

스트랩 브레이스를 갖는 내력벽식 모듈러건축 스틸스터드 벽체의 반복하중에 대한 거동 연구

이두용¹ · 조봉호^{2*} · 김태형³ · 하태휴⁴

¹석박사통합과정, 아주대학교, 건축학과, ²교수, 아주대학교, 건축학과,

³연구원, EPC팀, 센엔지니어링그룹, ⁴책임연구원, 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹, 포스코

Experimental Study on the Cyclic Behavior of Modular Building with Strap Braced Load Bearing Steel Stud Walls

Lee, Doo Yong¹, Cho, Bong Ho^{2*}, Kim, Tae Hyeong³, Ha, Tae Hyu⁴

¹Ph.D candidate, Department of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

²Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

³Research Engineer, EPC Team, SEN Engineering Group, Seoul, 07226, Korea

⁴Principal Researcher, Steel Solution Team, POSCO, Incheon, 21985, Korea

Abstract - Load-bearing steel stud wall system is widely used for the middle-to-high rise modular buildings worldwide. Seismic performance is a key issue to apply load-bearing steel stud wall system to modular buildings in Korea. This study proposes a new strap braced steel stud wall system with enhanced seismic performance and design equations considering the flexural behaviour of the vertical outer studs. For the verification, two specimens with different strap braces and vertical outer stud were designed and tested. The test results showed that the total strengths were evaluated to be 1.11 to 1.18 times higher than the predicted values. Usually strap braced walls are considered to have low energy dissipation capacities. The proposed system showed enhanced seismic performance with equivalent damping of 9.42% due to the reduced pinching effects.

Keywords - Modular building, Load-bearing wall system, Strap brace, Seismic design, Energy dissipation

1. 서론

공장에서 제작된 3차원 모듈러 유닛을 현장에서 조립하여 건축물을 완성하는 모듈러 공법은 유럽, 일본, 미국 등에서 이미 널리 사용되고 있는 건축 공법이다^[1]. 최근 국내에서도 주택, 군 숙소, 학교, 임시주거시설 등 공기단축 및 재사용이 용이한 건축 수요가 증가하고 있으며, 특히 비즈니스 호텔, 오피스텔, 대학 기숙사 등을 위한 중고층형 모듈러 건축의

필요성도 커지고 있다. 단위 모듈러 유닛의 구조 유형은 크게 보-기둥 프레임 방식 모듈과 이용한 내력벽 방식 모듈로 구분된다. Fig. 1은 RIST에서 개발한 두 가지 유형의 모듈러 유닛의 예를 나타낸다. 프레임 방식 모듈은 고층으로 갈수록 기둥의 크기가 커져 평면구성에 불리하고, 뿔침을 이용한 습식내화로 공장제작 및 현장시공에 번거로움이 있는 반면에

Note.-Discussion open until June 30, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 31, 2016; revised October 12, 2016; approved on October 12, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-031-219-3572 Fax. +82-031-219-2945

E-mail. bhcho@ajou.ac.kr



(a) Framed module (b) Load-bearing walled module

Fig. 1. Structural types of modular units (by RIST)

내력벽 방식 모듈은 넓은 면적의 내력벽이 연직 하중을 분담하여 벽체 두께가 비교적 작고 건식내화공법을 적용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 이유로 유럽에선 중고층 건축물에 내력벽 방식 모듈이 널리 사용되고 있다^[2]. 한국의 경우 모듈러 건축 시장이 유럽에 비해 활성화되어 있지 않고, 내력벽 모듈에 대한 경험도 부족하여 대부분의 프로젝트에 내력벽 방식 모듈 대신 프레임 방식 모듈이 주로 사용되고 있다.

내력벽 방식 모듈을 중고층 건축에 적용하기 위해서는 효과적인 횡력저항 시스템의 적용이 필수적이다. 이를 위한 단위모듈은 중력하중에만 저항하고 지진하중은 별도의 코어 구조 등으로 저항하는 방법이 사용되기도 하나^{[3],[4]}, 이러한 경우에도 단위모듈은 기본적인 횡력저항 성능을 보유해야 한다. 일반적으로 스틸스터드 내력벽 시스템의 횡력저항 시스템으로는 박판의 스트랩 브레이스를 활용한 가새구조가 사용되며 AISI S213^[5] 등에서 정의된 설계식을 적용하고 있다.

스트랩 브레이스를 갖는 내력벽 패널의 내진성능에 대한 연구는 주로 X형 단일 스틸스터드패널을 대상으로 이루어졌다. Serette and Ogunfunmi^[6]는 8mm 두께의 스트랩 브레이스가 포함된 단일 경량패널에 대한 단조가력 실험을 통해 스트랩 브레이스에 작용하는 인장력에 의해 접합부에서 파괴가 발생함을 관찰하였다. Al-Kharat and Rogers^[7]는 스트랩

브레이스를 갖는 2,440×2,440mm 크기의 패널에 대하여 주기 횡하중을 가하였으며, 실험 결과 Fig. 2와 같이 스트랩 브레이스의 인장력으로 인해 스트랩 브레이스를 갖는 스틸스터드패널(이하, 스트랩 스틸스터드패널)의 수직외측스터드(vertical outside stud)에 좌굴이 발생할 수 있으며, 이로 인해 하중저항능력 및 강성이 저하됨을 보였다. Casafont *et al.*^[8]은 스트랩브레이스 접합부에 대하여 순단면적, 스크류 간격 등을 설계 변수로 인장실험을 수행하고, 파괴유형 분석을 통해 순단면 파괴(Net-section Failure)가 가장 이상적인 파괴유형을 밝혔다.

