



국산 낙엽송 CLT의 자재단계(A1-A3) 생애주기목록 구축 및 온실가스 배출특성 평가

Development of a Life Cycle Inventory and Valuation of Greenhouse Gas Emission Characteristics of Domestic Larch Cross-Laminated Timber at the Material Stage (A1-A3)

전진우* · 정택용** · 이정훈***

Jin-U Jeon* · Taek-Yong Jeong** · Jeonghun Lee***

* Main author, Graduate Student, Dept. of Environmental Materials Engineering, Chungnam National Univ., South Korea (201903005@o.cnu.ac.kr)

** Coauthor, Division of Research and Development, The Korean Woodism-City Project Research Center, South Korea (jty2533@naver.com)

*** Corresponding author, Assistant Professor, Dept. of Environmental Materials Engineering, Chungnam National Univ., South Korea (jh.lee@cnu.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: The objective of this study is to establish a life cycle inventory (LCI) database for domestically produced *Larix kaempferi* cross-laminated timber (CLT) at the material stage (A1–A3) and to quantitatively evaluate its greenhouse gas emissions and biogenic carbon storage potential. By doing so, this study aims to provide fundamental data for the environmental assessment of domestic engineered wood products and to support quantitative decision-making for timber construction and carbon-neutral building design. **Method:** The functional unit was defined as 1m³ of CLT. Primary data were collected through on-site surveys and interviews conducted at a CLT manufacturing plant to identify material and energy inputs and outputs. Based on the constructed LCI and corresponding emission factors, a life cycle assessment was performed in accordance with ISO 14040 and ISO 14044. The system boundary was limited to raw material production (A1), transportation (A2), and manufacturing (A3). In addition, the amount of biogenic carbon stored in CLT was estimated using the wood content and average carbon fraction, and subsequently converted into CO₂-equivalent values. **Result:** The results showed that the total greenhouse gas emissions at the material stage amounted to 224.76kg CO₂-eq/m³, with the manufacturing stage (A3) contributing the largest share, followed by transportation (A2) and raw material production (A1). Meanwhile, the biogenic carbon stored in CLT exhibited a substantial CO₂ storage effect, partially offsetting emissions generated during the material stage. These findings quantitatively demonstrate the potential contribution of domestic engineered wood products to reducing embodied carbon in buildings.

KEYWORD

공학목재
교차적층목재
전과정평가
탄소 저장량

Engineered Wood
Cross-Laminated Timber (CLT)
Life Cycle Assessment (LCA)
Carbon Storage

ACCEPTANCE INFO

Received Feb. 3, 2026
Final revision received Feb. 23, 2026
Accepted Feb. 27, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 선행 연구 고찰

최근 건축 분야에서는 온실가스 배출 저감을 주요 목표로 설정하고, 건축물의 전 생애주기에 걸친 환경 성능을 정량적으로 평가하기 위한 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)의 활용이 점차 확대되고 있다. 건축물 LCA는 건축물의 설계 단계부터 시공, 사용 및 폐기에 이르기까지 전과정에서 발생하는 환경부하를 체계적으로 평가하는 방법으로, 그 결과는 건축물의 환경적 성능을 판단하고 의사결정을 지원하는 핵심적인 근거로 활용된다. 이러한 건축물 단위의 LCA를 수행하기 위해서는, 건축물을 구성하는 개별 자재 및 부재의 환경 성능에 대한 성능 평가가 선행적으로 확보될 필요가 있다.

한편, 최근에는 온실가스 배출 저감과 함께 자원 순환을 고려한 지속가능한 건축 전략의 중요성도 동시에 강조되고 있다[1,2]. 이러한 흐름 속에서 목재는 재생 가능한 자원으로서, 생산 과정에서 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수하고 이를 내부에 저장하는 특성을 지닌 건축자재로 주목받고 있다[3]. 특히 구조용으로 사용되는

목재는 건축물 자재 구성에서 차지하는 비중이 크며, 재료 자체의 환경적 특성이 건축물 전체의 환경 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 점에서, LCA 관점에서 중요한 평가 대상으로 인식되고 있다.

이러한 배경 속에서 국외를 중심으로 목재 제품을 대상으로 한 환경성 평가 연구와 생애주기목록(Life Cycle Inventory, LCI) 데이터베이스 구축이 활발히 수행되어 왔다. 약 1990년대부터 목재 제품에 대한 LCI/LCA 연구가 시작되어 왔으며[4], 초기에는 가구·소비재 중심의 연구가 이루어졌지만, 건축용 목재와 구조 시스템 및 목조 건축물로 연구가 확장되는 추세이다[5]. de Serres-Lafontaine 등은 교차적층목재(CLT) 외피 시스템을 대상으로 습열 거동 분석과 전과정평가(LCA)를 결합한 환경성 평가를 수행했으며[6], Balasbaneh 등은 목재와 콘크리트를 결합한 목재-콘크리트 복합 바닥 시스템(Timber-Concrete Composite, TCC)을 대상으로 전과정평가(LCA)와 전과정비용분석(LCC)을 수행하였다[7].

반면, 국내에서는 목조 건축물의 습열 거동 및 실내 공기질 등 성능 중심의 연구가 주로 이루어져 왔으며[8,9], 전과정 관점에서 환경성을 정량적으로 평가한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 목재 제품 단위의 환경성 평가와 이를 뒷받침하는 생애주기목록(LCI) 데이터베이스 구축 연구는 아직 제한적인 수준에 머물러 있다

[10]. 권순길 등은 전과정평가 기법을 활용하여 건축용 목재 및 콘크리트의 종류별 환경영향을 비교·분석하였으며[11], 장운성 등은 국산 구조용 집성재를 대상으로 환경부하를 정량화하는 연구를 수행하였다[12]. 그러나 기존 연구의 상당수는 해외 생애주기 데이터베이스를 참조하여 분석을 수행하고 있으며, 목재 제품에 내재된 탄소 저장 효과를 전과정평가에 명시적으로 반영하지 않은 한계를 지닌다.

1.2. 연구 목적 및 범위

본 연구의 목적은 국산 낙엽송을 원료로 생산된 교차적층목재(Cross-Laminated Timber, CLT)를 대상으로, 자재단계에서의 생애주기목록(Life Cycle Inventory, LCI)을 구축하고 온실가스 배출특성을 정량적으로 분석하는 데 있다. 국내에서 생산되는 CLT 제품에 대한 환경성 데이터는 아직 충분히 축적되지 않았으며, 현재는 수입 CLT를 대상으로 구축된 환경성 데이터가 주로 활용되고 있는 실정이다. 특히 실제 국산 목재를 원료로 하는 CLT 제품을 대상으로, 생산 공정을 반영한 자재단계 LCI 연구는 제한적으로 수행되어 왔다. 이에 본 연구는 국산 낙엽송 CLT를 대상으로 한 사례 연구를 통해 기초 환경성 데이터를 제시하고자 한다.

