Vol.32, No.4, pp.257-267, August, 2020

Check for updates ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054 DOI http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2020.32.4.257

특수 제작된 블록을 활용한 모듈러 접합부의 구조성능평가

오근영¹ · 김선훈² · 신경재³ · 윤병익⁴ · 이강민^{5*}

¹박사후연구원, 충남대학교, 건축공학과, ²석사과정, 충남대학교, 건축공학과, ³교수, 경북대학교, 건축공학과, ⁴대표, ㈜아이맥스트럭처, ⁵교수, 충남대학교, 건축공학과

Structural Performance Evaluation of Modular Connection Using Specially Fabricated Blocks

Oh, Keunyeong¹, Kim, Sun-Hoon², Shin, Kyung-Jae³, Yoon, Byung-Ick⁴, Lee, Kangmin^{5*}

¹Post-doctoral Researcher, Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea
 ²Master's Course Student, Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea
 ³Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea
 ⁴CEO, AIMAC Structure Co., Ltd., Anyang, 14056, Korea
 ⁵Professor, Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

Abstract - In this study, structural performance of modular was evaluated by using special blocks to improve the constructability of connection between modules. The modular beam-column connection was designed to resist the story shear force of the structure, and structural stability of the modular connection within the design story drift was experimentally examined. As a result, all specimens yielded at 2 % to 3 % story drift ratio, and welding fractures occurred after 4 % story drift ratio, indicating it was structurally safe within the design story drift. However, it is considered that welding details or the shape of the blocks should be improved in order to prevent welding fractures occurring between block and column.

Keywords - Modular connection, Structural performance evaluation, Box-section, Block, Wrench bolt

1.서론

최근 1-2인 가구 및 고령 인구의 증가로 인한 소형 주택수 요의 증가와 건설 현장의 전문 건설인력 부족으로 인한 노 무비 증가로 인하여 모듈러 주택에 대한 사회적 관심이 높 아지고 있다. 모듈러 주택은 엄격한 품질 관리를 통해 제작 된 단위 유닛 모듈이 공장에서 제작되기 때문에 현장 시공 을 최소화하여 공기를 단축할 수 있는 장점이 있다^[1]. 이러 한 장점으로 인하여 최근에는 중·고층 모듈러 건축물에 대 한 관심이 높아지고 있어, 많은 연구자들은 중·고층 모듈러 건축물에 적용 가능한 다양한 접합 상세들을 제시하고 있다.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction *Corresponding author.

Tel. +82-42-821-5625 Fax. +82-42-823-9467 E-mail. leekm@cnu.ac.kr Lacey et al.^[2]은 많은 연구자들에 의해 제시된 모듈 유닛 간 접합부의 형식을 수평 접합(horizontal connection, HC) 과 수직 접합(vertical connection, VC)으로 구분하였다. 모 듈 유닛 간 수평 접합의 경우에는 강재 판재(plate)를 모듈 유닛에 접합하여 모듈 간 접합 시 용접 또는 볼트로 체결하 는 방식이 주를 이루고 있다. 수직 접합의 경우에는 모듈 기 둥 양 끝단에 기초판(base plate)과 같은 판재를 용접하여 모 듈 유닛이 적층이 되었을 때, 플레이트를 통하여 용접 혹은 볼트 접합하는 방법이 있다. 그러나 모듈 유닛 간 접합을 위 하여 수평 접합 또는 수직 접합만 수행할 경우에는 다양한 평면을 제시하기 어렵고, 중·고층 모듈러 건축물을 구축하 기에 구조적인 한계점이 있다.

모듈러 건축물의 평면의 자유성을 보장하면서 중·고층 모듈러 건축물 실현을 위하여 많은 연구자들은 수직 접합과 수평 접합이 모두 가능한 접합 상세를 제시하고 있다. Lee *et al.*^[3]은 각형강관 기둥과 ㄷ형강 보가 사용되었으며, Fig. 1 에서와 같이 각형강관 기둥에 수직 접합을 위한 액세스 홀 (access hole)을 천공하여 볼트 체결하는 방법을 제시하였

Note.-Discussion open until February 28, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 16, 2020; revised July 28, 2020; approved on July 30, 2020.

다. 상하 모듈 유닛 사이에 연결 플레이트(connecting plate) 를 사용하여 수평 접합 또한 가능하도록 설계하였다. Lee et al.^[3]은 액세스 홀에 의한 단위 모듈의 보-기둥 접합부의 강성 및 강도를 실험적으로 평가하였으며, 그 결과 철골모 멘트골조의 반강접 접합부로 평가하였다.



