

CLT 건축물의 외벽 및 지붕 구조체 레이어 구성 유형 분석

Analysis of the Types of External Wall and Roof Structure Layer Composition of CLT Building

유 동 완*
Yoo, Dong-Wan

이 태 구**
Lee, Tae-Goo

Abstract

Today, the whole world is going through a big chaos due to the COVID-19, but paradoxically, the emergence of COVID-19 has been leading to the need for sustainable development, such as Green New Deal that can improve global warming and carbon emissions, and the need for sustainable architecture is growing bigger and bigger in the architectural field as well. The level of CLT buildings in Korea is at a very rudimentary stage, while CLT buildings remedying existing wooden buildings are getting the spotlight among European countries for sustainable architecture. This study was conducted to categorize structure layer compositions of overseas CLT buildings and analyze architectural techniques and materials applied by collecting and analyzing information about CLT structure layer compositions of overseas CLT building-related institutions, companies and cases. When classifying structure layer compositions of foreign CLT buildings depending on the roles of layers, it was revealed that exterior wall structure layers were combined and organized within a sequence of external finishing, ventilation, waterproof, board, external insulation, airtightness, structure, airtightness, interior insulation, interior finishing, sloped roof structure layers were external finishing, ventilation, waterproof, board, external insulation, airtightness, structure, airtightness, interior insulation, interior finishing, flat roof structure layers were external finishing, ventilation, waterproof, planking wood, external insulation, waterproof, external insulation, airtightness, structure, airtightness, interior insulation, interior finishing.

주요어 : 교차집성판, 구조체 레이어, 지속가능한 건축

Keywords : Cross Laminated Timber, Structure Layer, Sustainable Architecture

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 전 세계는 COVID-19로 인해 사람들의 활동이 제한되면서 사회적 측면에서는 혼란을 겪고 있는 반면, 환경적 측면에서는 탄소 배출량이 감소하고 기존 서식지에서 사라졌던 생물들이 다시 서식지로 모여들며, 사람들이 사라진 거리에 야생동물들이 모습을 드러내는 등의 현상들이 발생하고 있다. 이는 지금까지 이루어져 왔던 인간들의 다양한 활동들이 지구 환경에 미치는 악영향을 단적으로 보여주었으며, 앞으로 인간들의 모든 활동에서 환경을 우선적으로 고려하여야 한다는 인식이 높아지는 계기가 되었다. 이에 전 세계는 탄소배출량 감축에 대한 필요성이 더욱 높아지고 있으며, 건축분야에서도 지속가능한 건축에 대한 필요성이 더욱 높아지고 있다. 국내에서도 이에 맞춰 그린뉴딜을 통해 신재생에너지 활용, 제로에너지 건축, 그린 리모델링 활성화 등을 추진하고 있으나 환경적 차원에서의 올바른 지속 가능한 건축을 위해서는 건축물 사용 기간 동안의 에너지 소비량 감축뿐만 아니라 건축물의 생산부터 폐기까지의

전 생애를 고려하여 친환경 건축자재를 활용한 건축이 이루어져야 한다. 이에 유럽 국가를 중심으로 기존의 경량 목구조의 내화·내진·방음·축열 등의 단점을 보완하고 철근콘크리트를 대체하기 위한 건축 구조재로 CLT(Cross Laminated Timber : 교차 집성판)를 개발하였다<Table 1>. CLT는 제재목을 층층이 교차로 접착하여 구조적 강도를 높인 구조용 판재로 고층 목조건축을 가능하게 하였으며, 건축의 공업화를 이루기에 적합한 건축 기술로 각광받고 있다. 현재 국외에서 제작되는 CLT에 첨가되는 접착제 첨가율은 0.6%¹⁾ 내외로 소량으로 접착제를 얇게 도포하여 접착제 사용량을 최소화하고 있으며, 인체에 무해한 친환경 접착제 적용에 대한 연구 개발을 진행하는 등 CLT의 친환경성을 더욱 강화하고 있다. 특히 구조용 목재의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우 구조용 목재로 사용하기에는 길이가 짧아 사용되지 못한 목재들을 활용하여 CLT를 만들 수 있기 때문에 국산목재의 활용 측면에서도 많은 이점이 있음에도 불구하고 현재 CLT의 건설기법에 대한 활발한 연구를 진행 중인 유럽 국가에 비해 우리나라의 CLT 건설 수준은 매우 기초적인 단계에 있다. CLT 건축은 주요 구조체가 목재인 만큼 구조체를 구성하는 재료들의 물성을 고려한 레이어 구성을 통해 건물의 내구성을 높이는 것이 매우 중요한 요소인 만큼 국외

* 세명대학교 건설공학과 대학원, 공학박사과정

** 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Semyung University, tglee2911@naver.com)

이 연구는 2020년도 국토교통부 도시건축연구사업 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호:20AUDP-B146511-03

1) 일반 건축자재에도 많이 사용되는 합판의 접착제 첨가율은 5-20%, MDF합판 8-13%, OSB합판 5-10%, 플라이 우드 10-20%인 것에 비해 CLT의 접착제 첨가율 0.6% 내외로 합판류의 건축자재 중에서도 상대적으로 접착제 첨가율이 소량인 것으로 보고되고 있다. (ATLAS-Mehrgeschossiger Holzbau)

에서도 최근까지 이에 대한 연구가 진행되고 있으나 국내의 CLT 관련 연구는 아직까지 CLT 자체 자체의 구조적 성능에 관한 연구에 집중되어 있으며, CLT를 이용한 건축기술 관련 건설은 매우 미흡한 상황이다.²⁾

이에 본 논문에서는 국외 CLT 건축 관련 기관, 기업, 건축 사례의 CLT 구조체 레이어 구성 정보들을 수집·분석하여 현재 국외 CLT 건축물들의 구조체 레이어 구성을 유형화하고, 적용된 건축기법 및 자재에 대한 분석을 진행하였으며, 본 연구 결과를 토대로 추후 국내 환경에 적합한 CLT 건축물의 구조체 레이어를 구축하기 위한 기초자료로서 활용하고자 한다.

