

가새재 설치여부와 이동경로 폭에 따른 시스템 비계의 극한하중에 대한 실험적 연구

이선우¹ · 정성춘² · 김승준³ · 원정훈^{4*}

¹차장, 현대건설, 안전관리팀, ²선임연구위원, 산업안전보건연구원,
³교수, 고려대학교, 건축사회환경공학부, ⁴교수, 충북대학교, 안전공학과

Experimental Study on Ultimate Load of System Scaffolding According to Catwalk Width and Bracing Installation

Lee, Sun-Woo¹, Jeong, Seong-Choon², Kim, Seungjun³, Won, Jeong-Hun^{4*}

¹Chief Manager, Safety Management Team, Hyundai E&C, Seoul, 03058, Korea

²Chief Researcher, Occupational Safety and Health Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency, Ulsan, 44429, Korea

³Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

⁴Professor, Dept. of Safety Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

Abstract - This paper studied the ultimate load capacity of assembled system scaffoldings. The assembled system scaffoldings have wedge joints and are reinforced with bracing members. However, the bracing members can only be applied on the one side of the system scaffolding due to the installation of catwalk for working passage. The width of catwalk was considered in the evaluation of ultimate load capacity. Eight scaffolding specimens in total were tested; during the test, the installation conditions of bracing members and the catwalk width were investigated yielding various types of load-displacement responses. The resultant load-displacement curves tend to show similar trends for all specimen cases until the external load reaches about 80 kN. However, after passing that load value, a sharp change occurred through the point of the ultimate strength of test specimen. The installation of bracing members effectively increased the ultimate loads by 21 % for the catwalk width of 1.220 m and 24 % for the catwalk width of 0.914 m compared to the case without any bracing members. Thus it should be noted that no installation of bracing members may result in the overall buckling of the vertical members. On the other hand, the catwalk width did not significantly affect the ultimate strength of system scaffolding in the width range considered. As a result, it was successfully demonstrated that the installation of bracing members is essential to improve the ultimate load capacity of the system scaffolding.

Keywords - Ultimate load, System scaffolding, Wedge joint, Bracing members, Catwalk width

1. 서론

가설구조물 중 근로자들의 이동통로 및 작업발판으로 사용되는 비계는 건설공사에 필수적으로 사용되는 가설구조물이며, 다양한 비계 중 구조적 안전성과 설치 및 해체 편

이성으로 시스템 비계의 사용이 증대되고 있다. 사용되는 시스템 비계의 규모 또한 증가하고 있으며, 규모의 증가로 대규모 인명피해가 발생하는 붕괴사고의 가능성도 증가되므로 시스템 비계는 구조 안전성이 반드시 확보된 상태로 설치되어야 한다.

최근 정부의 지속적인 관심 속에서도 계속되는 가설구조물 사고로 인하여 인적, 물적 피해가 증가함에 따라 건설업자 또는 주택건설등록업자는 건설기술진흥법 제62조(건설공사의 안전관리)에 의거하여 동바리, 거푸집, 비계 등 가설구조물 설치를 위한 공사를 할 때 가설구조물의 구조적 안전성을 관계전문가에게 확인을 받아야 한다^[1]. 31 m 이상의 시스템 비계의 경우는 반드시 관계 전문가의 구조 검토를

Note.-Discussion open until October 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 07, 2020; revised April 14, 2020; approved on April 14, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-261-2459 Fax. +82-43-265-2457

E-mail. jhwon@chungbuk.ac.kr

실시하도록 하고 있으며, 일반적인 시스템 비계의 경우도 현장에서 설치 전 구조검토에 근거한 조립도를 작성하고 현장에 비치하도록 하고 있다.

비계와 같은 가설구조물의 실제 성능과 설계 가정에 근거한 설계 성능에는 차이가 발생한다. 성능의 차이가 발생하는 주요 요인들은 지면조건, 편심하중, 부재 간 연결조건, 부재의 초기결함, 부재의 성능편차 등이 있다^[2]. 또한, 비계와 동바리와 같은 가설구조물은 전체 설치길이에 대해 압축하중과 모멘트에 동시에 저항하지만, 현재 시스템 비계의 중요한 부재인 수직재의 강도 검토는 단위 수직재에 대해 실험에 근거하여 강도를 추정하고 있는 실정이다.

해외의 경우 가설구조물의 구조적 안전성을 확인할 때 단위 수직재의 좌굴하중 외에도 실제 조립된 가설구조물을 대상으로 실험을 실시하여 조립된 가설구조물의 강도를 검토하고 있다. 예로, 영국의 경우 건설업에 사용하는 가설재의 안전성을 개별부재가 아닌 조립체 실험을 실시하도록 권고하고 있다^[3]. 해외의 가설재 성능에 대한 연구결과를 분석하면, 조립체의 성능을 기준으로 시스템 비계의 설치 층수, 가새재 설치 유무, 잭베이스의 설치 높이 등 시공 중 발생할 수 있는 다양한 변수를 연구에 적용하고 있다^{[4]~[9]}.

시스템 비계의 부재로 사용되는 강관의 좌굴에 대한 국내의 연구는 단일부재에 대한 제한적 연구결과만 존재한다^{[10],[11]}. 또한 국내에서는 시스템 비계의 연결부로 주로 웨지 타입의 연결부가 사용되나, 웨지 타입의 연결부에 대한 국내 연구는 미비한 실정이다. 또한 시스템 비계의 전체 강도를 확인할 때 축력을 받는 단위 수직재의 좌굴강도의 실험결과를 활용하고 있어, 수직재에 체결된 수평재의 연결이 불량할 경우 시스템 비계의 전체 좌굴강도는 급격히 감소하게 된다. 그러므로 실제 시스템 비계의 극한하중을 분석하는 데는 한계가 있는 실정이다.

