



CLT를 활용한 국외 목조 패시브하우스의 에너지 성능 및 구조체 구성 분석

Analysis of Energy Performance and Structure of Wooden Passive Houses Using CLT in Overseas

유동완* · 이태구**

Dong-Wan Yoo* · Tae-Goo Lee**

* Dept. of Construction Engineering, Semyung Univ. South Korea (ydw@nate.com)

** Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Semyung Univ. South Korea (tglee2911@naver.com)

ABSTRACT

Purpose: CLT (Cross Laminated Timber) is a heavy weight structure that has advantages in seismic resistance, fire resistance, sound insulation, and heat storage performance compared to lightweight wood structures. Therefore, there is a big advantage that can reduce the dependence on foreign wood and actively use domestic wood. **Method:** This study intends to find a way to apply domestically by analyzing related technical cases abroad. **Result:** As a result of analysis, the energy performance of the currently constructed foreign CLT wooden passive houses is as follows. Annual heating energy requirement 12.7 kWh / m²a, primary energy requirement 87.9 kWh / m²a, heating load 12.5 W / m², airtight performance 0.41 h⁻¹, window heat permeability 0.78 W / m²K, glass heat permeability 0.62 W / m²K, glass solar energy transmittance 56%, door heat transmission rate 0.81 W / m²K, waste heat recovery ventilation efficiency 87%, roof heat transmission rate 0.10 W / m²K, exterior wall heat transmission rate 0.12 W / m²K, floor foundation heat transmission rate 0.13 W / m²K. Based on the analysis results, the basic design data for the domestic CLT wooden passive house design are provided.

KEYWORD

패시브하우스
교차집성판
생태건축Passive House
CLT (Cross laminated Timber)
Ecological architecture

ACCEPTANCE INFO

Received Oct 4, 2019
Final revision received Oct 18, 2019
Accepted Oct 21, 2019

© 2019 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

목조 패시브하우스는 건축물의 에너지 사용량을 감소시켜 온실 가스를 감축할 수 있을 뿐만 아니라 장기적으로는 목재를 주요 건축 자재로 사용함으로써 지속 가능한 건축기술로 각광받고 있다. 이에 최근 유럽 국가를 중심으로 기존의 경량목구조 건축물의 단점, 예를 들어 내진·내화·방음·축열 성능 등을 보완하기 위한 방안으로써 CLT(Cross Laminated Timber : 교차집성판)를 목조건축물의 주요 구조자재로 적극 활용하고 있다. CLT는 제재목 층재를 합판처럼 교차하여 접착·집성한 판형 구조용 목재로 판 그대로를 구조재로 사용할 수 있기 때문에 모듈화 시공 및 고층 목조주택에도 적극 활용되고 있다. 또한 중량구조이기 때문에 경량목구조에 비해 내진, 내화, 방음, 축열 성능 등에 이점이 있으며, 길이가 짧아 구조용 목재로 사용하지 못하는 국내 목재들도 집성하여 사용할 수 있어 국외 목재에 대한 의존성을 줄이고 국내 목재를 적극적으로 활용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 그러나 세계적인 목조건축의 추세와 함께 많은 장점이 있음에도 불구하고 현재 우리나라의 CLT 산업은 매우 기초적인 단계이며, 그나마 최근 이루어지고 있는 연구는 대부분 CLT 부재의 구조 및 성능에 대한 연구이고 CLT를 이용한 건축 설계연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 현재 건축되어진 국외 CLT 목조 패시브하우스들의 에너지 성능을 분석함으로써 동향을 파악하고, 현재 CLT 건축물을 설계·시공하고 있는 유럽의 주요 CLT 건설 업체들의 구조체 구성 방법을 분석하여 국내 CLT 목조 패시브하우스 설계에 필요한 기초 설계 자료를 제공하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 관련 기술 선진국들의 건축 사례 및 설계 디테일 자료를 바탕으로 한 사례분석 연구이다. 현재 국외에 건축된 CLT 패시브하우스의 에너지 성능과 구조체의 구성 방법을 분석하기 위해 두 가지 분류의 사례를 대상으로 분석하였다. 첫째, CLT 목조 패시브하우스들의 에너지 성능 현황을 분석하기 위해 현재 건축된 24건의 국외 사례를 대상으로 각각의 에너지 성능 관련 정보(연간 난방에너지 소모량, 1차 에너지 소모량, 난방부하, 기밀성능, 구조체 열관류율, 창호 열관류율, 유리 열관류율 및 일사에너지 투과율, 문 열관류율, 폐열회수장치 효율)를 조사하여 요소별로 평균적으로 적용된 에너지 성능을 분석하였다. 둘째, CLT 목조 패시브하우스의 구조체 구성 방법에 대한 분석을 하기 위해서 현재 CLT 건축물을 설계·시공하고 있는 유럽의 주요 CLT 건설 업체 4곳의 구조체 구성 방법에 대한 설계 자료를 분석하여 유형별로 제시하였다.

연구의 범위는 CLT를 주요 구조체로 하고, 건물의 연간 난방에너지 소모량이 15 kWh/m²a 이하인 단독주택 건물을 대상으로 하였으며, CLT 건축물 사례 분석 결과 대부분의 경우 바닥 구조체는

철근콘크리트 기초를 적용하고 있어 바닥을 제외한 지붕과 외벽의 구조체 구성을 분석하였다.

