

# 모듈 간 접합부 강성에 따른 바닥 다이아프램 거동 판정에 관한 연구

이상섭<sup>1</sup> · 부윤섭<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공학박사, 선임연구위원, 한국건설기술연구원, <sup>2</sup>박사수료, 전임연구원, 한국건설기술연구원

## Evaluation of Floor Diaphragm Behavior According to Inter-Module Connection Stiffness

Lee, Sangsup<sup>1</sup>, Boo, Yoonseob<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ph. D., Senior Research Fellow, Dept. of Building and Urban Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

<sup>2</sup>Ph. D. Candidate, Research Specialist, Dept. of Building and Urban Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

**Abstract** – This study analyzes the effect of inter-module connection (IMC) stiffness on floor diaphragm behavior in modular buildings and proposes a quantitative criterion based on stiffness ratio. Numerical analysis was performed on a 4-bay, 5-story steel modular building using MIDAS Gen software. Connecting plates were modeled as beam elements reflecting actual geometric lengths, with thicknesses varying from 20 mm to 0.02 mm to examine structural responses under different IMC stiffness conditions. Results showed that when the connecting plate thickness was 20 mm or 2 mm, the entire floor behaved as an integrated diaphragm. However, as thickness decreased below 0.2 mm, diaphragm continuity was lost. Theoretical evaluation confirmed that when the horizontal stiffness of the IMC is approximately 5 to 10 times greater than that of a single module, the floor diaphragm exhibits rigid diaphragm behavior. The proposed stiffness ratio criterion provides a quantitative basis for evaluating diaphragm behavior in modular buildings; however, accidental eccentricity should be considered in design.

**Keywords** – Modular buildings, Floor diaphragm, Inter-module connection, Lateral stiffness, Connecting plate

### 1. 서론

모듈러 건축물은 공장에서 사전 제작된 3차원 유닛을 현장에서 조립하여 완성하는 건축 방식으로 공기 단축, 품질 확보, 환경 부담 저감 등의 장점으로 인해 중·고층 건축물로 적용 범위가 확대되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 특히 철골 모듈러 건축물은 구조적 경량성 및 시공 효율성으로 인해 국내외에서 활발히 연구 및 적용이 이루어지고 있으나, 구조 시스템의 불연속성으로 인해 기존의 일체식 건축물과는 상이한 구조 거동을 나타낼 수 있다는 점이 지적되고 있다<sup>[3]</sup>. 모듈러 건축물의 가장 큰 구조적 특징 중

하나의 바닥 슬래브가 연속적으로 타설되지 않고, 모듈 단위로 분절되어 있다는 점이다. 이로 인해 층 단위의 바닥 다이아프램은 연속성을 상실하며 횡하중은 모듈 간 접합부(inter-module connection, IMC)를 통해 전달된다. 이러한 불연속 바닥 시스템에서는 기존 철골조 건축물에서 일반적으로 가정되는 강한 다이아프램(rigid diaphragm) 가정이 성립하지 않을 가능성이 크다<sup>[4],[5]</sup>.

국외 연구에서는 모듈러 건축물의 다이아프램 거동이 전체 구조 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 다양한 해석적·실험적 연구가 수행되어 왔다. Srisangeerthan et al.<sup>[6]</sup>은 모듈 간 수평 접합부의 축 및 전단 강성이 다이아프램 거동을 지배하는 주요 인자임을 제시하고, 접합부 강성 변화에 따라 다이아프램이 강한 거동에서 유연 거동으로 전이됨을 보였다. Chua et al.<sup>[7]</sup>은 모듈 간 접합부의 강성 모델링 방식에 따라 전체 구조물의 주기, 횡변위 및 하중 분배가 크게 달라질 수 있음을 보고하였다. 최근에는 개별 다이아프램의 면내 거동을 직접

Note.-Discussion open until December 31, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 6, 2026; revised on May 20, 2026; approved on May 20, 2026. Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-910-0778 Fax. +82-31-910-0361

E-mail. yoonseobboo@kict.re.kr

평가하려는 연구도 활발히 진행되고 있다. Shi *et al.*<sup>[4]</sup>은 실험을 통해 모듈 간 연결강판을 적용한 경우 다이아프램의 면내 강성과 하중 전달 능력이 유의미하게 향상됨을 확인하였다. Zhong *et al.*<sup>[8]</sup>과 Wang *et al.*<sup>[9]</sup>는 실험과 해석을 통해 접합부 강성이 불충분할 경우 다이아프램의 실제 변형이 설계 가정보다 크게 발생하고 하중 전달 성능이 저하될 수 있음을 지적하였다. 또한 FEMA P-1026<sup>[10]</sup>에서는 유연한 다이아프램을 갖는 구조물의 경우 전통적인 횡력 분배 가정이 부적절할 수 있음을 명확히 언급하고 있다.

국내에서도 모듈러 건축물의 횡력 전달 메커니즘과 다이아프램 거동에 대한 연구가 축적되고 있다. Kim<sup>[11]</sup>은 모듈러 프레임-전단벽 접합부가 횡하중 전달에 중요한 역할을 수행함을 실험적으로 검증하였으며, Ju<sup>[12]</sup>는 모듈러 건축물의 횡력을 전단벽으로 효과적으로 전달하기 위해 트러스로 강화된 연결 바닥 시스템을 제안하고, 그 구조적 성능을 실험으로 검증하였다. 또한 Kwak *et al.*<sup>[13]</sup>과 Choi *et al.*<sup>[14]</sup>는 고층 모듈러 건축물의 다이아프램 연속성 확보를 위해 접합부 강성과 보강 방식(천장/바닥)에 따른 횡력 저항 성능을 비교 평가하였다. 그러나 다수의 국내 연구에서는 모듈 간 접합부를 단순화된 스프링 또는 강체 요소로 모델링함으로써 실제 시공 시 존재하는 모듈 간 갭(gap) 및 접합부 변형 특성이 충분히 반영되지 못한 한계가 존재한다.

