리·공표할 수 있는 근거를 마련한다.
- 또한, 산림청에서 운영하는 “목재제품 탄소저장량 표시제도”의 대상을 현행 국산 목재에서 수입목재까지 확대하고, 이를 공공조달 시 가점으로 활용하는 등 실질적 혜택과 연계하도록 관련 규정을 개정해야 한다.

4.2.3. 국제협력 사업 연계 및 시범사업 추진

- 장기 전략의 성공적 이행을 위해, 선제적 국제협력 활동을 시작해야 한다. 정부는 주요 수출국과 산림경영 및 목재이용 증진을 위한 양해각서(MOU)를 체결하고 이를 바탕으로, 파리협정 제6.2조에 기반한 ITMO 시범사업 추진을 제안한다.
 - 이 시범사업은 특정 공공 프로젝트를 대상으로, 수입목재 사용에 따른 탄소저장량을 양국이 합의한 MRV 절차에 따라 산정하고, 상응조정을 통해 감축 실적을 이전하는 전 과정을 실제 이행해보는 것을 목표로 한다.
 - 이 과정에서 축적된 경험과 데이터는 향후 ITMO 거래를 본격화하고, 다른 국가와의 협상에서 유리한 위치를 점하는 중요한 자산이 될 것이다.
- 또한, KOICA의 ODA 사업 등과 연계하여 개발도상국에 한국의 목조건축 기술과 탄소저장량 평가 시스템을 이전하고 경험을 공유하는 것도 좋은 전략이다.
 - 이는 개발도상국의 지속가능한 발전에 기여함은 물론, HWP 회계기준 개선 논의에서 우리나라의 입장을 지지하는 우호 세력을 확보하는 효과를 가져올 수 있다. 이를 통해 국가 간 신뢰를 구축하고 상호 이익이 되는 협력 모델을 적극적으로 발굴해야 한다.

4.2.4. 데이터 기반 정책을 위한 LCI DB 구축 및 고도화

- 모든 탄소회계와 감축정책의 근간은 신뢰할 수 있는 데이터 확보이다. 목조건축의 탄소감축 기여도를 정확하게 산정하기 위해서는 ‘목제품의 전과정 인벤토리’ 즉, LCI DB(Life Cycle Inventory Database) 구축 및 고도화가 필요하다.

- 현재 우리나라 목제품 LCI DB는 일부 품목에 한정되어 있고 데이터가 부족하여 정확한 LCA 수행에 한계가 있다.
- 따라서 산림청, 환경부, 관련 연구기관(국립산림과학원, 한국환경산업기술원)은 우리나라에서 생산·소비되는 ‘주요 목제품에 대한 국가 표준 LCI DB’를 신속하게 구축해야 한다.
 - 이는 제품 생산에 투입되는 원료, 에너지 사용량, 공정 중 발생하는 배출물 등 전 과정에 걸친 데이터를 수집하고 분석하는 작업을 포함한다. 구축된 DB는 공개적으로 제공되어 건축 설계사, 건설사, 연구자 등이 쉽게 활용할 수 있도록 하여야 한다.
- 나아가, 4차 산업혁명 기술을 활용하여 산림자원 관리, 목재수급 예측, 건축물의 탄소저장량 모니터링 등을 통합적으로 관리하는 “산림-목재-건축 연계 디지털 플랫폼(가칭)”을 구축하는 방안도 중장기 계획으로서 고려하여야 한다.
 - AI 기술을 활용하면, 위성 영상, 국가산림자원조사 결과 등 방대한 데이터를 통합 분석하여 산림의 탄소흡수량 예측의 정밀도를 높일 수 있다(산림청, 2025.7).
 - 디지털 트윈 기술은 실 건축물을 가상공간에 복제하여 생애주기 동안의 탄소 흐름을 시뮬레이션하고 최적의 관리방안을 도출하는 데 활용될 수 있다.
- 이러한 데이터 기반의 과학적인 정책 수립 및 관리체계는 앞으로 목조건축을 통한 탄소중립 실현의 신뢰성과 효율성을 극대화할 것이다.
- 이러한 데이터 기반의 과학적인 정책 수립 및 관리체계는 앞으로 목조건축을 통한 2050 탄소중립 실현의 신뢰성과 효율성을 극대화할 것이다.

제5장 결 론

1. 연구결과 요약 및 시사점

- 목재OSC 기반 LH 탄소중립 아파트 구현을 위한 요소기술과 제도·정책적 과제를 주로 다룬 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.
- 첫째, PC 아파트 외벽에 대한 목재OSC 패넬화 기술의 적용 가능성을 입증하였다. 국내외 기준 검토 및 다양한 시뮬레이션을 통해 목재 외벽 패넬이 구조적 안전성, 에너지 성능, 내화성능 등을 확보할 수 있음을 제시하였다.
 - 경골목구조와 방화 석고보드 등을 복합한 외벽 단면 구성으로 2시간 이상의 내화성능, 지역별 단열기준 충족, 풍하중 등에 대한 안정성을 충족하는 설계안을 도출하였다.
 - 특히, 목재 외벽에 OSC 방식을 적용하면, 적정품질 확보와 공기단축이 가능하고 시공 효율성이 높다는 점을 사례로서 확인하였다.
 - 다만, 현행 건축법의 재료 중심 제약(예 : 외벽 불연재료 의무)으로, 목재 외벽을 바로 적용하기는 어려우므로 성능시험을 거쳐 인증을 받는 방식의 예외적 허용 또는 기준 개정이 필요하다는 시사점을 얻었다.
 - 또한, 목재 외벽 간 접합부에 대한 표준 시험방법과 설계기준이 부재하여 관련 KS 규격 제정과 인증제도 수립이 시급함도 확인하였다.
- 둘째, 수입목재의 탄소저장 효과에 대한 제도개선의 필요성을 부각시켰다. 현재 수입 목제품을 활용해 탄소를 감축해도 국가 NDC 통계에 반영되지 않는 구조적 한계를 분석하였으며, 이를 개선하지 않을 경우 목조건축 활성화 정책의 실효성이 떨어진다는 점을 지적하였다.
- 이에 따라 단기적으로는 국내에서 기술 기반 탄소감축분을 인정하는 제도를 도입하거나 UN에 별도로 보고하여 간접적으로 평가받는 방안을 제시하였다. 장기적으로는 국제 협상 등을 통해 탄소회계 기준의 형평성 제고를 추진해야 함을 강조하였다.
 - 예를 들어, 파리협정의 국제 탄소거래 메커니즘을 활용해 목재 수출국과 감축 실적을

분담하는 상응조정 방안을 모색하거나, IPCC 지침의 개선에 한국이 주도적으로 참여하는 전략 등이 그것이다.

- 아울러 이런 정책을 뒷받침하려면 국내 목재 이용에 따른 탄소저감량을 모니터링하는 시스템(MRV) 구축이 필수적이다.
 - 본 연구는 관련 부처와 협업하여 목재 생산·유통·활용 전 주기에 걸친 데이터를 수집하고 투명하게 검증하는 체계를 마련할 것을 제언하였다.
 - 이는 기업 ESG 경영에도 수입목재 사용에 따른 Scope 3 배출량 관리에 긍정적 요소로 작용하여, 기업이 목조건축을 자발적으로 채택하도록 유도하는 효과도 기대된다.
- 셋째, 목조주택의 바닥충격음 문제 해결을 위한 현황과 사례를 검토하고 대책을 제시하였다. 검토 결과, 목조 바닥구조만으로는 현행 공동주택의 엄격한 중량충격음 기준을 만족하기 어려우나, 복합바닥구조 시스템을 적용하면 상당한 개선이 가능함을 확인하였다.
- 국내외 사례를 통해 CLT 바닥에 콘크리트 토퍼(topping), 방진재, 이중바닥 구조 등을 조합하여 RC 바닥에 준하는 차음 성능을 달성한 경우들이 보고되었다. 다만, 이러한 구조는 바닥 두께가 증가하고 공법이 복잡해지는 한계가 있어, 경제성 및 시공성 측면의 추가 연구가 필요한 것으로 나타났다.
- 궁극적으로 목조건축 활성화를 위해서는 바닥충격음 문제에 대한 기준 완화나 개선도 검토할 필요가 있다. 예컨대 생활 패턴 변화에 따른 실효성 있는 평가방법의 도입이나 목조건축에 적합한 완충재 개발 등이 요구된다.
- 넷째, 이상의 기술·정책적 연구를 바탕으로 LH 아파트 사업에 목조화를 적용하기 위한 로드맵을 도출하였다. 단기적으로 파일럿 프로젝트를 통하여 실증을 거치고 중기적으로는 제도 개선과 시장 기반을 조성하며, 장기적으로는 목조건축을 본격 확산시켜 2050 탄소중립 목표에 기여하는 전략적 이행경로를 마련하였다.
- 이를 통해 얻은 종합 시사점은 기술개발과 제도개선이 병행되어질 때 목조건축이 가지는 탄소저감 잠재력이 현실화될 수 있다는 것이다. 다시 말해 정책적 뒷받침 없이는 새로운 기술이나 공법이 현장에서 빛을 보기 어렵고, 반대로 기술적 준비 없이는 제도가 마련되어도 실효를 거두기 어렵다.
- 따라서 민·관 협력을 통해 기술과 정책을 정교하게 연계하는 통합적 접근이 중요하며, 그렇게 할 때 우리나라 건축산업에서 목질화·목조화 전환이 가능할 것이다.

이 같은 노력은 LH공사의 ESG 경영과 정부의 기후대응 및 탄소중립 정책의 목표 달성에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

2. 정책 및 기술로드맵 제안

1) 단기전략 (~5년 이내)

- 우선 시범사업 및 제도기반 마련에 주력한다. LH 차원에서 저층 또는 중층 목조 공동주택 시범사업을 추진해 목재 OSC 외벽 패널과 바닥 구조를 실제 적용·검증한다. 이를 통해 축적된 데이터를 바탕으로, 국토교통부 등 관계 부처와 협력하여 ‘성능기반 건축 승인제도(가칭)’를 도입한다.
 - 예를 들어, 목재 기반 복합패널에 대한 내화·구조성능 시험 기준을 제정하고 해당 성능을 입증하면 기존 불연재료 의무규정을 면제하는 인증 프로세스를 구축한다.
 - 아울러 목재 사용 건축물의 탄소저감 실적을 인센티브화하는 방안을 강구한다. 공공사업의 입찰이나 녹색건축 인증 과정에서 목재 활용에 따른 가점을 부여하고, 저탄소 소재의 사용을 확대하는 조달 가이드라인을 마련한다.
 - 환경부 및 산림청과 협조하여 목재 탄소저장량 산정 및 보고지침을 수립하고, 공식 NIR에 반영되지 않는 감축분에 대해서는 별도의 국가보고 체계(예 : BTR 부속서)를 통해 국제사회에 투명하게 공개하는 방안도 추진한다.
- 기술적 측면에서는 표준설계 및 시방서 개발이 단기과제로 중요하다. 목재 OSC 외벽 패널의 표준 단면 상세, 층간차음 성능을 높이기 위한 층상 구조 조합, 노출형 목구조의 내화 상세 등을 매뉴얼화하여 업계에 보급한다.
- 이와 함께, 전문인력 양성과 기술교육을 실시해 설계·시공자의 목조건축 역량을 강화하고 초기 적용상의 시행착오를 줄인다.

2) 중기전략 (5~10년)

- 본격적인 제도화와 시장 확산 단계로, 법·규정의 개정을 완료하고 민간시장에도 목조건축이 활발히 도입되도록 유도한다. 이를 위해 건축법 및 제 규정에서 목조 건축 관련 제약 조항을 정비하여, 일정 규모 이하의 중층 건축물에는 구조용 목재

사용을 허용하거나 요구성능 기준을 충족하는 경우, 목재를 건축자재로 제한 없이 사용할 수 있도록 한다.

- 예를 들어, 내화구조 인정 범위에 목재 복합구조를 포함시키고, 층간소음 기준도 구조 타입별 특성을 고려한 합리적 기준 개선을 추진한다.
- 중기에는 민간 부문의 투자 활성화를 위한 인센티브를 강화한다. 탄소세 또는 배출권 거래제와 연계하여 목재 사용으로 절감된 탄소량에 경제적 가치를 부여하고 친환경 목조주택에 대한 세제 혜택이나 용적률 인센티브를 제공한다.
- 기술적으로는 국산 목재의 활용 비중을 높이기 위한 노력을 병행한다. 국내 산림 자원의 활용도를 높이고 탄소저장 효과의 국내 환류율을 높이기 위해 국산 목재의 품질 향상과 표준규격화를 추진하고 지역별 생산·유통 거점을 육성한다.
- 아울러, 목재산업 선진국의 목조건축 등 신기술을 적극적으로 도입하여 생산성과 품질을 향상시키는 공정 혁신을 이루도록 지원한다. 이 시기에는 중층 이상 목조 하이브리드 구조(예 : 목재+철골, 목재+RC 혼합구조) 실증 프로젝트를 추진하여 기술적 한계를 보완하면서 건축 규모를 확대해 나간다.
- 국제적으로는 우리나라의 목재 탄소회계 개선 노력을 공식화하여, UNFCCC 등 협상 테이블에서 HWP 회계방법 개선안을 제안하거나 관련 논의에 주도적으로 참여한다.
- 또한 목재산업 선진국과 양자 협력으로 우리나라가 수입한 목재의 탄소저장량에 상응하는 감축분을 상호 조정 또는 공유하는 시범사업을 추진한다.