박판의 스트랩 브레이스를 포함한 적용한 스틸스터드 패널의 주기하중에 따른 거동은 에너지 소산능력이 떨어지는 핀칭 현상이 가장 큰 특징이며, 대표적인 유형은 Fig. 3과 같다^[9]. 스트랩 브레이스는 인장항복을 통해 연성 거동을 나타내지만, 주기하중에 대하여 이미 항복한 브레이스로 인해 핀칭현상이 크게 발생하여, 매우 낮은 에너지 소산능력이 관찰된다. Ha *et al.*^{[10],[11]}은 4개의 스틸 스틸스터드패널을 경량철골을 이용한 테두리 골조에 접합하는 방식의 모듈러 건축물용 내력벽식 스틸스터드패널을 제안하였으며, 주기하중에 대한 내진성능을 평가하고 설계식을 제안하였다. Mirzaei *et al.*^[12]은 AISI S213에서 정의한 스트랩 스틸스터드패널의 설계식이 스트랩 브레이스의 공칭강도만 고려하는 것에 문제를 제기하였고, 성능기반 설계를 통한 스트랩 스틸스터드패널의 강성 예측식을 제안하였다.

Fig. 4는 일반적으로 사용되는 스트랩 스틸스터드패널의 거동 예측 모델이다. 모든 접합부가 핀접합으로 가정되어 스트랩 브레이스의 인장 항복에 의해서만 횡력저항이 이루어진다고 가정한다. 하지만 선행연구를 살펴보면 Fig. 2와 같이 스트랩 브레이스에 작용하는 인장력에 의해 수직외측스터드에 압축력 및 휨모멘트가 발생하게 되며, 이는 수직외측스터드



Fig. 2. Cold-formed strap-braced stud deformation and flexural failure of chord studs (M. Al-Kharat, C.A. Rogers, 2006)

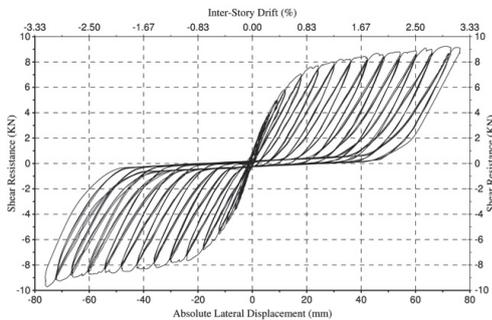


Fig. 3. Load-displacement curve of light-gauge cold-formed steel strap-braced stud (Moghimi and Ronagh, 2009)

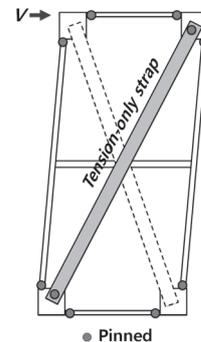


Fig. 4. Pinned connection points of load bearing steel stud wall with strap brace

에 의한 프레임거동이 내력벽식 스틸스터드 패널의 횡력저항 성능에 영향을 준다는 반증이 된다.

본 연구는 구조실험을 통하여 스트랩 브레이스를 갖는 내력벽식 스틸스터드 패널의 횡력저항 성능에 대한 수직 외측스터드의 구조적 역할을 규명하였다. 이를 위해 Ha *et al.*^{[10],[11]}이 제안한 내력벽식 스틸스터드 벽체와 동일한 테두리 골조를 갖고, 스트랩 브레이스의 각도, 수직외측스터드의 규격 등을 달리하는 2개의 시험체에 대한 구조실험을 수행하여 강도, 항복변위, 탄성강성 등을 예측할 수 있는 설계식을 제안하였고 주기하중에 대한 실험결과와 비교를 통하여 설계식을 검증하였다.

2. 내력벽 패널의 횡력저항 성능 산정

2.1 스트랩 브레이스를 갖는 스틸스터드패널의 횡력저항

냉간성형강으로 구성된 벽체에 대한 횡력저항 성능 설계에는 일반적으로 AISI-213^[5]의 방법이 사용된다. AISI-213에서는 Fig. 4와 같이 스트랩 스틸스터드패널에서의 횡력저항은 스트랩 브레이스에만 의존한다는 가정 하에 단일 스트랩 스틸스터드패널의 공칭강도 $V_{strap,i}$ 는 식 (1)과 같다.

$$V_{strap,i} = P_{strap} \cos \theta \quad (1)$$

여기서, P_{strap} = 스트랩 브레이스의 공칭강도, θ = 스트랩 브레이스의 수평축에 대한 경사각이다.