Fig. 1. Connection details proposed by Lee et al.^[3]

Chen et al.^[4]은 모듈 유닛이 적층될 때 발생하는 내부 접 합(inner connection)을 위하여 특수 제작된 블록에 각형강 관기둥을 삽입하고 상부 유닛의 바닥보(floor beam)와 하부 유닛의 상부보(ceiling beam)을 볼트로 체결하여 모듈 유닛 이 수평 및 수직접합이 모두 가능하도록 Fig. 2와 같이 설계 하였다. 각형강관을 사용하여 모듈러 보-기둥 접합부를 제 작하여 실험연구를 수행하였으나, 각형강관의 국부좌굴과 용접부 파괴가 발생하였으며, 접합부의 강성을 높이기 위하 여 설치된 스티프너로 인하여 기둥 부재가 파괴되었다.



Fig. 2. Connection details proposed by Chen et al.^[4]

Jang et al.^[5]은 기존 모듈러 건축물에 주로 사용되었던 각 형강관과 ㄷ형강의 재료적 단점을 보완하기 위하여 H형강 을 사용하여 기둥과 보를 구성하고, 수평과 수직 연결을 위 하여 브라켓 개념을 도입하여 실험연구를 수행하였다. 브라 켓 형상이 H형강인 경우에는 모듈 유닛 간 연결을 위하여 웨 브를 천공하였지만, 이로 인하여 보-기둥 접합부에 내력 저 하가 발생하였다. 문제점을 보완하기 위하여 브라켓 형상을 ㄱ형강을 대체하였고, 그 결과 H형 브라켓에 비하여 원만한 이력거동을 보여주었으며, 보-기둥 접합부의 성능은 중간 모멘트골조(IMRF)의 수준으로 나타남을 보고하였다.

그러나 이러한 접합 상세들은 구조적인 성능은 충족시킬 수는 있지만, 공장에서 마감재 부착이 어렵거나, 혹은 현장 에서 모듈 유닛 간 접합 시 마감재 일부를 절취해야 하는 상 황이 발생되기 때문에 오히려 모듈러 건축물의 장점이 저감 되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 공장에서 마감재까지 제작된 모듈 러 유닛이 현장에서 모듈 유닛 간 접합을 위한 마감재 절취를 최소화하기 위하여 각형강관 보와 기둥을 사용하였고, 모듈 유닛의 수직 접합을 위하여 특수 제작된 블록을 사용하였고, 수평접합을 위하여 연결 플레이트를 사용하였다. 모듈러 유 닛 간 발생되는 접합부의 형태에 따라 실물 규모로 제작하여 모듈러 접합부의 구조성능을 실험적으로 평가하고자 한다.

2. 실험연구 계획

2.1 실험체 개요 및 설계 계획

2.1.1 블록 형상 및 설계

본 연구에서는 모듈러 유닛이 공장에서 제작될 때, 내외 부 마감재 또는 내화재가 구조부재와의 접합을 용이하게 하 기 위하여 각형강관을 주요 구조부재로 사용하였다. 마찬가 지로 모듈 유닛 간의 접합을 위한 블록은 개량형 박스형의 형태으로 설계하였다. 또한, 모듈 간 접합을 위하여 일부 단 면을 절취하는 개방형 단면이 아니라 폐쇄형 단면으로 설계 하였다. 그 이유는 모듈 접합을 위하여 액세스 홀이 존재할 경우, 마감재 및 내화재의 부착이 곤란한 경우가 발생할 수 있으며, 액세스 홀로 인하여 결로 등과 같은 현상으로 주요 구조부재의 결함이 발생될 것을 고려하였다.

특수 제작된 블록을 활용한 모듈 유닛 간 수직 접합을 위 하여 상부 유닛 실내에서 렌치 볼트(wrench bolt)를 특수 제

작된 블록에 삽입하면, 하부 유닛 블록에 특수 제작된 케이 스 안의 너트에 체결되는 방안을 고안하였다. Lee et al.^[3] 의 접합을 위해서 작업자가 모듈러 건축물 외부에서 모듈 유닛을 체결해야 하지만, 본 연구에서 특수 제작된 블록을 활용하면 작업자가 실내에서 모듈 유닛을 체결하기 때문에 중·고층 모듈러 건축물을 적층 시 작업자의 위험 요소를 최 대한 줄이고자 하였다. 그리고 렌치 볼트가 블록에 체결된 이후에는 돌출 부분이 없도록 설계하였다.