본 연구는 제품 단위 관점에서 CLT의 자재단계에서 발생하는 온실가스 배출량을 평가하는 것을 범위로 하며, 이는 원자재가 생산되어 운송된 후 공장에서 제품 단위로 생산되기까지의 과정을 의미한다. 건축물 적용 이후의 시공, 사용 및 폐기 단계는 불확실성이 크고 연구 범위를 벗어나는 것으로 판단하여 본 연구에서는 고려하지 않았다. 또한 본 연구는 단일 생산시설을 대상으로 수행된 사례 연구로서, 결과의 일반화를 목적으로 하기보다는 자재단계에서의 배출 구조와 특성을 분석하고, 향후 국내 CLT 환경성 데이터의 축적과 일반화를 위한 기초 자료를 제공하는 데 목적을 둔다.

아울러 본 연구에서는 국산 낙엽송으로 생산된 CLT에 포함된 목재의 생물기원 탄소 저장량을 함께 산정하고, 이를 자재단계 온실가스 배출량과 비교하여 제시함으로써 생물기원 탄소 저장량 고려 여부에 따른 결과 차이를 검토한다. 이를 통해 국산 낙엽송 CLT의 자재단계 온실가스 배출 특성을 보다 종합적으로 이해할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 분석 대상 및 시스템 경계

본 연구의 분석 대상은 국산 낙엽송을 원료로 생산된 교차적층목재(CLT)이며, 단일 생산시설을 기반으로 한 사례 연구로 수행되었다. CLT는 목재 판재를 섬유 방향이 서로 직교하도록 교차적층하여 제작된 공학목재 제품으로, 목재의 이방성을 보완하고 구조적 강도와 치수 안정성을 향상시킨 재료이다[6]. CLT는 판상 부재로서 하중을 면 단위로 전달할 수 있어, 벽체, 바닥 및 지붕과 같은 건축물의 주요 구조 요소에 적용되고 있다. 이러한 특성으로 인해 CLT는 중·고층 목조건축물이나 대형 목조건축물에서 핵심적인 구조 재료로 활용되고 있다.

CLT의 활용은 국외를 중심으로 지속적으로 확대되고 있으며, 다



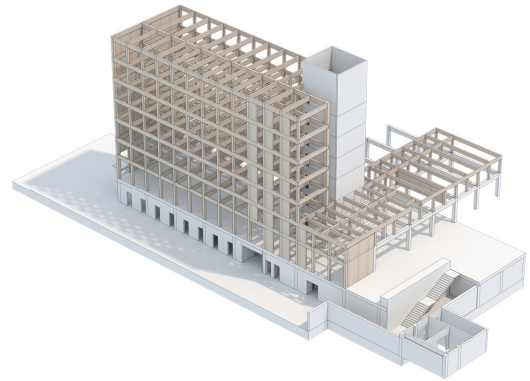
a) Han Green CLT Building (Youngju)



b) Forest Bioresource Research Division Research Building (Suwon)



c) National Forest Welfare Education Center (Daejeon)



d) Perspective view of the National Forest Welfare Education Center

Fig. 1. Application examples of cross-laminated timber (CLT) in major public buildings in South Korea [15,16]

층 목조건축 사례가 증가하는 추세이다[13,14]. 대표적인 사례로는 노르웨이에 건설된 Mjøstårnet (18층, 약 85.4m)와 캐나다 밴쿠버에 위치한 Brock Commons Tallwood House (18층, 약 53m)가 있다. Fig. 1.과 같이 국내에서도 CLT를 적용한 건축 사례가 점차 증가하고 있으며, 공공 건축물을 중심으로 실증적 활용이 이루어지고 있다[17]. 대전광역시 서구에 위치한 산림복지종합교육센터(7층, 28m)는 국내 최고층 CLT 적용 사례로, CLT의 구조적 적용 가능성

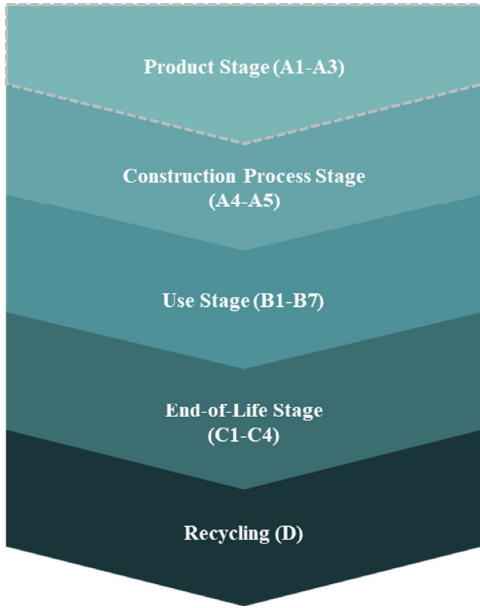


Fig. 2. Product life cycle stages

을 보여주는 사례로 평가된다.

이와 같이 CLT는 구조적 성능과 시공 효율성을 동시에 확보할 수 있는 대표적인 공학목재로서, 건축 분야에서의 활용 범위가 점차 확대되고 있다. 따라서 CLT를 대상으로 한 환경성 평가, 특히 생산 단계에서의 환경부하를 정량적으로 분석하는 생애주기평가 연구는 목조건축물의 환경적 특성을 이해하고 합리적인 재료 선택을 지원하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

제품의 생애주기 흐름은 ISO 14040 및 ISO 14044에서 제시하는 전과정 관점에 따라 구성되며, 건축자재의 경우 EN 15804에서 정의한 모듈 체계를 통해 자재단계(A1-A3), 시공단계(A4-A5), 운영단계(B1-B5), 폐기단계(C1-C4) 그리고 시스템 경계 외 재생단계(D)로 구분된다(Fig. 2). 본 연구에서는 이 중 자재단계(A1-A3)를 시스템 경계로 설정하여 데이터를 수집하고 환경영향 평가를 수행하였다. 이는 A1-A3 단계가 건축물 설계 단계에서 재료 선택 및 대안 비교를 위해 직접적으로 활용 가능한 환경성 정보를 제공하는 핵심 범위이기 때문이다.