Fig. 4에 표현한 스트랩 스틸스터드패널의 힘의 평형조건으로 인해 스트랩 브레이스의 공칭강도 P_{strap} 와 수직외측스터드에 요구되는 공칭강도 P_{stud} 는 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$P_{strap} = F_{y,strap} A_{g,strap} \quad (2)$$

$$P_{stud} = P_{strap} \sin \theta \quad (3)$$

여기서, $F_{y,strap}$ = 스트랩 브레이스의 공칭 항복하중, $A_{g,strap}$ = 스트랩 브레이스의 단면적이다.

2.2 모듈러 건축물용 스틸스터드패널의 횡력저항성능 향상

스티드패널을 모듈러 건축물에 적용하기 위해 Ha *et*

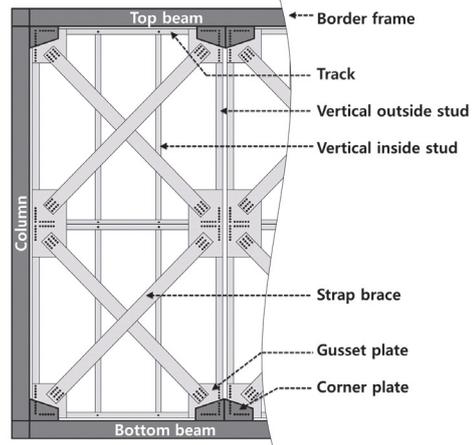


Fig. 5. Framed stud wall with multiple strap brace: configurations and details

al.^{[10],[11]}은 테두리 골조를 이용한 3차원 유닛에 사진 제작된 규격품 형태의 스틸스터드 패널을 스크류볼트를 이용해 접합하는 방식을 제안하였다.

본 연구에서는 기존 내력벽식 모듈의 횡력저항 성능 향상을 위하여 Fig. 5와 같은 다중 스트랩 브레이스를 갖는 내력벽식 모듈러 시스템을 제안한다. Fig. 5의 내력벽식 패널은 기존 시스템 대비 스트랩 브레이스의 경사각을 낮출 수 있고, 거셋플레이트와 패널에 접합된 수직 외측스터드가 모멘트 저항을 통해 횡력저항성능의 향상을 기대할 수 있다. 특히 기존 시스템 대비 수직외측스터드의 유효높이가 절반 이하로 낮아졌기 때문에, 수직외측스터드의 모멘트저항에 의한 횡력저항 성능 향상을 기대할 수 있다.

2.3 스틸스터드 벽체의 횡력저항성능 및 유효 강성 제안

다수의 스트랩 스틸스터드패널을 갖는 내력벽식 모듈러 시스템에 대한 공칭강도 V_n 은 스트랩 브레이스뿐만 아니라 수직 외측스터드에 의해 결정되며, 공칭강도 V_n 은 식 (4)와 같다. 단일 스트랩 스틸스터드패널의 소성 메커니즘으로 인한 스트랩 스틸스터드패널에서의 수직외측스터드의 휨모멘트로 인해 발생하는 항복을 고려한 강도 $V_{panel,i}$ 은 식 (5)와 같다.

$$V_n = V_{strap,n} + V_{panel,n} = n(V_{strap,i} + V_{panel,i}) \quad (4)$$

$$V_{panel,i} = 4M_{n,stud} / h_{stud} \quad (5)$$

여기서, n = 내력벽식 스틸스터드 벽체에 포함된 스트랩 스

터드패널의 개수, $V_{strap,n} = n$ 개의 스트랩 스틸스터드패널을 갖는 모듈러 시스템의 스트랩 브레이스에 의한 공칭강도, $V_{panel,n} = n$ 개의 스트랩 스틸스터드패널을 갖는 모듈러 시스템의 수직외측스터드의 휨모멘트로 인해 발생하는 항복을 고려한 강도, $M_{n,stud}$ =수직외측스터드의 공칭휨강도, h_{stud} =수직외측스터드의 유효높이이다.

수직재(패널의 수직외측스터드 및 테두리골조의 기둥)에 작용하는 휨모멘트를 정의하기 위한 탄성해석모델에 따라^[12], 각 거동의 강성을 평가하기 위해 트러스 거동 및 프레임 거동으로 구분하였다. n 개의 스트랩 스틸스터드패널을 갖는 내력벽식 모듈러 시스템의 트러스 거동에 의한 탄성강성 $k_{strap,n}$ 및 변위 $\Delta_{strap,n}$ 는 식 (6), 식 (7)과 같고, 프레임거동에 의한 탄성강성 $k_{panel,n}$ 및 변위 $\Delta_{panel,n}$ 는 식 (8), 식 (9)와 같다.