Table 1. CLT and CLT construction examples

| CLT | | |
|---|---|---|
|  |  | |
| 국외 CLT 건축물 | | |
|  |  |  |
| 오스트리아 | 독일 | 프랑스 |

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 국외 CLT 건축 관련 기관, 기업, 건축 사례의 CLT 구조체 정보를 바탕으로 현재 국외 CLT 건축물의 구조체 레이어 구성을 유형화하고 적용된 건축 기법 및 자재를 분석함으로써 현재 국외 CLT 건축 기술의 현황을 파악하기 위한 사례 분석 연구이다. 분석 대상인 구조체의 범위는 CLT를 주요 구조체로 하는 외벽과 지붕을 대상으로 하였으며, CLT 건축에서도 바닥은 일반적으로 철근콘크리트 기초 및 바닥을 사용하고 있어 분석 대상에서 제외하였다. 지속 가능한 건축을 위해서는 외벽과 지붕의 열 성능 확보가 필요한 만큼 국내 건축물 에너지 절약 설계 기준에서 명시하고 있는 중부지역 기준과 독일 패시브하우스 인증기준인 열관류율 0.15 kW/m²·k 이하의 구조체 사례를 대상으로 분석하였다. CLT 외벽 구조체 레이어 구성 유형을 분석하기 위해 사용된 사례의 자료들은 각 기관 및 기업에서 제공하는 벽체 레이어 도면, 적용 자재 정보 테이블, 부위별 상세 단면도에 명시된 내용을 기반으로 진행되었다.

2. CLT 외벽 구조체 레이어 구성 유형 분석

2.1 국외 CLT 관련 기관

오스트리아는 CLT가 가장 먼저 개발되어 상용화된 국가로 CLT 건축기술의 선진국이라 할 수 있다. 이에 오스트리아 최대의 목재 연구 및 시험 기관인 ‘오스트리아 임산물 협회(Holzforschung Austria - Austrian Forest Products Research Society)³⁾’에서 제공한 구조체 레이어 도면 및 자재 데이터를 대상으로 외벽 열관류율 0.15 kW/m²·k 이하를 만족하는 외벽 구성 사례를 정리한 결과 각 레이어의 적용 유무, 적용 건축 기법 및 재료의 변화에 따라 총 30가지의 외벽 구조체 구성 방안을 제시하고 있었다. 이를 대상으로 외벽을 구성하고 있는 재료들의 역할에 따라 레이어를 구분한 결과 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 구조체, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 통기층, 방수층, 판재, 내단열층의 유무에 따라 6가지의 유형으로 구분할 수 있었다<Table 2>. 주요 특징으로는 구조체의 실내·외측에 별도의 기밀층이 존재하지 않는다는 것이다. 이는 오스트리아의 CLT 자체의 기밀성능이 높다고 판단하고, 기밀이 취약한 연결 부위에만 기밀 자재를 적용하는 것만으로도 기밀층 형성이 가능하다고 판단한 것으로 보인다. 이를 국내 CLT 건축에 적용하기 위해서는 반드시 국내 CLT의 기밀성능 평가가 필요하며, 충분한 기밀성능이 확보되지 않는다면 별도의 기밀층을 구성하여야 할 것으로 판단된다. 또 다른 특징으로는 모든 외벽 구성 사례에 외단열이 적용되어 있으며, 30건 중 1건을 제외한 29건에 내단열을 함께 적용하는 방안을 제시하였고, 통기층이 있는 외부 마감을 적용하는 경우 반드시 통기층 다음 방수층이 위치하는 특징을 보였다.

2.2 국외 CLT 건축물 사례

국외 CLT 건축물 사례는 독일 PHI (Passive House Institute) Database⁴⁾에 공개된 CLT 건축물을 대상으로 외벽 열관류율 0.15 kW/m²·k 이하를 만족하는 외벽 구성 사례를 정리한 결과 오스트리아, 독일, 캐나다, 영국, 이탈리아, 프랑스, 콜롬비아, 루마니아에 건축된 CLT 건축물의 외벽 구성 사례 60건을 분석 대상으로 선정하였다. 대상건물의 외벽을 구성하고 있는 재료들의 역할에 따라 레이어를 구분한 결과 ‘외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층’의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 통기층, 방수층, 기밀층, 내단열층의 유무에 따라 8가지의 유형으로 구분할 수 있었다<Table 2>. 주요 특징으로는 모든 사례가 외단열을 적용하고 있었으며, 단열재 외부측에 일반적인 구조용 판재 대신 투습방수성능을 갖는 고밀도 단열 보드를 적용하는 특징을 보였다. 또한 국외 CLT 관련 기관의 사례와 같이 별도의 기밀층을 형성하지 않은 사례

3) Austrian Forest Products Research Society, Building Components, 2020, <https://www.dataholz.eu>

4) Passive House Database, Passivhaus Institut GmbH, <https://passivehouse-database.org>

2) 장성진, CLT 목조주택의 열습기 성능 평가, 숭실대학교 박사학위논문, 2018, pp.22-38.