2.2. 기능 단위 설정 및 데이터 수집 방법

본 연구의 기능 단위는 1m³ CLT로 설정하였다. 모든 투입물 및 산출물 데이터는 해당 기능 단위를 기준으로 환산하여 분석을 수행하였다. 기능 단위 환산을 위해 CLT의 함수율은 8%, 밀도는 450kg/m³을 기준 조건으로 설정하였으며, 해당 조건은 분석 대상 생산시설에서 제공된 제품 정보를 바탕으로 정의하였다.

데이터 수집은 국산 낙엽송 CLT를 생산하는 공장을 대상으로 2025년에 수행한 현장 조사 및 관계자 인터뷰를 통해 이루어졌으며, 조사 시점에서 확인 가능한 항목에 대해서는 1차 데이터를 우선적으로 확보하였다. 수집된 데이터는 현장 조사 당시의 해당 생산시설의 정상적인 운영 조건을 반영하는 범위 내에서 정리되었다. 조사 대상 생산시설에서는 CLT 외에도 GLT 등 다양한 공학목재 제품이 합

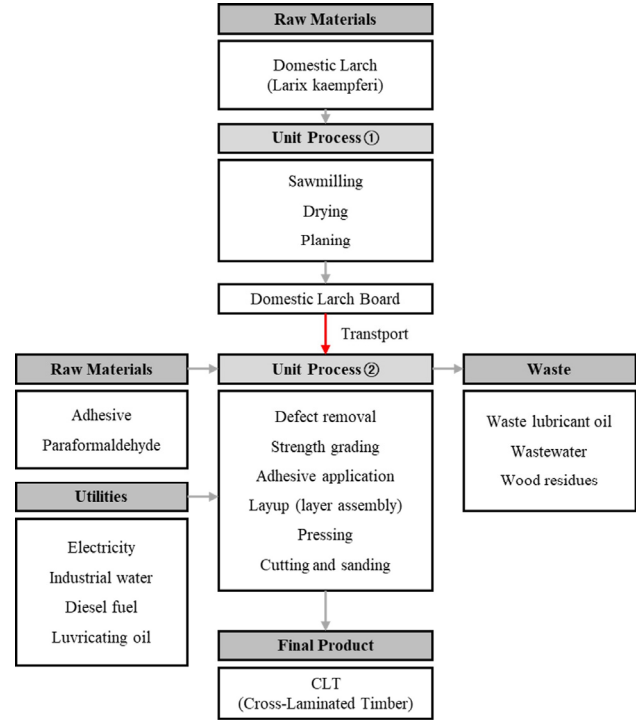


Fig. 3. Manufacturing process flow of cross-laminated timber (CLT)

계 생산되고 있어, 전기 및 가스 등 유틸리티 사용량을 개별 제품 단위로 정량화하는 데에는 공정 특성상 한계가 존재하였다.

이에 따라 CLT 제조에 직접적으로 투입되는 목재 및 접착제 등의 원재료 항목 및 물량은 현장 조사를 통해 확인된 개별 계측값을 적용하였으며, 다수의 제품이 동시에 생산되는 공정에서 발생하는 유틸리티 사용량은 국제 LCI DB인 Ecoinvent의 ‘cross-laminated timber production’을 기반으로 한 2차 데이터를 활용하여 기능 단위 기준으로 환산하였다.

또한 본 연구에서는 현장 조사 및 관계자 인터뷰를 통해 확인된 CLT 제조 공정을 바탕으로 공정 흐름도를 작성하였으며, 이를 데이터 수집 범위 및 생애주기 목록 구성의 기준으로 활용하였다(Fig. 3). 원재료인 국산 낙엽송은 수확 후 제재 및 가공을 거쳐 낙엽송 보드 형태로 생산되며, 이후 CLT 제조 공장으로 운송된다. 제조 공정에서는 웅이 및 갈라짐 등 결점을 제거한 후 등급 구분을 통해 적층 배치를 결정한다. 이후 접착제를 도포하여 적층 및 냉압 공정을 거쳐 패널 형태로 성형하며, 최종적으로 재단 및 샌딩 공정을 거친 후 포장·출고된다. 해당 공정 흐름은 자재단계(A1-A3)에 해당하는 원자재 공급, 운송 및 제조 공정을 순차적으로 정리한 것이다.

2.3. 생애주기목록 구축 및 온실가스 배출량 산정 원칙

본 연구에서는 수집된 모든 데이터는 2.2절에서 정의한 기능 단위를 기준으로 환산하여 생애주기목록(LCI)을 구축하였다. 생애주기 목록은 국산 낙엽송 CLT의 생산공정을 중심으로 투입물과 산출물로 구성하였으며, 추가로 원자재 운송과정에 대한 데이터도 포함하였다. 운송 과정은 원재료인 국산 낙엽송의 생산지, 낙엽송 보드 가공 공장, 그리고 CLT 생산 공장의 위치를 고려하여 설정하였으며,

각 단계 간 운송 거리는 해당 지점 간의 실제 이동 거리를 기준으로 산정하였다. 운송 과정에서의 물량은 각 공정 단계별 투입 원자재의 중량을 기준으로 적용하였다.

국산 낙엽송 원자재는 주로 강원도 지역에 분포한 낙엽송 군락지에서 생산되며, 이후 중부권에 위치한 목재 유통 및 가공 시설을 거쳐 CLT 제조 공장으로 공급되는 것으로 조사되었다. 낙엽송 원자재의 조달은 다수의 공급업체를 통해 이루어지나, 수급 시기 및 거래 비중이 고집되어 있지 않아 모든 공급 경로를 개별적으로 반영하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 현장 조사 및 관계자 인터뷰를 통해 확인된 주요 거래 비중을 차지하는 공급 경로를 기준으로 대표 운송 경로를 설정하였으며, 해당 경로를 기반으로 운송 거리 및 물량을 산정하여 생애주기목록에 반영하였다. 한편, 집착제 및 기타 부자재의 경우 생산 공장 인근 지역에서 조달되는 것으로 조사되었으며, 개별 공급처에 따른 상세 운송 경로를 모두 반영하기 어렵다는 점을 고려하여, 동일 권역 내 운송을 가정하여 국내 환경성적표지(EPD) 작성 지침에서 제시하는 운송거리를 적용하였다. 이에 따라 목재 원자재와 달리 기타 자재의 운송 거리는 근교 운송을 전제로 설정하여 생애주기목록에 포함하였다.