$$k_{strap,n} = n \left[\frac{h_{stud}^3}{b_{panel}^2 EA_{stud}} + \frac{(h_{stud}^2 + b_{panel}^2)^{1.5}}{b_{panel}^2 EA_{strap}} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\Delta_{strap,n} = V_{strap,n} (k_{strap,n})^{-1} \quad (7)$$

$$k_{panel,n} = n \left[\frac{\frac{6I_{hor} + 4b_{panel}}{I_{stud}} + \frac{4b_{panel}}{h_{stud}}}{\frac{6I_{hor} + b_{panel}}{I_{stud}} + \frac{b_{panel}}{h_{stud}}} \times \frac{h_{stud}^3}{24EI_{stud}} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\Delta_{panel,n} = V_{panel,n} (k_{panel,n})^{-1} \quad (9)$$

여기서 b_{panel} =스트랩 스틸스터드패널의 폭, A_{stud} =수직외측스터드의 단면적, A_{strap} =스트랩 브레이스의 단면적, E =탄성계수, I_{hor} =내력벽식 스틸스터드 벽체의 수평부재 단면이차모멘트, I_{stud} =스트랩 스틸스터드패널의 수직외측스터드의 단면이차모멘트이다.

Fig. 6과 같이 이 시스템의 공칭 탄성강성 k_{en} 및 항복강도 V_{yn} 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$k_{en} = k_{strap,n} + k_{panel,n} = V_{yn} / \Delta_{strap,n} \quad (10)$$

$$V_{yn} = V_{strap,n} + V_{panel,n} \frac{\Delta_{strap,n}}{\Delta_{panel,n}} \quad (11)$$

식 (4)~(11) 과정을 거치면, 가새골조를 갖는 내력벽식 스

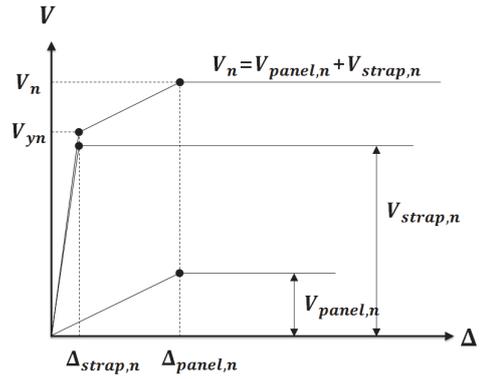


Fig. 6. Plastic mechanism of load bearing steel stud wall with strap brace

틸스터드 벽체의 Fig. 6과 같은 하중-변위곡선을 나타내어 거동을 예측할 수 있다. 하지만 식 (4)~(11)은 수직외측스터드에 요구되는 조합력을 수용할 수 있는 단면성능을 지녀야 하기 때문에 이를 검토해야 할 필요가 있으며, AISI S100^[13]에 따른 검토식 (12)는 다음과 같다.

$$\frac{\overline{P}_r}{P_{no}} + \frac{\overline{M}_{ry}}{M_{ny}} = \frac{F_y A_{g, sb} \sin \theta}{P_{n, stud}} + \frac{M_{base}}{M_{n, stud}} \leq 1.0 \quad (12)$$

여기서, \overline{P}_r =요구되는 압축력, \overline{M}_{ry} =요구되는 휨모멘트, P_{no} =압축력에 대한 수직부재의 공칭강도, $P_{n, stud}$ =수직외측스터드의 공칭압축강도, M_{base} =수직외측스터드의 끝단에 작용하는 모멘트, M_{ny} =휨모멘트에 대한 수직부재의 공칭강도이다.

수직외측스터드의 끝단에 작용하는 모멘트 M_{base} 는 식 (13)와 같다.

$$M_{base} = \frac{V_{panel,n} h_{panel}}{2} \left[\frac{\frac{3I_{hor} h_{panel}}{I_{stud} b_{panel}} + 1}{\frac{6I_{hor} h_{panel}}{I_{stud} b_{panel}} + 1} \right] \quad (13)$$

3. 실험 계획 및 방법

3.1 시험체 구성

2장에서 서술한 바와 같이 스트랩 스틸스터드패널의 횡력저항은 트러스거동과 프레임거동으로 나뉜다. 그중 프레임거동

은 수직외측스터드의 단면 및 유효높이에 의해 지배되며, 이의 검증을 위해 2개의 실험체 MSB-SS(Multiple strap braces - strong stud section), SB-WS(Strap brace - weak stud section)를 설계하였다. MSB-SS 시험체는 단위패널에 스트랩 브레이스를 상하부에 설치하여 경사각을 낮추고, 각형강관의 수직외측스터드 유효높이를 절반 이하로 줄여 프레임거동의 강도분담을 높인 시험체이다. SB-WS는 수직외측스터드의 단면을 C형강으로 적용하여 단면성능을 의도적으로 줄였으며, 유효높이는 MSB-SS에 비해 2배로

적용하였다. 반면에 스트랩 브레이스의 폭과 강도는 키워서 의도적으로 프레임거동을 줄이고 스트랩브레이스에 의해 전체 거동이 지배되도록 설계하였다.