또한, 기둥과 보가 교차되는 블록의 단면 치수를 결정할 때에는 식 (1)과 같이 블록을 패널존으로 가정하여 보의 전 단강도(M_{pb}/d_b)보다 더 크도록 설계하였고, 실험연구 수행 시 블록(패널존)에서 과도한 전단변형이 발생되지 않도록 하였다(Table 2 참조). 특수 제작된 블록의 형상 및 체결 개 념도를 Fig. 3에 나타내었다.

$$R_{\nu}/(M_{pb}/d_b) > 1.0 \tag{1a}$$

$$R_{v} = 0.60 F_{yc} d_{c} t_{w} \left[1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^{2}}{d_{c} d_{b} t_{w}} \right]$$
(1b)

$$M_{pb} = F_{yb} Z_b \tag{1c}$$



(a) Geometric notation for modules connection



(b) Nut case

Fig. 3. Concept of modular connection using blocks

2.1.2 모듈러 건축물 평면 계획 및 부재 설계

본 연구에서 모듈러 보-기둥 접합부의 구조성능을 평가 하기 위하여 대상 평면도를 Fig. 4와 같이 가정하였다. 1개 층에는 6개의 세대와 코어로 구성하였으며, 모듈러 건축물 의 높이는 7층(층고 3 m)으로 가정하였다. Fig. 4에서와 같 이, 1개 층에서 세대의 형식은 총 3가지 유형으로 구분하였 고, 이중에서 맨우측세대 모듈(Room Type 3)이 가장 크게 설정되어, 우측 세대를 대상으로 모듈러 접합부 구조성능 평가 계획을 수립하였다. 접합부의 유형은 모듈러 건축물 최외각부(①)와, 모듈 유닛 간 접합 시 발생되는 y방향 접합 (②), 그리고 x방향 접합(③)으로, 총 3가지의 접합부의 형태 로 구분할 수 있었다. 접합부의 형태에 따른 실험체 일람표 를 Table 1에 정리하였다.

대상 모듈러 건축물의 횡력저항시스템은 코어 부분의 철 근콘크리트 전단벽으로 설정하여 전단벽 구조시스템이다. 따라서, 철골 모듈러 골조는 허용층간변위 내에서 구조적 안전성을 평가하였다. 구조해석 결과, 모듈러 골조의 허용층 간변위는 약 1.5 %로 나타났다. 구조해석을 바탕으로 산출 된부재의 크기는 기둥부재 □-250×150×12, 바닥보 □-250× 150×9, 지붕보 □-150×100×6을 사용하였고, 바닥보와 지붕 보의 처짐을 제어하고자 샛기둥(□-100×100×4)을 사용하 였으며, 강재는 모두 SRT355 강종을 사용하였다. Table 2에 는 모든 실험체의 부재별 강도를 산출하여 상호 비교를 통 해 보가 기둥보다 먼저 항복될 것으로 예상하였다.



Fig. 4. Structure plan

Name [*]	Column size	Beam size	Shape of specimen	No. of members**	No. of bolts	
ES_2 (1)			Т	C(2), FB(1), CB(1)	2	
ID_4 (2)		Floor beam □-250×150×9 Ceiling beam □-150×100×6	Floor beam \Box -250×150×9	Т	C(4), FB(2), CB(2)	4
ID_8 (2)	□-250×150×12		Т	C(4), FB(2), CB(2)	8	
IS_4 (3)			+	C(4), FB(2), CB(2)	4	
IS_8 (③)			+	C(4), FB(2), CB(2)	8	

Table 1. Matrix of specimens

*AB_2: A = external or internal, B = single or double connection, Number = number of bolts

**C = column, FB = floor beam, CB = ceiling beam

	Beam (SRT355)	Column (SRT355)	Panel zone (SM355)	SC/WB ratio	PZ requirement
Series	$M_{pb} = 1.1 R_y F_{yb} Z_b$	$M_{pc} = F_{yc} Z_c$	$R_v = 0.60 F_{yc} d_c t_w \left[1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_c d_b t_w} \right]$	$\sum M_{pc}$ / $\sum M_{pb}$	$R_v / (M_{pb} / d_b)$
ES	222.35 kN·m (177.29 kN·m)	389.08 kN∙m (458.04 kN∙m)	1,683.77 kN (2,188.90 kN)	1.75 (2.58)	1.89 (3.09)
ID	444.70 kN·m (354.58 kN·m)	778.16 kN·m (916.08 kN·m)	3,367.53 kN (4,377.79 kN)	1.75 (2.58)	1.89 (3.09)
IS	444.70 kN·m (354.58 kN·m)	778.16 kN·m (916.08 kN·m)	1,683.77 kN (2,188.90 kN)	1.75 (2.58)	0.95 (1.54)

Table 2. Strength of beam, column, and panel zone of all specimens

The values in parentheses were calculated using the measured yield strengths reported in Table 3.

