

# 집중 하중을 받는 버티포트용 스틸 모듈 바닥판의 웨브크리플링 성능

이승엽<sup>1</sup> · 김대경<sup>2\*</sup> · 이지운<sup>3</sup>

<sup>1</sup>박사과정, 울산대학교, 건축·도시환경학부, <sup>2</sup>교수, 울산대학교, 건축·도시환경학부, <sup>3</sup>수석연구원, (주)포스코 기술연구원, 구조연구그룹

## Web Crippling Performance of Steel Modular Deck Systems for UAM Vertiports Subjected to Concentrated Loads

Lee, Seung Yup<sup>1</sup>, Kim, Dae Kyung<sup>2\*</sup>, Yi, Jiwoon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Department of Architecture and Civil & Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 44610, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architecture and Civil & Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 44610, Korea

<sup>3</sup>Senior Principal Researcher, Steel Structure Research Group, POSCO, Incheon, 21985, Korea

**Abstract** – This study experimentally evaluates the structural performance of a steel modular deck system proposed for urban air mobility (UAM) vertiport applications. Four types of deck specimens, composed of cold-formed steel closed-section modular units, were fabricated with varying cross-sectional configurations and reinforcement details. Concentrated loading tests were conducted to investigate the load-displacement behavior and failure modes. The test results demonstrate that the proposed modular deck system provides sufficient load-carrying capacity despite its lightweight configuration, with web crippling identified as the dominant limit state. In addition, the interaction among adjacent modular units and the reinforcement details contributed to load redistribution and enhanced system-level strength. These findings confirm the structural efficiency of the proposed modular deck system and support its applicability to UAM vertiport deck structures.

**Keywords** – Urban air mobility, Vertiport, Modular, Deck system, Cold-formed steel, Web crippling

### 1. 서론

도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 향후 대도시 교통 혼잡 완화와 이동성 혁신을 견인할 핵심 미래 기술로 주목받고 있다. 이러한 UAM 기체의 실질적인 운용을 위해서는 안전한 이착륙 인프라인 버티포트(Vertiport) 구축이 필수적이다. 특히 도심지 내 기존 건축물의 옥상부나 제한된 공간에 설치되는 고가형 버티포트의 경우, 기체의 이착륙 하중뿐만 아니라 구조물 자체가 기존 건축물의 구조 안전성에 미치는 영향을 최소화해야 하므로 극심한 수준의 경량화와 시공 효율성이 동시에 요구된다. 버티포트 데크는 기체 하중이 직접

작용하는 주요 구조 요소로서, UAM 기체의 높은 이착륙 빈도에 따른 동적 충격과 집중 하중을 안전하게 지지해야 한다.

최근 국내외에서 버티포트 설계를 위한 기본적인 가이드라인이 단계적으로 제정되고 있으나<sup>[1]-[3]</sup>, 이는 주로 하중 조건과 기능적 요구 사항을 제시하는 수준에 머물러 있어 실제 구조 시스템 구현을 위한 설계 사례나 실험적 검증 자료는 부족한 실정이다. 특히 기존 건축물의 구조적 여유 하중이 제한적인 상황에서 대형 강재 구조물이나 콘크리트 슬래브를 적용하는 것은 현실적으로 한계가 있다. 기존 모듈러 바닥 시스템 연구에서는 Lee *et al.*은 트러스형 데크의 유효성을 입증하였고 Oh & Lee는 철골 모듈 유닛의 바닥구조형식에 따라 진동 성능평가를 수행한바 있다<sup>[4],[5]</sup>. 그러나 이러한 연구들은 주거용 건축물의 진동 제어에 집중되어 있어, 집중 하중 저항성이 중요한 버티포트에는 추가적인 검토가 필요하다.

반면, 토목 분야의 강재 복공판 연구는 집중 하중과 피로 성능 면에서 우수한 저항성능을 보여주었다. 먼저, Kang *et al.*은 고강도 강재를 적용한 장시간 복공판의

Note.-Discussion open until August 31, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 20, 2026; revised on February 10, 2026; approved on February 10, 2026.

Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-52-259-2271 Fax. +82-52-259-1690

E-mail. dkkim13@ulsan.ac.kr

정적 및 동적 거동 분석을 통해 구조적 강성 확보 방안을 제시하였으며<sup>[6]</sup>, 이는 대형 UAM 기체의 착륙 하중을 지지해야 하는 버티포트 데크의 고강성 설계 시 유효한 참고 자료가 될 수 있다. 또한, 교통 하중에 노출된 복공판의 용접부 피로 파손을 다룬 Kyung *et al.*의 연구<sup>[7]</sup>는 이착륙 빈도가 높을 것으로 예상되는 UAM 운용 환경에서 데크 시스템의 피로 수명 예측 및 유지관리 기준 수립을 위한 논리적 근거로 준용이 가능하다. 소음 저감을 목적으로 수행된 Cho & Jung의 강재 복공판과 강합성 복공판의 비교 연구에서는 두 복공판의 소음 차이가 미세하게 나타났는데<sup>[8]</sup>, 이는 강재 복공판이 도심지 옥상형 버티포트 설치 시 건물 하부로 전달되는 충격 및 진동을 제어하기 위한 구조적 대안으로서 그 적용 가능성을 시사한다. 이처럼 토목 분야에서 축적된 강재 복공판의 성능 데이터는 버티포트 전용 데크 시스템의 구조적 안전성을 확보하기 위한 전제 조건으로서 중요한 의미를 갖는다. 그러나 강재 복공판은 자중이 무거워 옥상형 인프라에 적용하기에는 건축물에 과도한 하중 부담을 줄 우려가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 건축물의 하중 부담을 최소화하면서도 소형 UAM 기체의 이착륙 하중을 안전하게 지지할 수 있는 박판 냉간성형강 폐단면 유닛 기반의 초경량 스틸 모듈러 데크 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 시스템은 박판 소재를 사용하되 공장에서 정밀 제작된 폐단면 유닛의 기하학적 형상과 모듈 간 조립을 통한 하중 분산 메커니즘을 활용하여 중량 대비 높은 강성 효율을 제공하도록 설계되었다. 본 논문에서는 제안된 초경량 데크 시스템의 구조 거동을 평가하기 위해 단면 형상 및 보강 상세를 변수로 한 정적 재하 실험을 수행하였다. 이를 통해 박판 구조물에서 지배적으로 나타나는 웨브 크리플링 거동과 인접 유닛 간의 하중 분산 효과를 분석함으로써, 하중 제한이 엄격한 도심지 옥상형 버티포트 데크로서의 적용 가능성을 검토하고 향후 관련 설계 기준 수립을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 구조 특성 및 현행 구조기준 분석

### 2.1 UAM 버티포트 데크의 구조적 특성

UAM 버티포트 데크는 기체의 이착륙 시 발생하는

충격 하중뿐만 아니라 추진체에 의한 하향풍과 기체 활주 시의 동적 영향 등 복합적이고 극한의 하중 조건에 대해 충분한 구조적 안전성을 확보해야 한다. 본 연구에서 제안하는 모듈형 데크는 일방향 하중 전달 시스템을 채택하여, 작용 하중을 데크의 길이 방향으로 집중시켜 하부 구조 시스템으로 전달하는 메커니즘을 갖는다. 두께 1.6 mm의 박판 강판을 냉간성형한 후 C형 단면을 맞대어 구성한 폐쇄형 사각 단면 상세는 부재의 경량화와 제작 효율성 측면에서 유리하며, 개방형 단면 대비 우수한 비틀림 강성과 단면 효율을 제공한다. 다만 박판 구조의 물리적 특성상 재료 항복 이전에 국부 좌굴, 비틀림 좌굴, 휨-전단 상호작용 등 구조 불안정 문제가 발생할 가능성이 있으므로 이에 대한 면밀한 구조 거동 검토가 요구된다.

