

CLT를 활용한 합성 바닥구조의 다이아프램 거동에 관한 연구

A Study on the Diaphragm Behavior of Composite Floor Structures Utilizing Cross-Laminated Timber

○김 수 나* 박 정 우** 노 영 숙***
Kim, Su-Na Park, Jung-woo Roh, Young-Sook

Abstract

As the application of sustainable mass timber, particularly Cross-Laminated Timber (CLT), expands, hybrid structures combining steel beams and CLT floors are emerging as an efficient alternative. For these systems to be safely implemented, it is crucial to accurately evaluate their behavior as a diaphragm that transfers lateral forces to the main resisting system. This paper reviews international design standards and prior research to analyze the key factors governing the diaphragm behavior of steel beam and CLT composite floors. Prior research indicates CLT panels are influenced by diaphragm characteristics, connections between panels and steel beams (collectors). This study emphasizes the necessity of establishing a reliable design procedure and proposes for future experimental and analytical research.

키워드 : 구조용 집성판(CLT), 합성바닥구조, 다이아프램 거동, 콜렉터

Keywords : Cross-Laminated Timber(CLT), Composite Floor Structures, Diaphragm Behavior, Collector

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축물의 탄소 발자국 저감에 대한 관심이 높아지면서, 탄소 저장 능력을 가진 구조용 집성판(Cross-Laminated Timber, CLT)의 활용이 전 세계적으로 확산되고 있다. 이러한 흐름 속에서, 철골의 우수한 강성과 연성, 그리고 CLT의 경량성 및 친환경성을 결합한 철골보-CLT 하이브리드 바닥구조는 두 재료의 장점을 극대화할 수 있는 효율적인 시스템으로 주목받고 있다. 이 하이브리드 바닥구조가 건물 전체의 구조안전성에 기여하기 위해서는 중력 저항 성능뿐만 아니라, 지진이나 바람과 같은 횡력 작용시 이를 수직 횡력저항시스템(Lateral Force Resisting System, LFRS)에 안전하게 전달하는 수평 격막, 즉 다이아프램(Diaphragm)으로서의 성능을 명확히 규명해야 한다. CLT 패널은 높은 면내 강성을 보유하고 있지만, 철골보와의 접합 방식, 패널 간의 연결 상세, 개구부의 존재 등에 따라 전체 다이아프램의 거동은 복잡한 양상을 띤다. 하지만 국내에서는 아직 철골보-CLT 하이브리드 바닥구조의

다이아프램 거동에 대한 체계적인 연구 및 설계 기준이 부재하여, 실무 적용에 어려움이 따르고 있다.

따라서 본 연구는 미국 등 관련 기술 선도국의 설계 기준과 선행 연구 문헌을 체계적으로 고찰하여 철골-CLT 하이브리드 바닥구조의 다이아프램 거동 특성과 그에 영향을 미치는 주요 인자를 분석하고, 국내 기술 현황 발전에 필요한 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

2. 하이브리드 바닥구조의 다이아프램 거동 메커니즘

2.1 다이아프램의 역할과 하중 전달 경로 및 분류

바닥 및 지붕 구조는 중력 하중을 지지하는 역할뿐만 아니라, 건물에 가해지는 횡력을 수직 저항 요소인 LFRS(가새골조, 전단벽 등)에 전달하는 수평 격막으로서 기능해야 한다. 이 과정에서 명확한 하중 전달 경로의 확보는 구조 안전성의 핵심이다. 철골-CLT 하이브리드 시스템에서 횡력의 전달 경로는 CLT 패널 → 패널-보 연결부 → 콜렉터(철골보) → 횡력저항시스템(LFRS)이다. 다이아프램은 바닥 평면 내에서 강성과 강도를 발휘하여 횡력을 최소한의 변형으로 LFRS에 전달하는 역할을 담당한다.

CLT 패널 자체는 높은 면내 강성을 가지지만, 다수의 CLT 패널과 철골보로 구성된 전체 바닥 시스템은 완벽한 강체로 거동하지 않는다. 다이아프램의 면내 변형 정도에 따라 그 거동은 강체(Rigid), 유연(Flexible), 반강체(Semi-rigid) 다이아프램으로 분류된다. 미국토목학회 기준(ASCE 7-16)에서도 특정 조건을 만족하지 못할 경우 다이

* 서울과학기술대학교 대학원, 박사과정

** ㈜씨앤피동양 설계본부, 상무

*** 서울과학기술대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Seoul National University of Science and Technology, rohys@seoultech.ac.kr)

아프램의 유연성을 고려한 해석을 수행하도록 명시하고 있다.

2.2 반강체 거동의 중요성 및 콜렉터(Collector)의 역할

CLT 패널 자체는 높은 면내 강성을 가지지만, 다수의 CLT 패널과 철판보로 구성된 전체 바닥 시스템에서는 연결부의 슬립과 변형으로 인해 완전한 강체 거동을 기대하기 어렵다. 따라서 실제 거동은 반강체 특성을 보이며, 이를 정확히 고려한 해석과 설계가 필요하다.

콜렉터는 LFRS와 직접 연결되지 않은 다이아프램 영역의 횡력을 수집하여 저항 시스템에 전달하는 구조 부재이다. 하이브리드 시스템에서는 주로 철판보가 콜렉터 역할을 수행하며, 다이아프램-콜렉터 연결부의 성능이 전체 시스템의 횡력 저항 성능을 좌우한다.