2.1.3 모듈러 접합부 설계

본 연구에서 모듈러 건축물의 모듈 유닛 간의 접합은 Fig. 3(a)에서와 같이 렌치 볼트를 사용하여 접합하였다. 렌 치볼트의 소요 개수를 산정하기 위하여 렌치 볼트는 밑면 전단력을 수직 분포시킨 층별 횡하중에 저항하는 것으로 가 정하였다. 밑면전단력은 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)^[6]에 따라 식 (2)와 같이 결정하였다.

$$F_x = C_{vx} \times V \tag{2a}$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$$
(2b)

이때, x층에서의 층전단력은 식 (3)에 의하여 결정하였 으며, 이때 격막(diaphragm)은 강한 격막인 것으로 가정하 였다.

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \tag{3}$$

렌치 볼트는 F10T급 M24볼트를 사용하였으며, 렌치 볼 트가 블록에 체결되었을 때, 마찰접합인 것으로 가정하였 고, 작업자의 시공성을 고려하여 볼트의 구멍은 대형구멍 (지름 30 mm)인 것으로 설정하였다. 렌치 볼트에 의한 설계 미끄럼강도는 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00)^[7]에 따라 산출하였으며, 수평 연결되는 렌치 볼트는 인장과 전 단의 조합력을 받는 마찰 전단접합으로 볼트 미끄럼강도에 끼움재 감소계수를 곱하여 접합부 수평 전단력에 저항하도 록 설계하였다.

$$\phi R_n = \phi u h_f T_0 N_s \tag{4a}$$

$$\phi R_n \times$$
끼움재 감소계수 × $k_s > V$ (4b)

여기서, 끼움재 감소계수: 1 – 0.0154(t_{filler} – 6)이다.

렌치 볼트의 소요 개수는 단위 모듈 1개의 절점 당 2개(x 방향 1개, v방향 1개)가 필요한 것으로 산출되었다. 따라서 ES 실험체의 경우에는 렌치볼트 2개, ID 실험체와 IS 실험 체는 4개가 필요하다. 그러나 강구조설계기준[8]에 의하면 접합부에는 존재응력이 낮더라도 고장력볼트의 경우 2개











(b) ID_4





(c) ID_8







(e) IS_8

Fig. 5. Details of specimens

이상 설치하도록 권고하고 있다. 따라서, 강구조 설계기준 에 따라 ID 실험체와 IS 실험체의 경우에는 단위 모듈 각 절 점당 소요 볼트를 2개씩 증가하여 ID_8과 IS_8 실험체를 추가적으로 제작하여 볼트 개수에 따른 구조성능을 평가하 고자 한다.

블록과 접합되는 보와 기둥은 그루브용접을 실시하였다. 블록에 접합되는 보와 기둥은 박스형 단면으로 백업바를 설 치할 수 없는 점을 고려하여 부분용입용접을 수행하였다. 이때 유효목 두께는 건축물 강구조 설계기준^[7]에서 제시하 고 있는 부분용입용접의 최소 유효목두께보다 1 mm - 2 mm 더 크게 용접하였다. 위와 같은 설계방법에 따라 총 5개의 모 둘러 접합부 실험체를 제작하였으며, 접합부 상세는 Fig. 5 에 나타내었다.

2.2 가력 및 계측 계획

특수 제작된 블록을 활용한 모듈러 보-기둥 접합부의 구 조성능을 평가하기 위하여 Fig. 6와 같이 현행 건축물 강구 조 설계기준(KDS 41 31 00)^[7]의 재하이력에 준하여 가력하 였으며, 0.05 mm/sec의 속도로 변위제어를 통해 가력이 이 루어졌다. Fig. 7에서와 같이 T자형 실험체의 경우, 기둥의 양단이 회전단으로 설치하였고, +자형 실험체는 기둥은 회 전단, 보는 이동단의 형태로 설치하였다.



각 실험체의 변형율 및 항복상태, 소성화 여부 등을 판단 하기 위하여 기둥과 보, 그리고 블록에 스트레인 게이지를 부착하였고, 실험체의 회전각 및 슬립 등을 측정하기 위하 여 LVDT를 설치하였다. 그리고 실험체의 항복상태, 소성 화 등을 육안으로 살펴보기 위하여 실험체에 석회칠을 하였 고, 실험체의 면외 좌굴을 방지하기 위하여 가이드 프레임 을 설치하였다.



(a) ES series and ID series



(b) IS series **Fig. 7.** Test set-up

2.3 재료시험 결과

각형강관 지붕보(CB), 바닥보(FB), 기둥(C) 및 블록(B) 의 재료적 특성을 파악하고자 각 3개씩 인장시편(5호)을 제 작하고 KS B 0802^[9]에 따라 강재의 인장강도를 평가하였 다. 인장시험 결과, 각형강관으로 이루어진 지붕보, 바닥보 그리고 기둥은 KS D 3568^[10]에서 제시된 SRT355 강재의 기계적 특성보다 상회하였고, SM355 강재로 제작된 블록 의 시편은 KS D 3515^[11]에서 제시된 기계적 성질을 만족하 는 것으로 나타났다.