이에 이 연구에서는 연결강판을 이용한 모듈 간 접합부를 대상으로 접합부 강성과 단일 모듈의 강성을 비교함으로써 모듈러 건축물 바닥 다이아프램의 거동을 판정할 수 있는 해석적 접근 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 매우 단순한 4Bay-5Story 모듈러 건축물을 대상으로 바닥 다이아프램 가정(통합 vs. 개별)에 따른 구조 거동 차이를 분석하고, 연결강판의 강성 변화가 다이아프램 거동 판정에 미치는 영향을 체계적으로 검토하고자 한다.

## 2. 모듈러 건축물의 바닥 다이아프램

### 2.1 바닥 다이아프램의 구조적 개념

바닥 다이아프램은 건축물의 바닥 또는 지붕과 같이 수평으로 배치된 구조 요소로서 풍하중 및 지진하중과

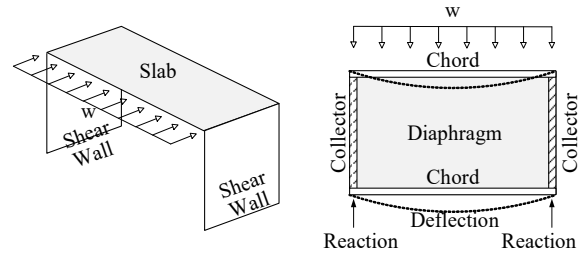


Fig. 1. Load transfer mechanism of floor diaphragm

같은 수평 하중을 수직 저항 부재로 전달하는 역할을 수행한다.

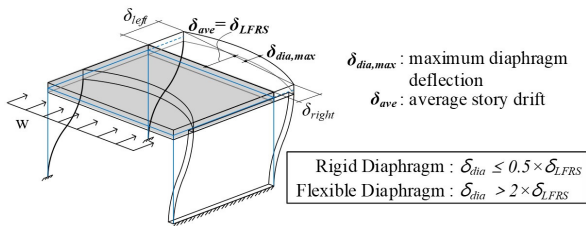
구조 설계에서 다이아프램은 층 단위에서 하중 전달 경로를 형성하는 요소로 작용하며, 다이아프램의 강성 및 변형 특성은 수직 저항 부재 간의 횡력 분배와 구조물 전체의 변형 형상에 직접적인 영향을 미친다. 다이아프램의 하중 전달 메커니즘은 Fig. 1과 같이 일반적으로 바닥을 하나의 춤 깊은 수평 보(deep beam)로 이상화하여 설명할 수 있다. 이때 바닥 슬래브 또는 데크는 보의 웨브(web) 역할을 수행하여 면내 전단력에 저항하고, 다이아프램 가장자리에 위치한 경계 부재는 코드(chord) 역할을 수행하여 휨에 의해 발생하는 인장력과 압축력을 부담한다. 또한 다이아프램에 분포된 수평 하중을 전단벽이나 가새와 같은 특정 수직 저항 부재로 전달하기 위해 수집재(collector)가 필요하며, 이 부재들은 다이아프램 내부에서 하중을 수집하여 전달하는 기능을 한다.

다이아프램의 구조적 거동은 면내 강성과 변형 특성에 따라 강성 다이아프램, 반강성 다이아프램, 유연 다이아프램의 세 가지 유형으로 분류된다. Table 1에 정리한 것과 같이 강성 다이아프램은 면내 변형이 매우 작아 수직 저항 부재의 상대 강성에 따라 횡력이 분배되는 거동을 보이며, 유연 다이아프램은 바닥 자체의 변형이 지배적이어서 각 수직 부재의 분담 면적에 따라 하중이 전달된다. 반강성 다이아프램은 이 두 거동의 중간에 해당하며, 바닥의 면내 변형과 수직 부재의 변위가 동시에 고려되어야 하는 경우를 의미한다.

ASCE<sup>[15]</sup>에서는 다이아프램의 최대 면내 처짐과 수직 저항 부재의 평균 층간 변위를 비교하여 다이아프램 거동을 분류하도록 규정하고 있으며, 이러한 분류는 IBC<sup>[16]</sup>, AISC<sup>[17]</sup>, 국내 기준 등에서도 동일한 개념으로 나타나고 있다.