시스템 비계는 콘크리트 타설하중에 저항하는 시스템 동바리와는 다르게 근로자 통행을 위해 이동통로가 설치되므로 비계의 네 개의 면 전부에 가새재를 설치하지 못한다. 즉, 근로자가 통행하는 면에는 가새재를 설치할 수 없어 가새재로 네 개의 면이 폐합이 될 수 없는 구조이고, 통행로의 옆면에만 가새재를 설치할 수 있다. 즉, 시스템 비계의 극한하중을 파악하기 위해서는 실제 현장에서 적용되는 가새재 설치 조건을 반영하여 가새재의 설치조건에 따라 성능의 변화를 실험을 통해 파악할 필요가 있다.

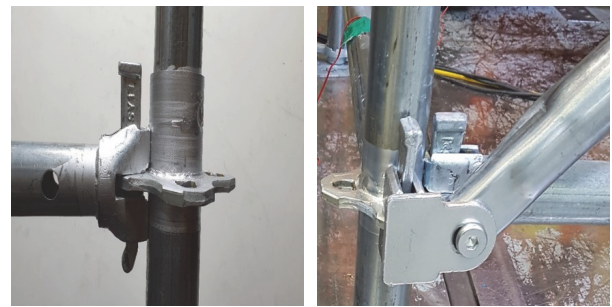
영구 강구조물의 경우, 실제 상황에 맞는 다양한 조건을 고려한 연구들이 꾸준히 진행되고 있으나^{[12]~[14]}, 가설구조

물에 대한 실험연구는 많지 않은 실정이다. 본 연구는 실제 건설현장에서 자주 적용되고 있는 가설구조물인 시스템 비계에 대해 극한하중과 정확한 거동을 측정하기 위해 조립된 실험체를 대상으로 하중재하 실험을 하였다. 실제 건설 현장에서 발생할 수 있는 가새재 설치조건이 실험의 주요 변수이며, 시스템 비계의 이동통로 폭이 추가적인 변수로 고려되었다.

2. 시스템 비계 조립체 성능 시험

2.1 실험체 구성 및 제원

본 논문에서 다루고 있는 시스템 비계의 연결부 형태는 웨지 타입(Fig. 1)으로, 조립된 실험체의 예시는 Fig. 2와 같다.



(a) Connection with vertical member (b) Connection with bracing member

Fig. 1. Configuration of wedge connection



Fig. 2. Test set-up example

조립된 실험체는 가새재 설치조건과 이동통로 폭의 변수를 조합하여 Table 1과 같이 총 8가지의 경우로 구성되었다. 가새재의 경우, 작업공간 및 이동통로 사용되는 시스템 비계에서의 가새재 설치특성을 반영하기 위해 장선방향 (Fig. 3의 y축)으로 해당하는 2개의 면에는 가새재를 설치하지 않았다. 가새재의 설치조건은 가새재가 미설치된 경우 (BN-12, BN-9)와 2층에만 설치된 경우(B1-12, B1-9), 1층과 3층에만 설치된 경우(B2-12, B2-9), 모든 층에 설치된 경우 (B3-12, B3-9)로 총 4가지로 구분되며, 마주 보는 모든 가새재는 평행하게 설치하였다(Table 1). Fig. 3과 같이 이동통로 폭의 조건은 두 가지 경우로 이동통로 폭은 일반적으로 너비 0.5 m 혹은 0.4 m의 작업발판이 2열로 설치되는 현장의 조건을 고려하여 수직기둥 중심 간의 거리가 1.220 m인 경

우(BN-12, B1-12, B2-12, B3-12)와 0.914 m인 경우(BN-9, B1-9, B2-9, B3-9)를 고려하였다.

8개의 실험체는 높이가 5.8 m로 모두 동일하며, 각 수직기둥은 1.9 m의 수직재 3개와 0.05 m로 확장된 2개의 책베이스로 구성된다(Fig. 4 참조). 층의 구분은 작업발판이 설치되어 이동통로 및 작업공간으로 사용되는 시스템 비계의 실제 현장 설치 조건을 고려하여, 상부 수평재 간의 수직간격이 1.8 m 이상 확보되도록 수평재를 설치하였다.

실험에 사용된 수직재와 수평재의 재질 및 단면 치수는 Table 2와 같다. 수직재의 재질은 SGH365Y(항복강도 365 MPa)이며, 단면치수는 48.6 mm(외경) × 2.2 mm(두께)이다. 수평재의 재질은 SGH295Y(항복강도 295 MPa)이며, 단면치수는 42.7 mm(외경) × 2.2 mm(두께)이다. 가새재와

Table 1. Schematic view of specimens

Name	BN-12	B1-12	B2-12	B3-12	BN-9	B1-9	B2-9	B3-9
Configuration								

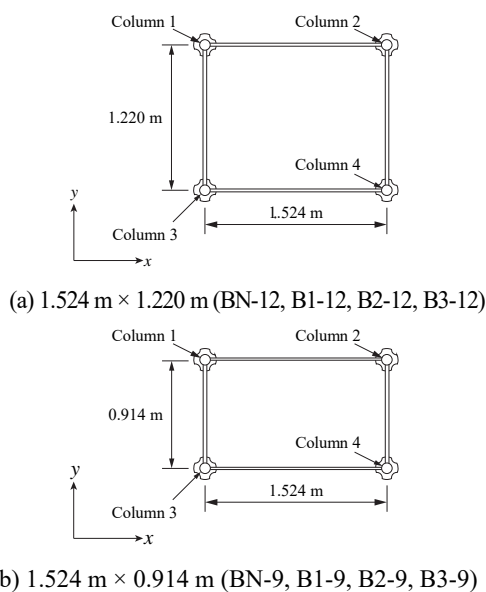


Fig. 3. Classification of specimens according to catwalk width

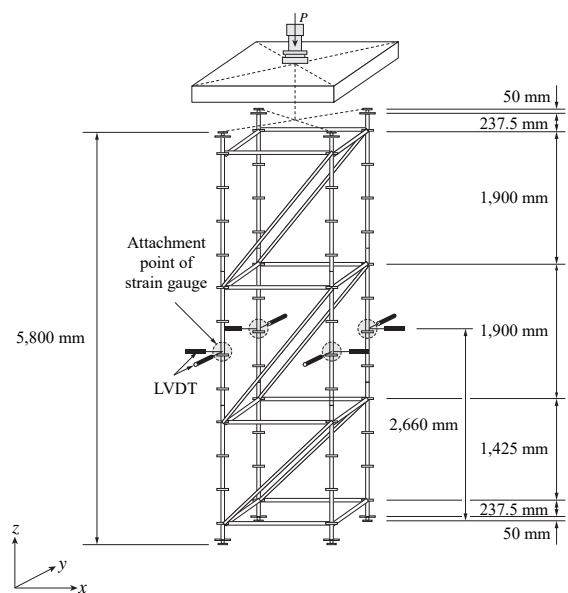


Fig. 4. Location of a load point and sensors

잭베이스의 재질은 각각 SGH295Y, SS275이며, 가새재의 단면치수는 42.7 mm(외경) × 2.2 mm(두께), 잭베이스의 단면치수는 34 mm(외경) × 4.2 mm(두께)이다.