2. 국외 CLT 패시브하우스 에너지 성능 현황 분석

2.1. 사례 분석 대상

사례 분석 대상을 선정하기 위해 독일 PHI(Passive House Institute) Passive House Database에 등록되어 있는 4742건(2019년 10월 기준)의 저에너지 건축물 사례 중 다음과 같은 조건을 갖는 건축물 사례를 수집하였다. 첫째, CLT를 외벽 및 지붕의 주요 구조체로 한다. 둘째, 연간 난방에너지 소요량이 15 kWh/m²a 이하인 건축물이다. 셋째, 단독주택이다. 이를 대상으로 조사한 결과 총 49건의 사례를 찾을 수 있었으며, 그중 유의미한 정보를 가지고 있는 24건의 사례를 분석대상으로 선정하였다. 이후 24건의 사례를 대상으로 관련 문헌, 설계·시공 및 적용 시스템업체정보 등을 통해 각 주택의 에너지 성능 자료(연간 난방에너지 소요량, 1차 에너지 소요량, 난방부하, 기밀성능, 구조체 열관류율, 창호 열관류율, 유리 열관류율 및 일사에너지 투과율, 문 열관류율, 폐열회수환기장치 효율)를 수집하였다.

2.2. 에너지 성능 현황 분석

Table 1.과 같이 사례 주택 24건의 에너지 성능을 종합하여 평균 값을 도출한 결과 연간 난방에너지 소요량(Annual Heating Demand) 12.7 kWh/m²a, 1차 에너지 소요량(Primary Energy Requirement) 87.9 kWh/m²a, 난방부하(Heating load) 12.5 W/m², 기밀성능(Air tightness) 0.41 h⁻¹, 창호열관류율(Window U-value) 0.78 W/m²K, 유리 열관류율(Glazing U-value) 0.62 W/m²K, 유리 일사에너지 투과율(Glazing g-value) 56%, 출입문 열관류율(Entrance Door U-value) 0.81 W/m²K, 폐열회수환기장치 효율(Ventilation heat recovery rate) 87%, 지붕 열관류율(Roof U-value) 0.10 W/m²K, 외벽 열관류율(Wall U-value) 0.12 W/m²K, 바닥 기초 열관류율(Basement Floor U-value) 0.13 W/m²K인 것으로 나타났다. 이는 연간 난방에너지 소요량 15 kWh/m²a 이하, 1차 에너지 소요량 120 kWh/m²a 이하, 난방부하 10 W/m² 이하, 기밀성능 0.6 h⁻¹ 이하 창호열관류율 0.8 W/m²K 이하, 유리 일사에너지 투과율 50% 이상, 출입문 열관류율 0.8 W/m²K 이하, 폐열회수환기장치 효율 75% 이상, 지붕·외벽·기초바닥 열관류율 0.15 W/m²K 이하의 성능을 요구하는 패시브하우스 기준과 비교할 때 약간의 난방부하가 높은 것을 제외하고 모든 요

Table 1. Energy Performance of CLT Passive House

Division	Number	Annual Heating Demand	Primary Energy Requirement	Heating Load	Air tightness (n50)	Window U-value	Glazing U-value	Glazing g-value	Entrance Door U-value	Ventilation (heat recovery rate)	Roof			Exterior Wall			Basement Floor			Year of Construction
											U-value	Thickness (CLT)	Insulation Thickness	U-value	Thickness (CLT)	Insulation Thickness	U-value	Thickness (RC)	Insulation Thickness	
Austria	1	14	x	12	0.59	0.85	0.70	79	x	x	0.10	148	300	0.10	105	300	0.14	250	200	2012
	2	12	50	13	0.58	0.79	0.70	51	0.82	x	0.07	146	460	0.11	100	340	0.11	325	250	2008
	3	14	x	14	0.35	0.75	0.60	45	x	x	0.11	145	320	0.11	95	280	0.14	80	250	2005
	4	11.8	x	15	0.36	0.85	0.60	60	x	x	0.10	120	300	0.12	100	300	0.14	250	350	2008
	5	12	x	19	0.55	0.73	0.70	x	x	x	0.10	150	300	0.10	100	300	0.14	200	250	2008
	6	14	x	14	0.42	0.76	0.50	60	x	x	0.10	200	360	0.10	125	360	0.10	650	300	2014
Canada	7	15	x	19	0.60	0.76	0.50	60	0.80	92	0.10	120	320	0.12	100	280	0.12	290	200	2015
	8	15	x	14	0.50	0.70	0.50	50	0.85	x	0.11	120	320	0.13	100	280	0.13	305	152	2017
Deutschland	9	14	90	13	0.60	0.75	0.64	61	0.71	90	0.10	160	300	0.11	97	300	0.12	300	220	2012
	10	15	65	12	0.20	0.63	0.53	48	0.65	x	0.10	150	300	0.10	100	300	0.14	200	250	2016
Eesti	11	15	119	13	0.36	0.66	0.69	60	0.71	94	0.07	102	500	0.10	94	400	0.09	300	300	2012
Romania	12	14	110	14	0.6	0.69	0.55	60	0.67	90	0.07	120	480	0.12	80	300	0.14	410	100	2018
	13	9	67	9	0.14	0.84	0.70	62	1.00	90	0.09	80	400	0.14	120	246	0.12	200	300	2015
	14	15	83	12	0.28	0.74	0.50	51	1.3	84	0.09	60	400	0.11	120	300	0.10	400	150	2017
	15	13	80	13	0.30	0.75	0.62	62	1.05	89	0.05	140	640	0.10	80	360	0.11	500	240	2017
	16	8	83	11	0.17	0.67	0.54	50	0.79	83	0.07	120	500	0.10	80	300	0.11	500	250	2017
France	17	11	77	11	0.28	0.92	0.65	62	x	94	0.12	120	160	0.17	94	200	0.15	140	130	2017
	18	8	72	10	0.38	0.77	0.60	56	x	96	0.09	84	450	0.15	62	240	0.12	305	150	2018
	19	14	88	12	0.20	0.73	0.56	47	0.73	88	0.11	95	320	0.14	94	240	0.15	220	200	2011
	20	14	119	12	0.30	0.83	0.72	54	0.72	78	0.19	94	300	0.14	94	240	0.11	120	200	2012
Italia	21	8	95	9	0.56	0.66	0.53	47	x	83	0.11	134	320	0.12	160	240	0.13	280	400	2009
Spain	22	15	103	12	0.39	1.27	1.10	58	0.76	75	0.19	182	160	0.20	100	160	0.24	100	250	2012
United Kingdom	23	14	97	8	0.29	0.79	0.53	49	0.6	91	0.08	160	360	0.11	100	320	0.10	300	300	2015
	24	8	96	10	0.88	0.83	0.50	50	0.72	82	0.13	140	200	0.08	94	280	0.08	250	180	2015
Average		12.7	87.9	12.5	0.41	0.78	0.62	56	0.81	87	0.10	129	353	0.12	100	286	0.13	286	232	-
Passive House Criteria		≤ 15	≤ 120	≤ 10	≤ 0.6	≤ 0.8	-	≥ 50	≤ 0.8	≥ 75	≤ 0.15	-	-	≤ 0.15	-	-	≤ 0.15	-	-	-
Unit		kWh/mfa	kWh/mfa	W/m ²	h ⁻¹	W/m ² K	W/m ² K	%	W/m ² K	%	W/m ² K	mm	mm	W/m ² K	mm	mm	W/m ² K	mm	mm	Year

