

포켓형 연결부를 가지는 시스템 비계의 회전강성에 관한 실험적 연구

정대현¹ · 장남권¹ · 원정훈^{2*}

¹박사과정, 충북대학교, 안전공학과, ²교수, 충북대학교, 안전공학과

An Experimental Study on the Rotational Stiffness of System Scaffolding with Pocket Type Connection

Chung, Dae Hyun¹, Jang, Nam Gwon¹, Won, Jeong Hun^{2*}

¹Graduate Student(Ph.D. Course), Dept. of Safety Engineering, Chungbuk National University, Seoul, 28644, Korea

²Professor, Dept. of Safety Engineering, Chungbuk National University, Seoul, 28644, Korea

Abstract - The connection of the system scaffolding between vertical and horizontal member has a significant difference in rotational stiffness depending on the connection shape. However, there is few research on the rotational stiffness of pocket type connections. This study proposed a bilinear rotational stiffness model of the pocket type connection of the system scaffolding through analysis and experiments. Results showed that the initial rotational stiffness of the bilinear model is 28.378 kN·m/rad, and the later rotational stiffness is 1.450 kN·m/rad. The yield of the pin and the pocket has a dominant effect on dividing the initial and later rotational stiffness.

Keywords - Connection, System scaffolding, Rotational stiffness, Pocket type, Bilinear model

1. 서론

국내의 경우 가설구조물의 구조적 안전성 확보를 위해 특정 가설구조물의 설계 전과 시공 전에 구조 안전성 검토를 수행하도록 법적으로 규정하고 있다. 가설구조물의 구조 안전성 검토는 일반적으로 ‘가시설물 설계기준’^[1] 및 관련 세부설계기준에 명시된 내용을 고려하여 구조 해석을 통해 수행되고 있다. 설계기준^{[2],[3]}에서는 비계 및 동바리 등을 대상으로 하는 구조해석의 효율성 확보를 위해 수직재와 다른 부재(수평재, 가새재, 벽이음 등) 간의 연결조건을 단순한 힌지조건으로 고려할 수 있다고 명시되어있다. 다만, 힌지조건을 따르기 어려운 경우, 구조분야 전문가의 판단을 적용할 수 있도록 하고 있으며, 실제로 비계 및 동바리의 연결부는 회전에 저항하는 힘

을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 비계 및 동바리의 연결부는 수직재의 모멘트를 일부 수평재에 분배할 수 있기 때문에 연결부의 접합강성을 고려할 필요가 있다^{[4],[5]}.

강구조물의 연결부는 실험 및 해석을 통해 성능을 검증하는 것이 반드시 필요하므로 연결부의 성능과 강성에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다^{[6]-[10]}. 비계 및 동바리 연결부에 대한 국내외 연구를 보면, 실험 및 해석을 통해 다양한 형태를 가지는 비계 및 동바리 연결부의 회전강성모델이 제시되고 있다. Jia *et al.*^[11]은 강관비계에 사용되는 직각 클램프의 회전강성에 대해 볼트 조임 토크, 제품 상태(신품 또는 구형), 다양한 클램프의 조합, 하중 방향을 고려한 분석을 수행하였다. Chandrangu and Rasmussen^[12]은 컵락형(cuplock type) 연결부를 가지는 시스템 비계를 대상으로 연결부의 구성 등을 고려한 실험을 수행하여 시스템 비계의 모델링을 위한 연결부의 회전강성을 제시하였다. 또한, 주로 국내에서 시스템 비계의 연결부로 채택되는 형태 중 하나인 웨지형(wedge type) 연결부를 대상으로 제품 상태, 하중 방향과 같은 다양한 영향 요인을 고려하여 시스템 비계의 구조해석을 위한 연결부의 회전강성모델을 제시하는 연구들이 수행되었다^{[13]-[16]}. 기존 연구^{[11]-[16]}에서 제시된 다양한 연결부

Note.-Discussion open until August 31, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 16, 2022; revised on January 11, 2023; approved on January 11, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. jhwon@chungbuk.ac.kr

형태의 회전강성은 비계 및 동바리의 구조해석결과에 영향을 미치는 주요 요소이며, 연결부의 구조적 형태에 따라 회전강성의 상당한 차이가 존재하는 것으로 분석되고 있다.

구조물의 정확한 거동을 예측하는 것은 비계 및 동바리의 구조적 안전성 확보에 있어 필수적이다. 비계 및 동바리의 구조해석에서 연결부의 회전강성은 중요한 요소이나, 연결부의 형태에 따라 회전에 저항하는 거동이 상이하다. 따라서 비계 및 동바리의 정확한 거동 예측을 위해서는 연결부 형태에 따른 회전강성을 정확하게 적용할 필요가 있다^[17]. 국내에서 사용되는 비계는 일반적으로 포켓형 연결부 또는 웨지형 연결부의 형태를 가진다. 그러나 웨지형 연결부에 비해 포켓형 연결부의 회전강성에 관한 연구는 거의 없는 실정이므로, 시스템 비계의 구조해석에 고려할 수 있는 포켓형 연결부의 회전강성에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 포켓형 연결부를 가지는 시스템 비계의 회전강성을 실험을 통해 분석하였다. 캔틸레버보 형태의 시스템 비계 실험체를 대상으로 하중재하 실험을 수행하여 포켓형 시스템 비계 연결부의 이선형(bilinear) 회전강성모델을 도출하였다.