Division	E (GPa)	Fy (MPa)	F _u (MPa)	Elongation (%)
6T (CB)	203.43	460.06	551.53	30.97
9T (FB)	196.21	421.75	570.59	34.82
12T (C)	179.34	379.33	555.07	36.85
KS D 3568	-	355 or more	500 or more	23 or more
15T (B)	184.30	368.35	541.16	33.18
KS D 3515	-	355 or more	490 - 630	17 or more

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험체 거동

본 연구에서는 각형강관 및 특수 제작된 블록을 활용한 모듈러 보-기둥 접합부의 구조성능을 평가하였다. Fig. 8에 각 실험체의 거동에 따른 변형 모습을 나타내었고, Table 4 에 실험결과를 정리하였다.

ES_2 실험체는 모듈러 건축물 최외각부에 형성되는 모 듈러 접합부로서, 상하부 모듈을 접합하기 위하여 렌치 볼 트 2개(x방향 1개, y방향 1개)가 사용되었다. 이 실험체의 경 우 층간변위 4 %까지 반복가력되었으며, 실험체의 설치 상 황을 고려하여 반복가력 이후에는 층간변위 6 %까지 단조 가력이 수행되었다. ES_2 실험체는 층간변위 3 %까지 실험 체의 거동에 특이사항은 없었다. 층간변위 4 %에서 상부 모 듈 유닛 바닥보 블록 부근에서 미세한 초기변형이 발생되었 다. 층간변위 5 %에서 상부 모듈 유닛 블록과 기둥 사이에서 용접부에서 파단이 발생되었다. 또한, 층간변위 6 %에서는 볼트 구멍 부근과 하부 모듈 블록에서 항복선이 관찰되었다.

ID_4 실험체와 ID_8 실험체는 모듈 유닛간 접합시 발생 하는 접합부 실험체로서 2개의 절점이 결합되고 ES 실험체 를 이중으로 접합한 형태와 같다. ID_4 실험체는 2개의 절 점이 결합되기 때문에 렌치 볼트 4개가 소요된 실험체로서 ES_4 실험체와 유사하게 층간변위 3 %까지 특이사항은 발 견되지 않았으며, 층간변위 4 %에서 상부 모듈 블록에서 초 기변형이 발생하고, 5 %에서 상부 모듈 블록과 기둥 사이의 용접부가 파괴되었다. ID_8 실험체는 강구조설계기준^[8]에 따라 볼트의 개수를 2배 증가시킨 실험체로서 ID_4 실험체 와 거의 유사한 거동을 보여주다가 층간변위 4 % 부방향 가 력시 상부 모듈 블록과 기둥 사이의 용접부에서 파괴되었다.

IS 실험체는 모듈 유닛 간 접합 시 +자 형태를 갖는 실험 체로서 IS_4 실험체는 층간변위 4 %에서 상부 모듈 블록에 서 초기 변형이 발견되었다. 층간변위 6 %에서 상부 모듈 블 록과 기둥 사이의 용접부에서 파괴가 발생되었다. IS_8 실 험체는 층간변위 4 %에서 상부 모듈 블록에 초기변형이 관 찰되었으며, 2번째 사이클 정방향 가력시 상부 모듈 블록과 우측 기둥 사이의 용접부 균열이 발생되었으며, 층간변위 5 %에서는 좌측 기둥에서도 용접부 균열이 발생되었다. 모 든 실험체에서는 Fig. 8에서와 같이 상부 유닛 블록과 기둥 사이에서 용접부 파단이 발생하였으며, 이는 부분용입용접 으로 인하여 용접량 부족으로 발생된 것으로 판단된다.