구 조건을 만족하는 수준인 것으로 나타났다. 이는 CLT 구조를 이 용해도 다른 패시브하우스의 열적 성능과 유사하게 구조를 구축하 는데 무리가 없으며 구조적인 기능을 향상시킬 수 있음을 확인하였 다.

사례 주택 지붕에 적용된 CLT의 평균 두께는 129mm이며, 외벽 에 적용된 CLT의 평균 두께는 100mm로 지붕이 외벽보다 29mm 두꺼운 CLT를 사용한 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 지붕이 외 벽에 비해 긴 길이의 구조재가 필요하기 때문에 구조적으로 CLT의 길이가 길어짐에 따른 처짐을 방지하기 위하여 외벽보다 두꺼운 CLT를 사용한 것으로 판단된다.

Table 2. Applicable Insulation by Structure Part

Division	Number	Roof			Exterior Wall			Basement Floor		
		Wood Fiber	EPS	Cellulose	Wood Fiber	Cellulose	Rock Wool	XPS	Foam Glass	EPS
Austria	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
Canada	7									
	8									
Deutschland	9									
	10									
Eesti	11									
Romania	12									
	13									
	14									
	15									
	16									
France	17									
	18									
	19									
	20									
Italia	21									
Spain	22									
United Kingdom	23									
	24									
Total		6	6	4	9	5	5	10	6	6

구조재 부위별로 가장 많이 적용된 단열재를 Table 2.와 같이 정 리한 결과 지붕 단열재로는 목섬유단열재(6건)와 EPS단열재(6건) 가 가장 많이 적용되고 있으며, 이외에 셀룰로오스(4건), 암면(3건), 폴리우레탄 단열재(3건)도 지붕 단열재로 사용되었다. 이는 지붕의 형태나 구조에 따라 다양한 종류의 단열재가 적용되고 있다는 특징 을 가지고 있는 것으로 나타났다. 반면 외벽의 경우 목섬유단열재(9 건)가 가장 많이 적용되었으며, 셀룰로오스(5건)와 암면단열재(5 건)도 외벽 단열재로 많이 사용된 것으로 나타났다. 이는 외벽 구조 재가 습기에 약한 목재인 특성을 고려하여 구조재가 함유한 습기나

내부로 유입된 물을 외부로 증발시킬 수 있도록 친환경적인 섬유형 단열재를 주로 사용한 것으로 판단된다. 바닥 기초 단열재로는 XPS 단열재(10건)가 가장 많이 적용되었으며, 폼글라스(6건)와 EPS단 열재(6건)도 바닥 단열재로 많이 사용된 것으로 나타났다. 이는 기 초 바닥 단열재의 경우 지면의 습기와 철근콘크리트 기초의 습기에 대해 저항할 수 있으며, 건물의 하중에 버틸 수 있을 만큼의 압축강 도를 갖는 단열재를 주로 사용한 것으로 판단된다.