2. 시스템 비계의 포켓형 연결부

포켓형 연결부는 웨지형 연결부와 더불어 주로 국내 시스템 비계의 연결방식으로 선택되고 있다. 본 연구에서 사용된 포켓형 연결부의 구조적 형태, 세부적인 치수의 제원 및 실측값의 평균은 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b), Table 1과 같다. 제작과정에서 연결부 부재의 규격과 실측값의 차이가 발생할 수 있으므로 각 부재에 대해 실측값을 측정하였으며, 결과를 Table 1에 같이 나타냈다. 실측값의 평균은 연구에 사용된 30개의 실험체 중 10개의 실험체를 무작위로 선택하여 측정하였다. 제원에 대한 실측값의 평균 오차율은 -1.7%에서 3.0% 이내로 나타났다.

각 부재(수직재 및 수평재)의 연결은 수평재 강관의 양단에 용접되어있는 핀 부분을 수직재의 포켓에 삽입 후 망치 등으로 충분히 타격하여 이루어진다. 4개의 포켓이 수직재에 용접되어 있는 포켓부의 형태상 각 포켓의 연결은 다른 포켓의 연결과 독립적으로 작용한다(Fig. 1(c)). 따라서 본 연구에서는 하나의 수직재와 하나의 수평재만이 연결된 구성체의 연결부 회전강성에 초점을 맞추었

으며, 연결된 수평재의 개수는 회전강성에 영향을 미치는 변수로서 고려하지 않았다.

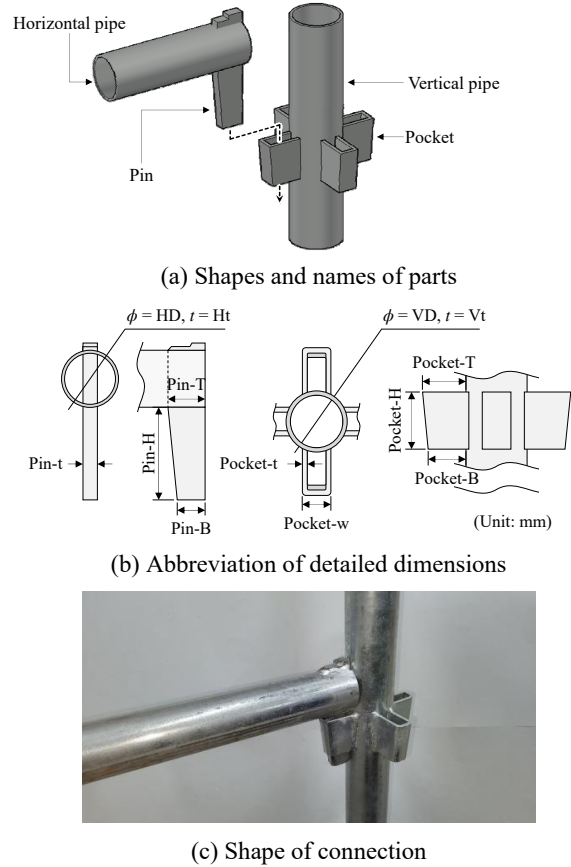


Fig. 1. Shapes and dimensions of pocket type connection

Table 1. Detailed dimensions of pocket type connection

Part	Specifications (mm)	Actual measurement		
		Mean (mm)	SD (mm)	Error (%)
HD	42.9	42.92	0.11	0.0
Ht	1.8	1.81	0.06	0.6
Pin-t	9	8.99	0.07	-0.1
Pin-T	29	29.05	0.08	0.2
Pin-H	60	60.44	0.32	0.7
Pin-B	23	23.22	0.15	1.0
HD	48.6	48.74	0.08	0.3
Ht	2.3	2.26	0.11	-1.7
Pocket-t	3	3.09	0.07	3.0
Pocket-T	31	31.19	0.14	0.6
Pocket-H	40	40.21	0.22	0.5
Pocket-B	27	27.26	0.20	1.0
Pocket-w	18	18.13	0.09	0.7

포켓형 연결부를 구성하는 강관, 포켓, 핀의 재질과 기계적 성질은 Table 2와 같다. 본 연구에서 사용한 포켓형 연결부를 가지는 시스템 비계는 ‘방호장치 안전인증 고시(2021. 3. 11)’의 ‘[별표 17] 조립식 비계용 부재의 성능 기준 및 시험방법’에 명시된 ‘시스템 비계용 부재의 재료’에 적합한 제품이다. 각 구성부의 항복강도와 인장강도, 연신율은 강재의 검사성적서(mill sheet certificate)를 활용하였다. 수직재 강관과 수평재 강관의 검사성적서는 강관(원재료)이 아닌 강관으로 가공한 제품을 대상으로 수행된 시험의 결과이다. 따라서 강관을 강관으로 가공하는 과정에서 발생할 수 있는 항복강도 등의 변화는 검사성적서의 결과에 반영된 것으로 판단된다.