구축된 생애주기목록을 바탕으로, 자재단계(A1-A3)의 온실가스 배출량은 단계별 산정식에 따라 계산하였으며, 해당 산정식은 (Eq. 1)~(Eq. 3)에 제시하였다.

$$GWP_{A1} = \sum (M_i \times EF_i) \quad (Eq. 1)$$

$$GWP_{A2} = \sum (M_i \times D_i \times EF_t) \quad (Eq. 2)$$

$$GWP_{A3} = \sum (M_j \times EF_j) \quad (Eq. 3)$$

여기서, M_i 는 CLT 제조에 투입되는 원재료 i 의 물량(kg 또는 m^3)을 의미하며, EF_i 는 해당 원자재 i 에 대한 온실가스 배출계수(kg CO_2 -eq/unit)이다. D_i 는 제품 i 의 운송 거리(km), EF_t 는 운송 수단 t 에 따른 온실가스 배출계수(kg CO_2 -eq/ton·km)를 의미한다. 또한, M_j 는 제조 공정에 사용되는 유틸리티 j 의 사용량(kWh, L 등), EF_j 는 해당 유틸리티에 대응하는 온실가스 배출계수(kg CO_2 -eq/unit)를 나타낸다.

A1 단계의 온실가스 배출량은 CLT 제조에 투입되는 원재료별 물량에 해당 원재료의 온실가스 배출계수를 적용하여 산정하였다. A2 단계의 배출량은 원자재 및 부자재의 운송 과정에서 발생하는 환경 부하를 고려하여, 운송수단에 따른 배출계수와 운송량 및 운송 거리를 기반으로 산정하였다. A3 단계의 배출량은 제조 공장에서 사용되는 전기 및 연료 등 유틸리티 사용량에 해당 유틸리티의 배출계수를 적용하여 산정하였다.

본 연구에서 활용한 배출계수 데이터베이스의 항목과 출처는 Table 1.에 정리하였다. 생애주기목록(LCI)은 투입물 및 산출물의 물량 정보를 제공하므로, 이를 온실가스 배출량으로 환산하기 위해서는 각 항목에 대응하는 온실가스 배출계수의 적용이 필요하다. 이에 본 연구에서는 원자재, 유틸리티 및 운송 등 물질 및 흐름별로 적용된 배출계수 데이터베이스의 종류와 데이터셋 명칭을 명확히 제시하였다. 이때 온실가스 배출계수는 국내 환경성적표지(EPD) 및 관련 국내 데이터베이스를 우선적으로 적용하였으며, 국내 자료가 존재하지 않거나 적용이 어려운 경우에 한하여 국제 LCI 데이터베이스를 보완적으로 활용하였다.

2.4. 목재 내 탄소 저장량 산정 방법

목재는 성장 과정에서 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하고, 이를 탄소 형태로 조직 내에 저장하는 특성을 가진다. 전과정평가에서는 ISO 14040 및 ISO 14044에 따라 이러한 목재 내 저장된 탄소를 생물기원 탄소(biogenic carbon)로 정의하고, 화석연료 기원 탄소와 구분하여 보고한다[18].

본 연구에서는 국산 낙엽송 CLT에 사용된 목재에 저장된 생물기원 탄소를 산정 대상으로 설정하였다. 목재 내 생물기원 탄소 저장량은 기능 단위 기준 CLT 제품의 목재 함량을 기준으로 평균 탄소 함량

Table 2. Density and carbon content of wood products

No.	Item	Density (kg/m ³)	Carbon fraction
1	Sawn wood (Mixed)	458	0.5
2	Sawn wood (Coniferous)	450	0.5
3	Sawn wood (Non-coniferous)	560	0.5
4	Fiberboard	691	0.427
5	Particleboard	596	0.451
6	Plywood	542	0.493

Table 1. List of LCI database items and sources of emission factors used

Material/Flow	Database category	Database name
CLT production	Ecoinvent v3.10	cross-laminated timber production cross-laminated timber Cutoff, U
Lubricating oil	Ecoinvent v3.10	lubricating oil production lubricating oil Cutoff, U
Adhesive	The International EPD System	EPD-IES-0023088:001
Sawn timber	National Institute of Forest Science (Korea)	Sawn timber production
Paraformaldehyde	Korean Environmental Product Declaration (Korean EPD)	Paraformaldehyde (37%)
Diesel		Diesel fuel
Electricity		Electricity
Process water		Industrial water
Municipal solid waste		Municipal solid waste incineration
Waste oil		Designated waste incineration
Waste wood		Waste wood recycling
Transport process		Road freight transport (truck)

계수를 적용하여 탄소량을 산정한 후, 이산화탄소 환산계수(44/12)를 적용하여 이산화탄소 등가량으로 변환하였다. 해당 산정 과정은 (Eq. 4)에 나타내었다. 목재의 탄소 함유율(Carbon Fraction, CF)은 수종에 따라 다소 상이할 수 있으나[19], 본 연구에서는 ‘목재제품 탄소 저장량 산정 지침’의 Table 2.에 의거하여 침엽수 제재목의 기준값인 0.5를 적용하였다[20]. 이 값은 주요 목재 전과정평가 및 환경성적표지 지침에서 통용되는 대푯값이며, 국내 기준에서도 ‘탄소 저장량 표시제도’에 따라 집성재 및 난연 목재 등의 탄소 저장량 산정 시 제재목과 동일한 계수를 준용하고 있다.

$$C_{storage} = M_{wood} \times f_C \times \frac{44}{12} \quad (\text{Eq. 4})$$

$C_{storage}$: biogenic carbon storage in wood product (kg CO₂)

M_{wood} : mass of wood used in the product (kg)

f_C : carbon fraction of wood

$\frac{44}{12}$: CO₂ to C molecular weight conversion factor

산정된 생물기원 탄소 저장량은 자재단계(A1-A3) 온실가스 배출량과 구분하여 정량화하였다. 본 연구에서는 생물기원 탄소 저장량을 자재단계 온실가스 배출량을 직접적으로 상쇄하는 항목으로 처리하지 않고, 자재단계에서 발생한 총 온실가스 배출량과 함께 고려하여 순 온실가스 배출량을 산정하기 위한 계산 요소로 활용하였다. 다만, 본 연구에서 제시한 순 온실가스 배출량은 자재단계에 한정된 결과로, 제품 사용 이후 또는 폐기 단계에서 발생할 수 있는 생물기원 탄소의 재방출은 평가 범위에 포함하지 않았다.