**Table 1.** Classification criteria of floor diaphragms (ASCE)

Diaphragm type	Load distribution	Classification criterion
Rigid	Relative stiffness of vertical elements	$\delta_{dia} \leq 0.5\delta_{LFRS}$
Semi-rigid	Combined diaphragm and vertical element response	$0.5\delta_{LFRS} < \delta_{dia} \leq 2\delta_{LFRS}$
Flexible	Tributary area	$\delta_{dia} > 2\delta_{LFRS}$



**Fig. 2.** Deformation modes of floor diaphragms

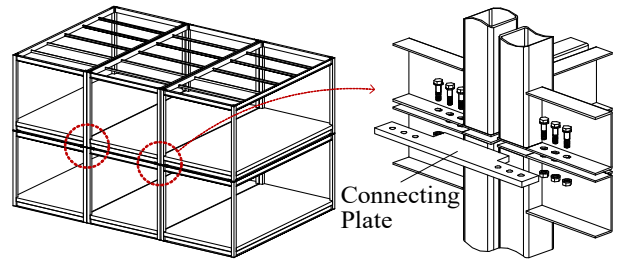
다이하프램 유형에 따른 개념적 거동 차이를 Fig. 2와 같이 도식적으로 비교하면 강성 다이하프램에서는 층 전체가 거의 강제처럼 거동하는 반면, 유연 다이하프램에서는 바닥의 면내 변형이 뚜렷하게 발생한다. 반강성 다이하프램의 경우에는 바닥 변형과 수직 부재 변위가 복합적으로 나타나며, 이러한 특성은 구조 해석 결과 및 부재력 산정에 직접적인 영향을 미치게 된다.

**2.2 모듈 간 접합부와 바닥 슬래브**

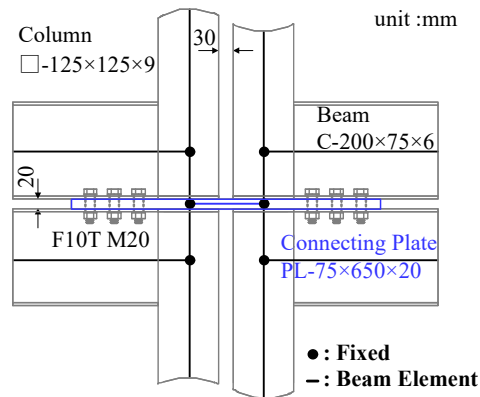
모듈러 건축물에서 바닥 슬래브는 개별 모듈에 포함된 바닥보와 슬래브 시스템으로 구성되며, 인접 모듈과의 구조적 연속성은 모듈 간 접합부를 통해 확보된다. 따라서 층 단위의 바닥 다이하프램 거동은 단일 모듈 내부의 바닥 슬래브 거동뿐만 아니라, 모듈 간 접합부의 강성과 변형 특성에 의해 함께 결정된다.

Fig. 3(a)는 모듈러 건축물의 기본 구조 형상을 나타내며, 바닥보와 기둥으로 구성된 모듈 프레임이 상·하 및 좌·우로 반복 배치되는 구조 시스템을 보여준다. 각 모듈은 독립적으로 제작되며, 현장에서 인접 모듈과 접합부를 통해 구조적으로 연결된다. 이 연구에서는 모듈 간 접합부로서 Fig. 3(b)와 같은 연결강판을 이용한 보-보 볼트 접합 방식을 해석 대상으로 선정하였다.

Fig. 4는 이 연구에서 선택한 모듈 간 접합부의 해석 모델 개념을 나타낸 것이다. 기존 연구<sup>[13],[14]</sup>에서는 모



(a) Modular frame structure (b) IMC with connecting plate  
**Fig. 3.** Modular frame structure and beam-to-beam IMC with connecting plate



**Fig. 4.** Analytical model of IMC with connecting plate

듈 간 접합부를 단순화하여, 기둥 상·하부의 경계조건을 핀(pinned) 또는 고정(fixed)으로 구분하고 그 사이 구간을 강제 링크(rigid link)로 모델링하는 사례가 있었다. 그러나 이러한 접근은 모듈 간에 실제로 존재하는 수직 간격과 이를 가로지르는 연결 요소의 변형 특성을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다.

특히 모듈 간 접합부를 강제 링크로 모델링할 경우 해당 구간에서의 휨 및 전단 변형이 배제되어 좌우 기둥이 동일한 변위와 회전을 강제적으로 공유하게 되며 이로 인해 접합부 강성이 과대평가되는 문제가 발생할 수 있을 것이다.

이 연구에서 고려한 모듈 간 접합부는 연결강판을 바닥보와 천장보 사이에 삽입하고 다수의 볼트로 체결한 형태로 연결강판 단부는 볼트 체결과 모듈 자중에 의한 압축력으로 인해 충분한 회전 구속이 확보되는 것으로 판단된다. 따라서 연결강판의 양단부 경계조건을 고정으로 가정하는 것은 구조적으로 타당하다고 볼 수 있다. 다만, 모듈 간 수직 간격이 약 30 mm이고, 기둥을 중심선 기준의 보요소로 모델링함에 따라 좌우 기둥 중심 간 거리가 약 155 mm로 형성되므로 연결강판은 일

정 길이를 갖는 구조 부재로서 휨 변형의 영향을 받을 수 있다.

이에 따라 여기서는 연결강판을 강제 링크로 이상화하지 않고, 실제 기하학적 길이를 반영한 보요소(beam element)로 모델링하였다. 이를 통해 연결강판 자체의 휨 변형을 허용함과 동시에 좌우 기둥에 서로 다른 변형이 발생할 수 있도록 하여 모듈 간 접합부의 구조적 거동을 보다 합리적으로 모사하고자 하였다. 이러한 모델링은 모듈 간 접합부 강성이 바닥 다이아프램 거동에 미치는 영향을 평가하는 데 있어 안전측의 접근이 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 모듈러 건축물의 해석

#### 3.1 모듈러 건축물 개요 및 모델링

연결강판으로 대표되는 모듈 간 접합부 강성이 바닥 다이아프램 거동에 미치는 영향을 명확히 파악하기 위하여, 구조적 복잡성을 최소화한 4Bay-5Story 규모의 매우 단순한 철골 모듈러 건축물을 해석 대상으로 설정하였다. 이는 부재 배치, 하중 전달 경로, 비정형 평면 등의 영향보다는, 모듈 간 접합부 강성 변화에 따른 바닥 다이아프램 거동 차이에 초점을 맞추기 위한 의도적인 단순화이다. 해석 대상 건축물의 전체 구조 형상과 평면 구성은 Fig. 5에 나타내었다.