### 2.2 국내외 구조기준 분석 및 하중 설정

현재 버티포트 설계를 위한 국내외 기준으로는 국내의 공항·비행장시설 및 이착륙장 설치기준(국토교통부, 2022)<sup>[1]</sup>과 미국 연방항공청(FAA)의 Engineering Brief #105A (2024)<sup>[2]</sup>, 유럽항공안전청(EASA)의 PTS-VPT-DSN (2022)<sup>[3]</sup> 등이 대표적이다. 해당 기준들에 따르면 이착륙장 설계 시 기체의 최대이륙중량을 기본 하중으로 설정하고 착륙 충격을 고려하여 정하중 대비 약 150 % 수준의 동하중 계수를 적용하도록 규정하고 있다. 특히 착륙장치 접지면을 통해 전달되는 집중하중에 대하여 국부 파괴나 유해한 영구 변형이 발생하지 않아야 함을 명시하고 있으며, 반복적인 이착륙 운용 조건에서의 구조적 사용성 확보를 강조하고 있다. EASA 기준의 경우, eVTOL (Electronic Vertical Takeoff and Landing) 기체의 운용 특성을 반영하여 과도한 처짐으로 인한 기체 안착성 저하나 배수 성능 저해를 방지하기 위해 변형 제한을 주요 검토 항목으로 포함하고 있다. 더불어 국내의 기준 모두 표면의 평탄성, 미끄럼 저항 및 배수 성능의 확보, 내식성 자재 적용 등 유지관리성과 내구성 확보를 공통적인 필수 요건으로 제시하고 있다.

본 연구에서는 이러한 국내의 설계기준에서 요구하는 구조적 성능을 충족하기 위해, 최대이륙중량에 동하중 계수 1.5를 적용한 하중 조건을 구조 성능 평가의 기본 전제로 설정하였다.

### 2.3 냉간성형강 설계 기준에 따른 강도 산정

본 연구의 모듈러 데크는 두께 1.6 mm의 박판 강판을 상온 절곡한 냉간성형강 부재로 구성되므로, 일반적인 열연 형강부재보다도 압축부의 판 요소의 좌굴 거동이 지배적이다. 따라서 데크의 설계 강도 산정 시에는 「KDS 41 30 30:2022 냉간성형강 구조 설계기준」<sup>[9]</sup>에 근거하여 재료 항복뿐만 아니라 전체좌굴, 국부좌굴, 단면형상변형좌굴을 단계적으로 고려해야 한다.

휨재는 항복 및 전체(횡비틀림)좌굴, 항복 및 전체좌굴과 상호작용하는 국부좌굴, 단면형상변형좌굴이 있으며, 설계강도는 이 세 가지 한계상태 중 최솟값을 기준으로 결정된다. 전체좌굴 강도는 공칭휨능력( $F_n$ )과 탄성임계횡비틀림좌굴능력( $F_{cr,e}$ )을 기반으로 산정하는데, 본 연구의 프로토타입은 단위 유닛 간의 연속적 결속으로 인해 충분한 횡방향 구속이 확보된 것으로 가정하여  $F_{cr,e}$ 를 검토하였다. 국부좌굴 강도는 유효폭법 또는 직접강도법을 적용하여 산정하며, 특히 단면형상변형좌굴은 세장비( $\lambda_d$ )에 따라 비탄성 여유강도를 고려하여 설계 내력에 반영한다.

휨을 받는 데크의 전단 내력은 웨브의 전단항복 및 전단좌굴 강도에 의해 결정되며, 횡방향 웨브 스틱프너 유무에 따른 전단좌굴계수( $k_v$ )를 적용하여 산정한다. 또한, 버티포트 데크는 기체 접지면을 통한 집중 하중을 직접 받게 되므로 웨브의 국부적 찌그러짐인 웨브크리플링이 구조 안정성을 결정짓는 핵심 한계 상태로 작용한다. 본 연구에서는 설계 기준에서 제시하는 지압 조건과 개구부에 의한 강도 저감 효과를 반영하여 이론적 내력을 산정하였다.

## 3. 프로토타입 모듈형 데크 시스템

### 3.1 실험체 설계 및 주요 제원

이 연구에서는 박판 냉간성형강으로 구성된 UAM 버티포트용 모듈러 데크 시스템의 구조 거동을 실험적으로 평가하기 위하여, 단면 형상 및 보강 상세에 따라 네 가지 유형(Type A-D)의 실험체를 제작하였다.

모든 실험체는 두께 1.6 mm의 냉간성형강판으로 제작된 C형 단면을 기본 요소로 하며, 두 개의 C형 단면

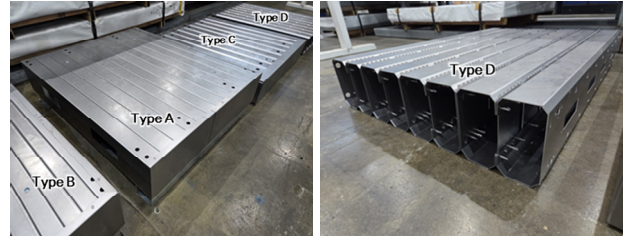


Fig. 1. Fabricated prototype specimens for four types of modular deck systems

Table 1. Geometric parameters and module configurations for each specimen type

Parameters	Type		
	A	B	C, D
Section profile	Basic	Optimized	Chamfered
Section height (mm)	200	200	180
Unit width (mm)	150	100	200
Lip length (mm)	27	27	Upper 27 / Lower 30
Chamfer detail	-	-	Asymmetric (45°)