3. 결과

3.1. 자재 단계 투입·산출물 구성 및 LCI 결과

본 절에서는 국산 낙엽송 CLT의 자재단계(A1-A3)를 대상으로, 기능 단위인 1m³ CLT 기준의 투입·산출물 구성과 이에 따른 생애주기 목록(LCI) 결과를 제시한다. 모든 물량 데이터는 기능 단위 기준으로 환산하여 정리하였다. 앞선 2.2절에서 설명하였듯이 1차 데이터를 우선으로 사용하고 현장 여건으로 인해 정량적 도출이 어려운 항목은 해외 데이터베이스인 Ecoinvent DB와 국제 환경성적표지 (EPD) 보고서를 활용한 2차 데이터를 적용하였다.

자재 단계에 해당하는 투입물 및 산출물의 구성은 Table 3.에 정리하였다. 자재 단계에서 주요 투입물은 낙엽송 제재목, 접착제, 전력 및 연료 등 유틸리티 항목으로 구성된다. 조사 대상 생산시설에서 CLT 제조 시 적용되는 목재 수율은 약 50% 수준으로 확인되었으며, 이에 따라 1m³의 CLT를 생산하기 위해 약 2m³의 낙엽송 제재목이 투입되는 것으로 나타났다. 공정 과정에서 옹이 제거, 샌딩 및 후 가공 작업 등으로 폐목재가 발생하며, 이러한 공정 특성이 Table 3.에 제시된 투입·산출 물량에 반영되었다. 그 외 접착제, 윤활유, 용수 및 유틸리티 항목의 물량은 기능 단위 기준으로 환산하여 생애주기 목록으로 구축하였다. CLT 제조 공정의 세부 흐름은 2.2절에 제시한 공정 흐름도를 따른다.

자재 단계에는 원자재 및 부자재의 운송 과정(A2)도 포함되며, 원재료인 국산 낙엽송 제재목의 운송과 접착제 및 기타 부자재의 운송 항목이 생애주기목록에 반영되었다. 운송 관련 LCI는 기능 단위인 1m³ CLT 기준으로 정리하였으며, 각 재료별 운송 수단, 운송 거리 및 운송 물량을 포함하도록 구성하였다. 해당 운송 항목은 육상 화물

Table 3. Life cycle inventory (LCI) of inputs and outputs for the CLT product stage

Category	Type	Material/Flow	Quantity	Unit	GHG emission factor (kg CO ₂ -eq/unit)	Activity data source (quantity)
INPUT	Raw material	Sawn timber	2	m ³	27.348	Primary
		Adhesive	6.154	kg	0.172	Primary
		Paraformaldehyde	1.846	kg	0.323	Primary
	Auxiliary material	Lubricating oil	0.330	kg	1.757	Ecoinvent v3.10
	Utility	Diesel	1.669	kg	0.0682	Ecoinvent v3.10
		Electricity	95.624	kWh	0.495	Ecoinvent v3.10
		Process water	82.130	kg	0.00211	Ecoinvent v3.10
OUTPUT	Product	Cross-Laminated Timber (CLT)	1	m ³	-	Primary
	Waste	Municipal solid waste	0.398	kg	1.18	Ecoinvent v3.10
		Waste oil	0.330	kg	1.8	Ecoinvent v3.10
		Waste wood	1	m ³	0.136	Primary

Note: The “Activity data source (quantity)” column indicates the source of activity (quantity) data used to construct the life cycle inventory (LCI). Greenhouse gas emission factors were derived separately from the databases listed in Table 1.

Table 4. Transportation scenarios and applied emission factors for raw materials

Transported material	Transport distance (km)	Transport amount (kg)	Transport mode	Road freight truck GHG emission factor (kg CO ₂ -eq/ton·km)
Sawn timber (larch)	30	900	Road freight truck	0.192
Adhesive		6.154		
Paraformaldehyde		1.846		
Diesel		1.669		
Lubricating oil		0.330		

운송을 기준으로 설정된 온실가스 배출계수 데이터와 연계하여 정량화하였으며, 육상 수송 트럭에 대한 배출계수 또한 함께 정리하였다. 운송 단계의 생애주기목록 구성 결과는 Table 4.에 제시하였다.

3.2. 자재 단계 온실가스 배출량 산정 결과

본 절에서는 3.1절에서 구축한 생애주기목록과 단계별 산정식을 바탕으로 CLT의 자재단계(A1-A3)에 대한 온실가스 배출량을 1m³ 기준으로 도출하였다.

자재단계 전체 온실가스 배출량은 224.760kg CO₂-eq/m³으로 도출되었다. 이를 단계별로 구분하면 Fig. 4.와 같이 전체 자재단계 온실가스 배출량 중 제조 단계(A3)가 가장 높은 비중을 차지하였으며, 그 다음으로 운송 단계(A2), 원자재 생산 단계(A1) 순으로 나타났다. 원자재 생산 단계(A1)에서는 총 56.350kg CO₂-eq/m³의 배출이 발생했으며, 운송 단계(A2)에서는 57.946kg CO₂-eq/m³, 제조 단계(A3)에서는 110.465kg CO₂-eq/m³가 발생되었다. 해당 단계별 정량 결과는 Table 5.에 제시하였다.

원자재 생산 단계(A1)에서는 제재목 생산 과정에 따른 온실가스 배출의 기여도가 가장 크게 나타났다. 이는 CLT 제조를 위해 투입되는 제재목 물량이 많을수록 A1 단계의 온실가스 배출량이 증가하는 구조에 기인한 결과로 해석된다. 본 연구 대상 공장의 경우, 1m³의 CLT를 생산하기 위해 약 2m³의 제재목이 투입되어 목재 수율이

약 50% 수준으로 나타났으며, 이러한 낮은 수율이 A1 단계 배출량 증가에 영향을 미치는 주요 요인으로 분석되었다.

운송 단계(A2)의 온실가스 배출량은 주로 제재목의 운송 거리와 운송 물량에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 특히 원자재인 제재목의 운송이 A2 단계 배출량의 대부분을 차지하였으며, 운송 거리 및 물량의 변화에 따라 배출량이 민감하게 반응하는 특성을 보였다.

제조 단계(A3)에서는 폐목재 재활용 과정에 따른 온실가스 배출 기여도가 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 제조 공정에서 사용되는 전력 사용에 따른 배출이 높은 비중을 차지하였다. 폐목재 재활용 과정은 수거, 선별, 파쇄 및 재가공 등 추가적인 공정과 에너지 사용이 수반되기 때문에, 단위 기능당 온실가스 배출량이 상대적으로 크게 평가된 것으로 분석된다. 이러한 결과는 CLT 제조 공정에서 발생하는 폐목재의 발생량이 A3 단계 온실가스 배출 특성에 중요한 영향을 미침을 시사한다.