가 60건 중 55건으로 대부분을 차지하고 있었으나, 오스트리아, 독일, 영국, 프랑스의 일부 사례에서 CLT 구조체를 중심으로 실내 또는 실외 측에 별도의 방습이 가능한 기밀층을 형성하는 유형도 확인할 수 있었다.

2.3 국외 CLT 건설 기업

국외 CLT 건설 기업인 스페인의 egoin⁵⁾, 슬로베니아의 LESOTEKA House⁶⁾, 체코의 Novatop⁷⁾, 핀란드의 Stora Enso⁸⁾에서 제공하는 CLT 외벽 구조체 모델들을 레이어의 적용 유무, 적용 건축 기법 및 재료의 변화에 따라 정리한 결과 총 67가지의 외벽 구조체 구성 방안을 도출할 수 있었으며, 이를 분석 대상으로 선정하였다. 이를 대상으로 외벽을 구성하고 있는 재료들의 역할에 따라 레이어를 구분한 결과 외부 마감층, 통기층, 방수층, 외단열층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 통기층, 방수층, 기밀층, 내단열층의 유무의 따라 6가지 유형으로 구분할 수 있었다 <Table 2>. 주요 특징으로 모두 외단열을 적용하고 있으며, 스페인의 CLT 건설 기업인 egoin의 일부 구조체 구성에서 실내 측에 기밀층을 형성하였으며, 나머지 CLT 건설기업들의 외벽 구조체 모델에서는 별도의 기밀층을 형성하지 않은 것으로 나타났다. 또한 통기층이 있는 외부 마감층을 적용하는 경우 반드시 통기층 다음 방수층이 위치하도록 하며, 구조용 판재 대신 투습방수성능을 갖는 고밀도 단열 보드를 사용하는 특징을 보였다.

2.4 소결

분석 대상으로 선정한 국외 CLT 관련 기관, 건축 사례, 건설 기업의 외벽 구조체 레이어 구성 사례 157건을 종합적으로 분석한 결과 레이어의 역할에 따라 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 구분할 수 있었으며, 이 순서 안에서 157건의 외벽 구조체 구성 사례를 12가지의 레이어 구성 방식으로 유형화할 수 있었다 <Table 2>. 주요 특징은 첫째, 12가지 유형 모두 기본적으로 외단열을 적용하여 외벽의 열 손실을 최소화했다는 것이다. 둘째, 통기층이 있는 외부 마감층을 적용할 경우 다음 레이어에 반드시 방수층 레이어를 구성하여 빗물로부터 단열재 및 구조체를 보호한다. 이는 일반적인 경량 목구조에서도 발견할 수 있는 공통적 특징이다.

셋째, CLT 자체의 기밀성능이 높을 경우 기밀이 취약한 구조체 접합부위에만 기밀 자재를 적용하여 기밀층을 형성하고, CLT가 기밀하지 못하거나 습기로 인한 결로 발생의 위험이 있는 환경의 경우 CLT 구조체의 실내 또는 실외 측에 별도의 기밀층을 형성하는 방식을 적용하는 특징을 보인다.

Table 2. Layer types of external wall composition of overseas CLT buildings

| 유형 | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|------------------------------------|--------|-----|-----|----|------|-----|-----|-----|------|--------|
| | 외부 마감층 | 통기층 | 방수층 | 판재 | 외단열층 | 기밀층 | 구조체 | 기밀층 | 내단열층 | 내부 마감층 |
| 국외 CLT 기관 / 건축사례 / 기업 공통 레이어 구성 유형 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | O | O | - | O | - | O | O |
| 2 | O | O | O | O | O | - | O | - | - | O |
| 3 | O | O | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 4 | O | O | O | - | O | - | O | O | O | O |
| 5 | O | O | O | - | O | - | O | - | O | O |
| 6 | O | O | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 7 | O | - | O | O | O | - | O | - | O | O |
| 8 | O | - | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 9 | O | - | O | - | O | - | O | - | O | O |
| 10 | O | - | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 11 | O | - | - | - | O | - | O | - | O | O |
| 12 | O | - | - | - | O | - | O | - | - | O |
| 국외 CLT 관련 기관 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | O | O | - | O | - | O | O |
| 2 | O | O | O | O | O | - | O | - | - | O |
| 3 | O | O | O | - | O | - | O | - | O | O |
| 4 | O | - | O | O | O | - | O | - | O | O |
| 5 | O | - | O | - | O | - | O | - | O | O |
| 6 | O | - | - | - | O | - | O | - | O | O |
| 국외 CLT 건축 사례 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 2 | O | O | O | - | O | - | O | O | O | O |
| 3 | O | O | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 4 | O | - | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 5 | O | - | O | - | O | - | O | - | O | O |
| 6 | O | - | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 7 | O | - | - | - | O | - | O | - | O | O |
| 8 | O | - | - | - | O | - | O | - | - | O |
| 국외 CLT 건설 기업 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | - | O | - | O | O | O | O |
| 2 | O | O | O | - | O | - | O | - | O | O |
| 3 | O | O | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 4 | O | - | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 5 | O | - | - | - | O | - | O | - | O | O |
| 6 | O | - | - | - | O | - | O | - | - | O |

O : 레이어 있음, - : 레이어 없음

본 연구를 통해 157가지 외벽 구성 사례를 레이어의 역할에 따라 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층으로 구분할 수 있었으며, 이 범위 내에서 레이어의 존재 여부에 따라 다양한 조합이 이루어지고 있는 것으로 나타났다.