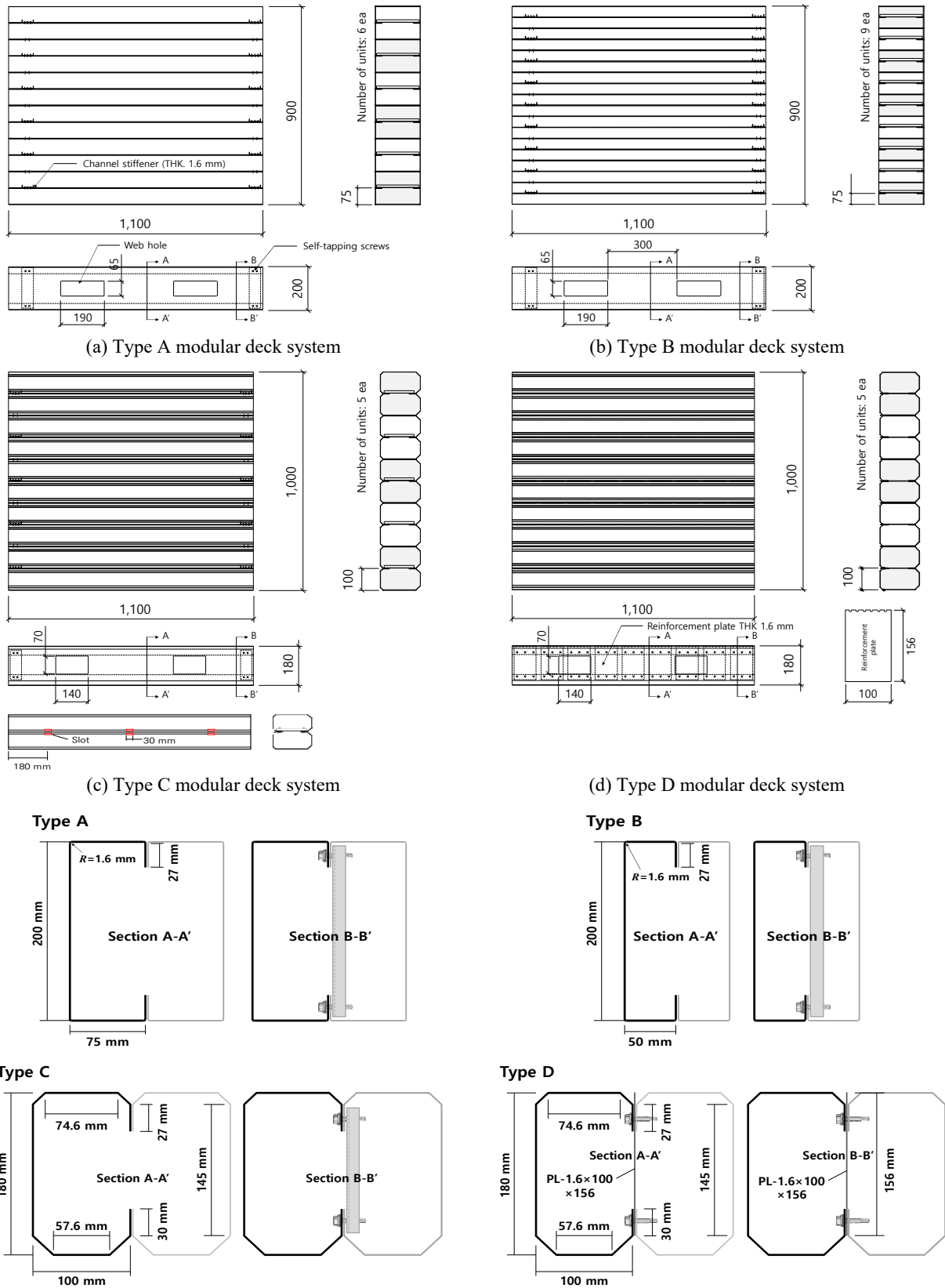
의 단순 끝단판(Lip)을 서로 맞대어 구성한 폐쇄형 사각단면(□형)을 형성하였으며, 단위 유닛으로 설정하였다. 이러한 단위 유닛들을 병렬로 배열하여 하나의 데크 시스템을 Fig. 1과 같이 형성하였으며, 전체 길이는 1,100 mm로 통일하여 단면 상세 및 유닛 구성 방식에 따른 변수 제어를 실시하였다.

Type A, B, C의 경우, C형 단면 간의 결합은 부재 양 단부에 수직 ㄷ형 스틱프너를 배치하고 단순 끝단판과 함께 셀프 태핑 나사못(self-tapping screw)을 체결하여 단위 유닛을 형성하였다. 단위 유닛 간의 결속은 현장 시공 효율성을 고려하여 건식 접합 방식을 채택하였으며, 부재 전 구간이 아닌 양 단부에만 셀프 태핑 나사못을 적용하여 결합하였다. 반면, Type D는 구조적 일체성 강화를 위해 전 구간에 걸쳐 보강 플레이트와 나사못 접합을 추가하였다. 모든 유닛의 웨브 면에는 유지관리의 편의성과 설비(MEP)의 관통을 고려하여 개구부를 설치하였으며, 실험체별 상세 도면 및 주요 제원은 각각 Table 1과 Fig. 2에 정리하였다.

### 3.2 실험체 유형별 상세 특징

본 연구에서 설정한 실험체별 구체적인 상세와 변수

집중 하중을 받는 버티포트용 스틸 모듈 바닥판의 웨브크리플링 성능



(e) Sectional details of unit assembly and connection methods  
**Fig. 2.** Detailed drawings and sectional configurations of the modular deck systems

제어 목적은 다음과 같다.

먼저 Fig. 2(a)의 Type A는 별도의 단면 가공이나 보강 상재를 적용하지 않은 기본형 실험체로, 냉간성형된 C형 단면 부재를 맞대어 유닛을 구성한 대조군이다. 개별 C형 단면은 플랜지 폭 75 mm, 높이 200 mm이며, 단순 끝단판 높이는 27 mm로 단면 도심을 기준으로 상하 대칭 형상을 갖는다. 데크 모듈 시스템은 총 6개의 단위 유닛을 병렬 배치하여 구성하였다.

Type B는 Type A와 동일한 제작 방식과 설계 원칙을 유지하되, C형 단면의 플랜지 폭을 50 mm로 축소하고 유닛 수를 9개로 증가시켜 전체 모듈 폭을 유지한 모델이다(Fig. 2(b) 참고). 이를 통해 단면 플랜지 폭의 세장비 감소와 유닛 수의 변화가 데크 시스템의 초기 강성 및 하중 분담 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

Fig. 2(c)의 Type C는 구조적 효율성 제고를 위해 C형 단면의 웹-플랜지 및 단순 끝단판-플랜지 접합부에 45° 절곡을 통한 면따기 단면 상재를 적용한 유형이다. 상·하단 면따기 길이는 비대칭으로 설계되었으며, 특히 수직 단순 끝단판과 45° 절곡면에 길이 30 mm의 슬롯을 가공하여, 국부 좌굴 및 변형 거동에 미치는 영향을 함께 관찰하고자 하였다. 이 슬롯은 부재 길이 방향으로 총 3개소(중앙 1개소, 양단부에서 180 mm 이격된 위치에 각 1개소)에 배치되었다. 데크 모듈은 총 4개의 단위 유닛으로 구성하였다.

마지막으로 Type D는 Type C의 면따기 단면 형상을 기반으로 구조적 일체성을 강화한 개선 모델이다(Fig. 2(d)). 데크 길이 방향 전 구간에 걸쳐 보강 플레이트를 추가 설치함으로써, 단면 형상 변화와 보강재의 복합 적용이 휨 강도 증진 및 최종 파괴모드 제어에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였다. Type C에 적용한 슬롯은 Type D에서는 제외하였다.