해석 대상 건축물은 공장에서 제작된 모듈을 현장에서 적층·배치하는 구조 형식으로, 각 모듈은 기둥과 바닥보 및 천장보로 구성된 독립적인 골조 프레임으로 이루어진다. 각 모듈의 크기는 3,000×6,000×3,000 mm<sup>3</sup>로 설정하였으며, 모듈 간 시공 오차 및 조립성을 고려하여 수직 방향으로 30 mm, 수평 방향으로 20 mm의 갭을 적용하였다. 기둥은 □-125×125×9 단면을 사용하였고, 바닥보 및 천장보는 C-200×75×6 단면을 적용하였다. 모든 구조 부재의 강종은 SS275로 동일하게 가정하였다.

구조 해석은 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS Gen을 이용하여 수행하였으며, 각 모듈은 기둥과 보로 구성된 3차원 골조 요소로 모델링하였다. 모듈 간 접합부는 Fig. 4에 제시한 바와 같이 연결강판을 이용한 보-보 접합 모델을 적용하였다. 연결강판은 두께 20 mm, 폭

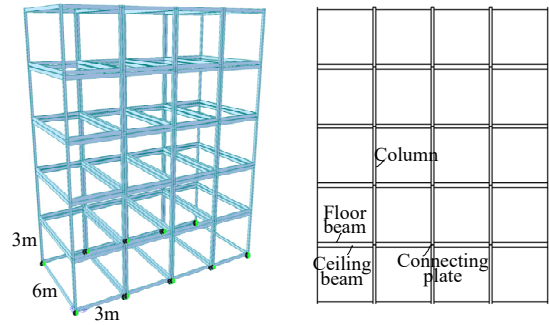


Fig. 5. Analytical model of modular building

75 mm로 설정하였고, 기둥 중심 간 거리와 모듈 간 수직 갭을 고려하여, 유효 길이를 155 mm로 하였다. 연결강판은 보요소로 모델링하여 휨 변형을 허용하였으며, 바닥보 및 천장보와는 강접합 조건으로 연결하였다. 이를 통해 모듈 간 접합부에서 발생할 수 있는 상대 변형과 강성 효과를 해석에 반영하고자 하였다.

지점 경계조건은 기둥 하부에서 x, y, z 방향의 병진 변위만을 구속하고 회전 자유도는 허용하였다. 이러한 경계조건 설정을 통해 기초부 회전 구속의 영향은 배제하고, 모듈 간 접합부 강성과 바닥 다이아프램 거동이 전체 구조 응답에 미치는 영향을 보다 명확히 분석하고자 하였다.

하중 조건으로는 풍하중과 지진하중을 모두 고려하였다. 풍하중은 서울 지역을 기준으로 기본풍속 26 m/s, 노풍도 B를 적용하여 산정하였다. 또한 지진하중은 서울 지역을 기준으로 설계 응답스펙트럼을 적용하여 입력하였다. 바닥 다이아프램의 횡력 전달 특성을 보다 명확히 파악하기 위하여, 일부 해석에서는 풍하중을 집중하중 형태로 치환하여 특정 Bay에만 작용시키는 조건을 적용하였다.

#### 3.2 바닥 다이아프램 범위에 따른 거동 비교

먼저 바닥 다이아프램 범위에 따른 구조 거동 차이를 정량적으로 비교하기 위하여, 동일 층 전체 바닥을 통합된 강한 다이아프램으로 가정한 경우와 모듈 바닥을 개별적인 강한 다이아프램으로 가정한 경우를 검토하였다. 두 모델의 다이아프램 모델링 개념은 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 각각 나타내었다.