5) egoin, EGO-CLT Materials & Products, 2018, pp.33-47.
 6) LESOTEKA, LESOTEKA Massive Wooden Houses, 2016, pp.8-11.
 7) Novatop, Novatop Constructive System, 2016, pp.7-31.
 8) Stora Enso, Wood Products Building Solutions, 2012, pp.197-274.

3. CLT 지붕 구조체 레이어 구성 유형 분석

3.1 국외 CLT 관련 기관

‘오스트리아 임산물 협회’⁹⁾에서 제공한 도면 자료를 바탕으로 경사지붕 36건, 평지붕 18건의 CLT 지붕 레이어 구성에 대한 분석을 진행하였다. 이를 각 레이어의 역할에 따라 구분한 결과 경사 지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 목재널, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 목재널과 내단열층의 유무에 따라 3가지의 유형으로 구분할 수 있었다<Table 3>. 주요 특징으로는 모든 경사지붕 구성 사례에서 통기층이 있는 외부 마감, 방수층, 외단열층을 적용하였다.

Table 3. Layer types of sloped roof composition of overseas CLT buildings

| 유형 | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|------------------------------------|--------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|--------|
| | 외부 마감층 | 통기층 | 방수층 | 목재널 | 외단열층 | 기밀층 | 구조체 | 기밀층 | 내단열층 | 내부 마감층 |
| 국외 CLT 기관 / 건축사례 / 기업 공통 레이어 구성 유형 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | O | O | O | O | - | O | O |
| 2 | O | O | O | O | O | - | O | - | - | O |
| 3 | O | O | O | - | O | O | O | - | O | O |
| 4 | O | O | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 5 | O | O | O | - | O | - | O | O | O | O |
| 6 | O | O | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 7 | O | - | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 국외 CLT 관련 기관 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | O | O | O | O | - | O | O |
| 2 | O | O | O | - | O | O | O | - | O | O |
| 3 | O | O | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 국외 CLT 건축 사례 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | O | O | - | O | - | O | O |
| 2 | O | O | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 3 | O | O | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 4 | O | O | O | - | O | - | O | - | - | O |
| 5 | O | - | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 국외 CLT 건설 기업 | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | - | O | O | O | - | - | O |
| 2 | O | O | O | - | O | - | O | O | O | O |
| 3 | O | O | O | - | O | - | O | - | - | O |

O : 레이어 있음, - : 레이어 없음

평지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 외단열층, 기밀층, 구조체, 내단열층, 내부마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 통기층과 내단열층의 유무에 따라 3가지의 유형으로

구분할 수 있었다<Table 4>. 주요 특징으로는 모든 유형에 공통적으로 방수층, 외단열, 구조체 외부측 기밀층을 적용하여 외벽에 비해 방수 및 방습층 형성을 중요하게 다루고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 국외 CLT 건축물 사례

독일 PHI Database¹⁰⁾에 공개된 CLT 건축물을 대상으로 외벽 열관류율 0.15 kW/m²·k 이하를 만족하는 지붕 구성 사례를 정리한 결과 오스트리아, 독일, 캐나다, 영국, 이탈리아, 프랑스, 콜롬비아, 루마니아에 건축된 CLT 경사지붕의 구성 사례 22건과 오스트리아와 영국에 건축된 CLT 평지붕의 구성 사례 17건을 분석 대상으로 선정하였다. 분석 대상을 각 레이어의 역할에 따라 구분한 결과 경사지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 목재널, 외단열층, 기밀층, 구조체, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 통기층, 목재널, 기밀층, 내단열층의 유무에 따라 5가지의 유형으로 구분할 수 있었다<Table 3>. 주요 특징으로는 모든 사례에서 방수층과 외단열을 적용하였으며, 실외 측에 기밀층을 형성하는 특징을 보였다.

평지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 기밀층, 구조체, 내부마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 통기층, 판재, 기밀층의 유무에 따라 5가지의 유형으로 구분할 수 있었다<Table 4>. 주요 특징으로는 모든 사례에서 방수층과 외단열을 적용하였으며, 실내 또는 실외 측에 기밀층을 형성하는 특징을 보였다.

3.3 국외 CLT 건설 기업

국외 CLT 건설 기업인 스페인의 egoin¹¹⁾, 체코의 Novatop¹²⁾의 경사지붕 구성 사례 13건과 스페인의 egoin, 핀란드의 Stora Enso¹³⁾의 평지붕 구성 사례 11건을 분석 대상으로 선정하였다. 분석 대상을 각 레이어의 역할에 따라 구분한 결과 경사지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 목재널, 기밀층, 내단열층의 유무에 따라 3가지의 유형으로 구분할 수 있었다<Table 3>. 주요 특징으로는 모든 사례에서 방수층과 외단열을 적용하였으며, 실내 또는 실외 측에 기밀층을 형성하는 특징을 보였다.