Table 2. Member dimensions and material properties

Classification	Vertical member	Horizontal member	Bracing member	Jack base
Steel grade	SGH365Y	SGH295Y	SGH295Y	SS275
Yield strength (MPa)	365	295	295	275
Outer diameter (mm)	48.6	42.7	42.7	34.0
Thickness (mm)	2.2	2.2	2.2	4.2

2.2 하중재하

가설구조물의 조립체를 대상으로 하는 국내의 실험 기준으로 미국의 ANSI/SSFI SC100-5/05와 일본가설공업회의 자체규정에 관련 실험방법이 존재하나, 국내의 경우 가설구조물의 조립체를 기본 실험단위로 하는 실험 기준은 존재하지 않는다. 본 연구에서는 향후 시스템 비계의 단일 부재 실험과의 비교분석을 위해 시스템 비계 및 동바리 부재에 관한 표준인 KS F 8021(2010)의 하중 재하 기준을 실험에 적용하였다. 용량이 1,000 kN인 actuator가 사용되었으며, 하중재하는 8 mm/min 속도로 재하되었다. 시스템 동바리의 각 수직기둥에 균일한 하중을 가하기 위해 직사각형의 가력틀을 actuator에 부착하였으며, actuator가 위치한 가력틀의 중심과 실험체의 중심을 일치시켜 편심의 발생을 영향을 최소화 시켰다(Fig. 4). 모든 실험체는 하중 재하 직전 상단부 잭베이스의 높이를 조절(± 5 mm)하여 가력틀과 실험체를 밀착시킨 후 하중을 재하하였다.

각 실험체에는 변위계, 변형률계가 Fig. 4와 같이 설치되었다. 수직재의 수평변위를 측정하기 위해 지면으로부터 2.660 m의 높이에 변위계인 LVDT(linear variable differential transformer)를 지면과 수평하게 설치하였다. 해당 변위계들은 구조물을 상부에서 투영했을 때 수직기둥의 x축, y축 변위를 측정하기 위해 각 수직기둥마다 2개씩 직교하여 설치하였다. 또한, 조립체에 가해지는 하중에 의한 각 부재의 응력상태를 확인하기 위해 변형률계를 수직재에 설치하

였다. 수직재에 부착된 변형률계의 경우 각 변위계가 설치된 위치의 맞은편에 설치되었다.

3. 결과 분석

3.1 단일부재 실험

시스템 비계 실험체에 사용된 수직재를 대상으로 강도를 측정하였다. 실험체들은 1.9 m 수직재를 조립한 실험체이므로 실험체에 사용된 1.9 m 수직재를 대상으로 시험을 실시하였다(Fig. 5). 실험체의 상·하는 힌지 조건으로 하였으며, 실험체 개수는 3개이다. 측정된 좌굴강도는 Table 3에 정리하였으며, 사용된 수직재의 좌굴강도는 평균 45.24 kN인 것으로 분석되었다. 오일러 좌굴식($\pi^2 EI/L^2$)으로 구한 이론적인 좌굴강도는 49.55 kN이므로 실험체는 오일러 좌굴강도의 약 91.3 % 수준으로 평가되었다.



Fig. 5. Test set-up for unit vertical member

Table 3. Measured buckling load of unit vertical member

Classification	Measured value (kN)	Average (kN)
Test 1	43.81	45.24
Test 2	42.64	
Test 3	49.26	

3.2 파괴형상 및 수평 변위

각 실험체의 파괴형상을 분석하여 Figs. 6-9에 나타내었으며, 수직변위 증가에 따른 수평이동 형상을 Figs. 10-13에 나타내었다. Figs. 10-13의 경우 수직변위가 3 mm 증가하는 지점마다 심별을 표시하여 수직변위에 따른 수평변위의 이력을 나타내었다. 실험체의 좌굴방향에는 차이가 있으나, 모든 실험체에서 수직기둥이 전체적으로 휘어지는 전체 좌굴형상이 나타났다. 가새재가 미설치된 실험체인 BN-12 실험체는 x 축 방향으로 휘어지며, BN-9 실험체는 y 방향으로

휘어진 것으로 나타났으며, 가새재가 중앙에 1쌍 설치된 실험체인 B1-12실험체는 y 방향, B1-9실험체는 x 방향으로 휘어진 것으로 분석되었다. 반면, 가새재가 2개 이상 실험체들은 모두 가새재에 수직하는 방향인 y 방향으로 휘어지면서 파괴된 것으로 분석되었다. 따라서 대상 실험체에서는 최소 1단과 3단에 가새재를 설치한 경우가 가새재 설치 효과와 나타날 것으로 판단된다. 또한, 전체 좌굴형상은 수직기둥의 최상단과 최하단이 힌지조건일 때 나타나는 좌굴형상과 유사한 것으로 나타났다.