국제적으로 공표된 CLT 제품의 EPD 자료 중 A1-A3 단계의 GWP-GHG 값을 비교한 결과, Table 7.과 같이 약 53.1-232.0kg CO₂-eq/m³ 범위로 나타났다. 본 연구에서 도출된 자재단계 배출량(224.760kg CO₂-eq/m³)은 해당 범위 내에서 상위권에 위치하는 것으로 확인되었다. 다만, 각 EPD는 전력, 원자재 조달 거리, 목재 밀도, 생산 수율, 접착제 사용량 및 부산물 할당 방식 등의 가정이 상이하여 직접적인 우열 비교에는 한계가 있다.

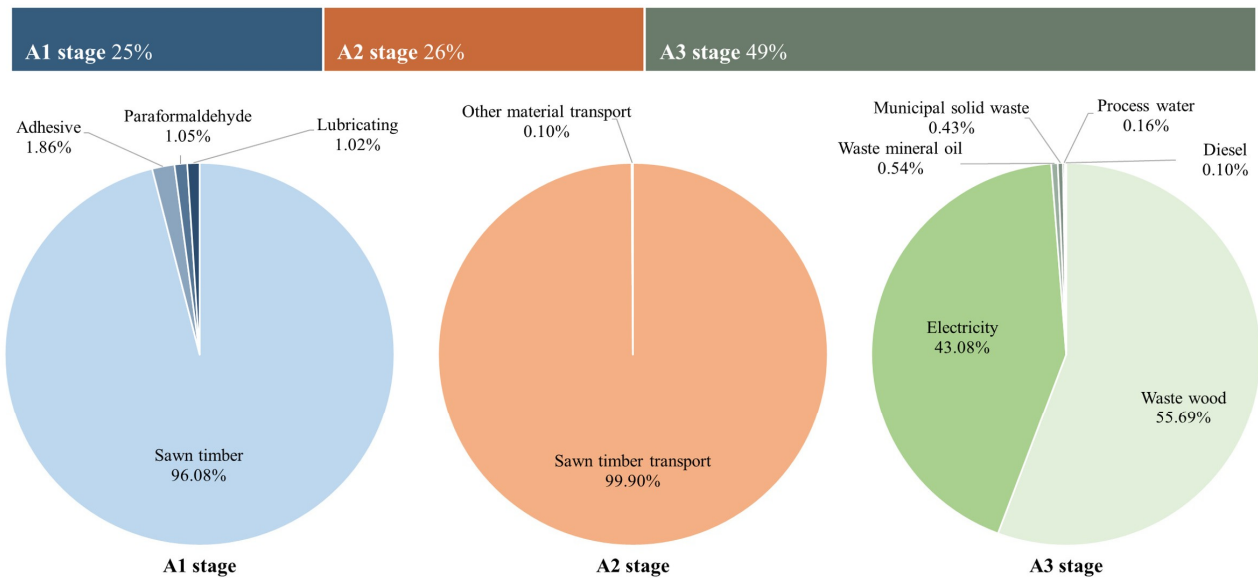


Fig. 4. Contribution of life cycle stages (A1-A3) and major emission sources to GHG emissions in the material stage

Table 5. Greenhouse gas emissions by material life cycle stage (A1-A3) per functional unit (1m³ CLT)

Category	A1 stage	A2 stage	A3 stage	Total
GHG emissions (kg CO ₂ -eq/m ³)	56.35	57.95	110.46	224.76

Table 6. Biogenic carbon storage and corresponding CO₂-equivalent storage for 1m³ of CLT

Timber quantity (m ³)	Wood density (kg/m ³)	Carbon content	Biogenic carbon storage (kg C/m ³)	Biogenic CO ₂ storage (kg CO ₂ -eq/m ³)
1	450	0.5	225	825

Table 7. International CLT EPD-based GWP-GHG values for the product stage (A1-A3) (unit: kg CO₂-eq/m³) [21]

Category	Company A	Company B	Company C	Company D
GWP-GHG (A1-A3)	232.0	111.0	76.5	53.1

종합적으로 볼 때, 본 연구에서 도출된 자재단계(A1-A3) 온실가스 배출량은 국제 EPD 범위 내 상단 수준에 해당하며, 국산 낙엽송 CLT의 배출 구조에서는 제조 단계(A3)의 기여도가 가장 크게 나타났다. 이는 제조 공정에서의 폐목재 발생과 에너지 사용이 주요한 영향 요인으로 작용함을 시사한다.

3.3. 생물기원 탄소 저장량 고려 여부에 따른 결과 비교

기능 단위인 1m³ CLT는 약 450kg의 목재로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 Table 2.의 침엽수 제재목의 탄소 함량 계수를 적용하여 목재 내 생물기원 탄소 저장량을 산정하였다. 그 결과 1m³ CLT에 저장된 탄소량은 약 225kg C로 도출되었으며, 이를 이산화탄소 환산 계수(44/12)를 적용하여 약 825kg CO₂에 해당하는 생물기원 이산화탄소 저장량을 산정하였다. 해당 결과는 Table 6.에 제시하였다.

산정된 생물기원 탄소 저장량은 자재단계(A1-A3)에서 발생한 온실가스 배출량(224.76kg CO₂-eq/m³)보다 큰 규모로 나타났으며, 이는 자재단계에서 발생한 배출량과 비교할 때 CLT 제품 내에 저장되는 생물기원 탄소의 상대적 규모가 크음을 의미한다. 다만, 본 연구에서는 생물기원 탄소 저장량을 자재단계 온실가스 배출량을 직접적으로 차감하거나 상쇄하는 항목으로 처리하지 않았다.

본 연구는 자재단계를 평가 범위로 설정하였으며, 제품 사용 후 및 폐기 단계(C)에서 발생할 수 있는 생물기원 탄소의 재방출은 고려하지 않았다. 따라서 본 결과는 CLT 제품의 전 생애주기 관점에서 순 온실가스 배출량을 의미하는 것이 아니라, 자재단계에서 일시적으로 저장되는 생물기원 탄소 저장 효과를 정량적으로 나타낸 결과로 해석되어야 한다.

그럼에도 불구하고, CLT가 건축자재로 사용되는 기간 동안에는 자재단계에서 발생한 온실가스 배출량을 초과하는 양의 생물기원 탄소가 제품 내에 저장된 상태로 유지된다. 이러한 특성은 CLT가 사용 단계 동안 일시적인 탄소 저장소로 기능할 수 있음을 시사하며, 자재단계 환경성 평가 결과를 해석하는 데 있어 중요한 고려 요소로 작용한다.