### 3.3 프로토타입 모듈형 데크 강도 산정

본 연구에서 제안한 모듈형 데크의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 KDS 41 30 30:2022 냉간성형강 설계 기준에 근거한 이론적 강도 산정을 수행하였다. 실제 버티포트 바닥 데크의 시공 시에는 고내식 도금강판인 PosMAC의 적용이 계획되어 있으나, 프로토타입 제작 단계에서는 수급을 고려하여 SPHC 열간 압연 강판을 대체 적용하였다. 제작에 적용된 SPHC 강재의 실측 항

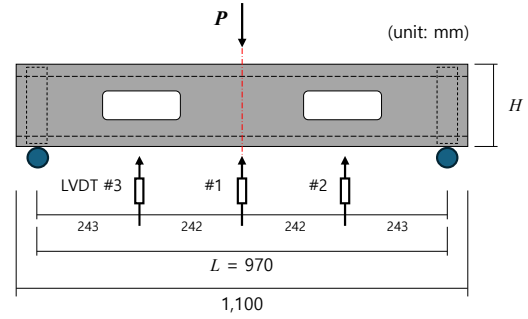


Fig. 3. Loading and instrumentation plan

복강도  $F_y$ 는 165 MPa이며, 탄성계수는 210,000 MPa를 가정하였다. 이때 냉간성형 과정에서 발생하는 가공경화로 인한 항복강도 증진 효과는 보수적인 평가를 위해 고려하지 않았다.

실험체의 지배적인 한계상태를 규명하기 위해, 단위 유닛의 주요 파괴모드인 휨, 전단 및 웨브크리플링 강도를 산정하였다. 도출된 각 공칭강도는 3점 가력 조건(Fig. 3 참고)의 등가 집중하중  $P$ 로 환산하여 비교하였으며, 이를 통해 예상 파괴하중과 선행 파괴모드를 결정하였다. 실험체 Type A, B, C는 단위 유닛 간 기계적 결속이 휨 모멘트가 발생하지 않는 양단 지점에만 국한되어 있으므로, 최대 응력이 발생하는 중앙부에서는 부재 간 전단흐름을 전달할 수 없다는 점을 고려해 완전 비합성 거동을 하는 것으로 가정하였다. 다만, 개별 유닛이 빈틈없이 맞대어 밀착 배열된 형상적 특성에 인해 부재의 횡방향 변위 및 비틀림이 상호 구속되는 효과가 존재할 것으로 판단하였으며, 이에 따라 횡비틀림좌굴의 발생 가능성을 배제하고 단면의 전체 휨 강도에 도달할 수 있는 것으로 간주하였다. Type D의 경우, 보강 플레이트와 나사못 접합에 의한 부분 합성 거동을 이론적으로 정확히 규명하기에 불확실성이 존재하므로, 안전측 설계를 위해 보강 플레이트에 의한 강도 증진 효과를 무시하고 기본 단면인 Type C의 강도를 준용하여 내력을 보수적으로 산정하였다. 이러한 가정에 따라 각 단위 유닛의 휨 및 전단 강도는 개별 구성 요소인 단일 C형 단면 강도의 2배로 산정하여 평가하였다.

단위 유닛의 공칭휨강도( $M_n$ )는 전체좌굴강도와 단면형상변형좌굴 강도 중 최솟값으로 결정되며, 이에 대응하는 하중  $P_b$ 는 식 (1)과 같이 산정한다. 이때 지점 간 거리  $L$ 은 970 mm를 적용하였다.

$$P_{nb} = \frac{4M_n}{L} \quad (1)$$

전단강도는 횡방향 웨브 스티프너가 없는 휨재의 공칭전단강도에 웨브의 구멍을 감안하여 전단강도 감소계수  $q_s$ 를 적용하여 산정하였다. Fig. 2에서 보듯 본 실험체에 적용된 웨브 개구부 크기는 Type A와 B가 65×190 mm, Type C와 D가 각각 70×140 mm로, 이는 KDS 41 30 30의 4.5.3(1)에서 규정하고 있는 웨브 구멍 제한사항을 초과하는 규격이다. 따라서, 원칙적으로는 정밀 수치해석을 통한 평가가 요구되나, 현 단계에서는 약산적인 성능 예측을 위해 설계 기준의 감소계수를 준용하였다. Type A와 B는 플랜지 폭의 차이만 있을 뿐, 전단력을 분담하는 웨브 형상과 조건이 동일하므로 전단강도를 동일한 것으로 평가하였으며, 공칭전단강도 대응 하중은 식 (2)에 따라 산정하였다.

$$q_s = \frac{c}{54t} \text{ 여기서, } c = \frac{h - d_h}{2} \quad (2a)$$

$$P_{nv} = q_s V_n \quad (2b)$$

웨브크리플링강도 산정 시에도 단면의 공칭강도에 개구부의 영향을 반영하기 위하여 감소계수  $R_c$ 를 적용하였다. 앞선 전단강도 검토와 마찬가지로 KDS 41 30 30의 4.5.4(1)에서 규정하고 있는 웨브 구멍 제한사항을 초과하는 규격에 해당한다. Type A와 B의 경우  $R_c$ 는 0.948, Type C와 D의  $R_c$ 는 0.967이다. 지압 조건은 지점에 접합하지 않고, 부분 구속 플랜지에 내부 하중이 재하되는 상태로 가정하였으며, 지압길이  $N$ 은 기준 최소값인 20 mm를 적용하였다. 대응하중은 식 (3)과 같이 결정된다.

$$P_n = Ct^2 F_y \sin \theta \left( 1 - C_{R\sqrt{\frac{R}{t}}} \right) \left( 1 + C_{N\sqrt{\frac{N}{t}}} \right) \left( 1 - C_{H\sqrt{\frac{h}{t}}} \right) \quad (3a)$$

$$R_c = 1.01 - 0.325 \left( \frac{d_h}{h} \right) + 0.083 \left( \frac{x}{h} \right) \quad (3b)$$

$$P_{nc} = R_c (2P_n) \quad (3c)$$

여기서,  $\theta=90^\circ$ ,  $C=13$ ,  $C_N=0.14$ ,  $C_R=0.23$ ,  $C_H=0.01$ ,  $N$

**Table 2.** Theoretical nominal strengths and predicted failure modes of unit modules based on measured yield strength

Specimen	Flexural strength	Shear strength	Web crippling strength	Predicted failure mode
	$P_{nb}$ (kN)	$P_{nv}$ (kN)	$P_{nc}$ (kN)	
Type A	49.98	26.96	<b>10.35</b>	Web crippling
Type B	42.55	26.96	<b>10.35</b>	
Type C (Type D)	50.11	16.33	<b>10.16</b>	

=20,  $R$ 은 안쪽 구부림 반지름이다.

Table 2는 각 단위 유닛의 지배 한계상태를 정리한 결과이다. 이론적 강도 산정 결과, 본 연구의 프로토타입은 휨이나 전단 파괴에 도달하기 전 집중 하중점에서의 웨브크리플링이 선행될 것으로 예측되었다. 이에 따라 실험적 검증을 통해 웨브 개구부에 의한 강도 저감 효과와 유닛 간의 결합 방식이 모듈 전체의 합성 거동 및 최종 내력에 미치는 영향을 면밀히 분석할 필요가 있다.