수평이동의 형상(Figs. 10-13)에서 확인할 수 있듯이, 1층



(a) BN-12 (b) BN-9

Fig. 6. The failure mode of specimens without bracing members



(a) B1-12 (b) B1-9

Fig. 7. The failure mode of specimens with bracing members installed in the 2nd story



(a) B2-12 (b) B2-9

Fig. 8. The failure mode of specimens with bracing members installed in the 1st and 3rd story



(a) B3-12 (b) B3-9

Fig. 9. The failure mode of specimens with bracing members installed in the 1st, 2nd, and 3rd story

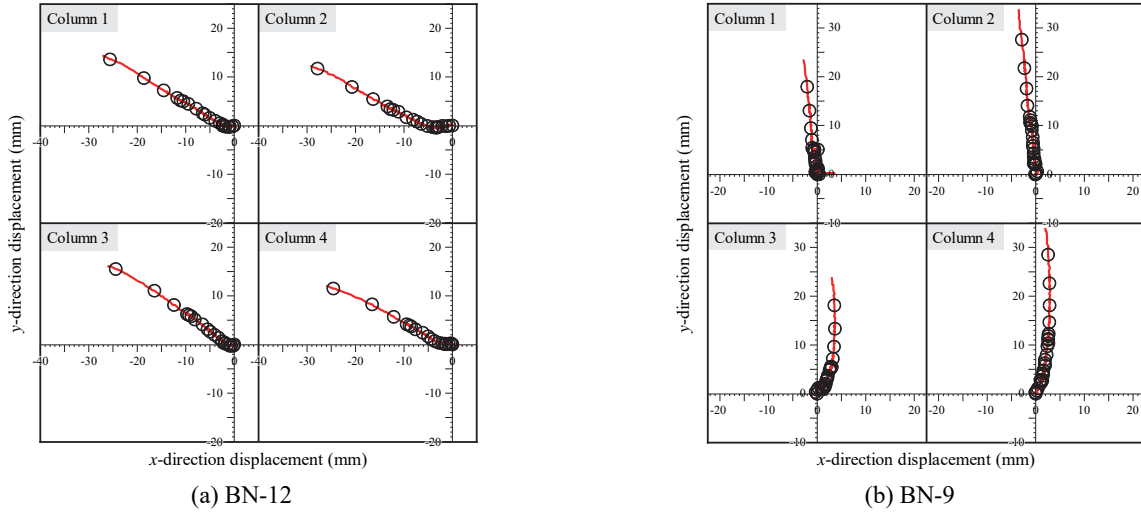


Fig. 10. The horizontal movement histories of specimens without bracing members

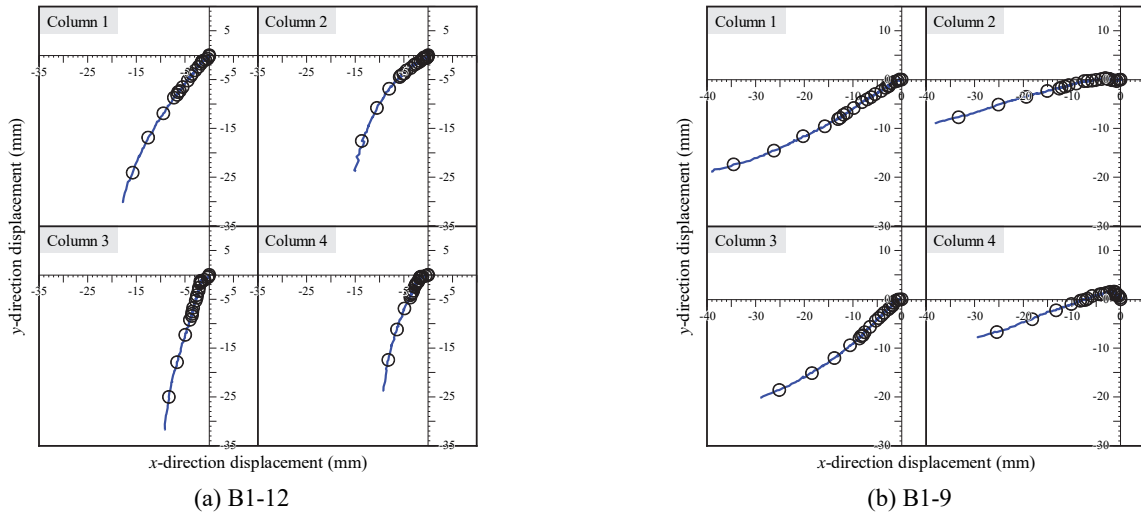


Fig. 11. The horizontal movement histories of specimens with bracing members installed in the 2nd story

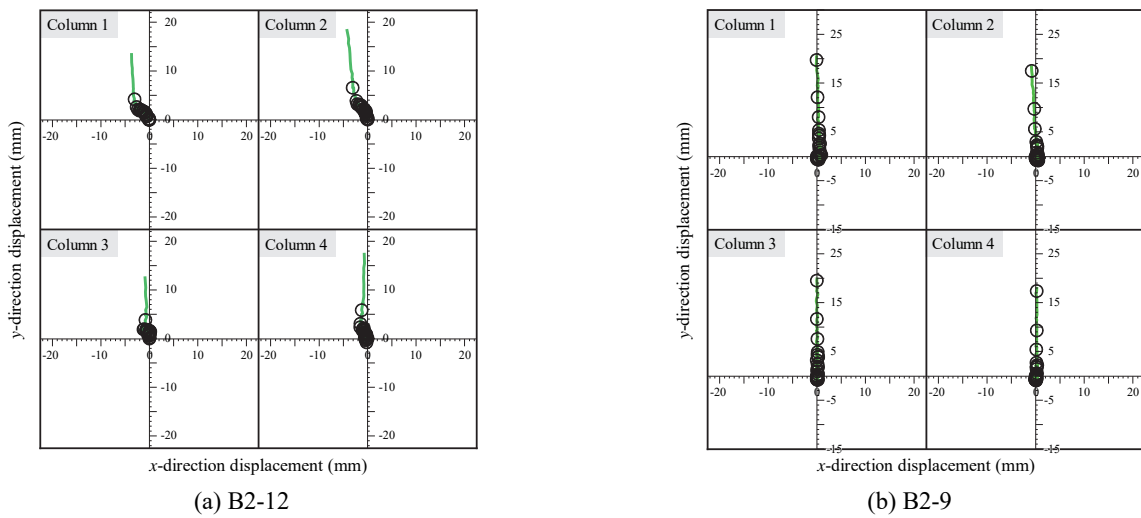


Fig. 12. The horizontal movement histories of specimens with bracing members installed in the 1st and 3rd story