Table 2. Material properties of pocket type connection

Part	Steel grade	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Vertical pipe	SGT550	639.0	706.0	22.0
Pocket	SPHC	211.7	338.5	48.3
Horizontal pipe	SGT550	698.0	724.0	19.0
Pin	SS400	273.0	445.8	27.8

Data obtained from a mill sheet certificate

3. 유한요소해석을 통한 회전강성 예측

3.1 포켓형 연결부 해석모델 개요

본 연구에서는 포켓형 연결부의 회전강성을 예측하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS(Ver. 6.13)를 이용하여 연결부의 각 구성부(강관, 포켓, 핀)를 솔리드(Solid) 요소로 모델링하였다(Fig. 2). 각 구성부의 형태 및 세부 수치는 Fig. 1(a), Fig. 1(b)와 동일하며, 수직재 및 수평재 강관의 길이는 각각 300 mm, 765 mm로 설정하였다. 포켓의 상단은 수직재 강관의 중앙 높이(150 mm)에 위치한다. 각 재질의 탄성계수와 포아송비는 205 GPa 및 0.3으로 적용했으며, 항복강도와 인장강도는 Table 2와 동일하다.

해석모델의 경계조건으로서 수직재 강관의 상·하단 절점들의 변위 및 회전을 구속하였다. 해석은 하중조건에 의해 2개의 step으로 구성된다(Fig. 2). 첫 번째 step은 망치질 등에 의해 핀과 포켓이 맞물려 있는 상황을 구현하

기 위한 단계로서, 핀의 상단부 절점들에 변위제어하중(하방, 10 mm)을 정의하였다. 또한, 핀과 포켓이 접합되는 연결방식을 모사하기 위해 contact 요소(friction coefficient: 0.5)를 이용하였다. 두 번째 step은 수평재 강관에 본 하중이 가해지는 단계로, 수직재의 중심부로부터 수평재 방향으로 500 mm 이격된 위치에 강체(rigid body) 요소를 생성하였으며, 강체에 변위제어하중을 정의하였다. 수평재 강관과 강체의 contact 설정은 핀과 포켓의 설정과 동일하다.

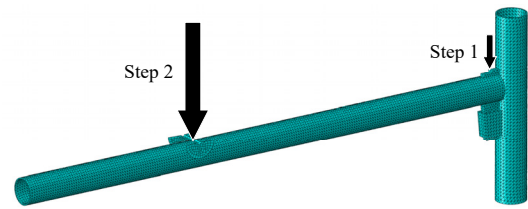


Fig. 2. Analysis model of pocket type connection

3.2 해석에 의한 포켓형 연결부 회전강성

유한요소해석결과에 의한 연결부의 변형 형상은 Fig. 3와 같다. 주된 변형은 강관에 비해 항복강도가 작은 핀과 포켓에서 나타났으며, 연결부의 구조 형태상 핀과 포켓이 맞닿는 부분(Fig. 3(b))의 상부에서 항복이 발생하였다. 또한, 핀의 하단부가 접촉되어있는 수직재 강관의 일부분에서 미소한 변형이 발생하였다.

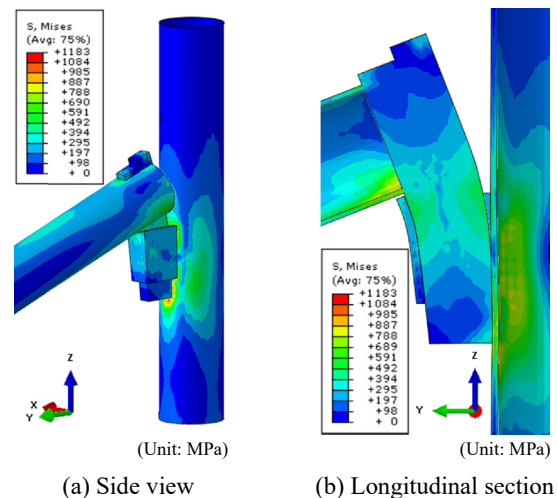


Fig. 3. Deformation shapes and von Mises stress distribution

해석모델로부터 포켓형 연결부의 회전강성을 예측하기 위해 연결부의 모멘트-회전 곡선(Fig. 4)을 도출하였

다. 해석모델의 최대 모멘트는 0.98 kN·m로 최대 모멘트 발생 이후(약 0.3 rad) 모멘트-회전 곡선은 완만하게 감소하였다. 또한, 모멘트-회전 곡선의 기울기에 해당하는 회전강성은 초기 구간에서 높게 나타나나, 약 0.025 rad 이후 급격히 감소했다. 회전강성이 급격히 감소하는 구간은 핀과 포켓이 항복하기 시작하는 구간으로, 핀과 포켓의 항복이 포켓형 연결부의 초기 및 후기 회전강성을 구분하는데 지배적 영향을 미치는 것으로 판단된다. 핀과 포켓이 항복하기 시작하는 각도를 기준으로 초기 구간(0 rad - 0.026 rad)의 회전강성(k_1)은 28.323 kN·m/rad이며, 후기 구간(0.026 rad - 1.169 rad)의 회전강성(k_2)은 1.169 kN·m/rad이다.