3. 국외 CLT 건설 업체의 구조체 구성 분석

3.1. 사례 분석 대상

2장에서 국외 CLT 목조 패시브하우스의 건물 전반적인 에너지 성능 현황을 파악하였고, 3장에서는 CLT 목조 패시브하우스의 외 벽 및 지붕 구성 방법에 대한 분석을 통해 구조체 구성을 유형별로 제시하고자 한다. 이에 본 장에서는 현재 CLT 건축물을 설계·시공 하고 있는 유럽의 주요 CLT 건설 업체에서 적용하고 있는 외벽 및 지붕의 구성방식을 분석하고자 한다. 이에 CLT 건설 업체의 설계 디테일, 기술문서를 통해 구조체 구성을 파악하였으며, 구조체의 열 관류율은 제공된 정보와 함께 PHPP를 통해 재검증하였다. 사례 분 석 대상으로 선정된 업체는 체코의 Novatop, 스페인의 egoin, 슬로 베니아의 Lesoteka Hiše, 핀란드의 Stora Enso 4곳이며, 많은 지붕 및 외벽 구성 방식 중에서도 패시브하우스 및 현재 국내 중부지방 구 조체 단열기준인 0.15 W/m²K에 준하는 에너지 성능을 갖는 지붕 및 외벽 구조체 구성 방법을 대상으로 분석하였다. 이는 구조체의 부위 별 열관류율 0.15 W/m²K 이하 기준이 단순히 건축물의 에너지 소 요량을 줄이기 위한 단열 목적 이외에도 겨울철 실내 측 벽체에 결로 가 발생하지 않도록 하기 위한 최소한의 단열성능이기 때문이다.

3.2. 국외 CLT 업체의 구조체 조사

1) Novatop(체코)

① 지붕구성

체코의 CLT 건설 업체인 Novatop에서 건축되는 CLT 건물의 구 조체 구성을 Table 3.과 같이 분석한 결과 지붕은 기본적으로 27mm 목재판을 이용한 경량목구조 지붕을 주요 구조체로 하며, 단열 및 마 감 방법에 따라 2가지의 지붕구성을 보이는 것으로 나타났다. 첫째, 지붕 서까래 사이에 목섬유단열재($\lambda = 0.040$ W/mK, 240mm)를 채우고 목섬유 보드($\lambda = 0.041$ W/mK, 60mm)를 덮어 단열층을 형 성하고, 투습방수지와 교차하여 설치한 목재틀 위에 기와를 얹어 통 기지붕을 형성함으로써 열관류율 0.15 W/m²K의 지붕을 구축한다. 둘째, 지붕 서까래 사이에 단열재를 충전하지 않고 서까래 위에 방습 지를 설치한 후 EPS단열재를 부착하여 단열층을 형성한다. 단열재 위에는 방수시트를 설치한 후 흙을 채워 마감함으로써 열관류율 0.15 W/m²K의 지붕을 구축한다. 추가적으로 CLT 구조체의 실내 측면에 목재틀을 설치하고 암면단열재($\lambda = 0.040$ W/mK, 40mm, 60mm, 80mm, 120mm)를 충전한 후 방화석고보드로 마감하여 단 열을 보강함으로써 최고 열관류율 0.08 W/m²K의 지붕을 구축할 수 있다.

Table 3. Structure Component of Nobatop

Roof Component Designs						
R 1	Roofing	20	20			(mm)
	Timber Batten	30	30			
	Timber Batten/Breather Membrane	30	30			
	Wood Fiber board	60	80			
	Timber board	-	27			
	Wood Fiber/Rafter	240	186			
	Timber board	27	27			
U-value	0.15	0.15			(W/m ² K)	
R 2	Soil Filling	-				(mm)
	Waterproof Membrane	2				
	EPS	220				
	Vapor Barrier	3				
	Timber board	27				
	Rafter	146				
	Timber board	27				
U-value	0.15			(W/m ² K)		
External Wall Component Designs						
W 1-1	Plaster	8	8	8	8	(mm)
	Wood Fiber	300	300	300	300	
	CLT	62	84	84	124	
	Gypsum board	10	10	-	10	
	U-value	0.13	0.13	0.13	0.12	
W 1-2	Plaster	8	8	8	8	(mm)
	EPS	300	300	300	300	
	CLT	62	84	84	124	
	Gypsum board	10	10	-	-	
	U-value	0.12	0.12	0.12	0.11	
W 2	Plaster	8	8	8	8	(mm)
	Wood Fiber board	20	20	20	20	
	Wood Fiber/I-Joist	280	280	280	280	
	CLT	62	84	84	124	
	Gypsum board	10	10	-	-	
U-value	0.12	0.12	0.12	0.12	(W/m ² K)	
W 3-1	Timber Cladding	20	20	20	20	(mm)
	Timber Batten/Breather Membrane	30	30	30	30	
	Wood Fiber/I-Joist	300	300	300	300	
	CLT	62	84	84	124	
	Gypsum board	10	10	-	-	
U-value	0.12	0.12	0.12	0.12	(W/m ² K)	
W 3-2	Timber Cladding	20	20	20	20	(mm)
	Timber Batten/Breather Membrane	30	30	30	30	
	Wood Fiber /Timber Batten	60	60	60	60	
	Wood Fiber /Timber Batten	240	240	240	240	
	CLT	62	84	84	124	
	Gypsum board	10	10	-	-	
U-value	0.12	0.12	0.12	0.12	(W/m ² K)	

② 외벽 구성

외벽은 기본적으로 62mm, 84mm, 124mm 두께의 CLT 내력벽을 주요 구조체로 하며, 단열 및 마감 방법에 따라 3가지의 외벽 구성을 보이는 것으로 나타났다. 첫째, CLT 구조체 외부에 경질의 EPS ($\lambda = 0.039$ W/mK, 300mm) 목섬유단열재 목섬유단열재($\lambda = 0.043$ W/mK, 300mm)를 부착하고 단열재 표면을 미장 마감(외단열 미장 마감 공법)함으로써 열관류율 0.12 W/m²K의 외벽을 구축한다. 둘째, CLT 구조체 외부에 I-joist를 수직 방향으로 설치한 후 목섬유 보드($\lambda = 0.050$ W/mK, 20mm)를 덮어 박스 공간을 형성하