(a) ES_4 specimen (@ 5 % story drift ratio)



(c) ID_8 specimen (@ 4 % story drift ratio)



(b) ID_4 specimen (@ 5 % story drift ratio)



(d) IS_4 specimen (@ 6 % story drift ratio)



(e) IS_8 specimen (@ 5 % story drift ratio)

Fig. 8. Experimental photos of specimens

Specimen	k_i (kN/mm) [*]	Positive (+)			Negative (-)				
		$P_y (\mathrm{kN})^{**}$	$\delta_y \left(\mathrm{mm}\right)^{**}$	$P_{\rm max}$ (kN)	δ_{\max} (mm)	P_{y} (kN)	δ_y (mm)	$P_{\rm max}$ (kN)	δ_{\max} (mm)
ES_2	0.41	54.13	130.85	60.79	196.36	-35.61	-80.65	-48.11	-160.80
ID_4	0.78	91.94	119.25	108.59	216.78	-92.99	-108.00	-105.90	-172.16
ID_8	0.88	111.07	112.05	121.03	171.86	-100.51	-106.60	-108.79	-172.05
IS_4	1.20	63.26	48.24	74.28	74.98	-70.97	-56.55	-77.73	-75.00
IS_8	1.56	62.70	35.76	73.02	74.96	-80.36	-53.94	-93.18	-75.01

Table 4. Test results of specimens

^{*} The initial stiffness(k_i) was obtained through the first cycle of 0.375 % story drift ratio.

** Yield point was defined as equivalent energy method.

3.2 모멘트-회전각 관계

Fig. 9은각 실험체의 하중-변위 관계 곡선을 모멘트-층간 변위 곡선으로 변환하였다. 이때 기둥 외주면에서 측정된 모멘트는 바닥보의 소성모멘트로 정규화하였다.

모든 실험체는 층간변위 2 % - 3 %에서 항복이 발생하였 고, 층간변위 4 % - 6 %에서 상부 모듈 블록과 기둥에서 용 접부가 파괴되었다. 본 연구에서 대상이 되는 모듈러 건축 물의 허용층간변위는 1.5 %로, 모든 실험체는 허용층간변 위 내에서 접합부 또는 부재 항복이나 용접부 파괴 등 없이 안전한 것으로 나타났으며, 본 연구에서 목표한 모듈러 보-기둥 접합부의 구조 안전성 측면에서 소기의 목적을 달성한 것으로 나타났다.

모듈러 접합부는 본 연구의 최종목표인 구조적 성능은 만 족하였지만, 추가적으로 모듈러 접합부의 내진성능을 평가 하였다. 건축물 강구조 설계기준 (KDS 41 31 00)^[7]에서 특 수모멘트골조는 기둥 외주면에서 접합부의 계측 휨강도는 4% 층간변위에서 적어도 보 소성모멘트의 80% 이상이 유



Fig. 9. Normalized moment versus story drift ratio curves

지되도록 규정하고 있다. 모든 실험체의 이력거동만을 검토 하였을 때, 특수모멘트골조의 요구사항을 만족시키는 것으 로 나타났다. 비록 본 연구에서 수행된 실험체가 특수모멘 트골조의 요구사항과 강기둥-약보 조건 등은 만족하였지만, 바닥보가 내진콤팩트 단면이 아닌 점, 부분용입용접을 수행 한 점, 일부 실험체에서 층간변위 4%에서 용접부 파괴가 된 점, 항복 이후 비탄성거동이 3% 이내인 점(소성회전각 1% 내외) 등을 고려하였을 때, 특수모멘트골조의 요구사항을 완벽히 만족하였다고는 볼 수 없다. 따라서, 본 연구에서 수 행한 특수 제작된 블록을 활용한 모듈러 보-기둥 접합부는 중간모멘트골조(IMF)의 성능을 보인 것으로 판단된다.

3.3 접합부 강성 분류

모듈러 보-기둥 접합부는 모듈 유닛 간 접합으로 인하여 보와 기둥이 중첩되기 때문에 접합 상세에 따라 다른 방식 의 하중 전달 메커니즘을 가지므로 구조해석을 위한 모듈러 보-기둥 접합부에 대한 접합부 분류가 필요하다. 보-기둥 접 합부에 대한 분류는 Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-8^[12]과 AISC Seismic Provisions^[13]에 제시되어 있으며, Eurocode 3에서의 접합부 분류 기준이 AISC에 비하여 보수 적 평가하고 있기에, 본 연구에서는 모듈러 보-기둥 접합부 분류를 Eurocode 3에 따라 분류하였다. Eurocode 3에서는 접합부의 강성(stiffness)과 강도(strength)를 식 (5)와 식 (6) 에 따라 분류하고 있으며, Fig. 9에 본 연구에서 수행된 모듈 러 보-기둥 접합부를 분류하였다.

• 강성에 의한 분류 기준

$k_s > 25EI/L$	\rightarrow Rigid	(5a)
$0.5EI / L < k_s < 25 E$	$I/L \rightarrow \text{Semi-rigid}$	(5b)
$k_s < 0.5 EI/L$	\rightarrow Pinned	(5c)

• 강도에 의한 분류 기준

$M / M_p > 1.0$	\rightarrow Fully strength	(6a)
$0.25 < M / M_p < 1.0$	\rightarrow Partially strength	(6b)
$M / M_p < 0.25$	\rightarrow Simple	(6c)

무차원화된 모멘트-회전각 관계 곡선을 Eurocode 3에 의 하여 분류한 결과, 모든 실험체는 반강접(semi-rigid) 접합 부로 분류되었다. 따라서, 본 연구에서 수행된 모듈러 보-기 둥 접합부 구조해석 수행 시에는 회전에 대해 일정 정도의 유연성과 구속력을 갖도록 고려해야 한다.