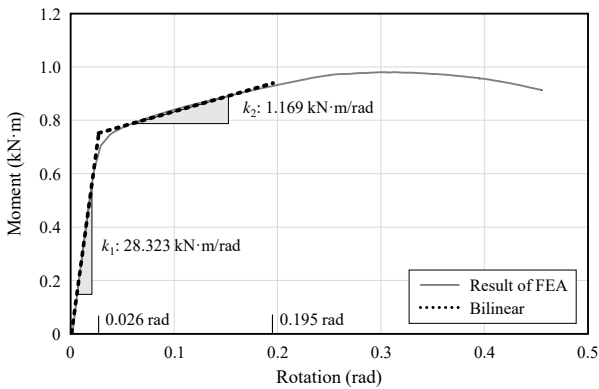


Fig. 4. Moment-rotation curves resulting from analysis model

4. 회전강성 실험계획

포켓형 연결부의 회전강성모델을 도출하기 위하여, 시스템 비계 수직재와 수평재로 구성된 캔틸레버보 형태의 실험체 30개를 대상으로 하중재하 실험을 수행하였다 (Fig. 5). 하중은 변위제어방식으로 20 mm/min의 속도로 수직재 중심에서 수평재 방향으로 500 mm 이격시킨 위치(Fig. 6)에서 수평재의 아래 방향으로 재하하였다. 연결부의 회전 각도를 구하기 위하여 4개의 변위계(LVDT)를 수직재 파이프의 중심에서 수평재 방향으로 100 mm, 200 mm 떨어진 위치 및 수평재 중심에서 수직재 양단 방향으로 100 mm 떨어진 위치에 설치하였다(Fig. 6). 또한 연결부의 세부 부재의 변형을 확인하기 위해 2개의 실험체에 Fig. 7과 같이 4개의 스트레인 게이지(SG-H, SG-V, SG-R, SG-L)를 부착하였다.

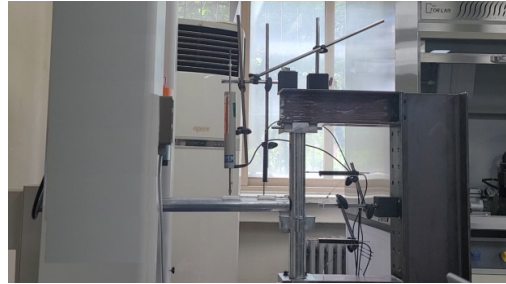


Fig. 5. Overview of the test setup

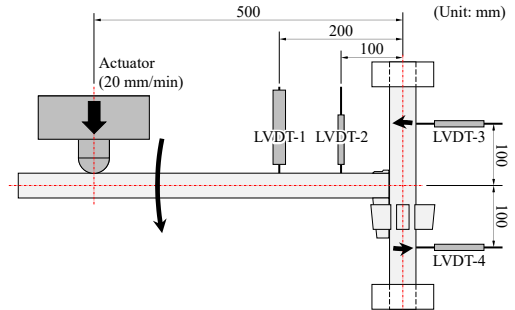


Fig. 6. Test configuration and measure points

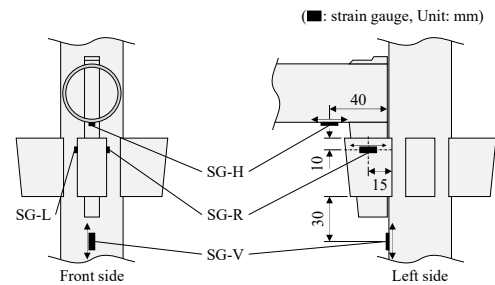


Fig. 7. Strain gauge location of specimen 01 and 02

5. 포켓형 연결부의 회전강성

5.1 연결부의 변형 형상 및 모멘트-회전 곡선

실험에 의한 포켓형 연결부의 극한 변형 및 실험체 30개의 각 변위계 별 하중-변위 곡선은 Fig. 8 및 Fig. 9과 같다. 주된 변형은 강관에 비해 항복강도가 작은 핀과 포켓에서 나타났으며, 연결부의 구조 형태상 핀과 포켓이 맞닿는 부분(Fig. 8(b), Fig. 8(c))의 상부에서 항복이 발생하였다. 또한, 핀의 하단부가 접촉되어있는 수직재 강관의 일부분에서 미소한 변형이 발생하였다. 수직재의 횡변위를 측정하는 LVDT-3, LVDT-4의 하중-변위 곡선(Fig. 9(c), Fig. 9(d))에서 나타나듯이 하중에 의한 수직재 강관의 휨은 거의 발생하지 않으므로, 연결부의 회전은 핀과 포켓의 변형에 의해 발생하는 것으로 판단된다.



(a) Deformation shape



(b) Pin



(c) Pocket

Fig. 8. Deformation shape after being test

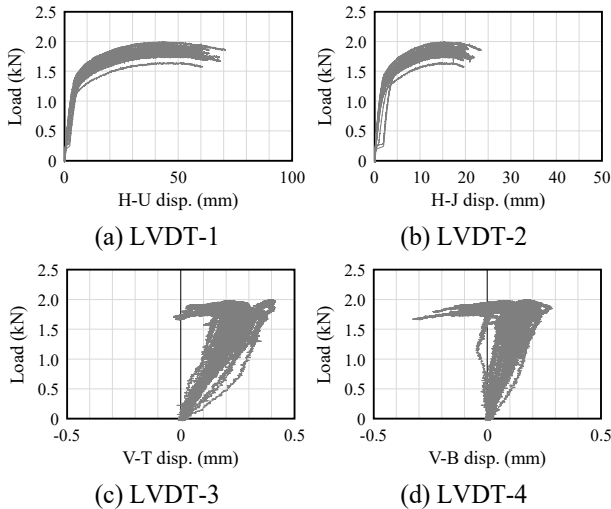


Fig. 9. Load-displacement curves of each LVDT

포켓형 연결부의 모멘트-회전 곡선을 구하기 위해 모멘트(M , kN·m)는 식 (1), 회전 각도(θ , rad)는 식 (2)을 사용하여 계산하였다. 연결부의 회전 각도를 계산함에 있어서 수평재의 휨에 의해 발생하는 오차가 반영되지 않도록 액추에이터(actuator)의 변위 데이터는 계산에서 고려하지 않았다. 각 기호의 모식도는 Fig. 10과 같다.