고 잘게 잘린 목섬유단열재($\lambda = 0.040$ W/mK, 280mm)를 Blow in 장비를 이용해 충전(Blow in 단열 방식)하여 단열층을 형성한다. 외부 마감은 목섬유 보드 위 미장 마감을 함으로써 열관류율 0.12 W/m²K의 외벽을 구축한다. 셋째, CLT 구조체 외부에 I-joist나 수직, 수평방향으로 목재틀을 교차하여 고정시킨 후 목섬유단열재($\lambda = 0.040$ W/mK, 300mm)를 채워 단열층을 형성한다. 단열재에는 물이 들어가지 않고 습기가 증발할 수 있도록 투습방수지와 통기층을 형성하고 외부는 목재 목섬유단열재로 마감함으로써 열관류율 0.12 W/m²K의 외벽을 구축한다. 추가적으로 CLT 구조체의 실내 측면에 목재 틀을 설치하고 암면 또는 목섬유단열재($\lambda = 0.040$ W/mK, 50mm)를 충전한 후 석고보드로 마감하여 단열을 보강함으로써 최고 열관류율 0.10 W/m²K의 외벽을 구축할 수 있다.

2) Stora Enso(핀란드)

① 지붕구성

핀란드의 CLT 건설 업체인 Stora Enso에서 건축되는 CLT 건물의 구조체 구성을 Table 4.와 같이 분석한 결과 지붕은 140mm 두께의 CLT를 주요 구조체로 하며 외부에 기밀층을 형성하고 경질의 EPS($\lambda = 0.038$ W/mK, 240mm) 또는 목섬유단열재($\lambda = 0.039$ W/mK, 240mm)를 설치하여 단열층을 형성한다. 단열재 위에 투습방수지를 설치하고 목재 틀로 통기층을 만들어 기와로 마감함으로써 열관류율 0.13 W/m²K의 지붕을 구축한다. 추가적으로 CLT 구조체의 실내 측면에 목재틀을 설치하고 암면단열재($\lambda = 0.035$ W/mK, 50mm)를 충전한 후 방화석고보드로 마감하여 단열을 보강함으로써 최고 열관류율 0.11 W/m²K의 지붕을 구축할 수 있다.

Table 4. Structure Component of Stora Enso

Roof Component Designs						
R 1	Roofing	20				(mm)
	Timber Batten	30				
	Timber Batten/Breather Membrane	30				
	EPS or Wood Fiber	120				
	EPS or Wood Fiber	120				
	Vapor Barrier	-				
	CLT	140				
	Gypsum board	15				
U-value	0.13				(W/m ² K)	
External Wall Component Designs						
W 1	Plaster	5				(mm)
	EPS	200	260			
	CLT	100	120	100	120	
	Gypsum board	13				
	U-value	0.13	0.13	0.11	0.10	
W 2	Timber Cladding	25				(mm)
	Timber Batten/Breather Membrane	30				
	Wood Fiber	120				
	Wood Fiber	120				
	CLT	120				
U-value	0.15				(W/m ² K)	
W 3	Timber Cladding	25				(mm)
	Timber Batten/Breather Membrane	30				
	Mineral Wool/Timber Batten	130				
	Mineral Wool/Timber Batten	130				
	CLT	100	120			
	Gypsum board	13				
U-value	0.13	0.13			(W/m ² K)	

② 외벽 구성

외벽은 기본적으로 100mm, 120mm 두께의 CLT 내력벽을 주요 구조체로 하며, 단열 및 마감 방법에 따라 3가지의 외벽 구성을 보이는 것으로 나타났다. 첫째, CLT 구조체 외부에 경질의 EPS단열재 ($\lambda = 0.031 \text{ W/mK}$, 200mm단열)를 부착하고 단열재 표면을 미장 마감함으로써 열관류율 $0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축한다. 둘째, CLT 구조체 외부에 경질의 목섬유단열재($\lambda = 0.038 \text{ W/mK}$, 240mm 단열)를 부착한 후 투습방수지와 통기층을 형성하고 외부는 목재 목섬유단열재로 마감함으로써 열관류율 $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축한다. 셋째, CLT 구조체 외부에 수직, 수평 방향으로 교차하여 설치한 목재를 사이에 압면단열재($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$, 260 mm)를 채워 단열층을 형성한다. 단열재에는 물이 들어가지 않고 습기가 증발할 수 있도록 투습방수지와 통기층을 형성하고 외부는 목섬유단열재로 마감함으로써 열관류율 $0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축한다. 추가적으로 CLT 구조체의 실내 측면에 목재틀을 설치하고 압면단열재($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$, 50mm)를 충전한 후 OSB합판과 방화 석고보드로 마감하여 단열을 보강함으로써 최고 열관류율 $0.09 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축할 수 있다.

3) egoín(스페인)

① 지붕구성

스페인의 CLT 건설 업체인 egoín에서 건축되는 CLT 건물의 구조체 구성을 Table 5.와 같이 분석한 결과 지붕은 135mm 두께의 CLT를 주요 구조체로 하며 외부에 기밀층을 형성하고 목재서까래를 설치하여 목섬유단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 150mm)를 충전한 후 방수지를 설치하여 단열재 내부로 물이 유입되는 것을 막는다. 그 위에 XPS단열재($\lambda = 0.035\text{W/mK}$, 80mm)를 추가적으로 설치하여 단열성능을 높이고 EPDM 방수시트를 설치하여 지붕의 방수층을 형성한다. 빗물이 방수층을 따라 원활하게 배수될 수 있도록 지붕에 자갈을 채움으로써 50mm 두께의 배수층을 형성하고 지붕은 옥상녹화로 마감함으로써 열관류율 $0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 지붕을 구축한다. 추가적으로 CLT 구조체의 실내 측면에 목재 틀을 설치하고 목섬유단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 50mm)를 충전한 후 방화 석고보드로 마감하여 단열을 보강함으로써 최고 열관류율 $0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 지붕을 구축할 수 있다.