3) 장기전략 (10년 이상)

- 목조건축이 주류 건축 방식의 하나로 완전히 자리잡는 것을 목표로 한다. 2040년 정부부터는 LH를 비롯한 공공부문 신규 주택 사업에 목조 또는 하이브리드 구조의 채택 비율을 크게 높이고, 민간에서도 기술 및 원자재 수급이 안정화된 목조 건축 시장이 형성되도록 한다.
- 이 시기에는 우리나라 인허가 제도 또한 성능 중심으로 전환되어 재료에 상관없이 안전과 성능을 충족하면 구조시스템을 자유롭게 선택할 수 있는 환경이 구축될 것이다. 건축물의 탄소발자국 평가가 의무화되어 목재 사용이 자연스럽게 증가하며

2050년 탄소중립 시나리오에서 건물부문의 핵심 감축수단으로 목조건축이 공식 반영될 것이다.

- 국제적으로는 IPCC 가이드라인에 수입목재의 HWP 탄소저장량에 대한 개선이 이뤄져 목재 수입국도 탄소저장 기여를 인정받게 되고, 전 세계적으로 목재 활용 촉진에 강화된다는 전제 하에 우리나라도 적극 부응한다.
 - 장기적으로 현 2% 수준에 그치는 국내 목조 건축비율을 대폭 확대하여, 2050년에는 신축 건물의 30% 이상을 목재로 건설하는 것을 목표로 설정한다.
- 기술적으로는 고층목조 분야의 연구개발을 활발하게 추진하여 10층 이상 규모도 안전하게 구현할 수 있는 하이브리드 구조시스템을 확보한다.
- 또한 디지털 트윈 등 스마트 기술을 활용한 건축물의 관리로, 전 생애 주기에 걸쳐 탄소저감 효과를 극대화하고 성능을 모니터링하는 지능형 관리체제를 구현한다.
- 요약하면, 이 장기 로드맵의 핵심은 우리나라가 탄소중립 사회로 이행하는데 목조 건축사업이 핵심 인프라로서 역할하기 위한 제반 여건을 완전히 갖추는 것이다.

3. 후속 연구과제 및 최종 제언

1) 바닥충격음 차단구조 개발

- 우리나라에서 목조주택이 공동주택(30세대 이상) 사업영역에 진입하기 위해서는 현행 바닥충격음 제도를 충족하는 솔루션을 확보하는 것이 중요하다.
- 우리나라는 해외와 다르게 중량충격음 요구기준 충족이 의무화되어 있고, 이 또한 RC 슬래브 두께 210mm를 전제로 한 매우 엄격한 수준이기 때문이다.
- 주요 해외사례에 대한 상세 검토 결과, 국내 법제에서 요구하는 중량충격음 성능 확보가 여전히 목조건축이 공동주택에 진입하는데 가장 큰 기술적 장애요인임을 확인할 수 있었다.
- 따라서 목조 공동주택 보급과 활성화를 위해서는 우리나라의 제 여건에 부합하는 기술 확보와 표준모델 제시를 위한 연구가 필요하다.
 - 예를 들어, 메타물질 등을 활용한 진동 제어 바닥재, 구조적으로 소음을 격리하는 혁신

적인 공법 등에 관한 연구이다. 또한, 실제 거주환경에서의 음향성능 연구 수행을 통해 현행 법상 요구기준과 인간이 체감하는 만족도 사이의 관계를 규명할 필요도 있다.

2) 탄소회계 및 인증제도 연구

- 국제 탄소회계 규범 변화에 대응하여 국내 실정에 맞는 ‘탄소저장량 인증제도’를 마련하여야 한다.
 - 예를 들어 “목조건축 탄소저장 인증제도(가칭)” 도입으로 준공 시에 사용된 목재량과 탄소저장 효과를 공식적 인증서로 발급하고, 이를 기업의 ESG 공시 또는 탄소배출권 거래에 활용하는 방안을 연구할 수 있다.
- 또한 LCA 데이터베이스를 지속적으로 고도화하여, 국산 대비 수입 목재 사용에 따른 전과정 탄소배출 비교, 목제품 폐기 후 순환 이용에 따른 추가 감축효과까지 포괄하는 통합적인 평가체계를 마련해야 한다.

3) 사회적 인식제고 및 인력양성

- 기술제도가 마련되더라도 시장 수용성이 확보되어야 성공적으로 안착할 수 있다. 이에 국민을 대상으로 한 목조건축의 장점(친환경·쾌적성 등)에 대한 홍보와 인식 제고 활동이 중요하다.
- 앞으로, 실제 목조 공동주택에 거주 사례에 대한 만족도 조사나 소셜 캠페인 등을 통해 긍정적 이미지를 구축해야 한다. 또한 목재 OSC 기반 건축 전문인력 양성을 위한 교육 커리큘럼 개발, 관련 학계·업계의 협력 네트워크 구축도 제언한다.
 - 대학 및 연구기관에서는 AI, OSC 등을 접목한 목조건축 특화 연구를 지속하고, LH와 같은 공공기관은 이러한 연구성과가 실무에 적용될 수 있도록 테스트베드를 제공하며 산·학·연 협력을 강화해야 할 것이다.
- 마지막으로 이상의 제언을 통해 정책(Policy)·기술(Technology)·시장(Market)이 조화롭게 연계된 범정부 차원의 목조건축 활성화 로드맵이 구축되길 기대한다.
- 궁극적으로, 본 연구에서 제시한 방안들이 실행에 옮겨질 때 우리나라 공동주택 목조화가 탄소중립 사회로 이행을 앞당기는 한편, 건축산업의 혁신 성장에도 크게 기여할 것으로 전망된다.

참고문헌 Reference

- 2050 탄소중립 녹색성장위원회(2023), “탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획”
- 산림청(2024), 목재제품 탄소저장량 표시제도 안내. 목재정보서비스
- 산림청(2024), “[탄소발자국] 8개 목재제품 탄소발자국 전과정 DB 구축”, CCE Times
- 산림청(2025), “[산림청] AI 기술로 산림 탄소흡수량 예측 정밀도 높인다”. 2050 탄소중립녹색성장위원회
- 권순일 외(2024), “전과정평가(LCA)를 이용한 건축자재별 환경영향 비교분석 ; 건축용 목재 및 콘크리트 종류별 중심으로”, 대한환경공학회지, vol.46, no.10
- 김용구 외(2014), “국산 목제품 이용의 탄소저장 및 대체효과에 관한 연구”, 산림경제연구 22(1) : 93~115
- 한국경제(2023.7.4), “[기고] 국산 목재 활용으로 탄소중립 이끌자”
- Dzhurko, D., et al.(2024), “Future buildings as carbon sinks : Comparative analysis of timber-based building typologies regarding their carbon emissions and storage”, Frontiers in Built Environment, 10
- Ecotree(2024), “How much CO₂ does a tree absorb? Let’s get carbon curious!”
- ForesTrust(2024), “U.S. Endowment for Forestry & Communities, Inc.”
- GHG Protocol(2013), “Corporate Value Chain(Scope 3) Accounting and Reporting Standard”, World Resources Institute(WRI) and World Business Council for Sustainable Development(WBCSD)
- IPCC(2019), “2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Volume 4 : Agriculture, Forestry and Other Land Use

- Liu, R., Yao, L., Gong, Y., & Wang, Z.(2025), “Life Cycle Assessment with Carbon Footprint Analysis in Glulam Buildings,” A Review Buildings, 15(12), 2127
- Matsumoto, H., et al.(2019), “Assessing the contribution of harvested wood products under greenhouse gas estimation : accounting under the Paris Agreement and the potential for double-counting”, Carbon Balance and Management, 14(12)
- Stora Enso(2024), “Environmental Product Declaration : CLT by Stora Enso”
- Think Wood(2024), “Net Zero Buildings : Does Wood Store Carbon ?”
- UNFCCC(2024), “Biennial transparency reports(BTRs)”

부 록 Appendix

국외 목재외벽 적용사례별 세부내용

→ 총 36개 사례 : 북미와 유럽지역 각 18개 사례

(1) Vienna House

(2025년 준공) Kensington – Cedar Cottage, BC, 캐나다

용 도	공동주택 _ 임대 (Rental Apartment Community)	층 수 연 면 적	지상 7층 13,039 m ²
유닛구성	총 123 세대	단위유닛	면적범위 : 85 ~ 90 m ² (스튜디오 35m ² , 4룸 110m ²)
구조형식	Mass timber + Light Wood Frame (경량목구조) Hybrid - CLT Floor & Roof Panels - 경량목구조 외벽 및 내벽 - 하부 콘크리트 기초 (매스팀버 포디움 없음)		
참여업체	- 건축 : PUBLIC Architecture + Communication - 구조 : Wicke Herfst Maver Consulting Engineers - 외피설계 : Morrison Hershfield - 패시브하우스 컨설팅 : Steven Winter Associates / Introba - 시공 : Kindred Construction Ltd. - 패널제작 : TAG panles (총 1,638개 패널 공급)		
특이사항	- 캐나다 BC 주 정부 (British Columbia Housing Corporation)가 주도하고, 밴쿠버시 등이 협력하여 추진한 고성능 · 저탄소주택 실증사업 (Demonstration Project for Mass Timber and Passive House Housing)으로 공공자금으로 R&D · 실증 · 사회주택을 결합한 목재OSC 데모프로젝트 - 외벽패널은 외장 · 창호 · 기밀층까지 완성된 클로즈드 패널 (Closed Panel) 형태로 공장제작 • 기밀성능 확보를 위해 실내측 구조용 OSB 조인트에 테이핑 처리 • 통기형 레인스크린 시스템 (ventilated cavity 25~40mm) + 내후성 외장재 • 패널간 수직접합 : 목재 맞댐형 조인트 + 금속 브래킷 체결 (볼트, 스크류) • 패널간 수평접합 : Simpson strongtie LTP4 철물 사용 • 패널간 접합부의 방수성능 : RAIN Chamber Test (비산수시험)으로 사전 검증 • 층간 수평접합 (바닥-벽 연결) : CLT 슬래브 상부에 금속 커넥터 삽입, 나사형 앵커로 외벽패널 체결		
전 경			

자료 : BC housing

(2) 330 Goldstream Avenue

(2021년 준공) Colwood, BC, 캐나다

용도	공동주택_임대 (Affordable Rental Projects)	층수 연면적	지상 6층 6,121 m ²
유닛구성	총 102 세대 (스튜디오 50, 원룸 39, 2룸 1, 3룸 12 세대)	단위유닛	면적범위 : 약 60 m ² (3룸 기준)
구조형식	경량목구조 (Light Wood Frame)		
참여업체	- 건축 : Cascadia Architects - 구조 : RJC Engineers - 외피 / 기밀 / 에너지 컨설턴트 : RDH Building Science - 엔지니어링 (MEP) : Williams Engineering (전기 · 기계) - 일반시공 : Kinetic Construction - 패널제작 : ZyTech Building Systems - 패널설치 : Ron Anderson & Sons Ltd. - 외피시공 (레인스크린 / 마감) : Brytar Contracting		
특이사항	- 외벽패널은 경량골조 패널 형태로 공장제작 (prefabricated light wood-frame panels) - 외벽패널의 단면 (공식발표된 단면) : 약 300mm 두께 • 구조 프레임 내부에 batt insulation (약 89mm) 설치 • 구조 외면에는 12mm 판넬 (plywood sheathing) + sheathing membrane (air/vapor/moisture barrier) • 구조 외측에는 150mm 미네랄울 단열재를 별도 클립구조로 외부 부착 • 외장 마감은 레인스크린 클라딩 시스템 적용 • 기밀막 (air barrier membrane) 사전 적용 (pre-applied)		
전경			

자료 : Naturally

(3) The Heights

(2018년 준공) East Vancouver, BC, 캐나다

용도	공동주택_임대 (Residential + Retail)	층수 연면적	지상 6층 약 5,600 m ²
유닛구성	총 85 세대	단위유닛	면적범위 : 약 65.9 m ²
구조형식	경량목구조 + 콘크리트 포디움 하이브리드 - 5개 층 (주거용) : 경량목구조 (Light Wood Frame) - 1개 층 (상가용) : 콘크리트 포디움		
참여업체	- 건축 : Cornerstone Architecture - 구조 : Weiler Smith Bowers Consulting - CM : Peak Construction		
특이사항	- 캐나다 최대 규모의 패시브하우스 인증건물 중 하나 • 고도의 단열 및 기밀 설계로 난방에너지를 일반건물 대비 약 80 ~ 90% 절감하도록 설계 • 초고효율 3중창 및 24시간 공기순환 시스템 (HRV) 적용 - 외벽패널은 경량목구조 골조로만 구성된 오픈 패널 (Open panel) 구성 • 경량목구조 외벽패널 + 외단열 / 통기 레인스크린 시스템 조합		
전경			