평지붕은 외부 마감층, 방수층, 외단열층, 방수층, 외단열층, 기밀층, 구조체, 내단열층, 내부마감층의 순서로 조합되어 있는 것으로 나타났으며, 방수층, 추가적인 외단열층, 내단열층의 유무에 따라 3가지의 유형으로 구분할 수 있었다<Table 4>. 주요 특징으로는 모든 사례에서 방수층과 외단열을 적용하였으며,

10) Passive House Database, Passivhaus Institut GmbH, <https://passivehouse-database.org>

11) egoin, CLT and CLT-MIX CLT Structural Properties & Connection Details, 2017, pp.48-81.

12) Novatop, Novatop Constructive System, 2016, pp.7-31.

13) Stora Enso, Wood Products Building Solutions, 2012, pp.197-274.

9) Austrian Forest Products Research Society, Building Components, 2020, <https://www.dataholz.eu>

기밀층을 형성한 모든 사례에서 실외 측에 기밀층을 형성하는 레이어 구성 형태를 보였다.

Table 4. Layer types of flat roof composition of overseas CLT buildings

| 유형 | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|------------------------------------|--------|-----|-----|----|------|-----|------|-----|-----|-----|------|--------|
| | 외부 마감층 | 통기층 | 방수층 | 판재 | 외단열층 | 방수층 | 외단열층 | 기밀층 | 구조체 | 기밀층 | 내단열층 | 내부 마감층 |
| 국외 CLT 기관 / 건축사례 / 기업 공통 레이어 구성 유형 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | - | O | - | - | O | O | - | O | O |
| 2 | O | O | O | - | O | - | - | O | O | - | - | O |
| 3 | O | O | O | - | O | - | - | - | O | - | - | O |
| 4 | O | - | O | O | O | - | - | O | O | - | - | O |
| 5 | O | - | O | - | O | O | O | O | O | - | O | O |
| 6 | O | - | O | - | O | - | - | O | O | - | O | O |
| 7 | O | - | O | - | O | - | - | O | O | - | - | O |
| 8 | O | - | O | - | O | - | - | - | O | O | - | O |
| 9 | O | - | O | - | O | - | - | - | O | - | - | O |
| 국외 CLT 관련 기관 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | - | O | - | - | O | O | - | O | O |
| 2 | O | O | O | - | O | - | - | O | O | - | - | O |
| 3 | O | - | O | - | O | - | - | O | O | - | O | O |
| 국외 CLT 건축 사례 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | O | O | O | - | O | - | - | - | O | - | - | O |
| 2 | O | - | O | O | O | - | - | O | O | - | - | O |
| 3 | O | - | O | - | O | - | - | O | O | - | - | O |
| 4 | O | - | O | - | O | - | - | - | O | O | - | O |
| 5 | O | - | O | - | O | - | - | - | O | - | - | O |
| 국외 CLT 건설 기업 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | O | - | O | - | O | O | O | O | O | - | O | O |
| 2 | O | - | O | - | O | - | - | O | O | - | O | O |
| 3 | O | - | O | - | O | - | - | O | O | - | - | O |

O : 레이어 있음, - : 레이어 없음

3.4 소결

분석 대상으로 선정한 국외 CLT 관련 기관, 건축 사례, 건설 기업의 경사지붕 구조체의 레이어 구성 사례 71건과 평지붕 구조체의 레이어 구성 사례 46건을 종합적으로 분석한 결과 레이어의 역할에 따라 경사지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 목재널, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 구분할 수 있었으며, 이 순서 내에서 71건의 경사지붕 구조체 구성 사례를 7가지의 레이어 구성 방식으로 유형화할 수 있었다<Table 3>. 주요 특징은 첫째, 7가지 유형 모두 기본적으로 외단열과 방수층을 적용하여 외벽의 열 손실을 최소화하고 빗물로부터 단열재를 보호할 수 있도록 레이어를 구성하였다. 둘째, 외벽의 경우 별도의 기밀층을 구성하지 않은 사례가 많았던 반면 지붕에서는 대부분의 사례에서 CLT 구조체

외부 측에 별도의 기밀/방수층을 구성하는 특징을 보였다. 셋째, 대부분 통기층이 있는 외부 마감재를 적용하였으며, 그중 모두가 워루프(Warm Roof)¹⁴⁾ 방식의 지붕 레이어를 구성하고 있는 특징을 보였다. 유럽 국가의 사례가 대부분인 만큼 유럽 국가를 중심으로 많이 사용되는 워루프(Warm Roof) 방식이 많이 사용되었지만 기능적으로도 물로부터 단열재를 보호하기 위해서는 콜드 루프(Cold Roof)¹⁵⁾ 방식보다 워루프(Warm Roof) 방식을 사용하는 것이 안전하기 때문에 모든 사례가 워루프(Warm Roof) 방식을 적용한 것으로 판단된다.

평지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 방수층, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 구분할 수 있었으며, 이 순서 내에서 46건의 경사지붕 구조체 구성 사례를 9가지의 레이어 구성 방식으로 유형화할 수 있었다<Table 4>. 주요 특징은 경사 지붕에서 나타난 특징과 같이 9가지 유형 모두 기본적으로 외단열과 방수층을 적용하였으며, CLT 구조체 외부 측에 별도의 기밀/방수층을 구성하는 특징을 보였다.