Fig. 10. Classification of modular connection

3.4 변형도 분포

Fig. 11은 바닥보와 천장보에 부착하였던 스트레인 게이 지의 변형도를 층간변위 0.005 rad., 0.01 rad., 0.02 rad., 0.04 rad.의 첫 번째 사이클에서 측정된 값을 나타내었다. Fig. 11에서는 IS 시리즈 실험체의 스트레인 게이지의 값은 스트레인 게이지의 파손으로 인하여 나타내지 못하였다.

스트레인 게이지로 측정된 변형도 분포를 살펴보면, 바 닥보와 천장보는 단면이 중립축이 1개가 발생하는 완전합 성 거동이 아닌, 중립축이 2개가 발생하는 불완전합성 거동 하는 분포를 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 모 듈러 접합부를 활용한 구조해석 수행 시에는 바닥보와 천장 보는 개별적인 부재로 모델링을 수행하여야 한다.

3.5 모듈러 접합부 구조성능 검토

본 연구에서는 모듈 유닛 간 수직 및 수평접합이 모두 가 능하고 유닛 적층 시, 시공성을 높이고자 특수 제작된 블록 을 활용한 모듈러 보-기둥 접합부의 구조성능을 평가하였 다. Fig. 12에서는 각 실험체의 이력거동을 포락곡선으로 변 환하여 함께 나타내었다. 모든 실험체는 층간변위 2%-3% 에서 항복이 발생하였으며, 층간변위 4% 이후에서 상부 모 듈 블록과 기둥에서 용접부 파단이 발생하였다. 본 연구에 서는 모듈러 보-기둥 접합부가 허용층간변위(1.5%) 내에서 구조적 안전성을 확보하는 것이 최종목표이기에, 허용층간 변위 내에서 골조 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

또한, 강구조설계기준^[8]에서 권장하고 있는 각 방향별 고 장력볼트 2개씩 체결한 실험체들(ID_8, IS_8)은 1개씩 체결



Fig. 11. Strain distribution of floor and ceiling beam

한 실험체들(IS_4, IS_4)과 비교하였을 때, 구조적으로 큰 차이를 보여주지 못하였다. 모듈러 건축물의 장점인 시공성 을 향상시키기 위해서는 본 연구에서 수행한 특수 제작된 블록을 활용하여 각 방향별 렌치 볼트 1개씩(절점당 2개) 체 결하여도 구조적으로 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서 수행된 모듈러 접합부는 바닥보 소 성모멘트에 비하여 큰 내력을 보유하고 있는 것으로 나타 났지만, 층간변위4%이후에서 발생하는 용접부 파괴는 대 상 모듈러 건축물에 큰 힘의 횡력이 작용할 경우, 골조의 취 성적 파단 잠재성을 가지고 있다. 따라서, 상부 모듈 블록과 기둥 접합시 부분용입용접(partial joint penetration)이 아닌 완전용입용접(complete joint penetration)을 수행할 수 있는 용접상세 개선 또는 블록의 형상이 개선되어야 될 것으로 판단된다.





4. 결 론

본 연구에서는 모듈러 건축물의 시공성을 향상시키고자 특수 제작된 블록과 렌치볼트를 활용한 모듈러 보-기둥 접 합부의 구조성능평가를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 도 출하였다.

- (1) 특수 제작된 블록과 렌치볼트를 통해 접합되는 모듈 러보-기둥 접합부는 층간변위 2%-3%에서 항복이 발생하였으며, 층간변위 4% 이후에서 용접부가 파 괴되어, 본 연구의 최종목표인 허용층간변위(1.5%) 내에서 골조 안전성을 보이는 것으로 나타났다.
- (2) 모듈러 보-기둥 접합부는 반강접(semi-rigid)인 접합 부로 분류되었고, 상하부 모듈 유닛의 보는 불완전 합성인 형태로 보여주었기 때문에 구조해석 시 바닥 보와 천장보는 별도로 모델링하여야 한다.
- (3) 모듈러 건축물에 예상보다 큰 횡력이 발생할 때, 상 부 모듈의 블록과 기둥에서 발생되는 용접부 파괴는 잠재적인 건축물 붕괴로 이어질 수 있기 때문에 용접 접합 상세 개선 또는 블록의 형상을 개선하는 방안이 필요하며, 이에 대한 추가적인 검증연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구 재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1B07048211)