Fig. 7~8는 MSB-SS와 SB-WS 시험체의 상세를 나타낸다. 두 개의 시험체 모두 모듈러 유닛 구성을 위한 테두리골조를 적용하였으며, 테두리골조에 4개의 스트랩 스테어드패널이 4.5mm의 연결강판(Connector plate, CP)과 스크류볼트를 통해 접합된다. 테두리골조의 좌·우 중심거리와 상·하 중심높이는 각각 5,713mm, 3,000mm이고, 기둥과 보는

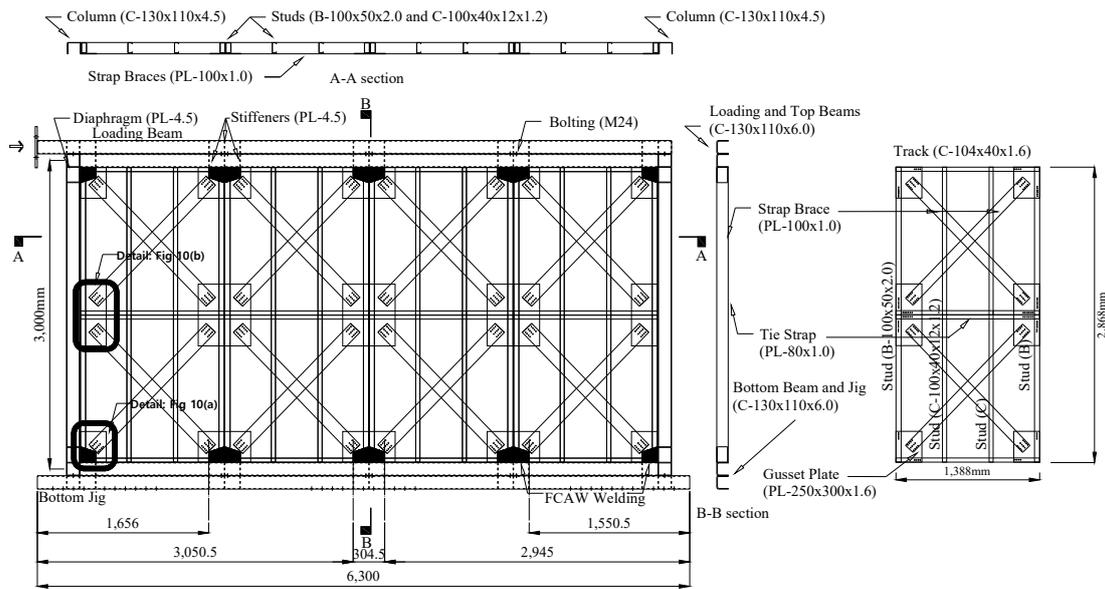


Fig. 7. Configurations and details of specimen MSB-SS (mm)

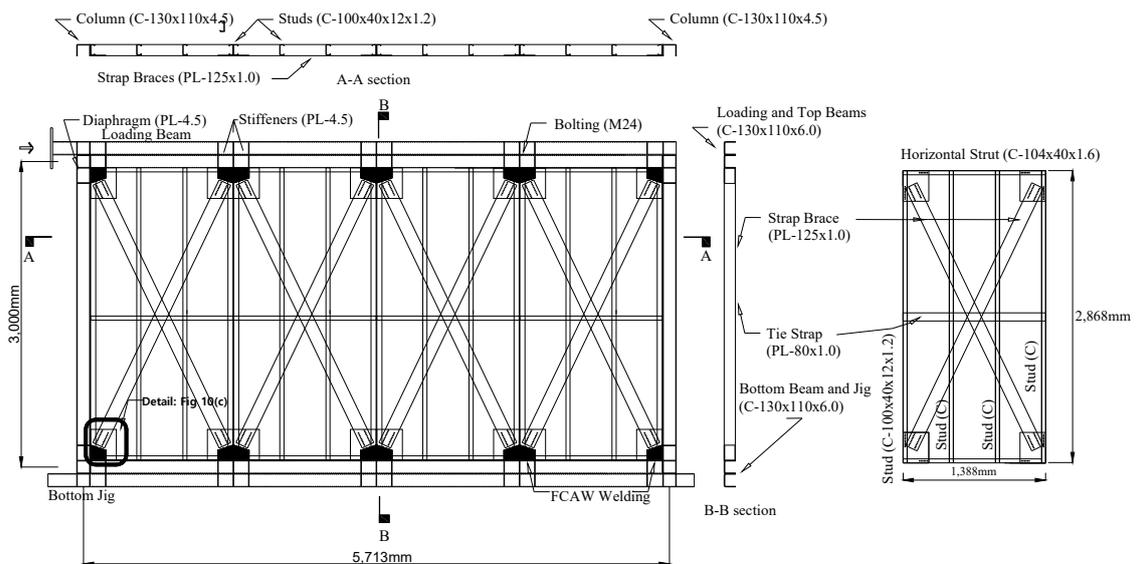


Fig. 8. Configurations and details of specimen SB-WS (mm)