## 4. 실험 결과

3장의 설계 과정을 거쳐 도출된 프로토타입 실험체를 대상으로 구조 성능 실험을 수행하였다. 본 장에서는 각 타입별 실험체의 실험 계획을 상술하고, 예측된 데이터를 바탕으로 하중 저항 메커니즘 및 강성 변화 특성을 분석하였다.

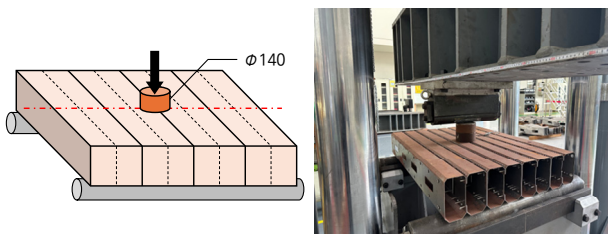
### 4.1 실험 계획 및 변수 설정

모듈러 유닛 간의 접합부 형상 및 보강 상세에 따른 구조적 성능을 평가하기 위하여 총 4가지 프로토타입을 제작하였다. 주요 실험변수는 단위 유닛의 구성 방식과 개별 유닛이 결합된 접합 모듈의 유닛 수로 설정하였다.

Table 3는 실험체별 상세 변수를 나타낸다. Type A는 구조 성능의 편차 검증 및 신뢰도 확보를 위해 단위 유닛과 유닛 2개가 결합된 이음 모듈을 각각 2개씩 실험하였다. Type B는 다수 유닛 연결 시의 균집 거동을 파악하기 위해 유닛 3개가 결합된 모듈을 추가하여 평가 범위를 확장하였다. Type C는 기본 설계 계획안에 따라 제작되었으며, Type D는 실제 데크의 거동을 모사하기 위해 유닛 4개

**Table 3.** Test matrix and configuration of modular unit combinations

Type	Specimen	Number of modules (ea)	Number of specimens (ea)
A	A1-1, 2	1	2
	A2-1, 2	2	2
B	B1-1, 2	1	2
	B2-1, 2	2	2
	B3	3	1
C	C1-1, 2	1	2
	C2	2	1
D	D	4	1

**Fig. 4.** Loading and instrumentation plan for Type D specimen

가 결합된 데크 모듈 1개를 대상으로 평가를 수행하였다.

Type A, B, C 실험체군은 앞서 3.1절에서 기술한 바와 같이 유닛 간의 기계적 결속이 모멘트가 발생하지 않는 양단 지점에만 국한되어 있다. 따라서 최대 휨모멘트가 발생하는 중앙 가력부에서는 부재 간 전단흐름을 효과적으로 전달할 수 없는 물리적 구조를 갖는다. 이러한 접합 상세의 특성을 반영하여, 본 연구에서는 모듈 결합 실험체들이 완전 비합성 거동을 하는 것으로 가정하였다. 이에 따라 다수 유닛으로 구성된 모듈의 이론적 공칭강도는 개별 단위 유닛의 공칭강도( $P_{nc}$ )를 단순히 합산한 값( $n \times P_{nc}$ )으로 정의하여 보수적으로 내력을 산정하였다. 반면, 전 구간 보강이 이루어진 Type D의 경우에도 실제 거동의 불확실성을 고려하여 보강 플레이트에 의한 강도 증진 효과를 배제하고 Type C의 강도를 준용하여 안전측 설계를 수행하였다.

Type A, B, C의 모든 실험체는 Fig. 3와 같은 3점 가력 시험 조건에서 수행되었다. Type D는 Fig. 4와 같이 모듈의 정중앙에 위치한 직경 140 mm의 원형 강재 하판을 통해 가해졌는데, 이는 UAM 기체나 각종 기기 장비의 접지압등 실제 하중 작용 면적을 모사하고 집중 하중을 중앙부 유닛들에 분산시키기 위한 목적이다. 실험 중 하부 플랜지의 수직 변위를 계측하기 위해 변위

계를 부재 길이 방향으로 등간격으로 배치하여 전체적인 처짐 형상을 파악할 수 있도록 계획하였다. 또한 가력 지점에서 50 mm 이격된 위치의 상·하부 플랜지 및 웨브에 스트레인 게이지를 부착하여 국부 변형률을 계측하였다.

#### 4.2 실험 결과 및 파괴 모드

실험을 통해 관측된 대표적인 파괴 모드는 Fig. 5와 같으며, 각 실험체별 최대 하중과 해당 시점의 가력 지점 변위를 포함한 주요 결과는 Table 4에 정리하였다. Type A-C 실험체군의 경우, 결합된 유닛 수가 증가함에 따라 최대 내력이 거의 비례적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 각 단위 유닛의 강도가 단순 중첩되는 거동 특성을 나타낸다.

실험 결과, Type A 실험체군은 최대 하중 및 해당 시점에서의 변위값이 유사하게 나타나 전반적으로 안정적인 거동을 보였다. 모든 실험체의 중앙 가력부에서는 강판에 명확한 항복선이 형성되며 접합 변형이 발생하는 웨브크리플링 한계상태에 도달하였다. 지점부에서 관찰된 단면 변형은 하중 증가에 따른 변위 수용 과정에서 발생한 부차적인 거동으로 판단된다(Fig. 5(a)와 (b) 참고). 대표 실험체(A1-1, A2-1)의 하중-변위 관계를 나타낸 Fig. 6를 살펴보면, 초기 탄성 구간을 거쳐 웨브크리플링에 의한 극한 내력에 도달한 이후 하중의 급격한 저하 없이 소성 구간으로 진입하는 전형적인 연성 거동이 확인된다. 가력 변위가 50 mm에 도달한 시점에서 최대 하중의 약 80 % 수준을 유지하였는데, 이는 본 시스템이 국부적 파괴 발생 이후에도 급작스러운 붕괴 없이 잔류 하중을 지지할 수 있는 충분한 에너지 흡수 능력을 보유하고 있음을 시사한다. 한편, 최대 하중 도달 시 기기에서 계측된 수직 변위는 약 3.7–4.7 mm 수준이었으나, 동일 시점에서 부재 하부 플랜지에 설치된 3개소의 LVDT 값은 거의 0–2 mm 내외로 매우 미미하게 계측되었다. 하부 LVDT의 유의미한 변위 증가는 최대 하중 이후부터 관측되었는데, 이는 유닛의 상부가 웨브크리플링에 의해 항복선이 완전히 형성되기 전까지는 작용 하중이 웨브를 통해 지점으로 직접 전달되는 스트럿 형태의 거동이 지배적이었음을 의미한다. 결과적으로 실험 초기 단계에서 계측된 변위의 대부분은 부재의 전체 휨 처짐이 아닌 가력 지점 직하부에서 발생