먼저 지진하중에 대한 층간변위 응답을 비교한 결과 두 모델 간의 최대층간변위 차이는 없었으며, X방향의

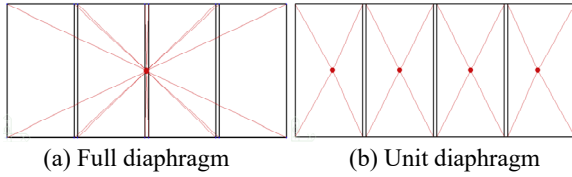


Fig. 6. Diaphragm modeling assumptions

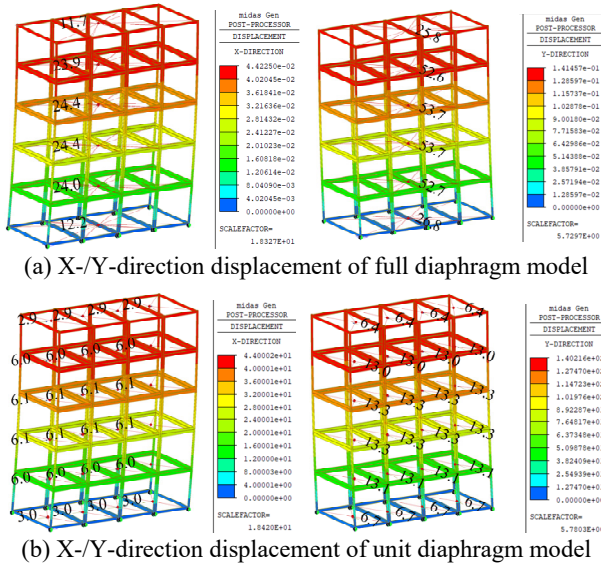


Fig. 7. Wind-induced displacements from diaphragm models

최대층간변위비는 0.0163이었고, Y방향의 최대층간변위비는 0.0195로 두 모델에서 동일한 값으로 나타났다. 또한 Fig. 7에 나타난 두 모델의 풍하중에 대한 X와 Y 방향의 변위 응답을 비교한 결과에서도 지진하중에 대한 결과와 유사한 경향이 확인되었다. 두 모델의 해석 결과에서 미소한 차이가 발생한 것은 개별 다이아프램 모델에 입력된 각 방향 풍하중의 합이 통합 다이아프램 모델에 입력된 풍하중보다 미소하게 작기 때문이었다.

동일한 해석 결과를 가져온 주요 원인은 해석 모델에 적용한 연결강판의 강성이 비교적 크게 설정되었기 때문일 것이다. 연결강판을 통한 모듈 간 횡력 전달이 원활하게 이루어짐에 따라 개별 다이아프램으로 모델링한 경우에도 층 단위로 일체 거동에 가까운 응답을 보인 것으로 분석된다.

### 3.3 연결강판 강성에 따른 거동 비교

연결강판을 이용한 보-보 모듈 간 접합부의 수평강성이 바닥 다이아프램 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 연결강판 두께를 단계적으로 변화시킨 해석을

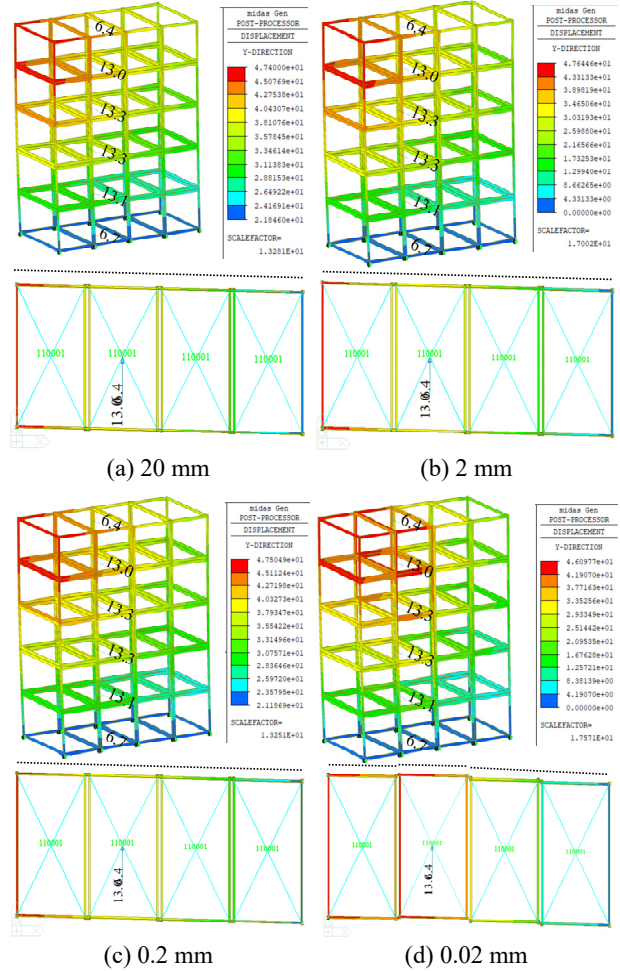


Fig. 8. Y-dir. displacement distributions for different connecting plate thicknesses

수행하였다. 해석 대상 건축물 및 기본 모델링 방법은 3.2절과 동일하며, 연결강판의 두께만을 변수로 설정하여 다이아프램 거동의 변화 양상을 비교하였다.

연결강판 두께는 20 mm, 2 mm, 0.2 mm, 0.02 mm의 4가지 경우로 가정하였다. 각 경우에 대해 좌측에서 두 번째 베이에 해당하는 모듈(1층-5층)에만 X 및 Y방향 풍하중을 작용시켰으며, 각 모듈 바닥은 도심에 마스터 노드를 생성하고 네 모서리 절점을 강체 링크로 연결하여 강한 다이아프램으로 이상화하였다. 이를 통해 연결강판 강성 변화에 따른 모듈 간 횡력 전달 능력과 바닥 다이아프램의 연속성 유지 여부를 명확히 관찰하고자 하였다.

Fig. 8은 연결강판 두께 변화에 따른 Y방향 변위 분포를 나타낸 것으로 각 경우에 대해 최상층 평면에서의 변위 형상을 함께 제시하였다. 연결강판 두께가 20 mm

및 2 mm인 경우 풍하중이 국부적으로 작용함에도 불구하고 최상층 평면의 Y방향 변위는 거의 선형적으로 분포하며, 바닥 전체가 하나의 다이아프램으로 거동하는 양상을 보였다. 이는 연결강판의 수평강성이 충분히 커 모듈 간 상대 변형이 효과적으로 억제되었기 때문으로 판단된다. 반면, 연결강판 두께가 0.2 mm로 감소한 경우에는 전체적인 변위 분포의 기울기는 유지되나, 풍하중이 작용한 모듈 인근에서 변위 기울기의 변화가 관찰되었다. 이는 연결강판 수평강성이 모듈 수평강성과 유사한 수준으로 감소하면서 바닥 다이아프램 거동이 통합 거동에서 국부 거동으로 전이되기 시작하는 경계적 상태로 해석할 수 있다. 연결강판 두께가 0.02 mm인 경우에는 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나며, 풍하중이 작용한 위치를 중심으로 변위 분포의 각도가 명확히 꺾이고 불규칙한 형태를 보였다. 이는 모듈 간 상대 변형이 지배적으로 발생하여 바닥 다이아프램의 연속성이 상실된 상태를 의미한다.