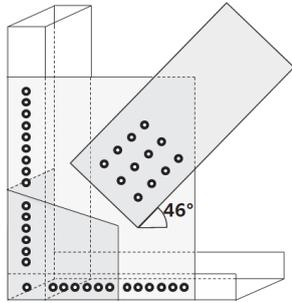
각각 C-130×110×4.5 와 C-130×110×6 경량 형강이 사용되었다. 테두리골조는 다수의 스트랩 스티드패널을 고정하며, 보-기둥 접합부는 일반적인 핀접합으로 하여 횡력 저항 성능은 거의 없도록 설계하였다. 실험체에 반복하중을 가하기 위해 가력보 및 바닥지그에는 C-130×110×6을 사용

하였으며, 각각 8개의 M24 볼트로 테두리골조의 상·하보에 단순고정 하였다. 테두리골조 접합된 스트랩 스티드패널의 높이와 폭은 각각 2,868mm, 1,388mm이고, 상·하의 트랙(Track)은 C-104×40×1.6을 사용하였다.

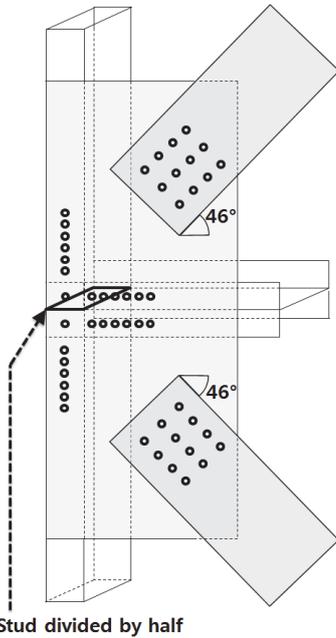
Fig. 9은 스트랩 브레이스와 수직외측스터드 및 테두리골조와의 접합 상세를 나타낸다. 접합은 모두 스크류 볼트를 이용하였으며, 스트랩 브레이스의 항복강도보다 접합부의 강도가 크도록 설계하였다.

Table 1은 각 실험체에 사용된 스트랩 브레이스 및 수직외측스터드의 사양을 보여준다. MSB-SS 실험체의 좌우의 수직외측스터드는 실험체의 프레임 거동을 크게 하기 위해 Box-100×50×2.0 단면을 갖는 경량형강이 사용되었고, Fig. 9(b)과 같이 스트랩 스티드패널의 중간 높이에서 단면을 자르고 2개의 트랙을 두어 독립적인 거동을 하게 하였다. Table 1 및 Fig. 8와 같이 SB-WS 실험체는 프레임 거동을 작게 하기 위하여 C-104×40×12×1.2 단면을 갖는 수직외측스터드를 사용하였다. 또한 SB-WS 실험체에서 수직외측스터드의 면내방향 횡지지를 위하여 중간 높이에 PL-80×1.0 (너비 80mm, 두께 1.0mm의 강판)의 타이 스트랩을 설치하였다. MSB-SS 실험체가 SB-WS 실험체보다 24% 더 많은 강재량이 사용되었다.

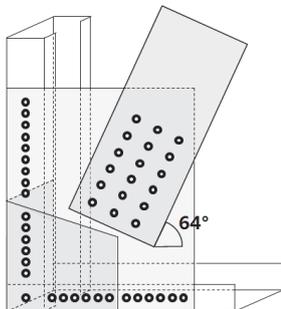
스트랩 스티드패널을 갖는 모듈유닛에 횡력이 작용하게 되면, 우선적으로 횡강성이 가장 높은 스트랩 브레이스에 인장이 작용하게 되고, 스티드패널 각 모서리에서 스크류볼트 접합을 통하여 거셋플레이트로 전달된 후에 테두리골조와 용접 접합된 연결강판을 통하여 테두리골조의 상·하 보로 전달된다. Table 2는 실험에 사용된 강판 및 경량형강의 항복강도 및 인장강도를 나타낸다.



(a) Left-lower connection of MSB-SS specimen's panel



(b) Left middle connection of MSB-SS specimen's panel



(c) Left-lower connection of SB-WS specimen's panel

Fig. 9. Configurations and details of specimen's panel

Table 1. Details and differences of the specimens

| Specimen | Strap brace | θ | l_{sb} (mm) | vertical outside stud of panel |
|----------|-------------|----------|---------------|--------------------------------|
| MSB-SS | 100×1.0t | 46° | 1,963 | B-100×50×2.0 |
| SB-WS | 125×1.0t | 64° | 3,154 | C-104×40×12×1.2 |

Table 2. Yield and Ultimate Strengths of Steel

| Specimen | | MSB-SS | SB-WS |
|---------------------------------|---------------|---------|---------|
| Yield /ultimate strengths (MPa) | Strap brace | 181/297 | 351/458 |
| | Exterior Stud | 303/380 | 238/321 |
| | Column | 271/356 | 282/359 |
| | Beam | 276/361 | 281/361 |