4. 결론

본 연구는 국산 낙엽송을 원료로 생산된 교차적층목재(CLT)를 대상으로, 자재단계(A1-A3)를 평가 범위로 설정하여 생애주기목록(LCD)을 구축하고 온실가스 배출 특성을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 CLT 생산 공정을 기반으로 한 현장 조사 및 관계자 인터뷰를 통해 확보한 1차 데이터를 중심으로 분석을 수행하였으며, 제품 단위로의 정량화가 어려운 일부 항목에 대해서는 문헌 기반의 2차 데이터를 보완적으로 활용하였다.

분석 결과, 기능 단위인 1m³ CLT 기준 자재단계의 온실가스 배출량은 총 224.76kg CO₂-eq로 도출되었다. 단계별로는 제조 단계

(A3)가 전체 배출량의 약 49%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, 원자재 생산 단계(A1)과 운송 단계(A2)는 각각 25%와 26%로 유사한 수준의 배출 기여도를 보였다. A1 단계에서는 제재목 생산 과정이 온실가스 배출의 주요 기여 요인으로 나타났다. A2 단계의 온실가스 배출은 제재목 운송과 접착제 및 기타 부자재 운송으로 구분하여 분석하였으며, 제재목 운송이 A2 단계 배출량의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. A3 단계에서는 폐목재 재활용 공정이 가장 큰 배출 기여 요인으로 분석되었다.

이러한 결과는 CLT 제조 과정에서의 낮은 목재 수율이 자재단계 온실가스 배출 구조에 중요한 영향을 미치고 있음을 시사한다. 본 연구 대상 공장의 경우, 1m³의 CLT를 생산하기 위해 약 2m³의 제재목이 투입되어 수율이 약 50% 수준으로 나타났으며, 이로 인해 A1 단계에서 투입 원자재 증가에 따른 배출이 확대되고, A3 단계에서는 폐목재 발생량 증가로 인한 추가 배출이 발생하는 구조를 보였다. 한편, 본 연구에서 확인된 수율은 국내 낙엽송 CLT 제조 사례 연구에서 보고된 55% 수준과 유사한 범위로, 국내 공정 여건에서 관찰될 수 있는 수준으로 해석된다[22]. 따라서 목재 제품 생산 공정에서 수율 향상은 원자재 투입량 감소와 폐기물 발생 저감을 동시에 달성할 수 있는 핵심적인 개선 방향으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 CLT의 생물기원 탄소 저장 효과를 함께 분석하였다. 1m³의 CLT에 저장된 생물기원 탄소 저장량은 225kg C/m³로 나타났으며, 이는 이산화탄소로 환산할 경우 82kg CO₂-eq/m³에 해당한다. 전과정 관점에서 일반적으로 목재에 저장된 생물기원 탄소는 제품 사용 이후 폐기 단계(C 단계)에서 재방출되는 것으로 취급되므로, 본 연구에서 제시한 생물기원 탄소 저장량은 전 생애주기 기준의 영구적인 상쇄 효과를 의미하는 것은 아니다.

그럼에도 불구하고, CLT가 건축자재로 사용되는 기간 동안 자재 단계에서 발생한 온실가스 배출량을 초과하는 양의 생물기원 탄소가 제품 내에 저장된 상태로 유지된다. 이는 CLT가 사용 단계 동안 일시적인 탄소 저장소로 기능할 수 있음을 의미하며, 자재단계 환경성 평가 결과를 해석하는 데 있어 중요한 고려 요소로 작용한다. 더 나아가, 목재를 건축자재 사용 이후 가구, 내장재 등으로 재사용하거나 재활용할 경우 탄소 저장 기간을 연장할 수 있으며, 최종적으로는 바이오에너지 원료로 활용함으로써 에너지 회수 가능성도 존재한다. 이러한 단계적 활용은 목재 제품이 생애주기 전반에서 탄소를 저장하고 전환하는 매개체로 기능할 수 있음을 시사한다.

본 연구는 단일 생산시설을 대상으로 수행된 사례 연구로서, CLT 생산 공정을 기반으로 한 1차 데이터를 중심으로 분석을 수행하였으나 제조 단계(A3) 일부 항목, 특히 공정 유틸리티 사용량은 Ecoinvent DB 기반 2차 데이터에 의존하였다. 제조 단계(A3)는 본 연구에서 전체 자재단계 배출량의 약 49%를 차지하는 주요 기여 단계로 도출되었으므로, 해당 단계의 핵심 입력값이 해외 데이터에 기반한다는 점은 결과 해석에 불확실성을 내포하며, 국내 CLT 제조시

설의 실제 에너지 효율, 전력 사용 구조 및 운전 조건이 충분히 반영되지 못했을 가능성이 있다. 또한 주요 입력 변수에 대하여 자료의 변동 특성 및 불확실성을 충분히 정량적으로 검토하지 못한 점은 분석 방법상의 한계로 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 실제 국산 낙엽송을 원료로 생산된 CLT를 대상으로 자재단계의 투입·산출물 구조와 온실가스 배출 특성을 공정 기반으로 정량화하였다는 점에서 의의를 가진다. 향후 연구에서는 국내 생산시설의 공정별 유틸리티 사용량을 실측 기반으로 축적하고, 다양한 생산시설과 공정 조건을 반영한 추가 사례 분석과 주요 입력변수의 통계적 유효성 및 불확실성 분석을 병행함으로써 결과의 대표성과 A3 단계 배출량 산정의 신뢰도를 제고할 필요가 있으며, 사용 및 폐기 단계를 포함한 전 생애주기 관점의 평가를 통해 CLT의 환경적 성능을 보다 종합적으로 검토할 필요가 있다.

Acknowledgement

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(RS-2024-00400728)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

[1] 김권예, 남유진, 노후 보건소의 그린리모델링 전후에 따른 탄소배출량 전과정평가, KIEAE Journal, 제25권 제3호, 2025.06, pp.45-50. // (K.Y. Kim, Y.J. Nam, A life cycle assessment of carbon emissions before and after green remodeling of old public health centers, KIEAE Journal, 25(3), 2025.06, pp.45-50.)

[2] 박해든 외 4인, 기존 건축물의 지속 가능성 확보를 위한 리트로핏 전략 비교 평가, KIEAE Journal, 제25권 제5호, 2025.10, pp.75-80. // (H.D. Park et al., Comparative evaluation of retrofit strategies for enhancing the sustainability existing building, KIEAE Journal, 25(5), 2025.10, pp.75-80.)