본 연구를 통해 경사지붕 구성 사례 71건과 평지붕 구성 사례 46건을 레이어의 역할에 따라 경사지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 목재널, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층, 평지붕은 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 방수층, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층'으로 구분할 수 있었으며, 이 범위 내에서 레이어의 존재 여부에 따라 다양한 조합이 이루어지고 있는 것으로 나타났다.

4. 적용 건축 기법 및 자재 분석

4.1 CLT 외벽 적용 건축 기법 및 자재 분석

3장에도 도출된 국외 CLT 외벽 구조체 레이어를 바탕으로 분석 대상 157건에 적용된 건축 기법 및 자재에 대하여 다음과 같이 분석하였다<Table 5>. 외부 마감은 목재 통기층을 갖는 목재 외장재와 외단열 미장마감을 가장 많이 적용하였다. 통기층과 단열재 사이의 방수층은 모두 투습방수 성능을 갖는 방수자재를 적용하였으며, 시트 형태의 투습방수지나 목섬유 단열보드, 미네랄 울 단열보드와 같은 판 형태의 투습방수 보드를 주로 사용하고 있는 것으로 나타났다. 건축 과정이나 건축물의 유지 관리 과정에서 외부 단열재 또는 구조체에 수분이 유입되는 경우 수분을 증발 및 건조시키지 못한다면 단열재 성능 저하 및 구조체의 부식이 발생할 수 있다. 이에 외벽의 통기층과 투습이 가능한 방수층을 함께 구성하는 것은 건물의 내구성을 높이는 데 중요한 요소라고 판단된다. CLT 구조체 외부에 단열층을 형

14) 일반적으로 지붕 외관을 따라 단열층이 형성되며, 단열재위에 투습방수지가 설치되고, 그 위에 통기층을 설치하여 통기층에서 발생하는 결로수가 단열재를 적시는 것을 방지할 수 있는 형태의 지붕 단열 방식이다.

15) 일반적으로 지붕 아래 천장부분을 따라 단열층이 형성되며, 지붕 통기층과 단열재 사이에 투습방수지가 설치되지 않는 구조이기 때문에 통기층에서 발생하는 결로가 단열재를 적시며 단열성능을 저하시키는 문제점이 발생된다.

Table 5. Construction techniques and materials applied to overseas CLT external wall

| CLT 외벽 | | | |
|--------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 레이어 | | 적용 건축 기법 및 자재 | |
| A | 외부 마감층 | 외단열 미장마감, 목재/금속/벽돌/시멘트보드/테라코타/아크릴 외장재 | |
| B | 통기층 | 목재, 금속 | |
| C | 방수층 | 투습방수지, 투습방수 보드(목섬유, 미네랄울) | |
| D | 판재층 | MDF, OSB, 섬유강화석고보드 | |
| E | 외단열층 | 구조목 | 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스, 글라스울, 스트로우베일, 폴리우레탄 |
| | | I-Joist | 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스 |
| | | 파스너 | 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스, EPS, 폴리우레탄 |
| F | 기밀층 | 방습지, 가변형 투습방습지 | |
| G | 구조체 | CLT(Cross Laminated Timber) | |
| H | 기밀층 | 방습지, 가변형 투습방습지 | |
| I | 내단열층 | 목재틀 | 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스, 글라스울 |
| J | 내부 마감층 | CLT 노출 | |
| | | 석고보드, 목재판, 석고미장, 흙 보드 | |

성하는 방법은 단열재 고정용 목재 틀을 만들거나 밀도가 높은 단열재를 파스너로 직접 CLT에 고정시키는 방법이 주로 사용되고 있는 것으로 나타났다.

단열재 고정용 목재 틀은 구조목이나 I-Joist를 이용하며, 구조목 보다 두께가 얇은 I-Joist를 사용할 경우 목재 틀을 통한 열교를 줄일 수 있어 에너지 손실을 줄이는 관점에서 좋은 방안이 될 수 있을 것이라고 판단된다. 실내외에 적용되는 단열재는 목섬유 단열재와 미네랄울 단열재가 가장 많이 사용되는 것으로 나타났으며, 이외에도 셀룰로오스, 글라스울, 스트로우베일 등 친환경적이고 투습성능이 좋은 단열재를 적극 활용하고 있는 것으로 나타났다. 현재 CLT 건축에서의 기밀층 형성은 CLT 자체의 기밀성능에 대한 영향이 많이 미치는 것으로 판단된다. 즉, 현재는 CLT 자체가 기밀할 경우 기밀이 취약한 부위인 부재와 부재의 연결 부위에만 기밀 자재를 적용하여 기밀층을 확보하고, CLT 자체가 충분한 기밀성능을 확보하지 못하다면 CLT 구조체의 실내 또는 실외 측에 방습지나 가변형 투습방습지로 건물을 감싸는 방안이 가장 많이 적용되고 있는 것으로 나타났다. 내부 마감은 석고보드 또는 섬유강화 석고보드로 마감하거나 CLT 구조체를 그대로 노출시키는 방안이 가장 많이 적용되고 있는 것으로 나타났다.