각 해석 경우에 대한 연결강판 두께와 관찰된 다이아프램 거동 특성은 Table 2에 정리하였다. 표에서 확인할 수 있듯이 연결강판 두께가 충분히 큰 경우에는 바닥 다이아프램이 통합 거동을 유지하였으나, 강성이 감소함에 따라 국부 변형 집중 및 다이아프램 거동의 분리가 단계적으로 발생하였다.

이와 같은 해석 결과는 바닥 다이아프램 거동이 모듈 간 접합부의 수평강성에 의해 지배됨을 명확히 보여준다. 특히, 연결강판 수평강성이 단일 모듈의 수평강성에 비해 충분히 확보되지 않을 경우, 국부 풍하중에 의해 바닥 다이아프램의 연속 거동이 유지되지 못하고 모듈 단위의 개별 거동이 나타날 수 있음을 확인하였다.

**Table 2.** Summary of diaphragm behavior according to connecting plate thickness

Connecting plate thickness (mm)	Observed diaphragm behavior
20	Fully integrated diaphragm
2	Integrated diaphragm
0.2	Transitional behavior
0.02	Discrete diaphragm behavior

## 4. 바닥 다이아프램 거동에 대한 이론적 평가

### 4.1 모듈 간 접합부와 모듈의 수평강성 비교

모듈러 건축물에서 바닥이 하나의 통합된 강한 다이아프램 거동을 나타내기 위해서는, 개별 모듈을 연결하는 모듈 간 접합부가 충분한 수평강성을 확보하고 있어야 한다. 즉, 횡하중이 작용할 경우 모듈 간 접합부의 변형이 개별 모듈 자체의 변형에 비해 상대적으로 작다면 층 단위 바닥은 통합 다이아프램으로 거동할 수 있다. 반대로 접합부의 수평강성이 부족할 경우 모듈 간 상대 변위가 발생하며 바닥 다이아프램의 연속성은 저하된다. 따라서 모듈러 건축물 바닥의 다이아프램 거동 여부는 모듈 간 접합부의 수평강성과 단위 모듈의 수평강성을 비교함으로써 판정할 수 있다.

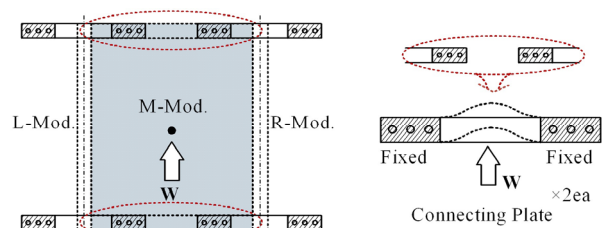
이 연구의 모듈 간 접합부는 바닥보와 천장보 사이에 삽입된 연결강판이 볼트로 체결되는 형식으로 Fig. 9과 같이 단순화된 상태에서 횡하중에 의해 전단 변형과 휨 변형이 동시에 발생할 수 있다. 따라서 연결강판의 수평강성  $k_{imc}$ 는 전단강성  $k_s$ 와 휨강성  $k_b$ 의 조합으로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{k_{imc}} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_b} \tag{1}$$

$$k_s = \frac{GA}{L} \tag{2}$$

$$k_b = \frac{12EI}{L^3} \tag{3}$$

- 여기서,  $E$ : 탄성계수
- $G$ : 전단탄성계수
- $A$ : 연결강판 단면적
- $I$ : 단면2차모멘트
- $L$ : 연결강판 유효 길이



**Fig. 9.** Simplified analytical model of the connecting plate

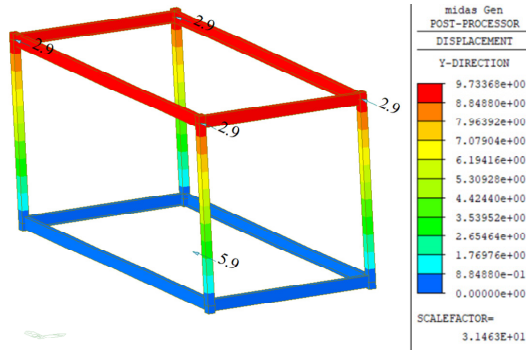


Fig. 10. Analysis result for lateral stiffness of single module

Table 3. Lateral stiffness of connecting plate and module

Connecting plate				Module	Diaphragm level
Thk. (mm)	$k_s$ (kN/mm)	$k_b$ (kN/mm)	$k_{imc}$ (kN/mm)	$k_m$ (kN/mm)	
20	745.0	453.2	281.8	1.19	Strong
2	74.5	45.3	28.2		Adequate
0.2	7.45	4.5	2.82		Critical
0.02	0.745	0.45	0.28		Weak

3.3절에서 해석된 연결강판 두께 20 mm, 2 mm, 0.2 mm, 0.02 mm에 대해 전단강성과 휨강성을 계산한 결과 모든 경우에서 전단강성  $k_s$ 는 휨강성  $k_b$ 에 비해 현저히 큰 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 연결강판의 수평변형이 전단변형보다는 휨변형에 의해 지배됨을 의미하며 실무적인 계산의 편의성과 안전측 평가를 고려할 경우 연결강판의 수평강성을 휨강성으로 근사하는 것이 합리적임을 의미한다.