자료 : Naturally

(4) Crest

(2021년 준공) North Vancouver, BC, 캐나다

용도	공동주택_임대·분양 (Condos, Residential)	층수 연면적	지상 6층 15,124 m ²
유닛구성	총 178 세대 (Condominium 160, Town house 18)	단위유닛	면적범위 : 약 52 ~ 120 m ²
구조형식	Mass timber + Light Wood Frame (경량목구조) Hybrid		
참여업체	- 건축 : Integra Architecture Inc. - 구조 : London Mah & Associates Limited - 개발자 / 소유자 : Adera - 일반 시공자 : Adera (Developer as GC) - 패널제작 / 공급 : Mercer Mass Timber LLC		
특이사항	- 외벽패널은 경량목구조 골조로만 구성된 오픈 패널 (Open panel) 구성 - CLT 벽체 어셈블리 (fire wall 역할 포함) 설계 - 패시브하우스 수준은 아니지만, BC 주의 에너지 스텝 코드 Step 3 기준 만족		
전경			

자료 : Naturally

(5) Remy Project

(2013년 준공) Cambie Rd., Richmond, BC, 캐나다

용 도	공동주택_임대	층 수 연 면 적	지상 6층 -
유닛구성	총 188 세대	단위유닛	-
구조형식	경량목구조 (Light Wood Frame) 및 공학목재 적용 → RC수준의 성능을 확보한 혁신적인 목구조 적용		
참여업체	이 프로젝트는 여러 정부기관과 비영리 단체의 협력으로 추진 - 캐나다정부 : 연방 경기부양 자금과 저렴한 주택투자(IAH) 이니셔티브를 통해 수백만 달러를 지원 - BC 주정부 : 매칭 펀드와 임시 건설자금을 제공 - 리치먼드시 : 부지를 제공하고 지열 시스템 구축을 위한 인프라 지원 - 사업시행사 : Oris Consulting		
특이사항	- BC Building Code 개정 (4층 → 6층) 이후 최초로 허가받은 중층(6층) 경량목구조 건축의 대표사례 • 벽체패널은 공장기반의 경량목구조 오픈 패널 (Open panel) 적용 - 3개 동, 총 188세대로 구성된 복합 주거단지 • 시니어 임대주택 : 저소득층 노인 및 장애인을 위한 33세대 (SRH) • 정부보조 아파트 : 저소득층 및 중산층 가정을 위한 48세대 • 일반분양 : 일반 시장가격 주택 및 저렴한 (affordable) 자가주택 공급 • 편의시설 : 리치먼드시가 운영하는 지열 냉난방 시스템, 옥상정원 및 어린이집 (60석 규모)		
전 경	 자료 : Canada Wood Council		

(6) Hälsa

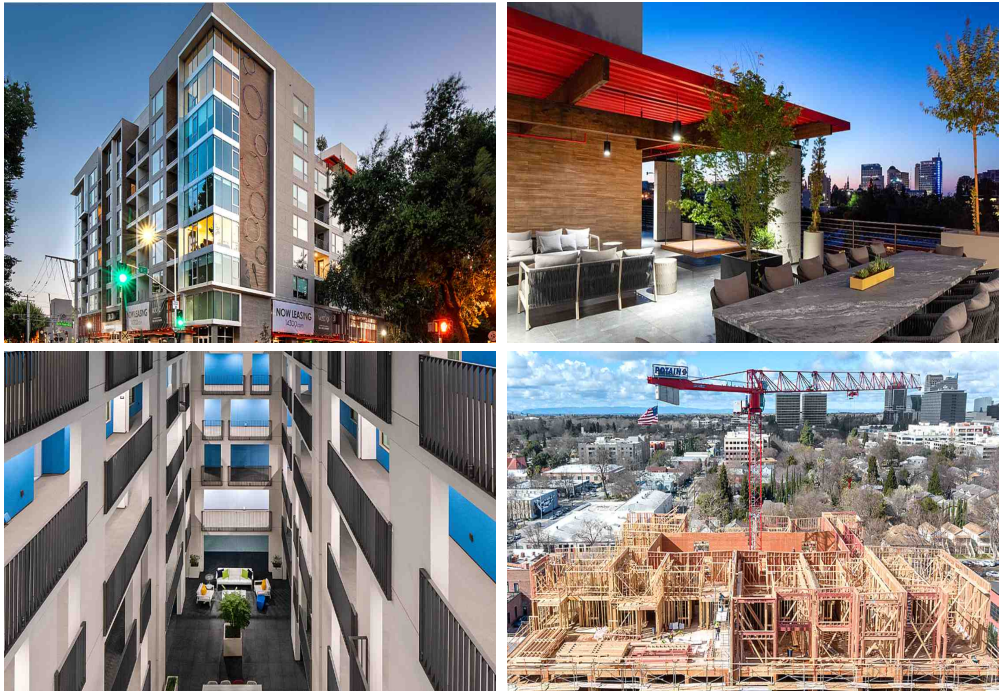
(2026년 준공예정) 230 Royal York, Toronto, Ontario, 캐나다

용 도	공동주택_임대·분양 (Rental Multi-Family Housing)	층 수 연 면 적	지상 9층 약 5,500 m ²
유닛구성	총 65 세대 (60 Rental Homes)	단위유닛	면적범위 : 약 92 m ²
구조형식	Mass Timber + RC Hybrid - RC코어 + 중목구조 + 외벽 CLT 패널		
참여업체	- 건축 : LWPAC Architects (Lang Wilson Practice in Architecture Culture) - 구조 : Moses Structural Engineers - 외피 : RDH Building Science - 개발·시행 : Windmill Developments + Leader Lane Developments - 시공·건축자재 : Intelligent City (구조 및 외피시스템 공급/설치)		
특이사항	- Ontario 주에서 가장 높은 프리패프 목조 주거단지 중 하나 • “One Planet Living” 가이드 라인을 따르며 LEED Platinum 인증과 패시브 하우스 (passive house) 수준의 에너지효율 확보가 목표 • 지열에너지 시스템 도입으로 탄소배출 제로 (Zero Emissions) 운영을 지향 • 로봇 및 AI 기술을 활용한 공장제작 방식을 통해 건설기간을 3~4개월 단축 - 패널화된 CLT 외벽시스템 적용 → 외장·단열·기밀층 일체형으로, 현장 비계없이 조립 가능 • 패널간 수직접합 : 패널간 실리콘 개스킷 + 멤브레인 겹침 + Z-바 및 스크류 체결로 기밀성능 확보 • 패널간 수평접합 : 상·하부 슬래브 또는 플로어 카세트와 강철 앵커 (anchor details)로 체결, 설치 전 슬래브 엣지에 가스켓·커브 (Curb) 준비 → 패널하부 고정 후 볼트 체결 • 모서리·코너접합 : L-shape Envelope Panel 제작으로 내·외부 코너 일체화 (현장절단 불필요) • 기밀·방수처리 : 공장시공된 멤브레인 + 현장 테이핑·실란트 보강. 조인트는 수직·수평 모두 겹침시공		
전 경	  		

자료 : Intelligent City

(7) 1430 Q Apartments

(2020년 준공) Q Street, Downtown Sacramento, California, 미국

용 도	공동주택_임대	층 수 연 면 적	지상 8층 15,116㎡
유닛구성	총 73 세대	단위유닛	면적범위 : 약 48 ~ 206㎡
구조형식	- 6개 층 : 경량목구조 (Light Wood Frame) - 2개 층 : 콘크리트 포디엄		
참여업체	- 설계 : HRGA (HR Group Architects) - 구조 : Buehler Structural Engineer - 시공 : Tricorp Hearn Construction		
특이사항	- 미국 최초의 6 over 2 구조 목조건물 : 2층 높이의 콘크리트 포디엄 위에 6층의 목조 프레임을 올린 형태로, 준공 당시 미국에서 가장 높은 경량목구조 건축물로 기록 • 경량목구조 벽체패널은 공장기반의 오픈 패널 (Open panel) 적용 - 건축공법 혁신 : 당시 캘리포니아 건축법상 목조주택의 높이제한을 넘어서기 위하여 혁신적인 설계와 대체자재 승인 과정 (AMMR ; Alternate Materials, Methods Requests)을 거쳐 준공 • Innovative light frame 목조 시스템 적용으로 콘크리트 기단과 결합하여 도심 중층 목조건축 구현 • 목구조 적용을 통해 도심 소규모 부지에서 최대 용적 확보 및 경량목구조의 비용·시공 효율성 달성 - 단지내 시설구성 • 주거유닛 : 73 ~ 75세대의 럭셔리 아파트로 구성 (스튜디오부터 펜트하우스까지 다양한 평면을 제공) • 상업시설 : 지상 1층에는 약 9,000평방피트(약 250평) 규모의 소매상점이 입점 • 주차편의시설 : 지하 및 지상 2층에 총 97대의 주차공간이 있고, 옥상테라스, 피트니스 센터, 반려동물 세척시설 등을 갖추고 있음		
전 경	 자료 : Woodworks Innovation Network		

(8) Bell Terminus Apartments (과거명칭 : Crescent Terminus)

(2014년 준공) Atlanta, Georgia, 미국

용 도	공동주택_임대·분양	층 수 연 면 적	지상 8층 25,550 m ²
유닛구성	총 355 세대	단위유닛	면적범위 : 약 60 ~ 90 m ²
구조형식	- 5개 층 : 경량목구조 (Light Wood Frame) → Type III - A wood frame - 3개 층 : 콘크리트 포디엄		
참여업체	- 설계 : Lord Aeck Sargent - 구조 : SCA Consulting Engineers - 시공 : DPR Hardin Construction Company LLC - 시행 : Crescent Communities - 패널제작 : Great American Framing Co.		
특이사항	- RC 포디엄 + 경량목구조 하이브리드 비용효율적인 고밀도 주거개발의 성공사례로 평가 • 경량목구조 벽체패널은 공장기반의 오픈 패널 (Open panel) 적용 - 단지내시설 : 3개의 개별 건물로 구성, 355 세대의 럭셔리 아파트 및 다양한 편의시설 • 주거공간 : 스튜디오, 1~2 베드룸 아파트로 구성 (디자이너 마감재, 화강암 조리대, 최첨단 가전제품 등) • 편의시설 : 주민들은 리조트 스타일의 시설을 이용할 수 있습니다. • 야외시설 : 옥상테라스 (벽난로, TV 포함), 제로엣지 해수 수영장, 야외 주방, 반려동물 공원 등 • 실내시설 : 2층 규모의 클럽 스타일 체육관, 요가룸, 커피 바, 비즈니스 라운지 등 - 지속가능성 : NGBS (National Green Building Standard) 인증 (Bronze Level) 및 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) 프로젝트로 등록		
전 경			

자료 : Woodworks

(9) Marselle

(2009년 준공) South Lake Union, Seattle, Washington, 미국

용도	공동주택_분양 (Condominiums)	층수 연면적	지상 8층 14,864 m ²
유닛구성	총 132 세대	단위유닛	면적범위 : 약 32 ~ 162 m ²
구조형식	- 5 ½개 층 : 경량목구조 (Light Wood Frame) - 2개 층 : 콘크리트 포디엄		
참여업체	- 설계 : PB Architects - 구조 : Yu & Trochalakis PLLC - 시공 : Norcon, NW, Inc.		
특이사항	- 경량목구조 벽체패널은 공장기반의 오픈 패널 (Open panel) 적용 - 목조 + RC 복합구조 적용 : RC 포디엄 위에 Type III - A 경량목구조 (5 ½ 개층) 설계를 통해 최대 높이와 용적률을 확보 - Code-Driven OSC 활용 : Seattle Building Code를 활용하여 목조프레임 상부를 최대 허용범위까지 설계 (콘크리트 2개 층 + 목조 5½개 층) - 비용 및 시공 효율성 : 만약 전부 콘크리트나 전부 강구조였다면, 비용이나 공사기간이 훨씬 증가했을 것으로 평가 (목재 채택은 비용절감 / 공기단축 효과) - 환경성 인증 및 Green Rating : Built Smart / Green 프로그램 요구 기준을 만족하여 목재의 환경적 장점도 부각		
전경			