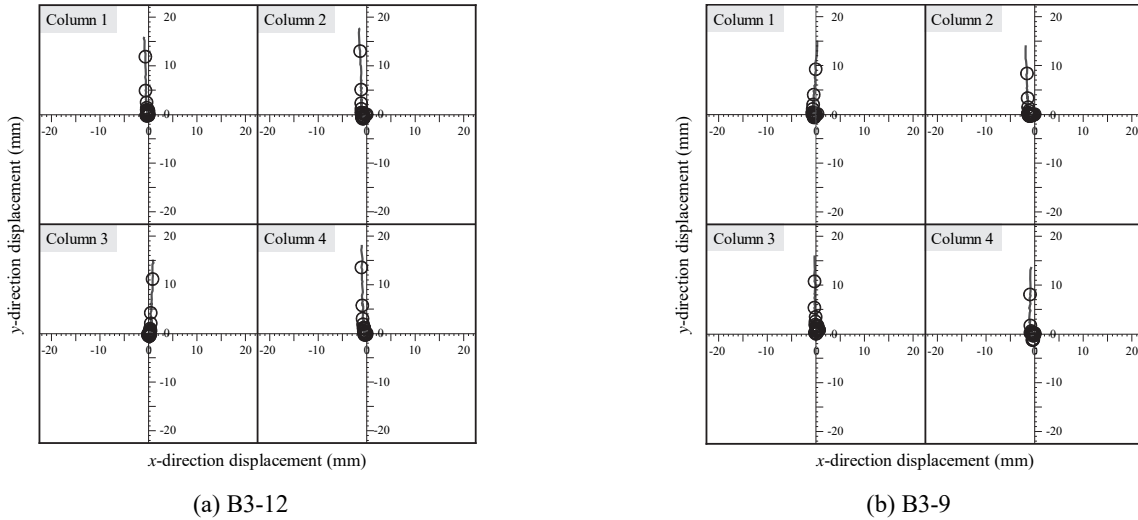


Fig. 13. The horizontal movement histories of specimens with bracing members installed in the 1st, 2nd, and 3rd story

과 3층에 수직기둥 상하단의 띠장방향(x축) 회전을 제어할 수 있는 가새재가 설치된 실험체들(B3-12, B3-9, B2-12, B2-9)은 좌굴의 방향이 장선(y축)방향으로 제한되는 것으로 확인되었다. 가새재가 미설치되었거나(BN-12, BN-12), 가새재가 2층에만 설치된 실험체들(B1-12, B1-12)의 경우 띠장방향의 좌굴을 억제하지 못하는 것으로 나타났다. 그러므로 시스템 비계의 수평재 간 수직간격을 유효좌굴길이로 선정하는 현재의 가설구조물 설계방법은 가새재가 설치되어도 벽이음 미설치 등의 상황으로 인해 시스템 비계의 변위를 제어하지 못할 경우 실제 좌굴길이를 과소평가하게 되는 문제점을 가진다고 판단된다.

각 실험체의 설치 구성에 따른 수평변위 거동을 확인하기 위해 수직변위 증가에 따른 수평변위의 이력을 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 시스템 비계 등의 가설구조물의 붕괴 사례의 많은 경우가 구조물을 구성하고 있는 일부 수직재의 좌굴이 원인이 되어 발생하는 구성부재의 연쇄적인 파괴로 인한 것으로 알려져 있다^[15]. 따라서 실험체에 가해지는 하중에 의해 좌굴이 최초로 발생된 수직기둥의 거동이 설치 구성에 따른 실험체의 내하력 차이를 나타낼 수 있는 주요 지표로 판단되므로, 실험체가 극한하중에 도달하는 시점에서 가장 큰 수평변위를 가지는 수직기둥의 거동을 분석하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 각 실험체의 수직기둥 중 극한하중에서 가장 큰 수평변위를 가지는 수직기둥의 수평변위-수직변위 관계를 나타내며, 수평변위는 극한하중에서의 수평변위(δ_u)로 나누어 무차원화하였다. 수평변위(δ)는 식 (1)을 통해 구하였다.

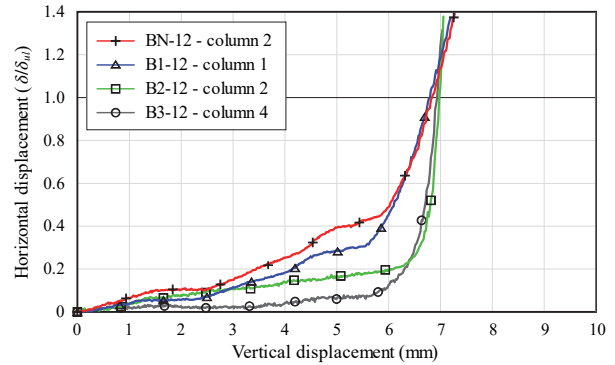


Fig. 14. Relationship between horizontal and vertical displacements in specimens with 1.220 m width

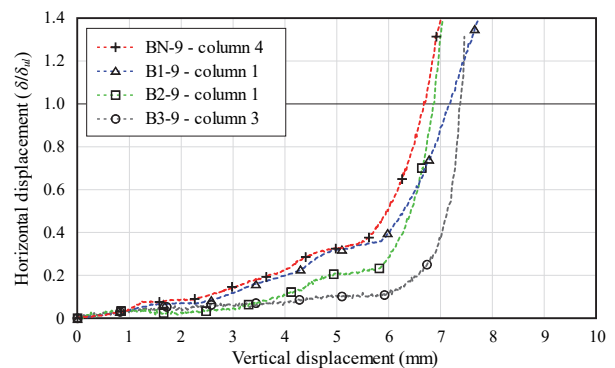


Fig. 15. Relationship between horizontal and vertical displacements in specimens with 0.914 m width

$$\text{Horizontal displacement } (\delta) = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (1)$$

여기서, δ_x 와 δ_y 는 x축 및 y축 수평변위이다.