3. 해외 기준 및 선행 연구 동향

3.1 설계기준 현황

미국강구조학회(AISC)의 설계지침 37 “Hybrid Steel Frames with Wood Floors”는 목재와 철판 하이브리드 시스템의 설계 원리를 포괄적으로 다루고 있다. 이 기준은 다음 사항들을 강조한다. 다이아프램의 강성 평가 방법, 콜렉터 및 연결부 설계 지침, 다이아프램 유연성을 고려한 해석의 중요성, 화재, 음향, 지속가능성을 포함한 다학제적 설계 고려사항을 포함한다.

미국토목학회 기준인 ASCE 7-16에서는 다이아프램의 면내 강성을 강체(Rigid), 유연체(Flexible), 반강체(Semi-rigid)로 분류하는 기준을 제시하여 구조 해석 모델링의 방향을 결정한다.

미국목재협회(AWC)의 NDS(National Design Specification for Wood Construction)는 목재 부재 및 접합부의 허용응력 및 강도 설계에 대한 기준을 제공하는 반면, SDPWS(Special Design Provisions for Wind and Seismic)는 이러한 연결부로 구성된 시스템의 강도 및 강성 설계 값을 제시한다.

3.2 주요 선행 연구 분석

WoodWorks에서 발간한 설계 가이드(2021)는 SDPWS 2021의 CLT 다이아프램 규정을 설명하고 적용 방안을 제시하며, CLT 패널 고유의 구조적 특성을 반영한 설계방식과 요구사항을 명시하고 있다.

Cristiano et al. (2018)은 냉간성형강재 보와 CLT로 구성된 하이브리드 다이아프램의 전단 실험을 수행하였다. 연구 결과, 다이아프램의 전체 면내 강성은 CLT 패널과 강재 보 사이의 스크류 접합부에서 발생하는 슬립에 의해 지배되며, 접합부의 하중-슬립 관계를 정확히 모델링하는 것이 전체 다이아프램 거동 예측의 핵심임을 실험적으로 입증하였다.

Zheng et al. (2016)은 실험과 해석 시뮬레이션을 병행하여 목재-철판 하이브리드 바닥 다이아프램의 거동을 평가하였다. 이 연구는 실험 크기 실험을 통해 다이아프램의 하중 전달 메커니즘과 파괴 모드를 관찰하고, 이를 바탕으로 검증된 유한 요소모델을 통해 연결부의 강성이 전체 시스템의 거동에 미치는 영향을 분석함으로써 해석적 예측의 신뢰도를 높였다.

Andi et al. (2011)은 고층 하이브리드 빌딩의 수평 슬래브에

사용되는 대형 목재 요소의 연결 시스템을 분석하며, 다이아프램의 연속성과 강성을 확보하기 위한 접합부 상세의 중요성을 제시한 바 있다.

이러한 선행 연구들은 공통적으로 철판-CLT 하이브리드 바닥구조의 횡력저항능력이 부재 자체의 성능보다는 연결부의 역학적 거동에 의해 결정되며, 정확한 성능 예측을 위해서는 연결부의 비선형 거동을 고려한 정밀한 해석 모델이 필수적임을 시사한다.

4. 결론

해외 기준과 선행 연구 고찰을 통해, 국내에서 철판보 및 CLT 합성 바닥구조의 다이아프램 성능을 신뢰성 있게 평가하고 설계하기 위한 연구가 필요함을 확인하였다.

철판-CLT 합성 바닥구조의 다이아프램 거동은 CLT 패널 자체의 강성만으로는 평가할 수 없으며, 반드시 철판보 및 패널 간 연결부의 슬립을 고려한 반강체(Semi-rigid)로 접근해야 한다. 전체 시스템의 성능은 CLT나 철판보 자체의 성능보다는 연결부의 역학적 특성에 의해 지배되므로 정확한 성능 예측을 위해서는 연결부의 비선형 거동을 고려한 해석 모델링이 필요하다.

향후 연결부의 거동 특성을 규명하는 실험적·해석적 연구를 통해, 이 지속가능한 하이브리드 구조 시스템의 국내 설계 기준 정립과 실용화 방안을 마련해야 할 것이다.

참고문헌

1. American Institute of Steel Construction (AISC), Design Guide 37: Hybrid Steel Frames with Wood Floors, 2022
2. American Society of Civil Engineers (ASCE), Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-16), 2016
3. American Wood Council (AWC), National Design Specification (NDS) for Wood Construction, 2018
4. American Wood Council (AWC), Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS), 2021
5. WoodWorks, Wood Products Council, CLT Diaphragm Design Guide: Based on SDPWS, 2021
6. Cristiano Loss, Stefano Rossi and Thomas Tannert (2018). In-Plane Stiffness of Hybrid Steel-Cross-Laminated Timber Floor Diaphragms, Journal of Structural Engineering, 144-8
7. Zheng Li, Minjuan He, Zhong Ma, Kangli Wang and Renle Ma (2016). In-Plane Behavior of Timber-Steel Hybrid Floor Diaphragms: Experimental Testing and Numerical Simulation, Journal of Structural Engineering, 142-12
8. Andi Asiz and Ian Smith (2011). Connection System of Massive Timber Elements Used in Horizontal Slabs of Hybrid Tall Buildings, Journal of Structural Engineering, 137-11