한편, 단위 모듈의 수평강성은 Fig. 10에 제시한 것과 같이 기둥과 보로 구성된 모듈 골조 전체의 횡방향 거동을 반영하기 위해 별도의 해석을 통해 산정하였다.

단위 모듈의 수평강성  $k_m$ 과 연결강판의 수평강성을 Table 3에 정리하여 비교한 결과 연결강판 두께 20 mm 및 2 mm의 경우에는  $k_{imc}$ 가 단위 모듈 강성보다 충분히 크게 나타나 바닥 다이아프램이 강한 다이아프램 거동을 유지할 수 있는 조건에 해당하였다. 반면, 두께 0.2 mm에서는 두 강성이 유사한 수준으로 접근하며, 0.02 mm의 경우에는 연결강판의 수평강성이 단위 모듈 강성보다 현저히 작아 다이아프램의 강체 거동이 상실되는 경향을 보였다.

### 4.2 강한 다이아프램 거동 판정 기준

모듈러 건축물에서 바닥 다이아프램이 통합된 거동을 보이기 위해서는 모듈 간 접합부가 개별 모듈의 횡방향 변형을 충분히 구속할 수 있어야 한다. 이를 정량적으로 판단하기 위해 이 연구에서는 모듈 간 접합부의 수평강성과 단일 모듈의 수평강성의 상대적 크기를 비교하는 방법을 적용하였다.

모듈 간 접합부의 등가 수평강성을  $k_{imc}$ , 단일 모듈의 수평강성을  $k_m$ 이라 할 때, 강한 다이아프램 거동 여부는 다음과 같은 강성비 조건으로 판정할 수 있다.

$$\frac{k_{imc}}{k_m} \geq \alpha \tag{4}$$

여기서,  $\alpha$ 는 강한 다이아프램 거동을 확보하기 위한 강성비 계수로 여기서는 5-10 범위를 제안한다. 공학적으로 두 강성이 직렬로 연결되면 등가강성은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \tag{5}$$

$k_1 \gg k_2$ 일 때,  $k_{eq}$ 는 약한 강성  $k_2$ 에 수렴한다. 수치적으로 보면 강성비가 5인 경우 약한 요소에 의해 전체 변형의 약 80 % 이상이 지배되며, 강성비가 10 이상이면 강한 요소의 변형 기여도는 10 % 미만으로 감소한다. 즉, 강성비 5-10은 상대적으로 약한 요소의 변형을 사실상 지배적인 변형으로 간주할 수 있는 합리적인 경계 범위라 할 수 있다.

이러한 개념은 기존 구조기준 및 문헌에서도 유사하게 적용되고 있다. ASCE<sup>[15]</sup>에서는 다이아프램 변형이 횡력저항시스템의 변형에 비해 무시할 수 있는 경우 강한 다이아프램으로 간주하고 있으며, 이 ‘무시 가능 (negligible)’ 조건을 정량화할 때 실무 및 연구에서는 일반적으로 5-10배 수준의 강성비가 활용된다. 또한, EN 1993-1-8 (Eurocode 3)<sup>[18]</sup> Cl. 5.2.2에서는 가새골조에 대해 접합부 초기회전강성이 보 강성의 8배 이상이면 강접합으로 분류한다.

다만, 모듈러 건축물은 구조적 비대칭, 접합부 성능 편차, 시공 오차 등의 영향이 일반적인 건축물보다 크

게 작용할 수 있다. 따라서 상기 강성비 조건을 만족하거나 현행 기준에서 강성 비정형 구조물로 분류되지 않는 경우라 하더라도 모듈러 건축물의 경우 우발편심하중을 항상 고려하는 것이 바람직한 설계 접근이라 판단된다. 이는 다이아프램 거동에 대한 불확실성을 보완하고, 구조적 안전성을 보다 보수적으로 확보하기 위한 합리적인 설계 방안이다.

## 5. 결론

이 연구에서는 연결강판을 이용한 모듈 간 접합부를 갖는 강재 모듈러 건축물을 대상으로 접합부 수평강성이 바닥 다이아프램 거동에 미치는 영향을 해석적·이론적으로 검토하였다. 단순화된 해석 모델을 통해 연결강판 두께 변화에 따른 다이아프램 거동 특성을 비교하고, 모듈 간 접합부 강성과 단위 모듈 강성의 상대적 관계를 기반으로 강한 다이아프램 거동 판정 기준을 제안하였다.