모든 실험체들은 하중재하 초기에 작은 수평변위 증가율을 보이나, 수직변위가 약 5.5 mm(하중 80 kN 근처의 발생 변위)인 지점 이후 수평변위가 급격하게 증가하며 극한하중에 도달하였다. 다만 수평변위가 급증하는 지점의 이전 구간은 가새재 설치 조건에 따라 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 수평변위가 급증하기 전의 구간에서 가새재가 미 설치된 실험체(BN-12, BN-9)에 비해 가새재가 설치된 실험체들은 작은 수평변위를 보이며, 해당 구간에서 수평변위-수직변위 곡선의 기울기는 설치된 가새재 개수가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 따라서 시스템 비계의 가새재는 설치된 방향에서의 시스템 비계 구조물의 횡변위를 억제하는 본래의 역할 이외에도, 설치된 방향과 수직인 방향에서의 횡변위를 초기 하중에서 억제할 수 있는 것으로 판단된다.

3.3 극한하중 변화 분석

가새재의 설치유무와 이동통로 폭에 따른 실험체들의 거동 변화를 분석하기 위해 하중-수직변위 곡선을 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다. 그림으로부터 수직변위가 약 1.2 mm에서 약 2.4 mm까지의 구간과 약 4.5 mm에서 약 5.5 mm까지의 구간에서는 하중 증가가 크지 않음에도 수직변위가 증가하는 구간이 나타났음을 알 수 있다. 약 1.2 mm에서 약 2.4 mm까지의 구간은 조립된 실험체 연결부의 유격이 하중을 재하 시 맞물리면서 수직변위가 증가한 것으로 보이며, 약 4.5 mm에서 약 5.5 mm까지의 구간은 수평재 연결부의 회전강성으로 인해 실험체의 하중 저항력이 증가한 것으로 판단된다. 하중-변위곡선을 분석한 결과 가새재의 설치조건과 이동통로의 폭에 상관없이 약 80 kN 하중에 도달할 때까지 하중-수직변위 곡선은 거의 유사한 형태를 보였지만, 80 kN 이후 극한강도의 차이가 발생한 것으로 나타났다.

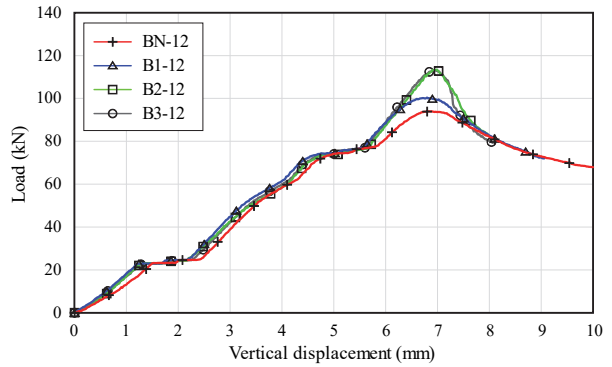


Fig. 16. Load-vertical displacement curve of specimens with 1.220 m width

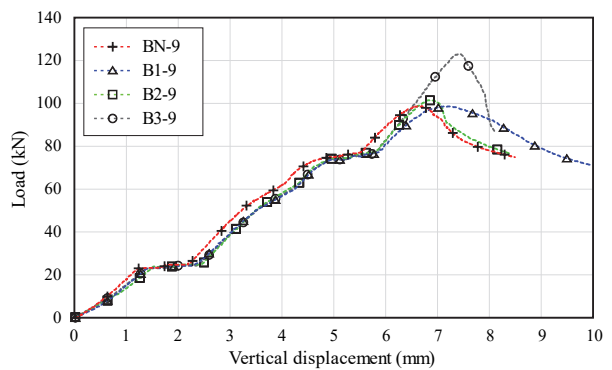


Fig. 17. Load-Vertical displacement curve of specimens with 0.914 m width

각 실험체의 극한하중을 Table 4에 정리한 결과, 이동통로 폭이 1.220 m인 실험체의 경우, 가새재가 없는 실험체(BN-12)의 극한강도(94 kN)를 기준으로 가새재가 1개 설치된 실험체(B1-12)에서는 극한강도가(100.4 kN) 약 7% 증가하였고, 가새재가 2개 설치된 실험체(B2-12)에서는 극한강도(113.4 kN)가 약 21%, 가새재가 전부 설치된 실험체(B3-12)에서는(극한강도 113.1 kN) 약 20% 증가한 것으로 분석되었다. 극한하중의 경우 시스템 비계 가새재의 설치조

Table 4. Comparison of ultimate load

Classification	Catwalk width 1.220 m				Catwalk width 0.914 m			
	BN-12	B1-12	B2-12	B3-12	BN-9	B1-9	B2-9	B3-9
Ultimate load (kN)	94.0	100.4	113.4	113.1	98.8	98.6	101.6	123.0
Increase rate*	-	7 %	21 %	20 %	-	0 %	3 %	24 %
Ratio**	95 %	102 %	112 %	92 %	-			

*Increase rate: increasing ratio of ultimate load compared to without bracing specimens

**Ratio: ultimate load ratio of the specimen having the catwalk width with 1.220 m to that with 0.914 m

건상 시스템 단위의 유효좌굴길이는 동일하나, 가새재가 설치된 방향의 수직 방향 횡변위를 일정수준 억제함으로써 가새재의 설치 개수에 따라 실험체의 극한하중에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 극한하중의 최대치와 최소치의 차이는 폭이 1.220 m인 실험체의 경우 19.4 kN이다.

이동통로의 폭이 0.914 m인 실험체의 경우 가새재가 없는 실험체(BN-9)의 극한강도(98.8 kN)를 기준으로 할 때 가새재가 1개 설치된 실험체(B1-9)의 극한강도(98.6 kN)는 변화가 거의 없으며, 가새재가 2개 설치된 실험체(B2-9)의 극한강도(101.6 kN)는 3% 증가하였으며, 가새재가 전부 설치된 실험체(B3-9)의 극한강도(123.0 kN)는 24% 증가한 것으로 나타났다. 이동통로 폭이 좁은 실험체의 경우 가새재가 전부 설치된 경우에서 극한강도가 증가되었으며, 극한하중의 최대치와 최소치의 차이는 24.4 kN이다.