4.2 CLT 지붕 적용 건축 기법 및 자재 분석

3장에도 도출된 국외 CLT 외벽 구조체 레이어를 바탕으로 경사지붕 분석 대상 71건, 평지붕 46건에 적용된 건축 기법 및 자재에 대하여 다음과 같이 분석하였다<Table 6>. 경사지붕의 외부 마감층은 목재 통기층을 갖는 목재 외장재가 가장 많이 적용되고 있으며, 평지붕은 옥상녹화 시스템, 자갈, 목재 테라스가 주로 적용되고 있는 것으로 나타났다. 경사지붕의 방수층은 외벽과 같이 투습성능을 갖는 방수지 또는 보드로 투습방수지, 목섬유 단열보드, 미네랄울 단열보드가 적용되고 있으며, 평지붕의 경우에는 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스, 스트로우베일 등

투습성능이 높은 단열재를 적용하는 경우 투습방수지와 목섬유 단열보드와 같은 투습방수층을 구성하고, EPS, XPS, 폴리우레탄 등 투습성능이 낮은 단열재를 적용하는 경우 PVC, 역청, EPDM과 같은 불투습 방수층을 구성하는 특징을 보였다. 경사 지붕과 평지붕 모두 외부 단열층을 구성하는 방법은 목재 틀을 설치하거나 구조체에 직접 고정하는 방식을 사용하였다. 경사 지붕에 적용되는 단열재는 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스, 코르크 등 친환경적이고 투습성능이 좋은 단열재를 주로 사용하며, 평지붕은 누수의 위험이 높은 만큼 외벽과 경사 지붕에 비해 EPS, XPS, 폴리우레탄과 같이 투습성능이 낮고 밀도가 높은 단열재를 상대적으로 많이 적용하였지만, 그럼에도 불구하고 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스, 스트로우베일 등 친환경적이고 투습성능이 좋은 단열재를 많이 적용하는 것으로 나타났다. 이는 건물의 사용과정에서 단열재와 목조 구조체 내부로 유입될 수 있는 수분을 증발시켜 건물의 단열성능 저하 및 구조체 부식을 방지하기 위한 방안으로 판단된다. 지붕 CLT 구조체의 실내 측에는 일반적으로 방습지나 가변형 투습방습지를 적용하며, 실외 측의 기밀층은 방습지와 가변형 투습방습지 이외에 불투습 방수시트를 적용하기도 한다. 이는 외벽과 마찬가지로 주변 환경과 구조체를 구성하고 있는 건축자재의 물성에 따라 기밀층의 설치 위치 및 방법이 다르게 적용되어야 할 여지가 있다고 판단된다. 실내 단열은 목재 틀을 설치하여 목섬유, 미네랄울, 글라스울과 같은 단열재를 채워 넣는 방식으로 구성되며, 석고보드, 섬유강화 석고보드, 원목 패널, 점토 미장 등을 통해 실내를 마감하거나 CLT 구조체를 그대로 노출시켜 인테리어로 활용하는 것으로 나타났다.

4.3 소결

국외 CLT 외벽 및 지붕에 적용된 건축 기법 및 자재를 종합적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다. 첫째, 목재 외장재, 목재 통기층, 투습방수 성능을 갖는 목섬유 단

Table 6. Construction techniques and materials applied to overseas CLT sloped roof and flat roof

| CLT 경사지붕 | | | |
|----------|--------|--|------------------------------|
| 레이어 | | 적용 건축 기법 및 자재 | |
| A | 외부 마감층 | 옥상녹화 시스템, 목재/징크/석재/시멘트보드 외장재 | |
| B | 통기층 | 목재 | |
| C | 방수층 | 투습방수지, 투습방수 보드(목섬유, 미네랄울) | |
| D | 목재널 | 목재널 | |
| E | 외단열층 | 구조목 | 목섬유, 미네랄울, 셀룰로오스, EPS, 폴리우레탄 |
| | | I-Joist | 목섬유, 셀룰로오스 |
| | | 파스너 | 목섬유, 미네랄울, 코르크, EPS, XPS |
| F | 기밀층 | 방습지, 불투습 방수시트, 가변형투습방습지 | |
| G | 구조체 | CLT(Cross Laminated Timber) | |
| H | 기밀층 | 방습지, 가변형투습방습지 | |
| I | 내단열층 | 목재틀 | 목섬유, 미네랄울, 글라스울 |
| | | 파스너 | 미네랄울 |
| J | 내부 마감층 | 석고보드 | |
| CLT 평지붕 | | | |
| 레이어 | | 적용 건축 기법 및 자재 | |
| A | 외부 마감층 | 옥상녹화 시스템, 자갈, 목재 테라스 | |
| B | 통기층 | 목재 | |
| C | 방수층 | 불투습방수층(PVC, 역청, EPDM), 투습방수(투습방수지, 목섬유 단열보드) | |
| D | 판재 | OSB | |
| E | 외단열층 | 구조목 | 셀룰로오스, 스트로베일 |
| | | I-Joist | 셀룰로오스 |
| | | 파스너 | 목섬유, 미네랄울, XPS, EPS, 폴리우레탄 |
| F | 방수층 | 역청방수 | |
| G | 외단열층 | 구조목 | 목섬유, 셀룰로오스 |
| | | 파스너 | 목섬유, 미네랄울, XPS, EPS |
| H | 기밀층 | 방습지, 불투습 방수시트, 가변형투습방습지 | |
| I | 구조체 | Cross Laminated Timber | |
| J | 기밀층 | 방습지, 가변형 투습방습지 | |
| K | 내단열층 | 목재틀 | 목섬유, 미네랄울 |
| L | 내부 마감층 | 석고보드, 원목패널, 점토미장 | |