- (1) 모듈러 건축물의 바닥 다이아프램 거동은 모듈 간 접합부의 수평강성에 크게 의존하며, 연결강판의 강성이 충분할 경우 국부 하중이 작용하더라도 층 단위의 통합된 다이아프램 거동이 유지됨을 확인하였다.
- (2) 연결강판의 수평강성은 전단강성과 휨강성의 조합으로 표현될 수 있으나, 이 연구에서 고려한 형상 및 길이 조건에서는 휨변형이 지배적이어서 실무적·안전측 평가를 위해 휨강성만을 고려한 근사가 합리적일 것이다.
- (3) 단위 모듈의 수평강성은 모듈 골조 전체의 횡거동을 반영하기 위해 별도의 구조해석을 통해 산정하는 것이 타당하며, 이를 통해 접합부 강성과의 직접적인 비교가 가능함을 보였다.
- (4) 모듈 간 접합부 수평강성이 단위 모듈 수평강성의 약 5~10배 이상일 경우, 모듈 간 상대변형은 제한되며 바닥 다이아프램은 사실상 강한 다이아프램 거동을 나타내는 것으로 판단할 수 있다.
- (5) 다만 모듈러 건축물의 구조적 불확실성을 고려할 때, 제안된 강성비 조건을 만족하더라도 설계 시 우발편심하중을 함께 고려하는 것이 바람직하다.

## 감사의 글

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(RS-2025-02220885)으로 한국건설기술연구원이 수행한 결과물임(과제번호: 20260231-102).

## 참고문헌(References)

- [1] Lawson, M., Ogden, R., and Goodier, C. (2014) *Design in Modular Construction*, CRC Press, USA.
- [2] Smith, R.E. (2010) *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*, Wiley, USA.
- [3] Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H., and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings - An Overview, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.16, pp.45-56.
- [4] Shi, F.W., Ding, Y., Zong, L., Pan, W., and Dong, S. (2025) In-Plane Behavior of Discretely Connected Diaphragms in Steel Modular Buildings, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.213, 113302.
- [5] He, X., Wei, Y., and An, Y. (2025) Analytical Model for Diaphragm Stiffness Classification Considering Stiffness of Horizontal Intermodule Joints in Steel Module-Concrete Core Structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.151, No.12, 04025205.
- [6] Srisangeerthan, S., Hashemi, M., Rajeev, P., Gad, E., and Fernando, S. (2017) Influence of Diaphragm Flexibility on the Seismic Performance of Multi-Story Modular Buildings, *Proceedings of the Australian Earthquake Engineering Society 2017 Conference*, Australia.
- [7] Chua, Y.S., Liew, J.Y.R., and Pang, S.D. (2020) Modelling of Connections and Lateral Behavior of High-Rise Modular Steel Buildings, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.166, 105901.
- [8] Zhong, X., Chen, Z., Liu, J., Liu, Y., and Liu, X. (2022) Experimental Research on the In-Plane Performance of Discontinuous Modular Diaphragms, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.173, 108905.
- [9] Wang, C., Tian, P., and Chan, T.-M. (2024) Seismic Behavior of Modular Buildings with Reinforced Concrete (RC) Structural Walls as Seismic Force Resisting System, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.315, 118378.

- [10] Federal Emergency Management Agency. (2021) *Seismic Design of Rigid Wall-Flexible Diaphragm Buildings*, FEMA P-1026, FEMA, USA.
- [11] Kim, H.J. (2013) *Structural Behavior of Intermediate Floor Frames Connected to Concrete Walls under Lateral Loading*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University (in Korean).
- [12] Ju, J.H. (2025) *A Study for the Improvement of Performance of Diaphragm in High-Rise Modular Building through Analytical Study*, Master's Thesis, Ajou University (in Korean).
- [13] Kwak, J.S., Cho, B.H., and Ju, J.H. (2025) Analytical Study on the Diaphragm Performance of High-Rise Modular Buildings Based on Connection Method Variations, *Proceedings of the 36th Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, pp.7-8 (in Korean).
- [14] Choi, J.Y., Lee, S.J., Joung, B.K., Lee, J.H., and Kim, T.J. (2025) Seismic Performance Evaluation of High-Rise Modular Buildings by Securing Diaphragm Continuity, *Proceedings of the 36th Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, pp.9-10 (in Korean).
- [15] American Society of Civil Engineers. (2017) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-16, ASCE, USA.
- [16] International Code Council. (2021) *International Building Code*, International Code Council, USA.
- [17] AISC. (2017) *Steel Construction Manual (15th Ed.)*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [18] European Committee for Standardization. (2024) *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-8: Design of Joints*, EN 1993-1-8:2024, CEN, Brussels, Belgium.

---

**요약**: 이 연구는 모듈러 건축물의 모듈 간 접합부 강성이 바닥 다이아프램 거동에 미치는 영향을 분석하고, 강성비를 이용한 정량적 판정 기준을 제안하였다. 4Bay-5Story 철골 모듈러 건축물을 대상으로 MIDAS Gen을 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 연결강판을 실제 기하학적 길이를 반영한 보 요소로 모델링하였으며, 두께를 20 mm에서 0.02 mm까지 변화시켜 접합부 강성에 따른 구조 응답을 비교하였다. 해석 결과, 연결강판 두께가 20 mm 및 2 mm인 경우 바닥 전체가 통합된 다이아프램으로 거동하였으나, 0.2 mm 이하로 감소하면 다이아프램 연속성이 상실되었다. 이론적 평가를 통해 접합부의 수평강성이 단위 모듈 수평강성의 약 5-10배 이상일 경우 바닥 다이아프램은 강한 다이아프램으로 거동함을 확인하였다. 제안된 강성비 기준은 모듈러 건축물의 다이아프램 거동 판정에 정량적 근거를 제공하나, 설계 시 우발편심하중을 반영할 것을 권장한다.

**핵심용어**: 모듈러 건축물, 바닥 다이아프램, 모듈 간 접합부, 수평 강성, 연결강판

---