시스템 비계 이동통로 폭 0.914 m인 실험체의 극한하중에 대한 이동통로 폭 1.220 m인 실험체의 극한하중 비율을 비교하면, 가새재가 없는 경우 95%, 가새재가 1개 설치된 경우 102%, 가새재가 2개 설치된 경우 112%, 가새재가 모두 설치된 경우는 92%로 분석되었다. 가새재를 미설치한 실험체와 3단 전부 설치한 실험체에서는 폭이 작은 실험체가 극한하중이 컸으나, 가새재가 1개 및 2개 설치된 실험체의 경우는 폭이 큰 실험체의 극한하중이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 가새재 설치에 따른 극한하중 변화로부터 1층과 3층에 수직기둥 상하단의 락장방향(x축) 회전을 제어할 수 있는 가새재가 설치된 경우 극한강도의 증가가 나타나며, 이동통로 폭에 따른 극한하중 변화는 뚜렷한 경향을 나타내지 않는 것으로 판단된다.

3.4 수직재의 응력 변화

각 수직재에 설치된 변형률계로부터 측정된 변형률로부터 수직재의 하중-응력곡선을 분석하였다(Figs. 18-19). 수직재의 하중-응력곡선은 각 실험체의 극한하중에 도달한 시점에서 가장 큰 응력이 발생한 수직기둥(수직재)의 데이터를 사용하였다. 그림에서 하중-응력곡선은 각 실험체에서 가장 큰 수평변위를 가지는 수직기둥(수직재)의 하중-응력이며, x축 및 y축의 구분 없이 하나의 수직기둥 당 2개의 곡선으로 표시하였다.

수직재의 하중-응력곡선의 경우 각 곡선의 초기 구간에서 압축응력을 받는 유사한 거동을 보이나, 실험체의 조립 구성에 따라 차이가 발생하였다. 이동통로 폭이 1.220 m인

실험체 중 극한하중에서 수직재 응력이 최대인 수직재는 가새재가 1층 및 3층에만 설치된 실험체의 수직재(B2-12 - column 2)로 응력은 113 MPa로 나타났다. 발생한 응력 수준은 사용한 수직재(STK490)의 항복강도인 315 MPa보다 월등히 낮은 수준이며, 이동통로 폭 0.914 m인 실험체의 경우에서도 동일한 경향을 나타내었다. 즉, 시스템 비계의 극한강도는 수직재의 재료 항복강도보다 좌굴 강도에 지배적인 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

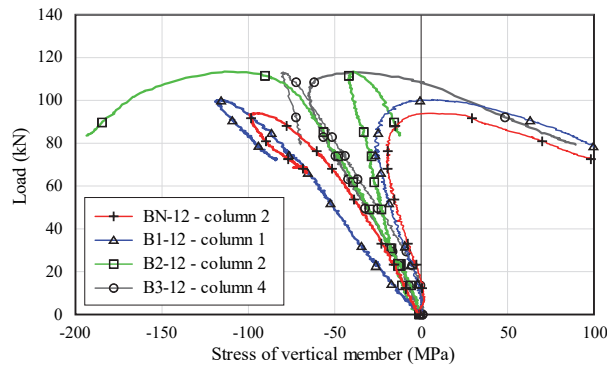


Fig. 18. Load-stress relationship of vertical members in the specimen with 1.220 m width

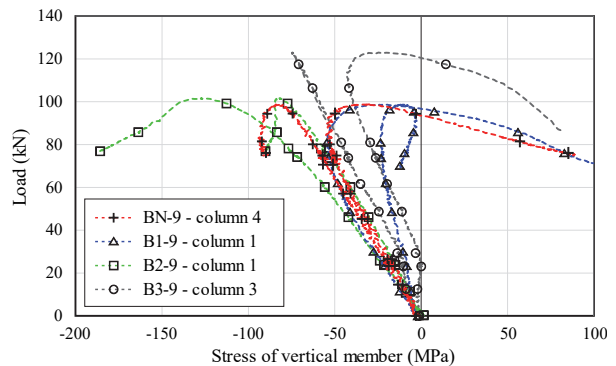


Fig. 19. Load-stress relationship of vertical members in the specimen with 0.914 m width

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 주로 사용하는 웹타입을 사용한 조립 시스템 비계를 대상으로 실험실실험을 진행하여 가새재 설치조건과 이동통로 폭에 따른 구조물의 극한하중과 수직변위를 비교·분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가새재 설치에 따른 좌굴형상을 분석한 결과, 통로

설치로 한쪽 면에만 가새재가 설치되는 특성으로 실험체들의 좌굴형상은 모든 수직기둥이 전체적으로 휘어지는 좌굴형상이 나타났다. 수직기둥의 2차원 수평이동 형상을 분석한 결과 1층과 3층에 가새재가 설치된 실험체들은 좌굴 방향이 장선(y축)방향으로 제한되는 것으로 확인되었다. 즉, 가새재 설치로 시스템 비계의 전체 유효좌굴길이가 감소되어 이동통로의 폭이 1.220m의 실험체에서는 극한하중이 최대 21% 증가하였으며, 이동통로의 폭이 0.914m의 실험체에서는 극한하중이 최대 24% 증가하였다. 따라서 시스템 비계의 안전성을 확보하기 위해서는 가새재를 적극적으로 배치하여야 한다고 판단된다.