② 외벽 구성

외벽은 기본적으로 90mm, 100mm 두께의 CLT 내력벽을 주요 구조체로 하며, 단열 및 마감 방법에 따라 2가지의 외벽 구성을 보이는 것으로 나타났다. 첫째, CLT 구조체 외부에 경질의 목섬유단열재($\lambda = 0.041 \text{ W/mK}$, 140mm)를 부착하고 단열재 표면을 미장 마감(외단열 미장 마감 공법)함으로써 열관류율 $0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축한다. 둘째, CLT 구조체 외부에 수직, 수평 방향으로 교차하여 설치한 목재 틀 사이에 목섬유단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 130mm)를 채워 단열층을 형성한다. 단열재에는 물이 들어가지 않고 습기가 증발할 수 있도록 투습방수지와 통기층을 형성하고 외부는 목섬유단열재로 마감함으로써 열관류율 $0.21 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축한다. 추가적으로 CLT 구조체의 실내 측면에 목재 틀을 설치하고 목섬유단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 50mm)를 충전한 후 방화석고보드로 마감하여 단열을

보강함으로써 최고 열관류율 $0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축할 수 있다.

Table 5. Structure Component of egoín

Roof Component Designs			
R 1	Green Roof	60	(mm)
	Gravel	50	
	EPDM Waterproof Membrane	-	
	XPS	80	
	Membrane	9	
	Wood Fiber/Timber Batten	150	
	Vapor Barrier	-	
	CLT	135	
U-value	0.14	(W/m ² K)	
External Wall Component Designs			
W 1	Plaster	4	(mm)
	Wood Fiber	140	
	CLT	100	
	U-value	0.23	
W 2	Timber Cladding	20	(mm)
	Timber Batten/Breather Membrane	30	
	Wood Fiber/Timber Batten	50	
	Wood Fiber/Timber Batten	80	
	CLT	100	
	Gypsum board	25	
U-value	0.21	(W/m ² K)	

4) Lesoteka Hiše(슬로베니아)

① 지붕구성

슬로베니아의 CLT 건설 업체인 Lesoteka Hiše에서 건축되는 CLT 건물의 구조체 구성을 Table 6.과 같이 분석한 결과 지붕은 구조목을 이용한 경량목구조를 기본 구조체로 한다. 지붕 서까래 사이에 압면 또는 목섬유단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 180mm)를 채우며 서까래 하부에 목재 틀을 설치하고 사이공간에 압면 또는 목섬유단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 200mm)를 추가로 설치하여 단열층을 형성한 후 실내 측에 기밀층을 형성한다. 서까래 상부는 목재판으로 덮고 투습방수지를 설치한 후 목재틀로 통기층을 만들어 기와로 마감함으로써 열관류율 $0.09 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 지붕을 구축한다.

Table 6. Structure Component of Lesoteka Hiše

Roof Component Designs					
R 1	Roofing	20	20	(mm)	
	Timber Batten	40	40		
	Timber Batten /Breather Membrane	50	50		
	Timber board	19	19		
	Rock Wool or Wood Fiber /Rafter	180	180		
	Rock Wool or Wood Fiber /Timber Batten	60	200		
	Vapor Barrier	-	-		
	Timber Batten (Duct)	25	25		
	Gypsum board or Timber board	15	15		
	U-value	0.15	0.09		(W/m ² K)
External Wall Component Designs					
W 1	Plaster	6	6	6	(mm)
	Rock Wool	180	-	240	
	Wood Fiber	-	180	-	
	CLT	100	100	100	
	Timber Batten	25	25	25	
	Gypsum board	15	15	15	
	U-value	0.18	0.18	0.14	

② 외벽 구성

외벽은 기본적으로 100mm 두께의 CLT 내력벽을 주요 구조체로 하며, 외부에 경질의 압면 또는 목섬유단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 240mm 단열)를 부착하고 단열재 표면을 미장 마감(외단열 미장 마감 공법)함으로써 열관류율 $0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축한다. 추가적으로 CLT 구조체의 실내 측면에 목재 틀을 설치하고 압면단열재($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$, 60mm)를 충전한 후 석고보드나 목재판으로 마감하여 단열을 보강함으로써 최고 열관류율 $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 외벽을 구축할 수 있다.

3.3. 국외 CLT 업체의 구조체 분석

1) 지붕 구성

유럽에 있는 CLT 건설 업체 4곳의 지붕 구성을 분석한 결과 주요 구조체의 종류(CLT 또는 경량목구조), 단열 방법(경질의 단열재 부착 또는 목재틀 사이에 단열재 충전), 마감 방법(통기층이 있는 기와 마감 또는 옥상활용(녹화) 시스템)에 따라 Table 7.과 같이 5가지의 계획 유형으로 나눌 수 있었다.