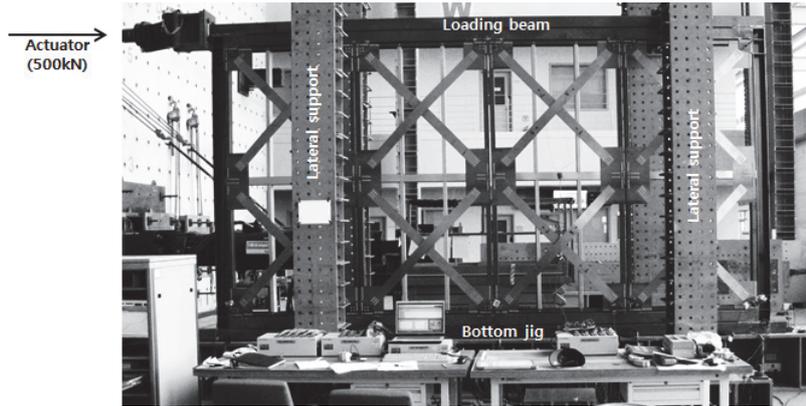


Fig. 10. Test set-up

3.2 실험방법 및 측정

Fig. 10은 실험체의 가력을 위한 실험체 세팅 사진을 보여 준다. 최대 스트로크 $\pm 190\text{mm}$ 를 갖는 500kN 액츄에이터를 가력보에 연결하여 횡하중을 반복가력하였고, 바닥 지그는 바닥 고정 패널에 연결하였다. 액츄에이터의 면외방향 변위를 막기 위하여 가력보의 1/4, 3/4 지점에서 횡지지하였다. 반복하중은 AISC 341(AISC 2005)^[14]의 가력 프로토콜에 따라 액츄에이터의 정·부 방향 횡변위 $\pm 12\text{mm}$, $\pm 16\text{mm}$, $\pm 24\text{mm}$, $\pm 32\text{mm}$ 에서 각각 5회 반복가력하였고, 이후 $\pm 48\text{mm}$, $\pm 64\text{mm}$, $\pm 96\text{mm}$, $\pm 128\text{mm}$, $\pm 160\text{mm}$, $\pm 180\text{mm}$ 횡변위에서 각각 3회 반복가력하였다. 주기실험 동안 일축 소성변형률계이지를 통해 변형률을 계측하였다. 또한 하중-변위 관계의 보정을 위하여 실험체의 바닥지그에 LVDT를 설치하여 미끄러짐을 계측하였고, 시험체의 전단 변형을 확인하기 위해 대각의 변위를 측정하였다.

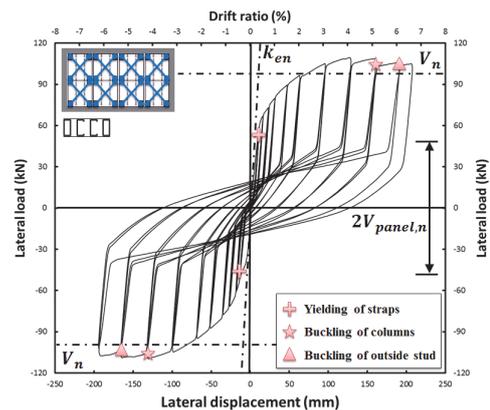
4. 실험 결과

4.1 시험체의 거동과 파괴 양상

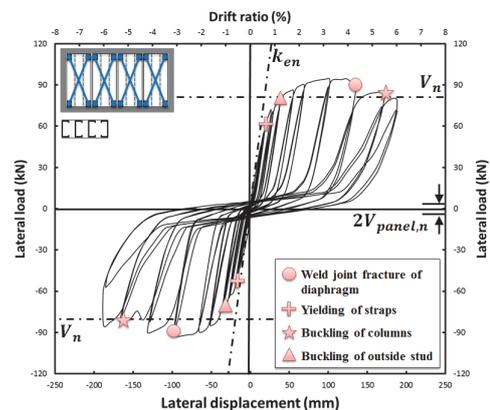
Fig. 11는 실험체 MSB-SS, SB-WS의 하중-변위 관계와 식 (4)~(11)의 이론값에 따른 공칭강도 및 유효강성을 나타낸다. Fig. 12~13는 각 실험체의 주요 파괴양상을 나타낸다.

Fig. 11(a)와 Fig.12은 MSB-SS 실험체의 하중-변위 곡선과 주요 파괴양상을 보여준다. 가력 시작 직후에 횡강성이 가장 높은 스트랩브레이스는 인장력을 받아 긴장이 시작되어 횡변위 12mm ($\delta=0.38\%$)에서 항복에 도달하였다. 이후 횡변위 128mm ($\delta=4.00\%$)에 최대강도에 도달한 이후 최대

스트로크 도달까지 강도가 최대강도 대비 5% 감소하였으나 안정적인 거동을 보였다. 횡변위 160mm ($\delta=5.00\%$)에서 기동의 국부좌굴이 관찰되었으며, 횡변위 180mm ($\delta=5.63\%$)에서 수직외측스터드에 패널의 수직외측스터드에서 좌굴이