$$M = P \times L \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_{h,1} - d_{h,2}}{l_{h,1} - l_{h,2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{d_{v,1} - d_{v,2}}{l_{v,1} - l_{v,2}} \right) \quad (2)$$

여기서, P : 하중,

L : 수직재 강관의 중심축에서 하중지점까지의 거리,

$d_{h,1}, d_{h,2}, d_{v,1}, d_{v,2}$: 각 변위계의 변위,

$l_{h,1}, l_{h,2}, l_{v,1}, l_{v,2}$: 강관의 중심축에서 각 변위계까지의 거리.

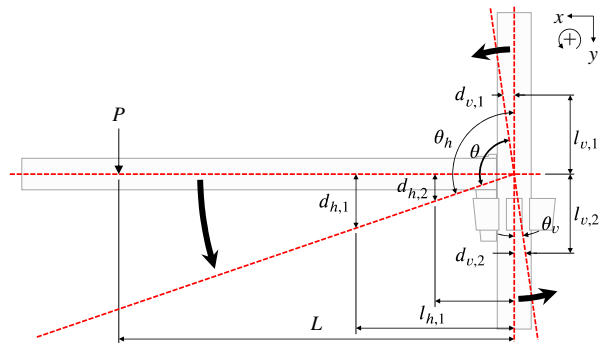


Fig. 10. Symbol designation

실험체 30개로부터 도출된 모멘트-회전 곡선 및 최대 모멘트의 평균과 표준편차를 Fig. 12와 Table 3에 나타냈다. Fig. 12 그래프 내 점선은 유럽의 철골 구조 설계기준인 Eurocode 3의 접합부 분류(Fig. 11)에 따라 그래프를 세 영역으로 나누는 기준선이다. 각 포켓형 연결부의 모멘트-회전 곡선은 모두 유사한 형태를 가지며, 최대 모멘트의 평균은 0.934 kN·m로 최대 모멘트의 발생 이후 (약 0.25 rad - 0.35 rad) 모멘트-회전 곡선은 완만하게 감소하였다. 또한, 모멘트-회전 곡선의 기울기에 해당하는 회전강성은 초기 구간에서 높게 나타나나, 약 0.025 rad 이후 급격하게 감소하였다. Eurocode 3^[18]에서는 보와 기둥의 접합부를 강성을 기준으로 공칭핀접합부(nominally pinned connection) 및 강접합부(rigid connection), 반강접합부(semi-rigid connection)로 분류하고 있으며, 연결부의 강성이 공칭핀접합 또는 강접합부의 영역에 속하면 설계 시 연결부를 핀 또는 강접합으로 간주할 수 있다. Fig. 12에서 포켓형 연결부의 초기 모멘트-회전 곡선은 모두 반강접 범위에 위치함을 알 수 있다. 포켓형 연결부를 가지는 시스템 비계를 대상으로 하는 구조해석 시, 연결부를 단순 힌지로 가정한다면 비계의 전체 안정성을 정확하게 예측하는 데 어려움이 있음을 의미한다.

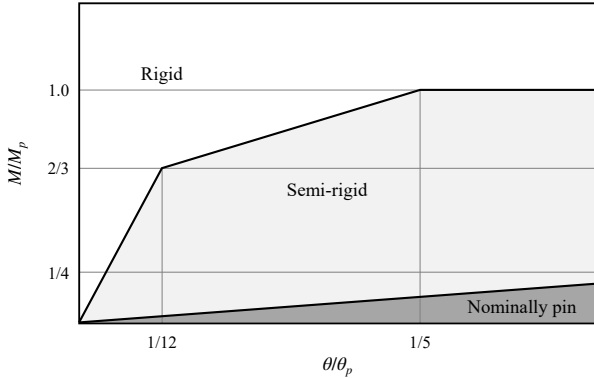


Fig. 11. Classification of beam-to-column connections by stiffness according to the Eurocode 3 for braced frames

Table 3. Maximum moments of specimens (Unit: kN·m)

Mean	SD	Coefficient of variation
0.934	0.038	0.040

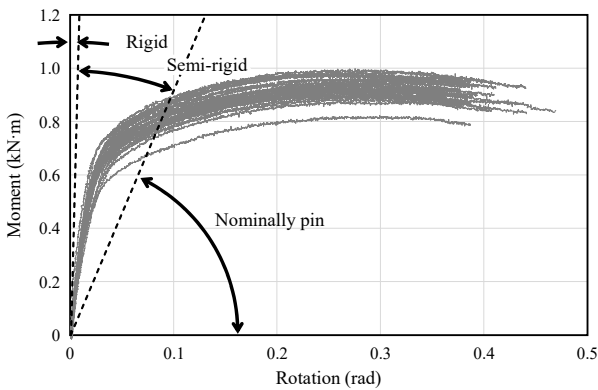


Fig. 12. Moment-rotation curves of tests

포켓형 연결부의 회전에 의한 거동 분석을 위해, 실험체 01과 02의 연결부 회전 각도에 따른 강관과 포켓에 부착한 스트레인 게이지의 변형률을 응력으로 변환하여 Fig. 13에 모멘트-회전 곡선과 함께 나타냈다. 수평재 강관에 부착한 스트레인 게이지(SG-V)의 위치에서 하중의 재하 이후 지속적인 압축응력이 발생하였다. 수평재 강관에 부착한 스트레인 게이지 위치의 최대 압축응력 (Specimen 01 - SG-H: 316.7 MPa, Specimen 02 - SG-H: 335.8 MPa)은 수평재 강관 재질의 항복강도(698.0 MPa)의 50% 미만 수준으로 발생하였다.