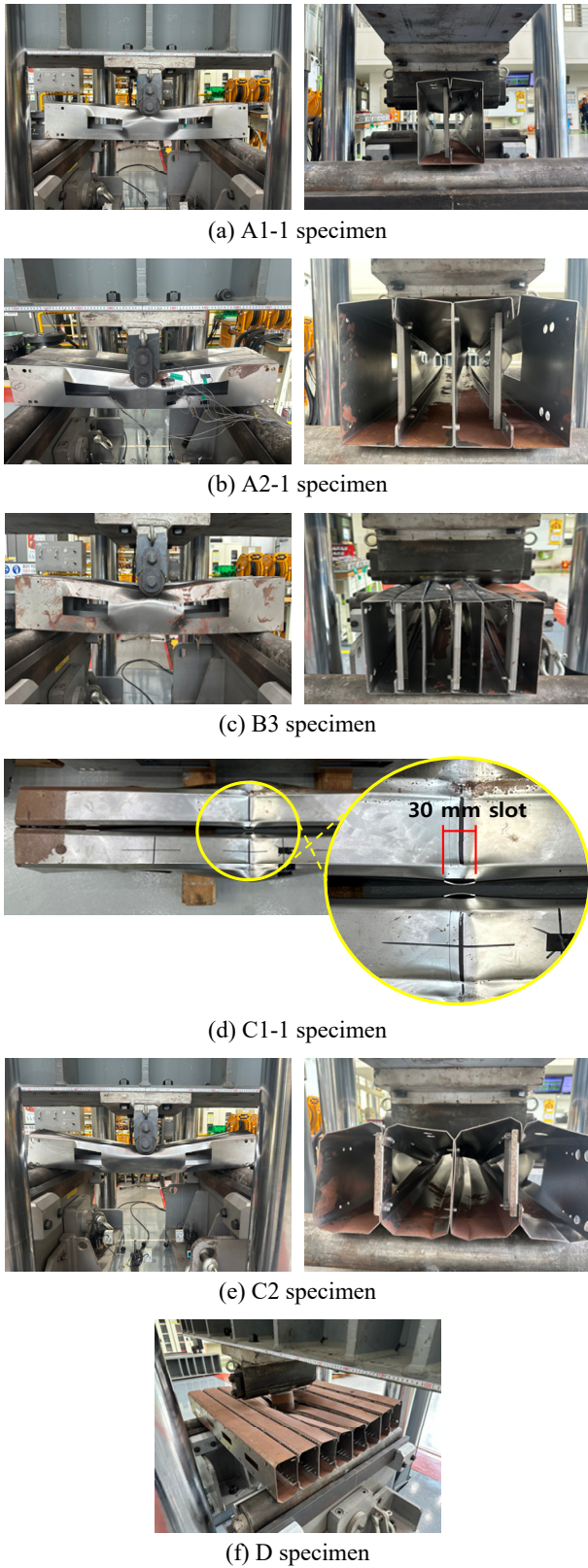


Fig. 5. Observed typical failure modes of modular deck specimens

Table 4. Experimental results of specimens

Type	Specimen	Maximum load $P_u$ (kN)	Actuator displacement $\Delta_u$ (mm)	$P_u/P_n$ (%)
A	A1-1	15.57	3.72	150.43
	A1-2	15.97	3.96	154.30
	A2-1	35.40	4.67	171.01
	A2-2	36.57	4.06	176.67
B	B1-1	15.56	3.36	150.34
	B1-2	16.09	6.75	155.46
	B2-1	35.80	5.33	172.95
	B2-2	35.38	4.74	170.92
C	B3	57.01	4.25	183.61
	C1-1	13.43	24.63	132.19
	C1-2	12.76	26.23	125.59
D	C2	28.26	23.79	139.07
	D	33.71	56.09	-

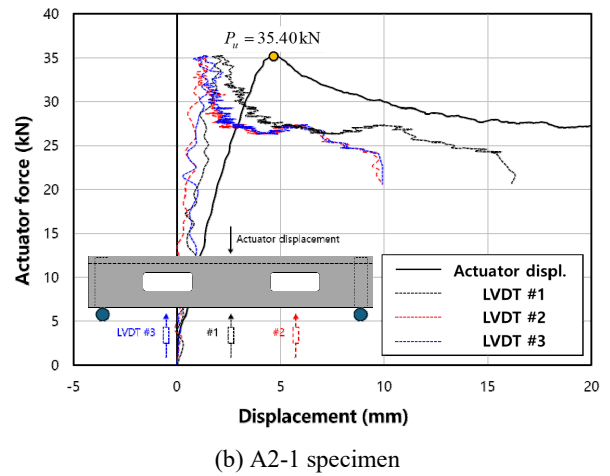
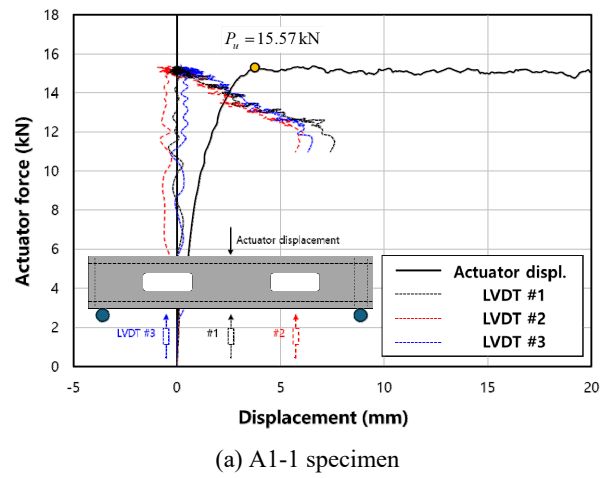


Fig. 6. Load-displacement relationships of Type A specimens

한 상부 플랜지 및 웨브의 국부적 압괴에 기인한 것으로 판단된다.

Type B 역시 Type A와 유사한 하중-변위 관계를 나타냈으며, 최대 하중이 유닛 수에 거의 비례하여 증가하는 경향을 보여 유닛 간 일체성이 확보되었음을 확인하였다.

Type C 실험체는 가력 초기 특정 하중 단계에서 일시적인 강성 저하가 관찰되었다. 이는 Fig. 5(d)에서 확인할 수 있듯이 응력이 집중되는 가력점 인근의 단면 결손부(슬롯)에서 발생한 국부적인 초기 변형이 부재 전체의 강성을 조기에 저하시키는 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 그러나 초기 강성 저하 이후 하중 재분배를 통해 강성과 강도가 다시 증대되며 최대 내력에 도달하였으며, 가력 변위가 90 mm에 도달할 때까지 하중이 완만하게 감소하는 안정적인 연성 거동을 나타냈다. 최종 파괴 모드는 타 실험체군과 마찬가지로 가력 지점 직하부의 웨브크리플링으로 나타났다.