- ① 통기층이 있는 기와 마감 + 투습방수지 + 목재판 + 서까래/압면단열재 + 목재 틀/압면단열재 + 방습지
- ② 통기층이 있는 기와 마감 + 투습방수지 + 목섬유보드 + 목재판 + 서까래/목섬유단열재 + 목재판
- ③ 통기층이 있는 기와 마감 + 투습방수지 + 경질의 EPS 또는 목섬유단열재 + 방습지 + CLT

- ④ 옥상녹화 시스템 + 방수시트 + EPS단열재 + 방습지 + 목재판 + 서까래 + 목재판
- ⑤ 옥상녹화 시스템 + 방수시트 + XPS단열재 + 투습방수지 + 목재 틀/목섬유단열재 + 방습지 + CLT

주요 구조체가 경량목구조인 경우 실내 측에 기밀층을 형성하고, CLT의 경우 Fig. 1.과 같이 실외 측에 기밀층을 설치하는 특징을 나타냈다. 이는 경량목구조의 경우 얇은 판재를 사이에 섬유형 단열재가 채워지는 만큼 실내의 습기가 얇은 판재의 틈새를 통해 단열재 내부로 유입되지 않도록 실내 측에 기밀층을 형성하는 것이 일반적이다. 반면 100mm 이상 두께의 CLT의 경우 실내의 습기가 투과할 수 없기 때문에 CLT 판과 판 사이의 연결 부위를 부분적으로 테이핑 하는 방식을 많이 사용하고 있으며, 실내의 경우 부재와 부재가 맞닿는 부분이 많아 기밀 시공이 어려운 만큼 시공 편의상 실외 측면을 따라 기밀층을 형성하는 것으로 판단된다.

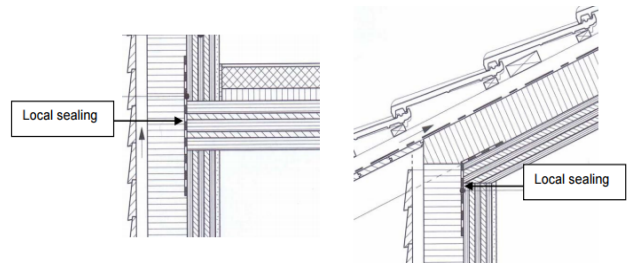


Fig. 1. Section of Cross Laminated Timber element to show the structure (Kolb 2008)

Table 7. Type of CLT Passive House Structure Component

		Ventilated Facade with Roofing			Green Roof	
Roof (Exterior)		Roofing / Timber Batten / Timber Batten/Breather Membrane			Soil Filling / Gravel / Waterproof Membrane	
		Timber board	Wood Fiber board	EPS or Wood Fiber	EPS / Vapor Barrier	XPS / Membrane
		Rock Wool / Rafter	Timber board	EPS or Wood Fiber	Timber board	Wood Fiber / Timber Batten
		Rock Wool/Timber Batten	Wood Fiber / Rafter	Vapor Barrier	Rafter	Vapor Barrier
		Vapor Barrier	Timber board	CLT	Timber board	CLT
(Interior)						
		Ventilated Facade with Timber Cladding			EIFS (Exterior Insulation Finishing System)	
Wall (Exterior)		Timber Cladding / Timber Batten / Breather Membrane			Plaster	
		Wood Fiber, Rock Wool/Timber Batten (Horizontal)	Wood Fiber / I-Joist (Vertical)	Wood Fiber, EPS, Rock Wool	Wood Fiber board	Wood Fiber, EPS, Rock Wool
		Wood Fiber, Rock Wool/Timber Batten (Vertical)			Wood Fiber / I-Joist (Vertical)	
	CLT	CLT	CLT	CLT	CLT	
(Interior)						

2) 외벽 구성

유럽에 있는 CLT 건설 업체 4곳의 외벽 구성을 분석한 결과 단열 방법(경질의 단열재 부착 또는 목재 틀 사이에 단열재 충전) 및 마감 방법(통기층이 있는 목재 사이딩 마감 또는 외단열 미장 마감)에 따라 Table 7.과 같이 5가지의 계획 유형으로 나눌 수 있었다.

- ① 통기층이 있는 목재 사이딩 마감 + 투습방수지 + 목재 틀/암면 또는 목섬유단열재 + 목재 틀/암면 또는 목섬유단열재 + CLT
- ② 통기층이 있는 목재 사이딩 마감 + 투습방수지 + I-joist/목섬유단열재 + CLT
- ③ 통기층이 있는 목재 사이딩 마감 + 투습방수지 + EPS 또는 암면 또는 목섬유단열재 + CLT
- ④ 외단열 미장 마감 + 목섬유보드 + I-Joist/목섬유단열재 + CLT
- ⑤ 외단열 미장 마감 + EPS 또는 암면 또는 목섬유단열재 + CLT

지붕의 경우 지붕의 경량화를 위해 경량목구조와 CLT를 선택적으로 적용한 반면 외벽의 경우 중량형의 CLT를 모두 주요 구조체로 사용함으로써 경량목구조의 내진, 내화, 방음, 축열 성능 등의 단점을 보완한 것으로 나타났다. 현재 건설된 CLT 패시브하우스 사례와 주요 CLT 건설 업체의 구조체 구성을 종합적으로 분석한 결과 국외 CLT 패시브하우스는 공통적으로 에너지 성능뿐만 아니라 친환경적인 시스템이 적극적으로 반영되었다. 단열재 종류로는 목섬유단열재와 암면단열재가 가장 광범위하게 적용되었으며, 지붕마감의 종류로 옥상녹화가 다수 적용되었다. 이에 현재 국외에서 CLT를 주요 구조체로 패시브하우스 수준을 만족하는 주택이 건설되고 있으며, 친환경적인 건축 재료 및 기술을 적극적으로 접목함으로써 지속 가능한 건축을 실현해나가고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