수직재 강관에 부착한 스트레인 게이지(SG-H)의 위치의 경우 초기 회전 구간에서 압축응력이 발생하였으며, 최대 압축응력 이후 응력의 발생은 반전되어 인장되는

것으로 나타났다. 초기 압축응력이 발생하는 구간은 하중재하에 의해 수직재 강관 자체가 하방으로 압축되는 구간으로 판단된다. 이후 발생하는 인장응력은 지속적으로 증가하여, 연결부의 최대모멘트에 도달하는 지점 부근에서 항복강도(639.0 MPa)에 도달하였다. 연결부의 회전에 의해 핀의 하단부가 수직재 강관을 누르면서 강관에 소형변형이 발생하는 것으로 분석되나, 실험 종료 후 연결부의 형상(Fig. 8)을 보았을 때 핀의 변형에 비해서는 미소한 수준인 것으로 판단된다.

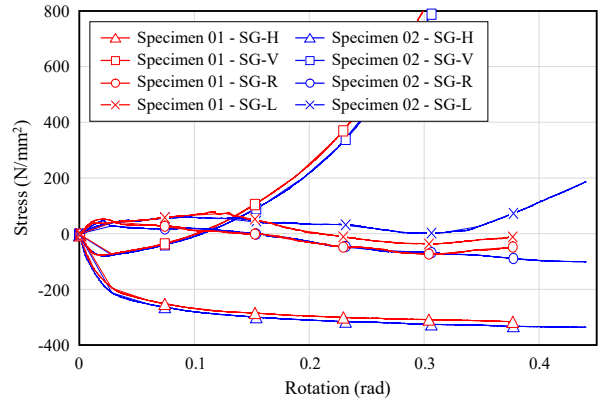


Fig. 13. Stress curves of Specimen 01 and 02

포켓의 상단부 양 측면에 부착한 스트레인 게이지(SG-R, SG-L)에서는 강관에 비해 작은 응력이 발생하며, 실험체 01과 02 모두 포켓의 좌·우측에서 발생하는 응력의 차이는 적다. 초기 회전 각도에서 인장응력이 나타나며, 약 0.1 rad - 0.2 rad 이후 반전되고 압축응력이 발생하였다. 실험 초기에는 핀에 의해 포켓이 인장되다가 Fig. 8(c)와 같이 포켓 전면부의 상단에서 찢어짐이 발생하면서 포켓 좌·우측 상단부의 응력 측정 위치인 SG-R, SG-L에서는 응력이 감소하기 시작한 것으로 판단된다. 또한, 실험 후기에 발생하는 압축응력은 핀을 포켓에 삽입 후 스트레인 게이지를 부착하기 전에 망치질에 의해 발생한 인장응력의 영향으로 판단된다.

포켓형 연결부의 변형 형상(Fig. 8)과 발생하는 응력(Fig. 13)을 보았을 때 연결부의 주된 변형은 포켓의 일부 상단(핀과 맞닿아 직접적인 힘을 받는 면의 상단)과 핀에서 발생하는 것으로 분석된다. 회전강성이 급격하게 감소하는 구간은 핀과 포켓이 항복하기 시작하는 회전구간으로, 핀과 포켓의 항복이 포켓형 연결부의 초기 및 후기 회전강성을 구분하는데 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5.2 연결부의 회전강성모델

실험에 의해 도출한 포켓형 연결부의 모멘트-회전 곡선(Fig. 12)은 연결부의 형태와 망치질 등을 통한 긴결 방식으로 인해 다른 구조적 형태를 가지는 일부 연결부에서 나타나는 회전각도 초기의 느슨함(looseness)^[12]이 나타나지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 포켓형 연결부의 회전강성모델을 실제 모멘트-회전 곡선과 유사한 이선형(bilinear)의 형태로 가정하였다. 가정한 이선형 회전강성 모델의 매개변수인 회전강성값(k_1 , k_2)과 기준 회전각도(β_1 , β_2)의 정의는 Fig. 14과 같다. 회전강성이 변화하는 기준인 β_1 의 평균값을 각 실험체의 이선형 회전강성모델의 β_1 값들로 산술평균값을 사용하는 경우, 각 회전강성 구간의 연속성을 만족시킬 수 없다. 따라서 β_1 의 평균은 식 (3)과 같이 회전강성(k_1)을 가중치로 사용하여 가중 산술평균으로 계산하였다.

$$(\beta_1)_{Mean} = \frac{\sum(k_1)_n \times (\beta_1)_n}{\sum(k_1)_n} \quad (3)$$