자료 : Woodworks

(10) The Postmark Apartments

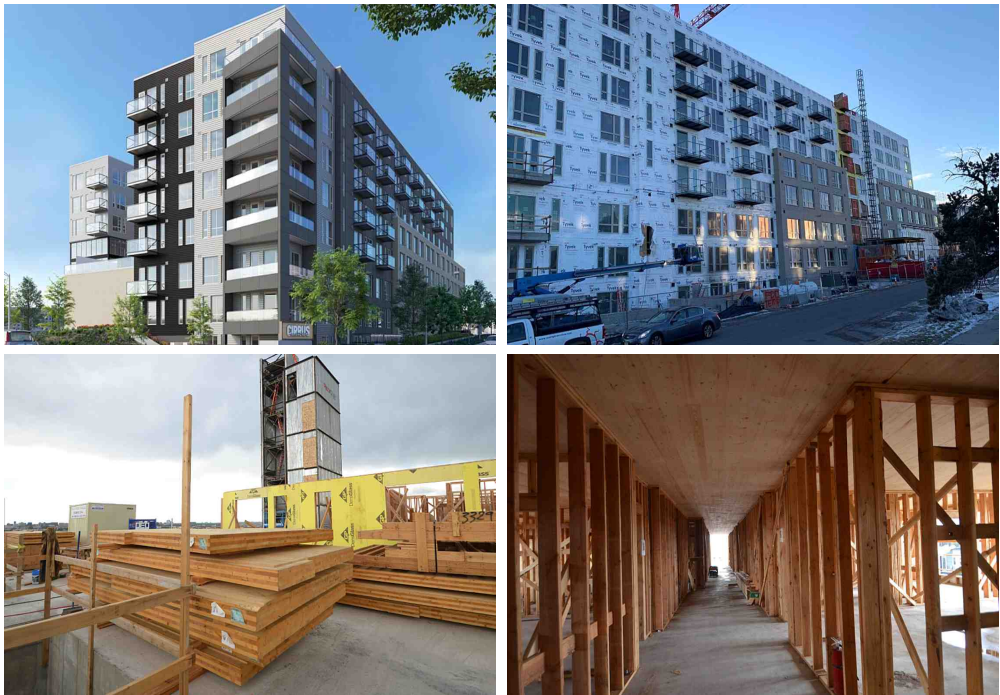
(2020년 준공) Shoreline, Washington, 미국

용 도	공동주택_임대	층 수 연 면 적	지상 5층 18,580 m ²
유닛구성	총 243 세대	단위유닛	면적범위 : 약 37 ~ 102 m ²
구조형식	5층 목조건물 2개 동이 2층 규모의 지하주차장 위에 올라간 Wood-over-Concrete Podium 구조 - 상부 : Type III - A 경량목구조 (Light Wood Frame) + CLT 바닥구조 - 하부 : 콘크리트 포디엄 (주차·공용부)		
참여업체	- 설계 : Alan Hart, VIA - A Perkins Eastman Studio - 구조 : DCI Engineers - 개발 : Kattera		
특이사항	- 원 개발사인 Kattera가 CLT 공법을 바닥과 천장 구조물에 사용한 미국 최초의 프로젝트 중 하나 • 경량목구조 기반 OSC (Hybrid Off-Site) 전략을 적용하여, 벽체·바닥·지붕을 패널단위로 공장제작 후 현장조립하는 방식을 채택 • 상부 주거층은 반복평면 설계로, 스테드 벽체, 바닥 트러스/조이스트 및 지붕 프레임의 규격화가 가능해져 OSC 적용에 유리한 구조체계 형성 - Seattle - Shoreline 지역의 건축코드를 활용하여 Type III - A 목구조의 최대 허용높이 (5~6층)를 적극 활용한 사례로서, 중층 목재OSC의 경제성 구간을 명확히 보여줌		
전 경	 		

자료 : Woodworks Innovation Network

(11) Cirrus

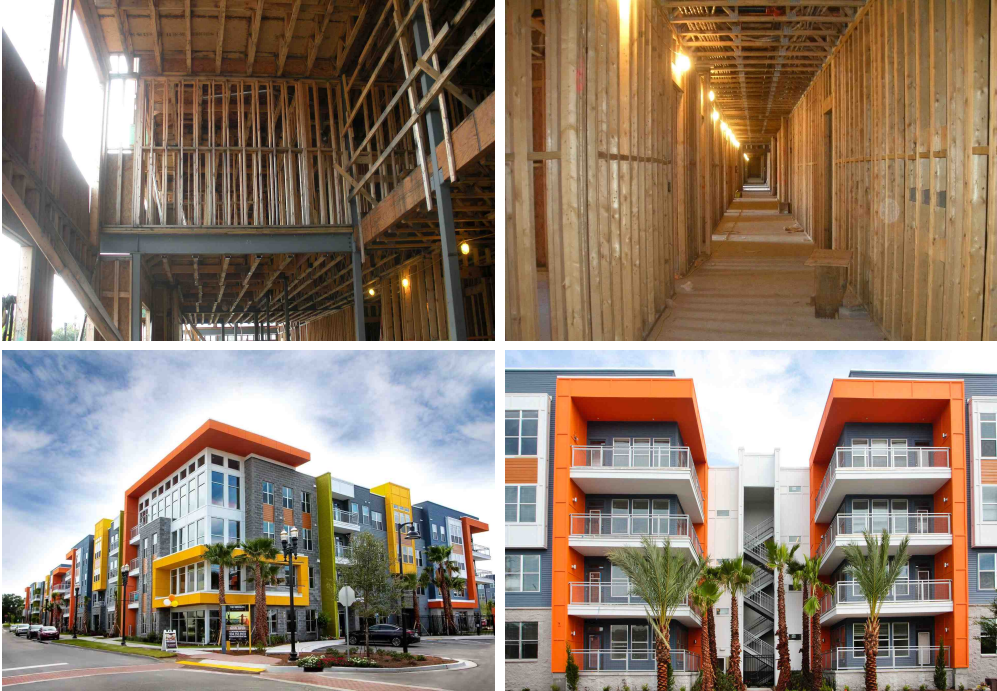
(2022년 준공) Denver, Colorado, 미국

용도	공동주택_임대	층수 연면적	지상 7층 26,640 m ²
유닛구성	총 292 세대	단위유닛	면적범위 : 약 46 ~ 111 m ²
구조형식	Wood-over-Concrete Podium 구조 - 상부 : Type III - A 경량목구조 (Light Wood Frame) + CLT 바닥구조 - 하부 : 콘크리트 포디엄 (주차·공용부)		
참여업체	- 설계 : Craig Curtis - 구조 : KL&A Engineers and builders - 시공 : Hensel Phelps		
특이사항	- 경량목구조 기반의 OSC (Hybrid Off-Site) 전략을 적용하여, 벽체·바닥·지붕을 패널단위로 공장제작 후 현장조립하는 방식을 채택 • 특히 노출된 CLT 천장을 사용한 친환경 건축사례로 주목 - Denver 지역의 건축코드를 기반으로, Type III - A 경량목구조의 최대 허용높이를 적극 활용한 사례로 중층 임대주택에서 목재OSC의 경제성이 극대화되는 구간을 보여줌 - 대규모 임대주택의 특성상 반복되는 평면유닛을 적용해 스테드 벽체, 바닥 조이스트, 개구부 디테일의 표준화가 가능하였으며, 이는 OSC 적용에 유리하게 작용 - Central Park (구 Stapleton) 재개발 지역의 대단지 임대주택에 적용되어 대규모·고밀도 주거개발에서도 목재OSC 시스템이 안정적으로 적용가능함을 실증		
전경			

자료 : Woodworks Innovation Network

(12) Brooklyn Riverside Apartments

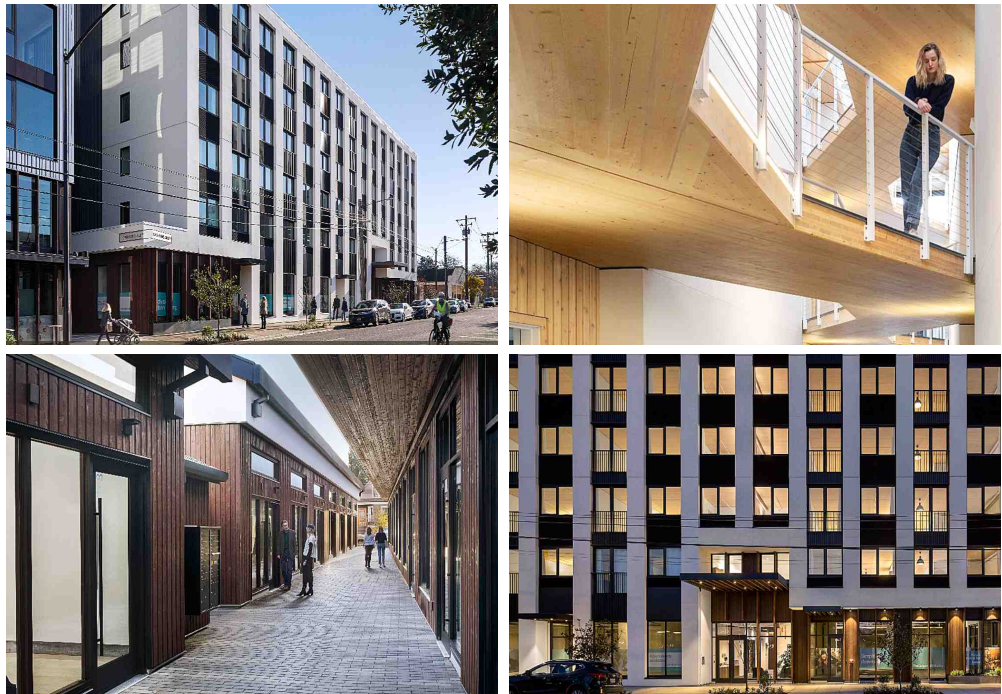
(2015년 준공) Jacksonville, Florida, 미국

용 도	공동주택_임대·분양 (Luxury Apartments)	층 수 연 면 적	지상 4층 24,140 m ²
유닛구성	총 310 세대	단위유닛	면적범위 : 약 62 ~ 120 m ²
구조형식	- 경량목구조 (Light Wood Frame) 플랫폼 프레임 - 공장제작 바닥·지붕 트러스 (Prefabricated Floor & Roof Trusses) - 하부기초 : 현장타설 콘크리트 기초		
참여업체	- 설계 : Dwell Design Studio - 구조 : M2 Structural Engineering - 시공 : Cambridge Swinerton Builders Inc.		
특이사항	- 전면 모듈러가 아닌 “패널·트러스 중심의 하이브리드 OSC” 적용사례 - 경량목구조 벽체패널은 공장기반의 오픈 패널 (Open panel) 적용 - 바닥·지붕 구조는 공장제작 트러스로 표준화하여 현장조립 위주의 공정 구성 - 반복평면 기반으로 외벽패널, 개구부, 구조 디테일의 규격화가 용이한 시스템 형성 - NFPA 13R 스프링클러 및 Type V-A 코드 적용으로 목재OSC 적용이 가능한 최대규모 (4층) 실현		
전 경			

자료 : Woodworks

(13) The Canyons Apartments

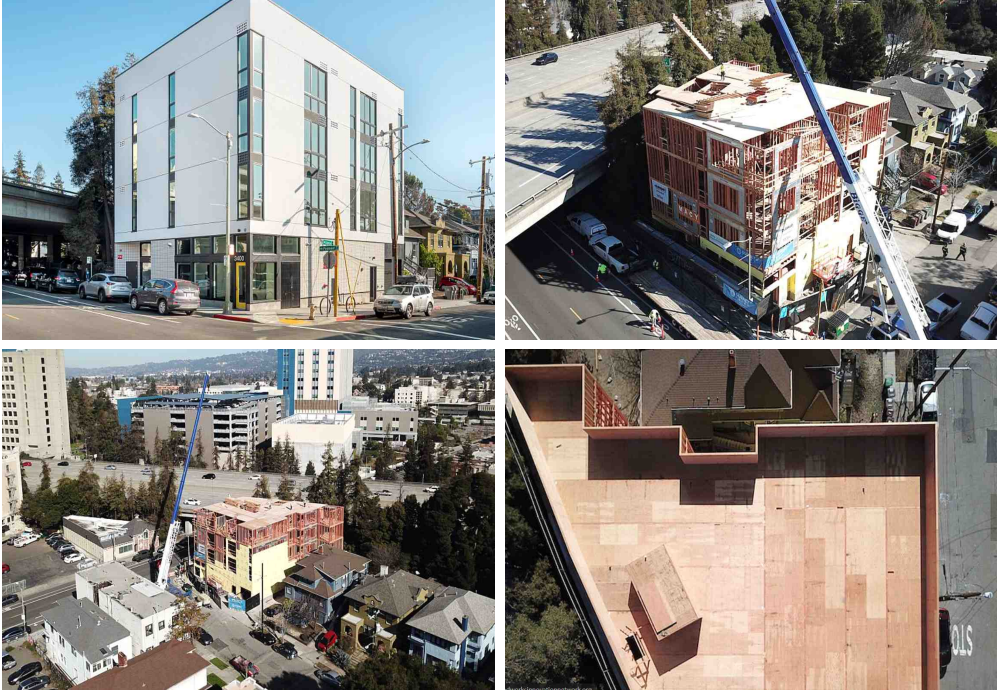
(2020년 준공) Williams Ave, Portland, Oregon, 미국