CLT는 중량구조로 경량목구조에 비해 내진, 내화, 방음, 축열 성능 등이 강하고, 짧은 국내 목재들을 집성하여 사용할 수 있기 때문에 국외 목재를 국산 목재로 활용할 수 있는 큰 장점이 있다. 또한 세계적인 친환경 건축의 확산 추세에도 불구하고 국산 자재의 부족으로 고가의 외국산 재료를 사용할 수밖에 없는 친환경 건축분야에서 국산자재를 활용할 수 있는 좋은 분야이다. 그러나 국내 목조건축의 보급이 주로 경량목구조로 보급되어 CLT 건축기술의 개발이 시급한 상황이다.

이에 본 연구에서는 현재 건축된 국외 CLT 목조 패시브하우스들의 에너지 성능을 분석하여 국내 저에너지 건축에 자료로 활용하고자 하였다. 외국의 CLT 구조로 만들어진 패시브하우스의 사례를 조사한 결과 패시브하우스 기준과 비교할 때 약간의 난방부하가 높은 것을 제외하고 모든 요구 조건을 만족하는 수준인 것으로 나타났다. 이는 CLT 구조를 이용해도 다른 패시브하우스의 열적 성능과 유사하게 구조를 구축하는데 무리가 없으며 구조적인 기능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

또한 유럽에 있는 CLT 건설 업체 4곳의 지붕 구성을 분석한 결과

주요 구조체의 종류는 CLT 또는 경량목구조로 구성하였고, 단열 방법은 CLT에 경질의 단열재를 부착하거나 목재를 사이에 단열재를 충전하는 방식으로 나타났다. 마감 방법으로는 통기층이 있는 기와 마감을 하거나 옥상을 녹화하는 방법으로 나눌 수 있었다. 또한 외벽 구성은 CLT 위에 직접 경질의 단열재 부착하거나 목재를 사이에 단열재 충전하였고, 마감은 통기층이 있는 목재 페널 마감이나 단열재 위에 미장으로 마감하는 것으로 나타났다.

이는 CLT 구조도 일반 패시브 하우스 구조와 유사하게 이루어질 수 있다는 것을 확인하였으며, 구조체 또한 경량목구조에 비해 내진, 내화성능이 우수한 것으로 나타났다.

추후 연구에서는 다양한 구조체 구성 방법들을 대상으로 열교 및 기밀성능을 향상할 수 있는 방안을 진행하고, CLT 구조체의 접합방식과 기밀층 형성방법에 대한 연구를 진행하여 CLT 구조의 패시브 하우스 하자를 경감할 수 있는 방안을 제시하도록 할 예정이다.

Acknowledgement

이 연구는 2019년도 국토교통부 도시건축연구사업 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호:19AUDP-B146511-02).

Reference

- [1] 장성진, CLT 목조주택의 열습기 성능 평가, 숭실대학교 박사학위 논문, 2018. // (S.J. Jang, Hygrothermal Performance of CLT Wooden Houses, Soongsil University Ph.D Thesis, 2018.)
- [2] 국립산림과학원, 구조용집성판(CLT)의 국외 시장동향, 2016. // (National Forest Research Institute, Overseas Market Trend of Structural Aggregates (CLT), 2016.)
- [3] 장성진 외 3명, 국내 기후조건을 고려한 CLT 목조주택의 건물에너지 요구량 평가, 한국생활환경학회, 2018, pp.671-678. // (S.J. Jang et al., Evaluation of the Building Energy Demands of the CLT Wooden Houses according to the Korean Climatic Conditions, Korean Society of Living Environment, 2018, pp.671-678.)
- [4] 양정필, 해외 패시브하우스의 건축구조유형별 계획특성 연구, 한국생태환경건축학회, 2013, pp.15-20. // (J.P. Yang, A Study on the Planning Characteristics of Passive House by the Building Structural Types in Foreign Cases, 2013, pp.15-20.)
- [5] 이정훈, 경량목구조 패시브하우스 외피의 Hygrothermal 거동, 숭실대학교 박사학위논문, 2017. // (J.H. Lee, Hygrothermal behavior of envelope of light wooden structures for passive houses, Soongsil University Ph.D Thesis, 2017.)
- [6] 김세종 외 1명, 단열 기준에 따른 기둥-보 목조주택의 단열 상세 및 에너지 성능, 한국목재공학학회, 2015. // (S.J. Kim et al., Insulation Details and Energy Performance of Post-Beam Timber House for Insulation Standards, Journal of the Korean wood science and technology, 2015.)
- [7] 김세종 외 2명, 건물 에너지 절약요소 적용을 통한 목조주택의 에너지 성능 개선, 한국목재공학학회, 2013. // (S.J. Kim et al., Improvement of Energy Efficiency in Wood Frame House with Energy Efficient Methods, Journal of the Korean wood science and technology, 2013.)
- [8] 패시브하우스인증협회, <https://passivehouse-database.org>. // (PHI (Passive House Institute), <https://passivehouse-database.org>.)
- [9] Novatop Constructive system, 2016, pp.7-31.
- [10] Stora Enso Wood Products Building Solutions, 2012, pp.197-274.
- [11] EGO-CLT Materials & Products, 2018, pp.38-43.
- [12] LESOTEKA Masivne lesene hiše, 2016, pp.7-11.