- (2) 각 실험체의 설치 구성에 따른 수평변위 이력을 극한하중 시 수평변위로 나누어 무차원화하여 분석한 결과, 가새재 설치 조건에 따라 이력 곡선에 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 무차원 수평변위-수직변위 곡선의 기울기는 설치된 가새재 개수가 증가함에 따라 감소하므로 시스템 비계의 가새재는 설치된 방향에서의 시스템 비계 구조물의 횡변위를 억제하는 본래의 역할 이외에도, 설치된 방향과 수직인 방향에서의 횡변위를 극한하중 이전 단계에서 억제할 수 있는 것으로 판단된다.
- (3) 시스템 비계 이동통로 폭 0.914m인 실험체의 극한하중에 대한 이동통로 폭 1.220m인 실험체의 극한하중 비율을 비교하면, 가새재를 미설치한 실험체와 3단 전부 설치한 실험체에서는 폭이 작은 실험체가 극한하중이 컸으나, 가새재가 1개 및 2개 설치된 실험체의 경우는 폭이 큰 실험체의 극한하중이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 실험에 사용된 이동통로 폭의 경우 폭 변화에 따른 극한하중 변화는 뚜렷한 경향을 나타나지 않는 것으로 판단된다.

본 연구의 실험결과를 설치 구성에 차이가 있는 다른 시스템 비계 구조물의 결과를 포함하는 결과로 일반화하기에는 실험체의 수가 부족하다. 실제 건설현장에서 설치된 시스템 비계의 설계방법에 적용하기 위해서는 연결부 형태, 벽이음, 층간 높이, 제조사 간 차이 등 다양한 변수를 고려한 추가 실험 연구가 필요하다. 또한, 향후 FEM 해석을 통해 설치 구성에 따른 시스템 비계의 변화에 대해 일관성 있는 결과를 확보할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국산업안전보건연구원의 2019년 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] *Construction Technology Promotion Act* (2018, Republic of Korea, in Korean).
- [2] Chung, D.H., Kim, G.Y., and Won, J.-H. (2015) Effects of Minimum Horizontal Load on Structural Safety of System Supports, *Journal of the Korean Society of Safety*, KOSOS, Vol.30, No.5, pp. 37-43 (in Korean).
- [3] British Standards Institution (2004) *Mobile Access and Working Towers Made of Prefabricated Elements — Materials, Dimensions, Design Loads, Safety and Performance Requirements* (BS EN 1004: 2004), UK.
- [4] Chan, S.L., and Cho, S.H. (2005) Second-Order P- Δ - δ Analysis and Design of Angle Trusses Allowing for Imperfections and Semi-Rigid Connections, *Advanced Steel Construction*, The Hong Kong Institute of Steel Construction, Vol.1, No.1, pp.157-172.
- [5] Enright, J., Harriss, R., and Hancock, G.J. (2000) Structural Stability of Braced Scaffolding and Formwork with Spigot Joints, *Proceedings of the 15th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, University of Missouri, Rolla, USA, pp. 357-376.
- [6] Yu, W.K., Chung, K.F., and Chan, S.L. (2004) Structural Instability of Multi-Storey Door-Type Modular Steel Scaffolds, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 26, No.7, pp.867-881.
- [7] Zhang, H., Chandrangsu, T., and Rasmussen, K.J.R. (2010) Probabilistic Study of the Strength of Steel Scaffold Systems, *Structural Safety*, Elsevier, Vol.32, No.6, pp.393-401.
- [8] Cimellaro, G.P., and Domaneschi, M. (2017) Stability Analysis of Different Types of Steel Scaffolds, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.152, pp.535-548.
- [9] Pieńko, M., and Błazik-Borowa, E. (2018) Verification of the Numerical Model of Insert-Type Joint of Scaffolding in Relation to Experimental Research, *AIP Conference Proceedings (Proceedings of the 22nd Inter-*

- national Conference on Computer Methods in Mechanics*), AIP Publishing, Vol.1922, No.1, 080003.
- [10] Kim, J.R., Lee, E.T., Lee, S.Y., and Baek, K.Y. (2008) A Study on the Structural Property of Structural Steel Tubes Under Axial Compression, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.3, pp. 437-444 (in Korean).
- [11] Mha, H.-S., and Cho, K.I. (2013) Analysis of Shear Buckling Stresses for Steel Pipes by Detailed Parametric Study, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.5, pp.579-585 (in Korean).
- [12] Park, Y.-S., Cui, G., and Park, Y.C. (2018) Experimental Study on Compressive Seam Strength of Bolted Connections in Extra-Deep Corrugated Steel Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.5, pp.309-316 (in Korean).
- [13] Kim, K.S. (2019) In-Plane Compressive Strength of Hybrid Steel Stiffened Plate with Single Stiffener, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.1, pp.65-73 (in Korean).
- [14] Cho, K.H., and Kim, S.B. (2019) Compressive Strength of Concrete-Encased Composite Columns According to Design Specifications, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.223-231 (in Korean).
- [15] Kim, H.S., Yeo, Y.K., Park, S.C., and Kim, Y.D. (2001) Investigation and Analysis of Construction Situations Affecting Lateral Displacement in Form-Shore System, *Journal of Industrial Science Researches*, Research Institute of Industrial Sciences (Cheongju University), Vol.19, No.1, pp.135-142 (in Korean).

요 약: 본 연구에서는 웨지 연결부를 갖는 가새재 설치 조건에 따른 시스템 비계의 극한강도 변화를 실험을 통해 평가하였다. 시스템 비계는 작업자의 통로확보를 위해 모든 면에 가새재가 설치되지 않고 통로에 평행한 마주보는 면으로 가새재가 설치되므로 현장의 가새재 설치 조건을 반영한 가새재 설치 위치와 통로 폭(1.220 m와 0.914 m)을 변수로 하여 8개의 실물 실험체를 대상으로 실험을 실시하였다. 실험 결과, 폭 1.220 m의 실험체에서는 전체 가새재 설치로 약 21 %의 극한강도가 증가하였으며, 폭 0.914 m 실험체에서는 약 24 %의 극한강도가 증가하는 것으로 분석되었다. 그러므로 시스템 비계에서의 가새재 설치의 구조적 안전성을 증가시킬 수 있는 방법이므로 현장에서 누락되지 않도록 하여야 한다. 다만, 대상으로 하는 비계 폭에서는 폭 변화의 영향은 작은 것으로 분석되었다.

핵심용어: 극한하중, 시스템 비계, 웨지 연결부, 가새재, 통로폭