용도	공동주택_임대	층수 연면적	지상 6층 10,219㎡
유닛구성	총 70 세대	단위유닛	면적범위 : 약 59 ~ 101 ㎡
구조형식	- CLT 바닥 및 지붕패널 + 목구조 벽체 - 상부 주거층 : 경량목구조 (Light Wood Frame) + CLT 조합 - 하부 구조 (지하/기초) : 포스트텐션 콘크리트 포디엄		
참여업체	- 설계 : PATH Architecture - 구조 : Catena Consulting Engineers - 시공 : R&H Construction		
특이사항	- 도시형 다세대주택의 CLT구조 적용사례로 주목 - 경량목구조 벽체패널은 공장기반의 오픈 패널 (Open panel) 적용 - 콘크리트 포디엄 + 목구조 조합으로 구조성능과 시공효율을 동시에 달성 - CLT패널을 바닥·지붕 시스템과 외부 개방통로 (아트리움)의 구조요소로 적극 활용 - 외부 연결통로 (Undulating outdoor corridor) 등에 비정형 CLT 패널 적용을 위하여, FEM 해석과 실물 시험 수행		
전경			

자료 : Woodworks Innovation Network

(14) Project One

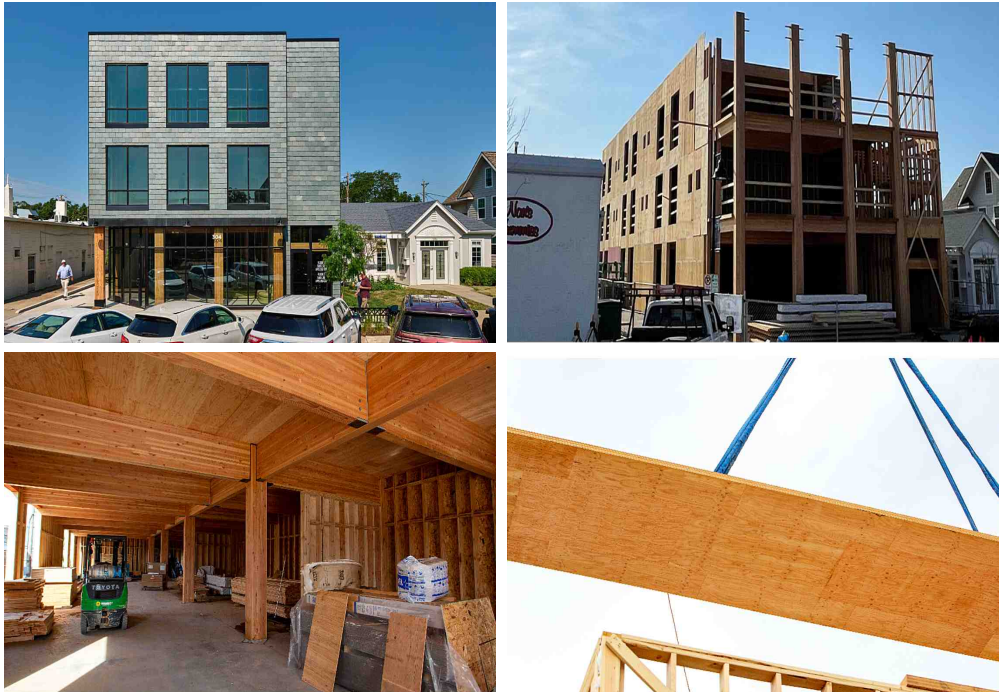
(2021년 준공) Glen Echo, Oakland, California, 미국

용 도	공동주택_임대 (Mixed-use, Multi-family)	층 수 연 면 적	지상 4층 1,579 m ²
유닛구성	총 9 세대	단위유닛	-
구조형식	- Mass Timber : GLT 기둥 · 보 + Mass Plywood Panels (MPP) 데크 (지붕 / 바닥) - 경량목구조 (Light Wood Frame) 벽체		
참여업체	- 설계 : Macy Architecture - 구조 : DCI Engineers - 시공 : Gurnet Point - 자재 : Freres Engineered Wood (MPP)		
특이사항	- “3 bedrooms + 3 욕실” 구조의 총 9 세대 임대아파트로서 룸메이트 공유형으로 설계되어 침실당 임대료를 절감하도록 고안 - Off-Site 제작 (패널화 · 프리컷 · 프리패브)을 최대화하기 위한 Proof - of - Concept Pilot - 프리패브 벽체패널 (prefabricated wall panel) 적용과 3D Building Model 활용으로, MEP 홀 · 관통부를 사전조율하여 현장작업 최소화 - 각 층 바닥의 MPP는 19개 매스팀버 패널로 구성 - 골조공사 약 3 ~ 4주내 완료		
전 경			

자료 : Woodworks Innovation Network

(15) Junction Lofts

(2023년 준공) West Des Moines, Iowa, 미국

용도	주상복합 _ 임대 (Mixed-use, 주상복합 아파트)	층수 연면적	지상 3층 1,486 m ²
유닛구성	총 11 세대 (아파트) + 소매상점 (4개)	단위유닛	면적범위 : 약 53 m ²
구조형식	- Mass Timber : GLT 기둥 · 보 + MPP (Mass Plywood Panels) 바닥 · 지붕 - 경량목구조 (Light Wood Frame) 벽체		
참여업체	- 설계 : Pelds Design Services - 구조 : Tometich Engineering Inc. - 시공 : Cutler Construction - 자재 : Freres Engineered Wood (MPP), RedBuilt (GLT)		
특이사항	- 아이오와 (Iowa) 최초의 Mass Timber 건축물로, US Forest Service Wood Innovation Grant 수상 • 노출된 GLT 기둥 · 보, MPP (Mass Plywood Panel) 바닥판이 특징 - 구조부재 (GLT · MPP deck) 노출을 적극 활용 : 1층은 유리 쇼윈도로 내부 목구조가 외부에 드러나도록 계획하고 상부 주거 · 오피스에도 노출 보와 데크를 적용 - MPP를 계단의 디딤판 및 참에도 적용하는 등 부재와 내장재까지 목재패널을 확장 적용 - 저소득층 주민을 위한 임대 제한 (income restricted) 유닛도 일부 제공		
전경	 자료 : Woodworks Innovation Network		

(16) The Duke

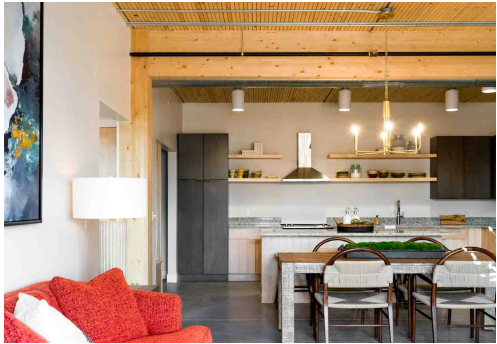
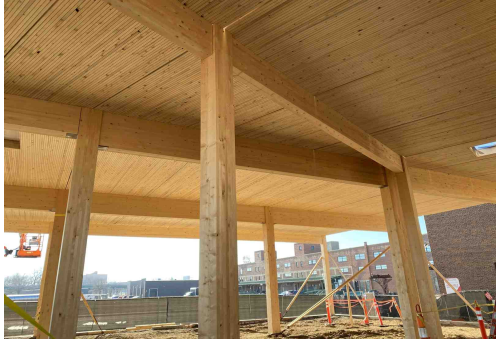
(2021년 준공) Austin, Texas, 미국

용 도	주상복합 _ 임대 (Mixed-use, 주상복합 아파트)	층 수 연 면 적	지상 4층 4,167 m ²
유닛구성	총 34 세대 (아파트) + 소매상점 (1층, 약 10,000 평방피트)	단위유닛	면적범위 : 약 120 m ²
구조형식	노출된 중목구조 (heavy timber, GLT) + CLT 구조 시스템을 전체 건물에 적용 - 내 · 외벽 : 경량목구조 (Light Wood Frame) - 보 · 기둥 : GLT - 바닥 · 코어부 : CLT		
참여업체	- 설계 : DesignTrait - 개발 / 엔지니어링 : WGI - 시공 : Dunaway Commercial Construction		
특이사항	- 소규모 공동주택에 경량목구조 기반의 OSC를 적용한 사례로서, 외벽 · 내력벽 · 바닥 등 프레임িং를 패널 단위로 계획하여 공장제작 친화설계 수행 - 건축 · 구조 통합설계 수행으로 구조모듈 · 평면계획의 정합성을 확보하고 외벽패널 · 개구부 · 층간 디테일의 표준화를 용이하게 함 - Texas 주 최초로 CLT를 중력하중 및 횡력저항 시스템에 모두 적용한 건축물 • 1시간 내화성능을 갖춘 CLT 바닥 (하부천장 노출형) • 2층에 7-ply CLT 전달바닥 (Transfer Floor) 적용		
전 경	   		

자료 : WGI

(17) Railyard Flats

(2021년 준공) Sioux Falls, South Dakota, 미국

용도	주상복합 _ 임대 (Mixed-use, 주상복합 아파트)	층수 연면적	지상 4층 5,760 m ²
유닛구성	총 41 세대 (아파트) + 오피스 + 소매상점	단위유닛	면적범위 : 약 50 ~ 90 m ² (스튜디오, 1베드룸, 2베드룸)
구조형식	Mass Timber (CLT & DLT) + 경량목구조 (Light Wood Frame) Hybrid		
참여업체	- 설계 : Co-op Architecture - 구조 : Structure Craft - 시공 : Journey Construction - 개발 / 운영 : Pendar Properties		
특이사항	- 사우스다코타 최초의 현대식 Mass Timber 건물 • 오스트리아산 GLT 기둥과 보, 캐나다산 CLT & DLT Floor 패널 혼용 - 경량목구조 패널기반의 OSC를 적용하여 외벽 · 내력벽을 패널단위로 계획하고, 현장에서는 조립 중심의 건식시공 방식을 적용 - 중소도시 주거 프로젝트에서 가장 보편적이고 규제 리스크가 낮은 4개 층 Type V-A 목구조를 적용한 사례로서 목재OSC의 표준모델에 해당		
전경	   		

자료 : Structure Craft

(18) Hotel Magdalena

(2021년 준공) Music Ln, Austin, Texas, 미국

용 도	호 텔 (Boutique Hotel)	층 수 연 면 적	지상 4층 4,336 m ²
유닛구성	총 89 개 (객실 및 스위트룸)	단위유닛	면적범위 : 약 28 ~ 46 m ²
구조형식	- Mass Timber 구조 (GLT 보 · 기둥 + CLT 바닥 · 벽체) - 일부 기초 및 코어부는 콘크리트		
참여업체	- 설계 : Lake - 운영 : Austin's acclaimed Bunkhouse group		
특이사항	- 북미 최초의 Mass Timber 호텔로, GLT 보·기둥과 CLT 패널로 시공 • CLT 바닥 및 벽체 패널과 GLT 보 · 기둥을 적용한 패널형 OSC 사례로, 주요 구조부재를 공장제작 후 현장조립하는 방식으로 시공 • 실내에서 CLT 패널과 GLT 구조체를 노출마감하여 별도의 천장 · 마감공정 최소화 - 반복되는 호텔 객실 프로그램을 기반으로 CLT 패널의 규격화와 개구부 · 설비홀 등의 사전 CNC 가공이 가능했으며, 이는 OSC의 효율성을 극대화		
전 경	 자료 : Structure craft		

(19) Stadthaus

(2009년 준공) Murray Grove, Hackney, London, 영국

용 도	공동주택_임대	층 수 연 면 적	지상 9층 (29m) 2,890 m ²
유닛구성	총 29 세대 (1룸, 2룸, 3룸, 4룸)	단위유닛	-
구조형식	- 전체 목구조 (CLT 패널 공법) • 1층 및 기초부는 RC구조 • 2층 이상부터 벽체, 바닥 슬래브, 계단 및 엘리베이터 코어까지 전체가 목재로 시공 - 외벽은 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : Waugh Thistleton Architects - 구조 : Techniker - 시공 : Telford Homes - 자재 : KLH UK		
특이사항	- 외벽, 바닥 슬래브 및 코어까지 CLT 패널로 조립되었으며, CLT 패널의 창·문 개구부와 관통부는 제작 단계에서 가공 완료 • 외벽은 128mm CLT에 100mm 외단열을 적용하여 열관류율 $U = 0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ 달성 - 시공속도 : 현장에서 사전제작된 패널을 사용하여, 작업자 4명이 단 27일 만에 8개 층의 목조 구조를 조립 (전체 준공까지 49주가 소요되어 일반적인 RC 건물보다 약 5개월 단축) - 친환경성 : 총 186톤의 탄소를 저장하고 있으며, RC구조 대비 124톤의 탄소배출을 절감		
전 경			

자료 : NHBC

(20) Siili Apartment Building

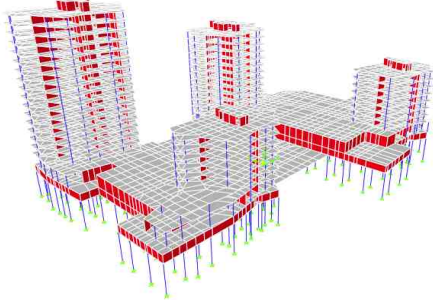
(2014년 준공) Siili tn 3, Karlova, Tartu, 에스토니아