[3] 김태형 외 7인, 목재 자재 사용에 따른 건축물의 내재 탄소배출량 및 저감량 분석, 한국건설순환자원학회 논문집, 제13권 4호, 2025.12, pp.544-552. // (T.H. Kim et al., analysis of embodied carbon emissions and reduction effects in buildings using wood-based material, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 13(4), 2025.12, pp.544-552.)

[4] J. Isinno Eismisdele et al., Harvested wood products' full lifecycle assessment for sustainable construction: A systemised review, Cleaner Waste Systems, 12, 2025, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100430>

[5] M. Xue et al., Understanding the benefits and challenges of harvested wood products in response to climate change, Resources, Conservation & Recycling, 209, 2024, 107739. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107739>

[6] C. de Serres-Lafontaine et al., Bio-based innovations in cross-laminated timber (CLT) envelopes: A hygrothermal and life cycle analysis (LCA) study, Building and Environment, 256, 2024, 111499. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111499>

[7] A. Tighnavard Balasbaneh et al., LCA & LCC analysis of hybrid glued laminated timber-concrete composite floor slab system, Journal of Building Engineering, 49, 2022, 104005. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104005>

[8] 이소민, 이정훈, 외단열 경량목구조 벽체의 Hygrothermal 안정성 분석, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제18권 5호, 2024.10, pp.478-489. // (S.M. Lee, J.H. Lee, Analysis of hygrothermal stability of lightweight wooden structure with external insulation, Journal of the Korean Institute of Architectural Environment and Building Systems, 18(5), 2024.10, pp.478-489)

[9] 박해든 외 4인, CLT의 코어층 적용 재료에 따른 실내공기질 및 건물에너지 평가, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제17권 제6호, 2023.12, pp.354-365. // (H.D. Park et al., Indoor air quality and building energy evaluation based on core layer materials applied in CLT, Journal of the Korean Institute of Architectural Environment and

Building Systems, 17(6), 2023.12, pp.354-365.)

[10] 전진우, 이정훈, 친환경 건축 자재로서의 목재: LCI DB 구축의 중요성, KIEAE Journal, 제24권 제6호, 2021.12, pp.69-76. // (J.U. Jeon, J.H. Lee, Wood as an eco-friendly building material: The importance of establishing an LCI database, KIEAE Journal, 24(6), 2024.12, pp.69-76.)

[11] 권순길, 장운성, 최환호, 전과정평가(LCA)를 이용한 건축자재별 환경영향 비교분석 건축용 목재 및 콘크리트 종류별 중심으로, 대한환경공학회지, 제46권 제10호, 2024.10, pp.570-581. // (S.G. Kwon, Y.S. Chang, H.H. Choi, Comparative analysis of environmental impacts of each building material using life cycle assessment(LCA) Focusing on types of construction wood and concrete, Journal of the Korean Society of Environmental Engineering, 46(10), 2024.10, pp.570-581.)

[12] 장운성 외 6인, 국산 구조용 집성재의 환경부하 정량화를 위한 온실가스 배출량 분석, 목재공학, 제44권 제3호, 2016, pp.449-456. // (Y.S. Chang et al., Assessment of carbon emission for quantification of environmental load on structural glued laminated timber in Korea, Journal of the Korean Wood Science and Technology, 44(3), 2016, pp.449-456.)

[13] 전영진, 김영훈, 해외 목조건축물 사례분석을 통한 생활 OSC의 목재 적용방안 고찰, KIEAE Journal, 제22권 제4호, 2022.08, pp.79-86. // (Y.J. Jeon, Y.H. Kim, Consideration of wood application plan by Living SOC through analysis of overseas wooden buildings, KIEAE Journal, 22(4), 2022.08, pp.79-86.)

[14] 김영훈, 일본 목재이용촉진 관련법 개정 내용 및 특징 분석 -「공공건축물 목재이용 촉진법」(2010)과 「탄탄소 사회 실현 기여 등을 위한 건축물의 목재이용 촉진에 관한 법률」(2021)의 비교를 통하여-, KIEAE Journal, 제23권 제2호, 2023.04, pp.53-66. // (Y.H. Kim, Analysis of the characteristics and policy effects of the legal system related to the promotion of wood utilization in Japan - Through a comparison between the 「Act on Promotion of Wood Use of Public Buildings」 and the 「Act on Promotion of Wood Use in Buildings to Contribute to the Realization of a Decarbonized Society」, KIEAE Journal, 23(2), 2023.04, pp.53-66.)

[15] 산림청, 국내 최고층 목조건축 문 연다... 산림복지종합교육센터 개소, <https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttlId=3207836>, 2025.05.20. // (Korea Forest Service, Korea's tallest wooden building opens: Forest Welfare Integrated Education Center, <https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttlId=3207836>, 2025.05.20.)

[16] 산림청, 국립산림과학원, 「그린빌딩 대상」 수상, <https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttlId=3206828>, 2025.04.21. // (National Institute of Forest Science, Recipient of the green building award, <https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttlId=3206828>, 2025.04.21.)

[17] 김영훈, 이지예, 일본 교육시설에 나타난 전통 목재 및 목구조 적용 방법 분석, KIEAE Journal, 제19권 제1호, 2019.02, pp.53-61. // (Y.H. Kim, J.Y. Lee, The traditional wooden and wooden application method analysis appeared in Japanese educational facilities, KIEAE Journal, 19(1), 2019.02, pp.53-61.)

[18] IPCC, 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4: Agriculture, forestry and other land use (AFOLU), 2019.

[19] S.H. Lamloom and R.A. Savidge, A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species, Biomass and Bioenergy, 25(4), 2003, pp.381-388. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3)

[20] 이선경, 임종수, 강진택, 주요 산림수종의 표준 탄소흡수량(ver. 1.2), NIFoS 산림정책이슈 제129호, 한국: 국립산림과학원, 2019.07.01. // (S.J. Lee, J.S. Lim, J.T. Kang, Standard carbon sequestration of major forest tree species (ver. 1.2), NIFoS Forest Policy Issue No.129, Korea: National Institute of Forest Science, 2019.07.01.)

[21] The International EPD® System, EPD Library, <https://www.environdec.com/home>, 2026.02.19.

[22] Y.J. Han et al., The effect of controlling the drying distortion of laminas on the production yield of cross-laminated timber (CLT) using Larix kaempferi wood, European Journal of Wood and Wood Products, 74, 2016, pp.519-526. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1008-3>