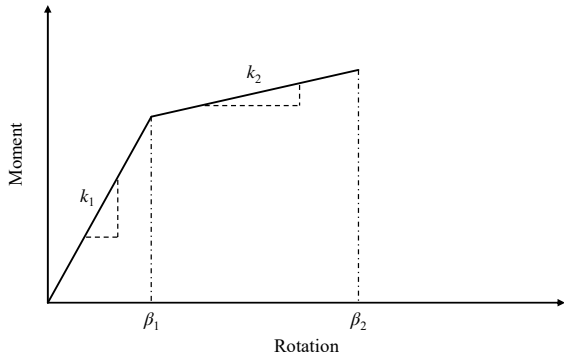


Fig. 14. Bilinear rotational stiffness model

본 연구에서 실험을 통해 도출한 포켓형 연결부의 이선형 회전강성모델의 주요 매개변수는 Table 4와 같다. 도출된 포켓형 연결부의 이선형 회전강성모델은 매개변수의 평균값 이외에도 회전강성(k_1 , k_2)의 변동계수(coefficient of variation) 및 5th, 95th percentile을 포함한다. 이선형 회전강성모델의 초기 회전강성(k_1 , rotation range: 0 rad - 0.025 rad)의 평균은 28.378 kN·m/rad, 5th 및 95th percentile은 각각 21.812 kN·m/rad, 37.002 kN·m/rad이다. 후기 회전강성(k_2 , rotation range: 0.025 rad - 0.196 rad)의 평균은 1.450 kN·m/rad이며, 5th 및 95th percentile은 각각 1.223 kN·m/rad과 1.650 kN·m/rad이다. 또한, 초기 회전강성의 변동계수는 0.145로, 후기 회전강성의 변동계

수 0.079의 약 1.8배이다. 실험체의 변형 형상 및 발생하는 응력의 결과에 의하면, 연결부의 회전 초기에는 핀과 포켓, 강관으로 구성된 연결부의 복합적인 구성체가 휨 모멘트에 저항하여 회전강성의 변동계수가 비교적 크나, 포켓 상부의 소성 변형 이후 휨모멘트에 저항하는 지배적인 구성체가 핀이 되므로 변동계수가 비교적 작은 것으로 분석된다.

Table 4. Parameters of bilinear rotational stiffness model

Statistics	k_1 (kN·m/rad)	k_2 (kN·m/rad)	β_1 (rad)	β_2 (rad)
Mean	28.378	1.450	0.025	0.196
SD	4.102	0.114	-	-
Coeff. of variation	0.145	0.079	-	-
5th percentile	21.812	1.223	-	-
95th percentile	37.002	1.650	-	-

도출된 이선형 회전강성모델의 결과는 해석결과와 비교하기 위해 Fig. 15에 나타났다. 포켓형 연결부의 회전강성을 예측하기 위한 해석모델(Fig. 2)의 결과는 도출된 이선형 회전강성모델과 전체적인 경향 및 초기·후기 회전강성이 유사한 것으로 분석되므로 본 연구의 해석모델은 포켓형 연결부의 회전강성을 평가할 수 있는 해석모델로 사용할 수 있다.

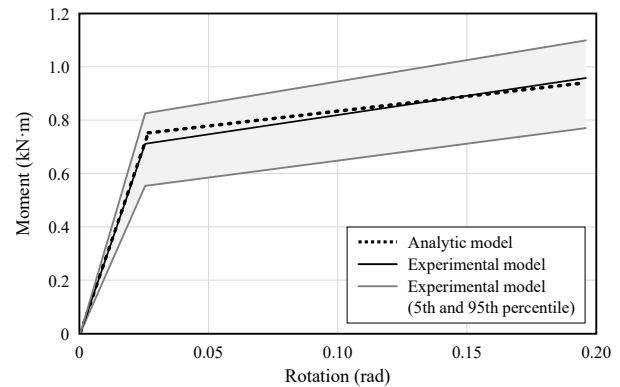


Fig. 15. Bilinear rotational stiffness model of pocket type connection based on the result of experiments and analysis

6. 결론

본 연구는 포켓형 연결부를 가지는 시스템 비계의 연결부 회전강성모델을 제시하기 위해 실험 및 유한요소해

석을 수행하였으며, 모멘트-회전 곡선으로부터 회전강성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 포켓형 연결부의 모멘트-회전 곡선을 분석한 결과, 이선형(bilinear) 회전강성모델이 적합한 것으로 판단된다. 초기 회전강성은 28.378 kN·m/rad (rotation range: 0 rad - 0.025 rad)이며, 후기 회전강성은 1.450 kN·m/rad(rotation range: 0.025 rad - 0.196 rad)로 평가되었다. 또한, 포켓형 연결부의 초기 회전강성은 Eurocode 3의 접합부 분류방식의 반강접합부에 해당되는 것으로 분석되었다.
- (2) 연결부의 주된 변형은 강관에 비해 항복강도가 작은 핀과 포켓에서 발생하였으며, 핀과 포켓이 접촉부 상부에서 항복이 발생하였다. 따라서, 회전강성이 급격하게 감소하는 구간은 핀과 포켓이 항복하기 시작하는 구간으로, 핀과 포켓의 항복이 포켓형 연결부의 초기 및 후기 회전강성을 구분하는데 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

포켓형 연결부의 재질이나 제조업체에 따라 회전강성의 차이가 발생할 수 있으며, 본 연구에서 도출한 포켓형 연결부의 회전강성모델을 모든 포켓형 연결부를 가지는 가설구조물의 구조해석에 적용 시 신중하게 접근해야 한다. 재질이나 제조업체에 따라 사용 강재의 시기나, 강재 공급사에 따라 회전강성은 변화될 수 있음에 유의하여야 한다. 본 연구에서는 연결부 실험의 회전방향을 단일방향으로만 고려하여 실시하였으나, 실제 포켓형 연결부는 회전방향에 따라 다른 거동을 나타낼 수 있으므로 다양한 회전방향을 고려하여 연결부의 회전강성모델을 도출할 수 있는 연구가 필요하다.