용 도	공동주택_임대 (Residential)	층 수 연 면 적	지상 6층 2,500 ~ 3,000 m ² (자료에 따라 상이)
유닛구성	총 60 세대 (스튜디오 유닛 + 1 베드룸 + 2 베드룸)	단위유닛	면적범위 : 약 16 ~ 77 m ² (스튜디오 : 16 ~ 35 m ² / 1 베드룸 : 33 ~ 45 m ² / 2 베드룸 : 74 ~ 77 m ²)
구조형식	- 기둥 및 바닥 슬래브는 RC조 - 외벽은 공장에서 마감재까지 제작하는 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산)		
참여업체	- 외벽패널 제작 : Welement		
특이사항	- 외벽은 경량목구조에 기반한 파사드 시스템 (Prefabricated Timber-frame Façade System)으로 구성하고 실내외 마감재까지 공장제작 • 현장에서는 외벽의 전면 교체를 위한 조립 및 설치작업만 진행 (비내력 파사드 시스템) • 패널접합은 RC 슬래브에 메탈 앵커 및 브래킷으로 패널 고정		
전 경			

자료 : Welement, ibpluss

(21) Lervig Brygge

(2019년 준공) Stavanger, Lervig Brygge, 노르웨이

용도	공동주택_임대·분양 (Exclusive Apartments)	층수 연면적	지상 8층, 13층, 18층 19,000 ~ 21,000 m ²
유닛구성	총 200 세대	단위유닛	면적범위 : 50 ~ 57 m ² (1베드룸 기준) 이외에도 다양한 대형평수(Plus-apartments)도 포함
구조형식	- 기둥 및 바닥 슬래브는 RC구조 (In-situ concrete) • 내부공간의 유연성을 위해 기둥이 없는 무량판 구조 (Bubble ceilings) 채택 - 외벽은 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : Lund Hagem Arkitekter + Atelier Oslo - 구조 : Bollinger + Grohmann - 시공 : AF Gruppen - 외벽패널 제작 : Timbeco		
특이사항	- 초고층 규모 (최대 18층) RC 골조에 경량목구조 프리패브 외벽요소를 대량 적용 • 경량목구조 프리패브 외벽요소에 총 8,600m² 물량 투입 - RC 골조와 외벽요소의 연결부를 설계·최적화하여, 투습방수 (weather proof) + 에너지효율 + 내화기준을 동시에 만족시키는 것이 핵심 목표 • 기밀도 측정 결과 : 0.41 ACH50 (8층 건물)		
전경	    자료 : Timbeco, Bollinger+Grohmann		

(22) The Bodø 360 Building

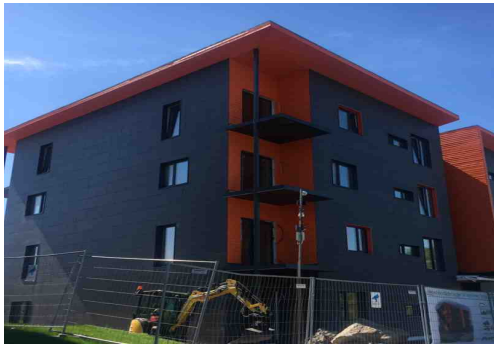
(2019년 준공) Bodø, Dronningens gate, 노르웨이

용도	공동주택_임대 (Residential)	층수 연면적	지상 14층 약 15,000 m ²
유닛구성	총 58 세대	단위유닛	면적범위 : 약 46 ~ 162 m ²
구조형식	- 기둥 및 바닥 슬래브는 RC조 - 외벽은 공장에서 마감재까지 제작하는 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : Norconsult - 시공 : Skanska Norge AS - 외벽패널 : Timbeco (design · manufacture · install)		
특이사항	- 외벽은 경량목구조에 기반한 파사드 시스템 (Prefabricated Timber-frame Façade System)으로 구성하고 실내외 마감재까지 공장제작 - 현장에서는 외벽의 전면 교체를 위한 조립 및 설치작업만 진행 (비내력 파사드 시스템) - 패널접합은 RC 슬래브에 메탈 앵커 및 브라킷으로 패널 고정 - Timbeco가 Prefabricated openings (개구부)를 공장제작하고 Façade cladding (외장마감)은 현장 설치 • 핵심 레이어 (구조 연결 · 단열 등을 포함한 외벽요소)는 공장제작, 외장마감은 현장공정으로 분리 • 목재OSC 외벽의 총 면적은 6,100 m²이고, 현장에서의 조립기간 12주 소요		
전경			

자료 : Timbeco, Byggeindustrien

(23) Knivsta Apartment Building (프로젝트명 : Eda Knivsta)

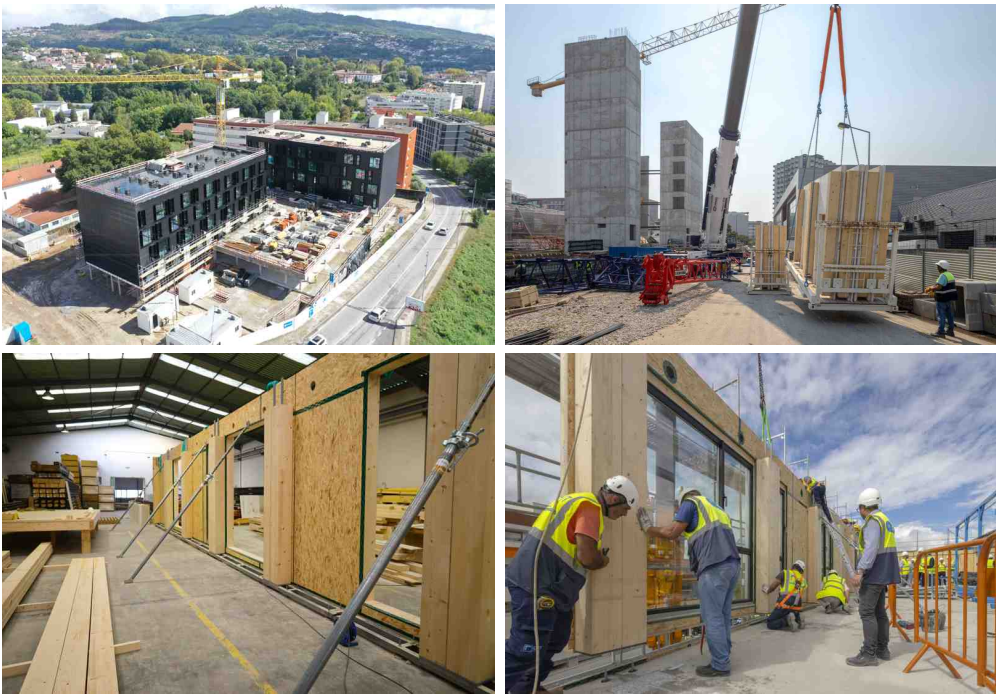
(2021년 준공) Knivsta, Uppsala County, 스웨덴

용 도	공동주택 _ 임대 (Affordable Housing)	층 수 연 면 적	지상 3 ~ 5층 5,350 m ²
유닛구성	총 124 세대	단위유닛	-
구조형식	- 기둥 및 바닥 슬래브는 RC조 - 외벽은 공장에서 마감재까지 제작하는 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산)		
참여업체	- 건축설계 : Andreas Martin-Löf Arkitekter & Barnard Arkitektur - 시공 및 모듈 생산 : Junior Living - 외벽패널 제작 : Welement		
특이사항	- 외벽은 경량목구조에 기반한 파사드 시스템 (Prefabricated Timber-frame Façade System)으로 구성하고 실내외 마감재까지 공장제작하여 현장에서는 조립만 진행 • 패널접합은 PC 슬래브에 메탈 앵커 및 브래킷으로 패널 고정 - 스웨덴 청년층의 저렴한 주택수요를 충족시키기 위해 설계된 혁신적인 프리패브 (Prefab) 모듈형 아파트 주거 단지 • 총 4개의 건물이 단지 중앙의 전용 녹색 중정을 둘러싸고 있는 하나의 '도시블록' 형성		
전 경			

자료 : Welement

(24) The First

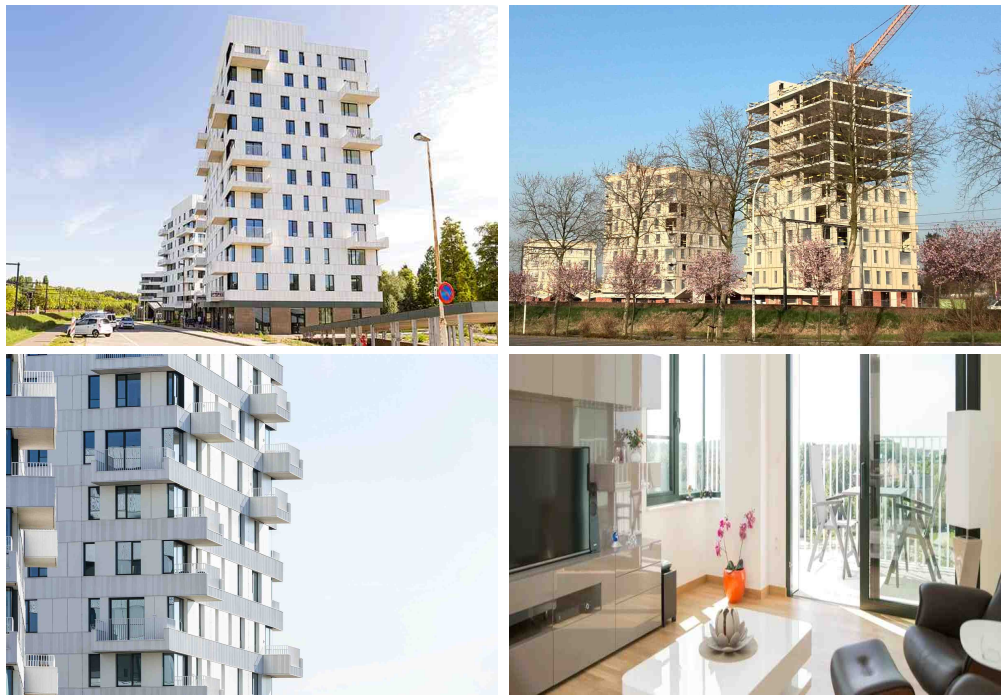
(2023년 준공) Rua Rómulo de Carvalho, Guimarães, 포르투갈

용 도	공동주택_임대 (Residential, 중소규모 빌라형 아파트)	총 수 연 면 적	지상 5층 1,700 ~ 2,000 m ² (자료에 따라 상이)
유닛구성	총 22 세대 (스튜디오 유닛 + 1 베드룸 + 2 베드룸)	단위유닛	유닛당 면적 : 45 ~ 90 m ²
구조형식	- 코어 : RC조 - 외벽 : PC조 + GLT 기둥 합성벽체 (공장생산) - 바닥 : RC 슬래브 + GLT 보 합성바닥 (공장생산)		
참여업체	- 건축 : Mário Fernandes - 구조 : ASPECT Structural Engineers - 외벽 / 바닥 골조제작 : CREE		
특이사항	- 외벽 모듈은 경량목구조 (Light Wood Frame)에 기반한 클로즈드 패널 (Closed Panel)로 사전제작하였고 바닥은 하이브리드 슬래브 (GLT 보 + 콘크리트) 적용 • 외벽 모듈은 구조체와 분리된 비내력 파사드 모듈로 계획 (마감은 알루미늄 / 금속 계열 외장재 적용) - 포르투갈의 대형 건설사 Grupo Casais가 목재와 콘크리트를 결합한 오프사이트 (Off-site) 건축공법을 선보이기 위해 오스트리아의 CREE 시스템을 도입하여 건설한 첫 번째 주거 프로젝트 • 포르투갈 내 다른 도시 (베자, 발렌사 등) 에 건설되는 후속 목조 하이브리드 프로젝트들의 기술적 모태 • 내부 구조물에 노출된 목재 (Exposed Wood)를 사용하여 따뜻하고 자연적인 분위기를 조성하며, 이는 실내공기질 개선과 심리적 안정감을 제공 • 해체가능한 (dismantlable) 시스템으로 순환성 (circularity)을 강조		
전 경			