참고문헌(References)

- Cho, B.-H., Kim, H.-J., and Ko, G.-H. (2007) The State of Art in the Modular Construction in Korea, *Magazine* of the Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.19, No.1, pp.112-119 (in Korean).
- [2] Lacey, W.A., 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.
- [3] Lee, S.S., Park, K.S., Hong, S.Y., and Bae, K.W. (2015) Behavior of C-Shaped Beam to Square Hollow Section Column Connection in Modular Frame, *Journal* of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol. 27, No.5, pp.471-481 (in Korean).
- [4] Chen, Z., Liu, J., and Yu, Y. (2017) Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.147, pp.625-638.
- [5] Jang, D., Oh, K., Kang, C., and Lee, K. (2019) Seismic Performance Evaluation of H-Shape Beam-to-Column Connection in Modular System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.5, pp. 339-347 (in Korean).
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) Seismic Design Standard for Buildings (KDS 41 17 00: 2019), Korea (in Korean).
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) Steel Structures Design Standard (KDS 41 31 00: 2019), Korea (in Korean).
- [8] KSSC (2016) *Steel Structure Design for New Korean Standard*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [9] Korean Agency for Technology and Standards (2018) Method of Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0802: 2018), Korea (in Korean).
- [10] Korean Agency for Technology and Standards (2018) Carbon Steel Square Pipes for General Structural Purposes (KS D 3568: 2018), Korea (in Korean).
- [11] Korean Agency for Technology and Standards (2018)

Rolled Steels for Welded Structures (KS D 3515: 2018), Korea (in Korean).

- [12] European Committee for Standardization (2005)
 Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints (EN 1993-1-8: 2005), Belgium.
- [13] American Institute of Steel Construction (2010) Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-10), USA.

기 호(Notation)

: 수직분포계수 C_{vx} Ε : 탄성계수(N/mm²) : i층 바닥에 작용하는 지진력(kN) F_i F_{x} : 층별횡하중(kN) F_{v} : 항복강도(N/mm²) : 보의 항복강도(N/mm²) F_{vb} : 기둥의 항복강도(N/mm²) F_{vc} : 인장강도(N/mm²) F_{μ} : 보의 단면2차모멘트(mm⁴) Ι : 보의 길이(mm) L : 기둥 외주면에서 측정된 휨모멘트(kN·m) М : 소성모멘트(kN·m) M_p : 보의 전소성모멘트(kN·m) M_{pb}

: 인장력을 받는 볼트의 수 N_h N_s : 전단면의 수 R_n : 미끄럼강도(kN) :패널존 전단강도(kN) R_v : 설계볼트장력(kN) T_0 : 소요인장력(kN) T_u : 밑면전단력(kN) V: x층에서의 층전단력(kN) V_x : 보의 소성단면계수(mm³) Z_b : 기둥 플랜지의 폭(mm) b_{cf} : 보의 춤(mm) d_b : 기둥의 춤(mm) d_c : 밑면으로부터 i 또는 x층까지의 높이(m) h_i, h_x : 필러계수 h_{f} : 건축물 주기에 따른 분포계수(식(2)) k : 접합부의 강성(kN/mm) (식 (5)) k $:= 1 - T_u/T_0 N_b$ k. : 층수 п : 기둥 플랜지의 두께(mm) t_{cf} : 끼움재의 두께(mm) t_{filler} :패널존의 두께(mm) tw : *i* 또는 *x*층 바닥에서의 중량 w_i, w_x : 미끄럮계수 и : 강도감소계수(= 0.85, 대형구멍) ф

요 약: 본 연구에서는 모듈러 간 유닛 접합의 시공성을 높이고자 특수 제작된 블록을 활용하여 모듈러 접합부의 구조성능을 평가하 였다. 모듈러 시스템의 횡력저항시스템은 코어 부분의 철근콘크리트 전단벽으로, 철골 모듈러 접합부는 구조물의 층전단력에 저항하 도록 설계하였다. 따라서, 허용층간변위 내에서 모듈러 접합부의 구조적 안정성을 실험적으로 검토하였다. 실험결과 모든 실험체는 층 간변위 2%-3%에서 항복하였으며, 층간변위 4% 이후에서 용접부 파단이 발생하여, 허용층간변위 내에서 구조적으로 안전한 것으로 나타났다. 그러나, 상부 유닛 블록과 기둥 사이에서 발생하는 용접파단을 방지하기 위하여 용접상세 또는 블록의 형상이 개선되어야 될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 모듈러 접합부, 구조성능평가, 박스 형강, 블록, 렌치볼트