Type D 실험체는 원형 재하판이 접촉하는 중앙 유닛 상부에서 심각한 소성 변형이 발생하였으며, 가력 지점 직하부에서 발생한 지배적인 파괴 모드는 웨브크리플링으로 판단된다. 이는 박판 부재가 집중 하중을 받을 때 나타나는 전형적인 국부적 파괴 거동이다. 특히 재하판과 직접 접촉하는 상부 플랜지는 하중 형상을 따라 오목하게 함몰되었으며, 내부 플레이트 보강이 적용되었음에도 불구하고 국부적인 응력 집중으로 인해 상부 플랜지의 국부 좌굴이 웨브 크리플링과 동반하여 발생한 것으로 보인다. 또한 하중이 직접 작용하지 않는 인접한 좌우 유닛에서도 상부 플랜지가 중앙으로 끌려들어가는 변형이 관측되어 유닛 간 하중 분배가 이루어짐을 확인하였으나, 시스템 전체의 내력은 중앙 유닛의 국부 파괴에 의해 결정되는 것으로 분석되었다.

#### 4.3 실험 결과 분석 및 고찰

Fig. 7은 Type A 및 Type B 실험체들의 하중-변위 관계를 비교한 것이다. 두 실험군은 플랜지 폭이 상이함에도 불구하고 전체적으로 거의 동일한 하중-변위 거동 특성을 나타냈다. 이는 제안된 데크 모듈의 내력이 플랜지의 휨 성능보다는 웨브의 전단 및 크리플링 성능에 의해 지배됨을 의미하며, 웨브크리플링이 해당 시스템의 지배적인 파괴 모드임을 입증하는 결과이다. Fig. 7에 표시된 수평 점선은 Table 2에서 산정한 유닛 수별 이론적

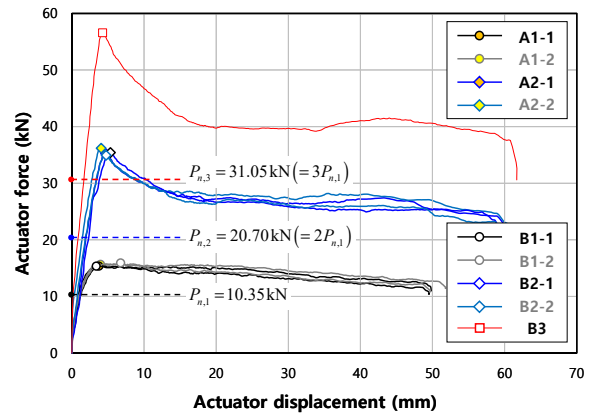


Fig. 7. Comparison of load-displacement relationships for Type A and Type B specimens

공칭 웨브크리플링 강도를 나타낸 것이다. 실험 결과로부터 도출된 최대 강도와 이론적 공칭 강도를 비교한 결과, 결합된 유닛 수가 증가할수록 두 값 간의 차이가 점차 확대되는 경향이 확인되었다. 특히 Table 4에 나타난 실험 하중 대비 이론 강도의 비율이 최대 183 %로 크게 나타난 원인은 다음과 같은 메커니즘에 기인한 것으로 판단된다. 첫째는 보수적인 설계 강도 산정 조건의 영향이다. 본 연구에서 안전측 설계를 위해 냉간성형 과정에서 발생하는 가공경화에 의한 항복강도 증진 효과를 배제하고 실측 항복강도만을 적용하였는데, 이러한 가정이 실험 값과 이론 값의 차이를 넓힌 것으로 판단된다. 둘째는 유닛 간 결합면에 형성된 이중 웨브의 상호 구속 효과이다. 이론 강도 산정 시에는 단일 웨브가 독립적으로 하중에 저항하는 것으로 가정하였으나, 실제 모듈러 시스템에서는 서로 맞닿은 두 웨브가 횡방향 변형을 상호 구속함으로써 웨브크리플링에 대한 저항능력이 보완되었으며, 유닛간 하중 재분배 효과를 유발한 것으로 판단된다. 그 결과 이론적인 단순 합산 강도를 상회하는 구조 성능이 발현된 것으로 분석된다.

Fig. 8은 Type C 및 Type D 실험체의 하중-변위 관계를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 8에서 C2(2개 유닛 결합) 실험체와 Type D(4개 유닛 결합 데크 모듈) 실험체의 하중-변위 곡선을 비교하면 공통적인 거동 특성이 관찰된다. 두 실험체 모두 약 18 kN 부근에서 일시적인 강성 저하가 발생하였으며, 특히 Type D 실험체에서 두 번째 강성 소실이 발생한 하중 수준은 C2 실험체의 최대 강도와 거의 동일한 수준인 것으로 확인되었다. 이는 Type D 실험체에 적용된 원형 재하판이 초기 가

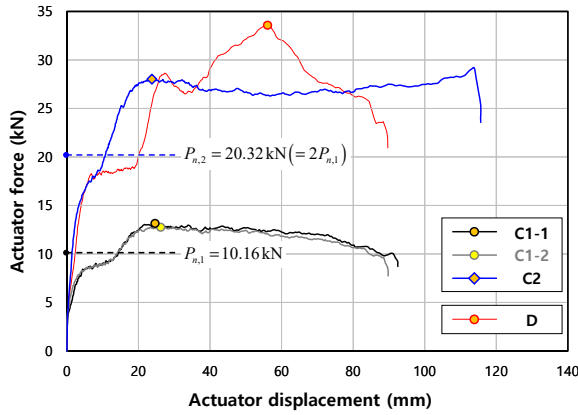


Fig. 8. Comparison of load–displacement relationships for Type C and Type D specimens

력 단계에서 중앙부의 두 개 유닛에 하중을 집중적으로 전달함으로써, 결과적으로 C2 실험체와 유사한 가력 메커니즘을 유발하였기 때문으로 판단된다. 그러나 C2 실험체가 해당 하중 수준에서 파괴로 이어진 것과 다르게, Type D 실험체는 강성 저하 이후에도 하중이 재상승하며 더 높은 최대 내력을 확보하였다. 이러한 차이는 유닛 사이에 설치한 보강 플레이트를 통해 하중이 인접 유닛으로 재분배되면서 시스템 차원의 추가적인 내력이 발현된 결과로 볼 수 있다.

이상의 실험 결과를 통해 Type C 실험체는 유닛 수에 따른 선형적인 강도 예측이 가능함을 확인할 수 있었다. 반면, Type D 실험체는 보강 상세의 적용을 통해 단순 유닛 강도의 합산을 상회하는 추가적인 내력 확보가 가능함을 입증하였다. 다만, 실제 설계 적용 시에는 안전성을 고려하여 직접 하중이 재하되는 유닛 수, 즉 유효폭에 해당하는 강도로 설계 내력을 제한하는 접근이 합리적일 것으로 판단된다. 특히 Fig. 8에서 Type C와 D 실험체가 약 10 mm의 수직 변위 부근에서 일시적인 강성 저하를 보인 후 내력이 재상승하는 거동은 버티포트의 사용성 측면에서 주목할 만한 부분이다. 이는 국부적인 압괴 이후 인접 유닛 및 보강재로의 하중 재분배에 의한 시스템적 여유 내력을 보여주지만, 실제 버티포트 운용 측면에서는 과도한 변형으로 인한 기체 안착의 불안정성이나 배수 성능 저하를 초래할 수 있다. 따라서 실무 설계 시에는 최종 파괴 하중을 내력으로 산정하기보다, 구조적 유해 변형이 시작되는 첫 번째 변곡점 하중을 사용성 기준 하중으로 설정하는 검토가 반드시 수반되어야 한다.