자료 : CASAIS, CREE

(25) Groen Zuid Residential Care Homes

(2015년 준공) Hoboken, Fodderiestraat, Antwerp, 벨기에

용도	공동주택_임대 (실버주택 + 돌봄센터)	층수 연면적	지상 5층, 9층, 11층 (전체 3개 동) -
유닛구성	총 118 세대 (1 베드룸 + 2 베드룸)	단위유닛	면적범위 : 약 55 ~ 85 m ²
구조형식	- 기둥 및 바닥 슬래브는 RC조 - 외벽은 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : Crepain Binst Architecture - 시공 : Hooyberghs, Cores Antwerpen - 구조 : VK Engineers, SD Engineering - 외벽패널 제작 : Machiels Building Solutions (MBS)		
특이사항	- 외벽은 경량목구조에 기반한 파사드 시스템 (Prefabricated Timber-frame Façade System)으로 구성하고 실내외 마감재까지 공장제작 • 현장에서는 외벽의 전면 교체를 위한 조립 및 설치작업만 진행 (비내력 파사드 시스템) • 프리패브 목구조 (팀버 프레임) 외벽요소 6,000 m² 적용 - 계단식 (캐스케이딩) 발코니가 있는 입면 조건에서 외벽 쉘이 RC 기둥과 슬래브를 관통하도록 계획하여 열교 최소화 및 수밀성 확보 • 고층 (11층) 프리패브 목구조 외벽에 대한 방화설계 및 소방 테스트 진행 • 설계 과정에서 구조안정성, 열, 기밀, 수밀 내풍, 음향, 방화, 공차 등 요구기준을 패널 시스템에 반영 - 노인을 위한 독립형 주거공간과 더불어 저층부에는 지역 서비스센터 (Dienstencentrum), 식당, 보건시설, 그리고 어린이집 (Crèche)이 결합된 복합 커뮤니티 시설		
전경			

자료 : Machiels Building Solutions, SwiftBuild

(26) Renovation of Social Housing Block

(2022년 준공) Ulius Vuylstekelaan, Antwerp, 벨기에

용 도	공동주택_임대 (사회주택의 리노베이션 프로젝트)	층 수 연 면 적	지상 16층 -
유닛구성	총 129 세대	단위유닛	면적범위 : 약 46 ~ 162 m ²
구조형식	- 고층 주거동의 기존 구조체는 유지 (RC조) - 외벽은 전면 개보수로 공장에서 마감재까지 제작하는 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산) 적용		
참여업체	- 설계 : arQ architectenstudio - 시공 : ArtesRogiers - 구조 : VK Engineers, SD Engineering - 외벽패널 제작 : Machiels Building Solutions (MBS)		
특이사항	- 외벽은 경량목구조에 기반한 파사드 시스템 (Prefabricated Timber-frame Façade System)으로 구성하고 실내외 마감재까지 공장제작 - 현장에서는 외벽의 전면 교체를 위한 조립 및 설치작업만 진행 (비내력 파사드 시스템) - 16층 규모의 고층 주거용 건축물에 프리패브 목구조 외벽을 적용한 사례로서 신축이 아닌 리노베이션 사업에서 목재OSC 외벽의 적용 가능성을 보여주는 사례 • 사회주택의 특성상 입주민 이주 없이 단계적 공사 진행		
전 경			

자료 : Machiels Building Solutions, arQ architectenstudio

(27) De Doktoren

(2022년 준공) Antwerpen, 벨기에

용도	주상복합 _ 임대 (Mixed-use, 주상복합 아파트)	층수 연면적	지상 22층 (81m) 약 10,248 m ² (GFA)
유닛구성	총 154 세대 (고층타워 : 주거용 + 지상1층 : 상업공간)	단위유닛	면적범위 : 45 ~ 150 m ² (1~2 베드룸 아파트 + 펜트하우스)
구조형식	- 골조는 RC조 - 외벽은 프리패브 목조 프레임 (Facade Timber Frame) 적용 - 패널은 알루미늄 마감재료와 결합 (외장 알루미늄 패널 외피)		
참여업체	- 건축 : Binst Architects - 구조 : Boydens Engineering - 시공 : BAM Interbuild - 외벽패널 : Machiels Building Solutions (목조 프레임 패널 제작설치)		
특이사항	- 목조 프레임 패널은 공장에서 완성된 상태로 제작되어 현장 반입 - 외벽패널의 길이를 3 ~ 10m 범위로 다양하게 제작 (모듈화에 대응) - 알루미늄 외장 패널로 마감 (목조 프레임 패널 + 금속 외장 결합) - 현장에서는 전체 건물 스캐폴딩 없이 Just-in-Time 방식으로 패널 납품설치 - 동쪽측면의 11층 이상에는 상부 돌출 구조물의 지지를 위해 보조 가설구조 사용(support scaffolding) - 외벽패널 구성 : 외장마감 (금속패널) + 통기층 (30mm) + 투습 방수막 + 목조 스테드 (140mm + 단열재 충전) + OSB 보강 + 석고보드 또는 내장마감 - 패널접합 방식 • 수직방향 접합 : 금속 브래킷 및 볼트 체결 + 기밀테이프 겹침 시공 • 수평방향 접합 : 슬래브 엣지 앵커 + 단열재 열교차단 패드 삽입 • 코너부의 접합 : L-형 패널 사전제작 후 현장체결 • 패널접합 재료 : 스테인리스 브래킷, 앵커볼트, EPDM 가스켓, 멤브레인 테이프, 실란트, 압축 단열패드		
전경			

자료 : MBS

(28) Studentenhuisvesting Renosale

(2016년 준공) Blijde Inkomststraat, Leuven, 벨기에

용 도	기숙사_학생전용 (Student Housing)	층 수 연 면 적	지상 5층 -
유닛구성	총 30 개 (Standard Rooms + Studios)	단위유닛	면적범위 : 12 ~ 30 m ²
구조형식	- 전체 목구조 : 외벽은 프리패브 경량목구조 벽체 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : t28 architects - 외벽패널 제작 : Machiels Building Solutions (MBS)		
특이사항	- 외벽은 경량목구조에 기반한 파사드 시스템 (Prefabricated Timber-frame Façade System)으로 구성하고 실내의 마감재까지 공장제작 현장에서는 조립 및 설치작업만 진행 - 총 243개의 경량목구조 프리패브 요소로 구성되었으며, 최대 폭 10m, 1개 층 높이의 대형 패널 사용		

전 경



자료 : Machiels Building Solutions

(29) The Fizz Utrecht (과거명칭 : The Cube)

(2020년 준공) Utrecht, Overvecht District, 네덜란드

용도	기숙사_학생전용 (Student Housing)	층수 연면적	지상 16층 (49.5m) 약 26,500 m ² (GFA)
유닛구성	총 639 세대 (스튜디오 유닛 + 1층 상업공간)	단위유닛	유닛당 면적 : 약 21 m ²
구조형식	- 골조는 RC조 (RC-frame) - 외벽은 프리패브 목조 프레임 (Prefabricated Timber-frame Façade System) 적용		
참여업체	- 건축 : Team V Architecture - 구조 : Van Rossum Raadgevende Ingenieurs - 시공 : Van Wijnen - 외벽패널 : Machiels Building Solutions (MBS)		
특이사항	- 목조 프레임 외벽패널 시스템 (Timber-frame Façade Elements) 적용 • 총 12,000 m² 외벽패널 공장제작 후 현장조립 • 대규모 학생형 공동주택에 목재OSC 외벽을 적용한 대표적 고층 실증사례 - 외벽패널은 창호·단열·방수·외장마감이 사전완료된 상태로 납품되어, 외벽의 설치속도 향상 및 도심내 협소부지에 효과적으로 대응 • 외벽패널 구성 : 외장마감 (금속·합성패널) + 통기층 (30mm) + 투습방수막 + 구조목 프레임 (140mm, 단열재 충전) + OSB 구조판 + 석고보드 또는 내장마감 • 수직방향 접합 : 금속 브래킷 및 볼트 체결 + 기밀테이프 겹침 시공 • 수평방향 접합 : 슬래브 엠티 앵커 + 단열재 열교차단 패드 삽입 • 코너부의 접합 : L-형 패널 사전제작 후 현장체결 • 패널접합 재료 : 스테인리스 브래킷, 앵커볼트, EPDM 가스켓, 멤브레인 테이프, 실란트, 압축 단열패드		
전경			

자료 : MBS

(30) Østerbrogade 190

(2026년 준공예정) Copenhagen, 덴마크

용 도	기숙사 _ 학생전용 (Rental Resiance House)	층 수 연 면 적	지상 6층 약 1,700 m ²
유닛구성	총 20 세대 + 카페 (1층)	단위유닛	면적범위 : 30 ~ 42 m ² 원룸형 (14) + 투룸형 (6)
구조형식	- 5개 층 : GLT Frame + PC Slab + 경량목구조 (Light Wood Frame) - 1개 층 : 콘크리트 포디움 / 베이스		
참여업체	- 건축 : Vilhelm Lauritzen Architects - 설계·시공 : Ramboll & Aspect Structural Engineers - 건설업체 : LÖFTE Property Development - 목재패널 벽체 공급 : Hasslacher Group		
특이사항	- 덴마크 최초로 CREE 시스템을 도입하여 건설하는 건축물 - 이 시스템은 오스트리아 CREE사에서 개발한 목재와 콘크리트를 결합한 Hybrid 시스템으로서 기둥과 보에는 GLT를 사용하고 바닥 슬래브는 얇은 PC를 결합한 모듈식 시스템으로 화재 안전성, 소음 차단, 구조 안정성 등을 확보가능 - 구체적으로는 GLT 골조에 강재 커넥터, 파사드 멤브레인, 창호 등을 모두 설치하는 방식이며 건축계획 시에 콘크리트와 강재 보강요소를 함께 사용가능하도록 설계 (최대 30층까지 확장 가능) • PC slabs : 각층 바닥 구조체로 사용 • Steel connectors : 목재와 콘크리트 연결을 위한 금속 접합부 • Prefabricated timber wall panels : 비내력 외벽 및 내벽체용 • 외벽패널 시스템 : 공장제작된 클로즈드 패널 (Closed Panel) 적용		
전 경			
			
			
			
자료 : Vilhelm Lauritzen			

(31) Residência Universitária Beja

(2024년 준공) Instituto Politécnico de Beja, 포르투갈

용도	기숙사 _ 학생전용 (Student Housing)	층수 연면적	지상 5층 10,500 ~ 11,000 m ² (자료에 따라 상이)
유닛구성	총 261 개 (유닛) (1인실 19 + 2인실 242 + 공용시설)	단위유닛	유닛당 면적 : 14 ~ 22 m ² (1인실 14 ~ 16 m ² , 2인실 : 18 ~ 22 m ²)
구조형식	- 코어 : RC조 - 외벽 : PC조 + GLT 기둥 합성벽체 (공장생산) - 바닥 : RC 슬래브 + GLT 보 합성바닥 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : Grupo Norma - 구조 : TOPBIM - 시공 : Grupo Casais - 외벽/바닥 골조제작 : CREE, Blufab		
특이사항	- 하이브리드 프리패브 외벽 (콘크리트 벽체 + 목재 GLT 기둥 포함) 에 창호 · 유리 · 자연환기 요소를 일체화하여 납품 · 설치함으로써 외벽 OSC의 적용수준을 높임 • 프리패브 파사드 (외벽) + 창호 일체형 납품 수준까지 구현 - 오스트리아의 CREE 시스템과 포르투갈 Grupo Casais의 협업으로 개발한 모듈형 오프사이트 (Off-site) 건축 솔루션을 적용한 하이브리드 프로젝트 • 모든 유닛은 CREE 시스템 (목재 GLT + 콘크리트)을 기반으로 규격화된 모듈로 제작 - 포르투갈 내 단일 프로젝트로는 가장 많은 목재 (약 1,700m³)를 사용한 건물 - 이 프로젝트는 태양광 패널 설치 및 고성능 단열재 등 적용으로 에너지소비를 최소화하는 NZEB (Zero Energy Building) 기준을 준수		
전경	   		

자료 : CREE

(32) Residência Universitária Norte

(2025년 준공) Avenida Pinto da Mota, Valença, 포르투갈

용도	기숙사_학생전용 (Student Housing)	층수 연면적	지상 3층 (11m) 약 1,200 m ² (GFA)
유닛구성	총 32 개 (유닛) (1인실 8 + 2인실 24 + 공용시설)	단위유닛	유닛당 면적 : 15 ~ 25 m ² (1인실 15 ~ 18 m ² , 2인실 : 20 ~ 25 m ²)
구조형식	- 코어 : RC조 - 외벽 : PC조 + GLT 기둥 합성벽체 (공장생산) - 바닥 : RC 슬래브 + GLT 보 합성바닥 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : TOPBIM - 구조 : TOPBIM - 시공 : Grupo Casais - 외벽/바닥 골조제작 : CREE		
특이사항	- 하이브리드 프리패브 외벽 (콘크리트 벽체 + 목재 GLT 기둥 포함) 에 창호·유리·자연환기 요소를 일체화하여 납품·설치함으로써 외벽 OSC의 적용수준을 높임 • 프리패브 파사드 (외벽) + 창호 일체형 납품 수준까지 구현 - 오스트리아의 CREE 시스템과 포르투갈 Grupo Casais의 협업으로 개발한 모듈형 오프사이트 (Off-site) 건축 솔루션을 적용한 하이브리드 프로젝트 • CREE 시스템 (목재 GLT + 콘크리트) 이라는 모듈방식을 채택해 모든 유닛의 크기가 규격화되어 있으며, 제한된 연면적 (약 1,200m²) 내에서 수용인원을 최대한 확보 (56명)하기 위해 최적화된 공간설계 • CREE 시스템 조립에는 단 11일 소요		
전경			