열보드, 목섬유/미네랄울/셀룰로오스 단열재, CLT 구조체 등 레이어별 가장 많이 적용되고 있는 건축자재들이 모두 친환경적인 건축자재라는 특징을 보였다. 이는 단순히 CLT가 철근콘크리트나 경량 구조목을 대체하기 위한 하나의 구조재로서의 의미에서 그치지 않고 현재 CLT 건축은 구조재 이외에 적용되는 모든 건축자재에서도 지속 가능성을 고려하여 발전되고 있다는 것을 보여주는 결과이다. 둘째, 통기층이 있는 외부 마감층을 적용하여 건물과 빗물이 직접적으로 접촉하는 것을 1차적으로 방지하고, 통기층과 함께 투습방수층을 구성하여 2차적인 방수 및 물이 빠르게 건조될 수 있도록 구성하는 것이 CLT 건축물의 내구성을 높일 수 있는 방안이라고 판단된다. 셋째, CLT 건축물은 주요 구조체가 목조인 만큼 친환경적이며 투습성능이 좋고 모세관 현상까지 활용할 수 있는 목섬유 단열재나 셀룰로오스 단열재를 적용한다면 성능과 더불어 지속 가능성까지 확보할 수 있는 방안이라고 판단된다. 넷째, 국외 사례에서도 CLT 건축물의 기밀층 구성에 대한 표준적인 방안이 없는 것으로 판단되

며, 기밀층은 주변 환경, 건축자재의 물성, 습기 거동 등의 다양한 요소를 고려하여 적용해야 하는 만큼 추가적인 관련 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 결론

현재 세계는 COVID-19로 인해 많은 혼란을 겪고 있지만 한편으로는 기후온난화, 탄소 배출, 그린뉴딜 등 지속가능한 개발에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 건축분야에서도 지속 가능한 건축에 대한 필요성이 더욱 높아지고 있다. 이에 유럽 국가를 중심으로 지속 가능한 건축을 위해 기존 목조의 단점을 보완한 CLT 건축이 각광을 받고 있으나, 우리나라의 CLT 건설 수준은 매우 기초적인 단계에 있다. 이에 본 논문에서는 국외 CLT 건축 관련 기관, 기업, 건축 사례의 CLT 구조체 레이어 구성 정보들을 수집·분석하여 현재 국외 CLT 건축물들의 구조체 레이어 구성을 레이어의 역할에 따라 다음과 같이 구분할 수

있었다.

첫째, 국외 CLT 외벽 구조체 레이어는 모두 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내부단열층, 내부 마감층의 순서로 구성되고 있으며, 통기층, 방수층, 판재, 기밀층, 내부 단열층 레이어의 형성 유무에 따라 다양한 외벽 레이어가 구성되는 것으로 조사되었다.

둘째, 국외 CLT 경사지붕 구조체 레이어는 모두 외부 마감층, 통기층, 방수층, 목재널, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 구성되고 있으며, 통기층, 목재널, 기밀층, 내단열층 레이어의 형성 유무에 따라 다양한 경사지붕 레이어가 구성되는 것으로 조사되었다.

셋째, 국외 CLT 평지붕의 구조체 레이어는 모두 외부 마감층, 통기층, 방수층, 판재, 외단열층, 방수층, 외단열층, 기밀층, 구조체, 기밀층, 내단열층, 내부 마감층의 순서로 구성되고 있으며, 통기층, 판재, 방수층, 추가 외단열층, 기밀층, 내단열층 레이어의 형성 유무에 따라 다양한 평지붕 레이어가 구성되는 것으로 조사되었다.

이는 재료별, 기후별 특성에 따라 구조체의 성능을 개선하기 위하여 레이어의 변화를 갖는 것으로 판단된다. 추후 구조체 레이어 구성 유형을 바탕으로 열교 및 습기 거동 시뮬레이션을 통해 단열재 고정용 목재틀 및 화스너 등을 통한 열교 발생을 최소화하고, 구조체 레이어 구성 변화에 따른 결로 곰팡이 발생 위험을 검토하여 국내 환경을 고려한 CLT 구조체 레이어 구성 방안을 제안하고자 한다.

참고문헌

1. 장성진, CLT 목조주택의 열습기 성능 평가, 숭실대학교 박사학위논문, 2018.
2. Egoïn, CLT and CLT-MIX CLT structural properties & connection details, 2017.
3. Egoïn, EGO-CLT materials & products, 2018.
4. LESOTEKA, LESOTEKA massive wooden houses, 2016.
5. Novatop, Novatop constructive system, 2016.
6. Stora Enso, Wood products building solutions, 2012.
7. Austrian Forest Products Research Society, Building components, 2020, <https://www.dataholz.eu>
8. Passive House Database, Passivhaus institut gmbH, <https://passivehouse-database.org>

접 수 일 자 : 2020. 10. 10

초 심 완 료 일 자 : 2020. 11. 10

재심(1차)완료일자 : 2020. 11. 17

게 재 확 정 일 자 : 2020. 11. 21