## 5. 결론

이 연구에서는 도심항공교통(UAM)의 상용화에 대비하여 시공성, 내구성 및 구조 안전성을 동시에 확보할 수 있는 버티포트용 스틸 모듈러 데크 시스템을 제안하고, 이에 대한 구조적 성능을 실험을 통해 체계적으로 검증하였다. 실험체 제작 단계에서는 실제 시스템에 적용될 예정인 고내식 도금강판(PosMAC) 대신 수급을 고려하여 일반 강판(SPHC)을 대체 적용하였다. 또한, 현재 구체적인 UAM 기체 제원 및 실제 이착륙 충격 하중 데이터가 미비한 상황을 고려하여 현행 국내의 설계 기준의 하중 조건을 바탕으로 검증을 수행하였다. 이러한 제약 조건 하에서도, 제안된 냉간성형강 폐단면 모듈은 초경량 구조임에도 불구하고 예측된 하중 시나리오에 대해 유효한 하중지지 능력을 보유하고 있음을 확인하였다.

실험 결과, 본 시스템과 같은 박판 구조물은 휨 항복에 도달하기 이전에 집중 하중이 작용하는 가력 지점 직하부에서 웨브크리플링이 지배적인 한계상태로 나타나는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 버티포트 데크 설계 시 일반적인 휨 강도 검토뿐만 아니라 웨브크리플링에 대한 정밀한 검토가 필수적임을 시사하며, 수직 보강재의 설치 또는 웨브 두께의 최적화가 구조 성능 확보를 위한 주요 설계 인자가 될 수 있음을 의미한다.

단위 유닛이 병렬로 결합된 모듈러 데크 시스템에서는 인접한 웨브 간의 상호 구속 효과로 인해, 개별 유닛 강도의 단순 합산을 상회하는 내력이 발현됨을 확인하였다. 이는 모듈러 시스템 적용 시 구조적 효율성이 향상될 수 있음을 실험적으로 입증하는 결과이며, 유닛 간 결합 방식이 전체 시스템 거동에 중요한 영향을 미침을 보여준다. 특히 보강 플레이트와 적절한 나사 접합 상세를 적용한 경우에는 특정 유닛에 집중되는 하중이 인접 유닛으로 효과적으로 재분배되면서 시스템 차원의 급격한 파괴를 방지하고 전체 내력을 증진시킬 수 있음이 확인되었다.

실험을 통해 제안된 데크는 UAM 버티포트의 운용 안정성을 고려할 때 변형 제어가 핵심 설계 인자가 됨을 확인하였다. 기체의 반복 이착륙에 따른 잔류 변형 방지를 위해 사용성한계상태에 기초한 변형 제한치(가령, L/180 등)를 명문화할 필요가 있다. 또한, 실험에서

관찰된 초기 강성 저하 지점을 기준으로 유효 설계 내력을 제한하는 보수적인 설계 접근 방식이 타당할 것으로 판단된다.

다만, 본 연구는 중앙 가력 조건에 따른 기초 성능 평가에 국한되어 있으므로, 실제 운용 환경을 고려하여 하중이 중앙부가 아닌 개구부 상부(실험체 길이의 약 1/4 지점)와 같은 취약 지점에 재하될 경우의 거동 평가가 추가로 수행되어야 한다. 더불어 실험체 제약으로 인해 소규모 유닛 연결 위주로 평가된 Type A, B, C 실험체에 대해서도 실제 데크 시스템 전체를 구성하여 Type D와 같은 국부 집중 하중을 받는 경우의 하중 분산 효과를 규명하기 위한 해석적 보완 평가가 향후 연구를 통해 수행되어야 할 것으로 판단된다.

종합적으로 볼 때, 본 연구에서 제안한 스틸 모듈러 데크 시스템은 UAM 버티포트에 요구되는 구조적 성능을 만족하는 유효한 대안으로 판단된다. 본 연구에서 축적된 실험 및 해석 데이터는 향후 제정될 UAM 버티포트 구조 설계 기준 및 매뉴얼 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 실제 설계 및 적용 단계에서 중요한 공학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 RS-2024-00408551, 이동식 모듈형 버티포트 설계·시공 기술 및 감시시스템 개발)으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2022) Standards for Aerodrome, Airfield, and Landing Facility Design (in Korean).
- [2] Federal Aviation Administration (FAA). (2024) *Engineering Brief No. 105A: Vertiport Design, Supplemental Guidance to Advisory Circular 150/5390-2D, Heliport Design*, U.S. Department of Transportation, Washinton, D.C.
- [3] European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2022) *Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)*, Cologne, Germany.
- [4] Lee, J.G., Park, J.H., and Cho, B.H. (2009) Structural Performance Tests of Slab Systems for Modular Building Structures. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.25, No.2, pp.19-28 (in Korean).
- [5] Oh, K.Y, and Lee, S.S. (2024) An Analysis on Floor Vibration According to the Floor System of Steel Module. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.4, pp.209-217 (in Korean).
- [6] Kang, J.W., Kim, J.H., and Lee, S.C. (2021) Static and Dynamic Behavior Analysis of Long-Span Steel Lining Boards with High-Strength Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.4, pp.215-224 (in Korean).
- [7] Kyung, K.S., Lee, S.D., Lee, S.Y., Lee, M.J., and Jeon, J.C. (2025) Characteristics of Fatigue Behavior on Deck Plate Fabricated with Checkered H-Beam. *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.5, pp.261-269 (in Korean).
- [8] Cho, B.S, and Jung, J. (2020) A Comparative Study on the Noise of Steel and Steel Composite Concrete Lining Board. *Proceedings of the 2020 Annual Convention of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.9-10 (in Korean).
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2022) *Design Standard for Cold-Formed Steel Structures*, KDS 41 30 30: 2022 (in Korean).

**요약**: 본 연구는 도심항공교통(UAM) 버티포트용으로 제안된 스틸 모듈러 데크 시스템의 구조적 성능을 평가한 것이다. 박판 냉간성형강으로 구성된 폐쇄형 사각 단면 모듈을 적용하여, 단면 형상 및 보강 상세가 상이한 네 가지 유형의 데크 실험체를 제작하였다. 각 실험체에 대해 집중 하중 조건에서 하중-변위 거동과 파괴 양상을 비교·분석하였다. 실험 결과, 제안된 모듈러 데크 시스템은 경량 구조임에도 충분한 하중 지지 능력을 보였으며, 웨브크리플링이 지배적인 한계상태로 확인되었다. 또한 유닛 간 상호작용과 보강 상세에 따른 하중 재분배 효과로 시스템 차원의 내력 증진이 가능함을 확인하였다. 본 연구의 결과는 제안된 시스템의 구조적 효율성을 증명하며, 향후 UAM 버티포트 데크 구조에 대한 적용 가능성을 뒷받침한다.

**핵심용어**: 도심항공교통, 버티포트, 모듈러, 데크 시스템, 냉간성형강, 웨브크리플링