자료 : CREE

(33) Hugo Stay Hostel

(2019년 준공) Raatuse tn 23, Tartu, 에스토니아

용도	호 텔 (Condo Hotel 또는 Apart Hotel)	층 수 연 면 적	지상 6층 -
유닛구성	층 40 ~ 50개 (객실, 추정)	단위유닛	유닛당 면적 : 17 ~ 24 m ² (트윈룸 : 17 m ² , 쿼터룸 : 24 m ²)
구조형식	- 코어 : RC조 - 외벽 : PC조 + GLT 기둥 합성벽체 (공장생산) - 바닥 : RC 슬래브 + GLT 보 합성바닥 (공장생산)		
참여업체	- 건축설계 (Architect) : Arhitektuuribüro Peil - 시스템 공급 및 기술 (System Provider) : CREE Buildings - 시공사 (General Contractor) : Tormis Disain 및 Rand & Tuulberg - 외벽패널 제작 : Welement		
특이사항	- 에스토니아 최초의 CREE 시스템 적용 사례 • 에스토니아의 IT 기술 (Hugo.legal)과 오스트리아의 친환경 건축기술 (CREE)이 결합된 혁신적인 사례 • 스마트 기술이 결합된 무인 체크인 시스템과 에너지 효율적인 빌딩 관리시스템 (BMS)이 통합 설계 - 외벽은 경량목구조에 기반한 파사드 시스템 (Prefabricated Timber-frame Façade System)으로 구성하고 실내외 마감재까지 공장제작하여 현장에서는 조립만 진행 • 패널접합은 PC 슬래브에 메탈 앵커 및 브래킷으로 패널 고정		
전 경			

자료 : Hugostay

(34) Paju 2 Bürohoone

(2020년 준공) Paju tn 2, Tartu, 에스토니아

용 도	오피스_임대 (Office Building)	층 수 연 면 적	지상 16층 (55m) 9,059 m ² (사무동) + 5,889m ² (주차동, 3층 규모)
유닛구성	사무실 임대공간 (임대인의 요구에 따라 유연) + 주차장 (250대 규모) + 편의시설	단위유닛	-
구조형식	- 골조는 RC조 - 건축물 내부 및 외피 일부에 목재 적용		
참여업체	- 건축 : Allianss Arhitektid OÜ - 구조 : Ehitustrust / TalTech 협업 - 시공발주 : Ehitustrust AS		
특이사항	- 외피의 일부에 목재 적용 + 고단열 창호 및 에너지 효율형 환기시스템 • 남향 파사드는 유리 커튼월, 북향은 단열복합 패널 마감 • 패널접합 방식 : 패널을 RC 슬래브에 메탈 앵커 및 브래킷으로 고정 • 패널접합 재료 : 스테인리스 앵커, EPDM 가스켓, 실란트, 열교차단 플레이트 - 에스토니아 최초 대형 친환경 오피스 중 하나 ("Wooden Office Building" 콘셉트 적용) • Tartu 시 친환경 건축 시범사업 (Near Zero Energy Pilot) 선정 • LEED Gold 예비 인증 (예상점수 79점) 및 Tartu Green City Plan 시범사업 연계		

전 경



자료 : Ehitustrust

(35) Life-Cycle Tower ONE (약칭 : LCT ONE)

(2012년 준공) Dornbirn, 오스트리아

용 도	오피스_임대 (Office / Demonstration Building)	층 수 연 면 적	지상 8층 (27m) 1,765 m ² (Usable Floor Space)
유닛구성	-	단위유닛	면적범위 : 100 ~ 1,600 m ²
구조형식	Hybrid Post-and-Slab 구조 - GLT 보 + GLT 기둥 + PC 슬래브 - 경량목구조 (Light Wood Frame) 벽체		
참여업체	- 건축 : Hermann Kaufmann ZT GmbH - 구조 : CREE GmbH / Rhomberg Group		
특이사항	- 오스트리아 정부의 "House of the Future Program" 실증 프로젝트 (Demonstration Building) • 8개 층 건물외벽 조립기간 : 8일 소요 - 외벽패널은 재생 금속패널 마감 + 노출 목구조 + 3중 유리창 (triple glazing) • 패널구성 방식 : 외장재 (재생 금속패널) + 통기층 + 투습방수막 + 목재 프레임 단열층 + CLT 또는 OSB 보강 + 내장 석고보드 마감 • 패널접합 방식 : GLT 기둥과 외벽패널 볼트 체결 + 패널간 Z-bar 연결 + 기밀 멤브레인 겹침처리 • 패널접합 재료 : 스테인리스 앵커볼트, EPDM 가스켓, 멤브레인 테이프, 실란트, 압축 단열패드 - LEED 플래티넘 및 패시브 하우스 표준 인증 획득 • 천장패널은 통합 냉난방 시스템 적용 • 바닥패널은 공동공간 방음형 (Cavity Floor System) 적용 • 패시브하우스 기준 (열회수 환기시스템, 자동 CO₂ 제어 환기)		
전 경	 		

자료 : CREE

(36) Wood Hub

(2023년 준공) Auderghem, Brussels, 벨기에

용 도	오피스_임대 (Office Building)	층 수 연 면 적	지상 6층, 지하 3층 (주차 및 기술실) 약 7,300 m ² (지상층 기준, 6,700 m ²)
유닛구성	오픈 플랜 (Open Plan)	단위유닛	최소 임대단위 : 약 250m ²
구조형식	- 코어 : RC조 - 외벽 : 프리패브 경량목구조 (공장생산) - 바닥 : RC 슬래브 + GLT 보 합성바닥 (공장생산)		
참여업체	- 설계 : Archi 2000 - 구조 : TOPBIM - 시공 : CFE Group / BPC Group + Wood Shapers - 외벽/바닥 골조제작 : CREE, Bruninghoff		
특이사항	- 외벽 모듈은 경량목구조 (Light Wood Frame)에 기반한 클로즈드 패널 (Closed Panel)로 사전제작하였고 바닥은 하이브리드 슬래브 (GLT 보 + 콘크리트) 적용 • 외벽 모듈은 구조체와 분리된 비내력 파사드 모듈로 계획 (마감은 알루미늄 / 금속 계열 외장재 적용) - 오스트리아 CREE Buildings의 목재-콘크리트 하이브리드 모듈형 시스템을 사용 • CREE 시스템의 표준 모듈 (약 1.35m 간격)을 사용하여 사무실 면적을 1인용 워크스테이션 단위부터 전체 층 (1,100 ~ 1,200 m²) 통합 사용까지 자유롭게 구성 가능 • GLT 기둥을 외벽 쪽에 배치하고 중앙 코어 (엘리베이터계단)를 콘크리트로 설계하여, 사무실 내부에는 방해요소가 거의 없는 오픈 플랜 (Open Plan) 구성이 가능 - BREEAM 'Outstanding' 및 WELL 'Platinum' 인증 획득 • 지열 히트펌프와 옥상 태양광 패널 (약 300m²) 적용을 통해에너지 자급자족 (Fossil Fuel Free)		
전 경			

자료 : WMA, CREE

부 록 Appendix

국산 구조용 PB의 재료 및 구조 성능

→ 국립산림과학원(2025), “구조용 파티클보드의 구조성능과 활용” 연구보고서에서 발췌

(1) 구조용 PB 재료성능

① 휨성능 → ASTM D 3043 내 방법 B

; ASTM D 3043(Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure)

[부록표 1-1] 구조용 PB 및 타 판상재의 휨성능 (단위: MPa)

구 분		휨 강 도		휨 탄성계수
		평 균	5% 하한치	평 균
구조용 PB		17.9 (0.10)	14.8	5,305 (0.11)
일 반 PB		13.0 (0.09)	10.7	3,568 (0.15)
OSB	주 측	20.3 (0.18)	13.8	5,936 (0.21)
	부 측	12.4 (0.15)	9.2	2,693 (0.18)

() : 변위계수 = 표준편차 / 평균

② 압축성능 → ASTM D 3501 내 방법 B

; ASTM D 3501(Standard Test Methods for Wood-Based Structural Panels in Compression)

[부록표 1-2] 구조용 PB 및 타 판상재의 압축성능 (단위: MPa)

구 분		압 축 강 도		압축 탄성계수
		평 균	5% 하한치	평 균
구조용 PB		16.0 (0.12)	12.6	2,558 (0.15)
일 반 PB		12.2 (0.07)	10.4	1,516 (0.13)
OSB	주 측	11.2 (0.14)	8.4	4,617 (0.42)
	부 측	10.5 (0.20)	7.2	2,191 (0.35)

() : 변위계수 = 표준편차 / 평균

③ 두께방향 면내전단 → ASTM D 2719 내 방법 B

; ASTM D 2719(Standard Test Methods for Wood Structural Panels in Shear Through-the-Thickness)

[부록표 1-3] 구조용 PB 및 타 판상재의 두께방향 면내 전단성능 (단위: MPa)

구 분		면내 전단강도		면내 전단 탄성계수
		평 균	5% 하한치	평 균
구조용 PB		2.9 (0.16)	2.0	1,634 (0.09)
일 반 PB		1.7 (0.16)	1.1	1,169 (0.26)
OSB		3.1 (0.43)	1.3	1,597 (0.26)

() : 변위계수 = 표준편차 / 평균

(2) 구조용 PB 구조성능

① 못 접합부 성능 → KS F 2153 내 1면 전단

; KS F 2153(목구조 철물 접합부의 전단 시험방법)

[부록표 1-4] 하중방향에 따른 구조용 PB의 못 접합부 성능

구 분	하중에 대한 방향		항 복 성 능		최대내력 (N)
	주부재 (제재목)	측면부재 (PB)	변 위 (mm)	내 력 (N)	
M(G) S(-)	섬유	-	1.3 (0.14)	979 (0.15)	1,792 (0.21)
M(P) S(-)	섬유직각	-	1.2 (0.31)	879 (0.21)	1,706 (0.19)

() : 변위계수 = 표준편차 / 평균

[부록표 1-5] 하중방향에 따른 OSB의 못 접합부 성능

구 분	하중에 대한 방향		항 복 성 능		최대내력 (N)
	주부재 (제재목)	측면부재 (OSB)	변 위 (mm)	내 력 (N)	
M(G) S(L)	섬유	주축	1.3 (0.42)	734 (0.12)	1,367 (0.10)
M(G) S(T)	섬유	부축	1.3 (0.34)	763 (0.17)	1,384 (0.16)
M(P) S(L)	섬유직각	주축	1.1 (0.20)	779 (0.25)	1,494 (0.23)
M(P) S(T)	섬유직각	부축	1.5 (0.45)	789 (0.26)	1,457 (0.14)

() : 변위계수 = 표준편차 / 평균

② 수평하중 저항성능 → KS F 2154 및 ASTM E 2126 내 ISO 16670 Protocol 적용

; KS F 2154(경골 목구조 전단벽의 전단 시험방법)

; ASTM E 2126(Standard Test Method for Cyclic(Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force resisting System for Building)

[부록표 1-6] 구조용 PB 경골벽체의 평균 수평하중 저항성능

스터드 간 격	변 위 (mm)			전 단 내 력 (kN)			전단강도 (kN/m)	전단강성 (kN/mm)
	항 복	최 대	0.4최대	항 복	최 대	0.4최대		
300mm	14.9	53.1	6.9	25.9	29.9	12.0	12.3	1.8
406mm	12.3	44.7	5.7	22.4	26.0	10.4	10.7	1.8
610mm	10.7	45.1	4.8	19.7	22.1	8.9	9.1	1.9

[부록표 1-7] 구조용 OSB 경골벽체의 평균 수평하중 저항성능

스터드 간 격	변 위 (mm)			전 단 내 력 (kN)			전단강도 (kN/m)	전단강성 (kN/mm)
	항 복	최 대	0.4최대	항 복	최 대	0.4최대		
300mm	12.8	53.1	5.9	23.4	26.8	10.7	11.0	1.9
406mm	7.9	55.1	3.6	20.6	23.4	9.4	9.6	2.7
610mm	7.5	37.1	3.4	16.9	19.4	7.7	7.9	2.3

③ 경간등급 성능 ➡ KS F 2089 내 정적 집중하중 및 충격 집중하중 시험

; KS F 2089(목조건축 덮개재료용 목질판상재)

[부록표 1-8] 구조용 PB의 바닥에서의 경간등급 확인을 위한 실험결과

경 간 등 급	조 건	구 분	항 복 성 능		충격 후 정적집중
			최대하중 (kN)	처 짐 (mm)*	최대하중 (kN)
F-16	건 조	KS 기준	1.75	5.0	1.75
		실험결과	3.32 (0.06)	2.5 (0.04)	2.71 (0.11)
	습윤-재건조	KS 기준	1.75	5.0	1.75
		실험결과	3.58 (0.02)	3.6 (0.08)	3.34 (0.13)

* : 1kN에서의 처짐, () : 변위계수 = 표준편차 / 평균