참고문헌(References)

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Standards for Temporary Facilities* (KDS 21 00 00: 2022), Korea (in Korean).
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Standards for Formwork and Support* (KDS 21 50 00: 2022), Korea (in Korean).
- [3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Standards for Scaffolding and Safety Facility* (KDS 21 60 00: 2022), Korea (in Korean).
- [4] Ahn, S.W., and Lee, S.J. (1999) Strength and Rotational Behavior of Semi-Rigid Composite Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.11, No.6, pp.615-625 (in Korean).
- [5] Kim, J.S. (2003) An Analytical Study on the Behavior of Steel Frames with Semi-Rigidity of Beam-to-Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.5, pp.551-559 (in Korean).
- [6] Oh, K., Kim, S.-H., Shin, K.-J., Yoon, B.-I., and Lee, K. (2020) Structural Performance Evaluation of Modular Connection Using Specially Fabricated Blocks, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.4, pp.257-267 (in Korean).
- [7] Jin, J., Lee, K., Park, K., Kim, D., and Seo, H. (2021) Seismic Performance Evaluation of Non-Welded Moment Connection (KONNECTION) Between Rectangular Tubular Section Column and H-Shaped Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.6, pp.355-362 (in Korean).
- [8] Kang, S.H., Woo, J.H., Lee, H.D., Lee, W.G., and Shin, K.J. (2022) An Experimental Study on Seismic Performance of Pipe-Rack Using Extended End-Plate Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.269-277 (in Korean).
- [9] Jung, S.-M., Lee, J.-S., Lee, S.-H., Kim, H.-J., Lee, K.-M., and Shin, K.-J. (2022) Structural Performance Evaluation of Modular System Connections Using Special Blocks, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.1, pp.45-53 (in Korean).
- [10] Lee, B.-H., and Seo, S.-Y. (2022) Development and Structural Behaviors of New Vertical-Diaphragm Connections to CFT Column-H Beam Under Cyclic Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.363-372 (in Korean).
- [11] Jia, L., Liu, H., Chen, Z., Liu, Q., and Wen, S. (2016) Mechanical Properties of Right-Angle Couplers in Steel Tube-Coupler Scaffolds, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.125, pp.43-60.
- [12] Chandrangu, T., and Rasmussen, K.J.R. (2011) Investigation of Geometric Imperfections and Joint Stiffness of Support Scaffold Systems, *Journal of*

- Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.4, pp.576-584.
- [13] Peng, J.-L., Wu, C.-W., Chan, S.-L., and Huang, C.-H. (2013) Experimental and Numerical Studies of Practical System Scaffolds, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.91, pp.64-75.
- [14] Pieńko, M., and Błazik-Borowa, E. (2020) Experimental Studies of Ringlock Scaffolding Joint, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 173, 106265.
- [15] Won, J.-H., Lee, H.D., Choi, M.-K., and Park, M.C. (2018) Flexural Strength and Rotational Stiffness Estimation of Joint Between Vertical and Horizontal Members in System Support, *Journal of the Korean Society of Safety*, KOSOS, Vol.33, No.4, pp.46-53 (in Korean).
- [16] Bong, J.K., Lee, H.D., Kim, S., Mha, H.-S., Yim, D.-K., and Won, J.-H. (2019) Probabilistic Characteristics of Moment Capacity and Rotational Stiffness of Wedge Joints Used in Support Systems Reflecting Reused Members, *Applied Sciences*, MDPI, Vol.9, No.19, 4056.
- [17] Zheng, Y., and Guo, Z. (2021) Investigation of Joint Behavior of Disk-Lock and Cuplock Steel Tubular Scaffold, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.177, 106415.
- [18] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints* (EN 1993-1-8: 2005), Belgium.

요 약: 시스템 비계의 연결부는 연결 형상에 따라 회전강성의 상당한 차이가 존재한다. 다양한 연구에서 실험 및 해석을 통해 연결부 형상에 따른 비계 및 동바리 연결부의 회전강성모델이 제시되고 있으나, 포켓형 연결부의 회전강성에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구는 포켓형 연결부를 가지는 시스템 비계를 대상으로 해석 및 실험을 통해 포켓형 연결부의 회전강성모델을 분석하였다. 포켓형 연결부의 회전강성모델은 이선형 모델로 분석되었으며, 28.378 kN·m/rad의 초기 회전강성과 1.450 kN·m/rad의 후기 회전강성을 갖는 것으로 평가되었다. 회전강성이 급격하게 감소하는 구간은 핀과 포켓이 항복하기 시작하는 구간이므로 핀과 포켓의 항복이 포켓형 연결부의 초기 및 후기 회전강성을 구분하는데 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

핵심용어: 연결부, 시스템 비계, 회전강성, 포켓형, 이선형 모델