(a) MSB-SS



(b) SB-WS

Fig. 11. Lateral load-displacement relationship and of specimens

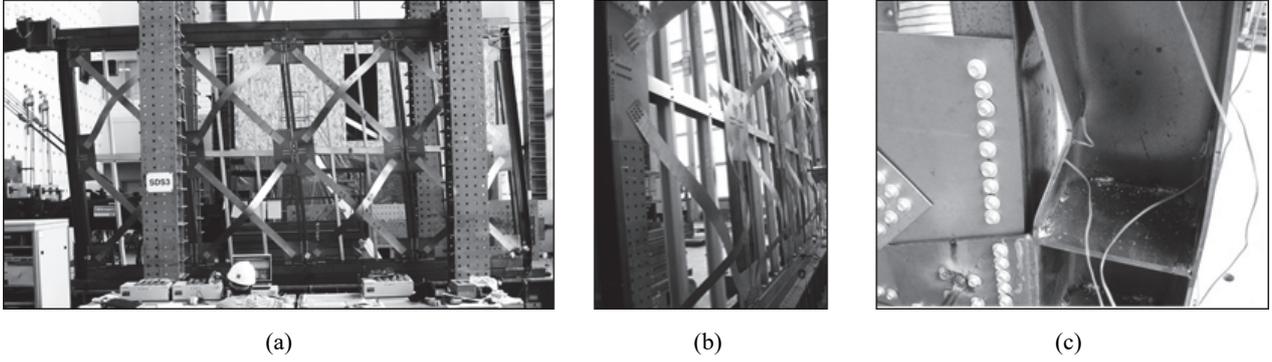


Fig. 12. Failure aspects of MSB-SS specimen; (a) Specimen deformation at drift -6.48% (b) Strap braces extended by tension force (c) Local buckling in the column and vertical outside stud when test ended

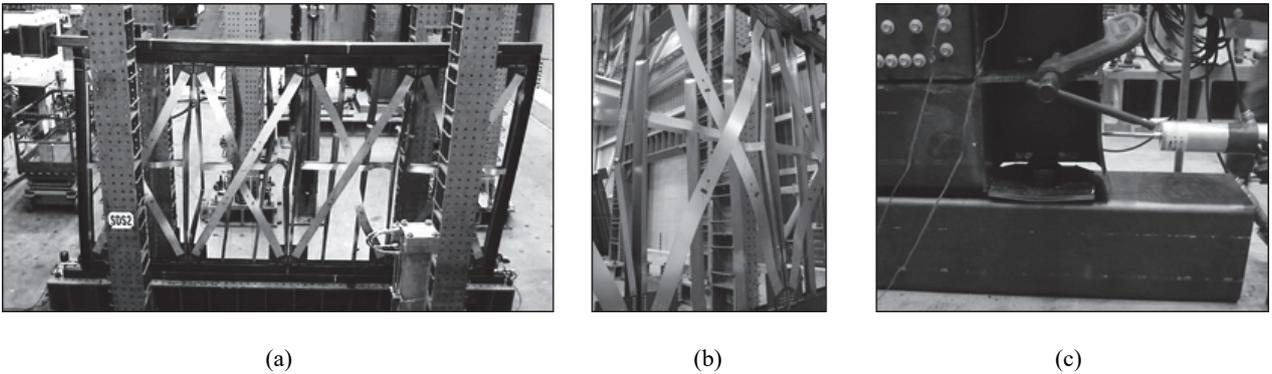


Fig. 13. Failure aspects of SB-WS specimen; (a) Specimen deformation at drift 6.28% (b) Flexural-torsional buckling occurred in the vertical studs at drift 1.00% (c) Fracture of weld joints of diaphragm at drift 3.00%

발생하였다. 이후 액츄에이터 최대 스트로크 제한까지 뚜렷한 강도저하 및 강성저하 없이 안정적인 비탄성 주기거동을 보였고, 실험을 종료하였다. MSB-SS 실험체는 예측한 바와 같이 박판의 스트랩 브레이스의 소성변형에 의한 핀칭 현상이 크게 발생하지 않고, 수직외측스터드의 휨거동에 의한 에너지 소산 거동을 나타내었다.

Fig. 11(b)와 Fig. 13는 SB-WS 실험체의 하중-변위 곡선과 주요 파괴양상을 보여준다. SB-WS 실험체는 스트랩 브레이스가 횡변위 16mm($\delta=0.50\%$)에서 최초 항복하였다. 횡변위 32mm($\delta=1.00\%$)에서 수직외측스터드의 좌굴발생이 관찰되었고 이후 휨 비틀림 좌굴 형태의 파괴양상을 보였다. 횡변위 128mm($\delta=4.00\%$)에서 스트랩 브레이스에 작용한 인장력에 대한 테두리골조의 보-기둥 접합부에 수직 인발력이 발생하여 기둥 하단의 용접부에서 다이아프램 파단이 발생하여 하중재하능력이 감소되었다. 수직외측스터드가 압축력을 받지 못해 스트랩 스틸스터드패널이 부담하던 스트랩 브레이스의 인장력이 테두리골조의 기둥으로 전달되었

고, 이로 인해 횡변위 160mm($\delta=5.00\%$)에서 테두리골조의 기둥에 좌굴이 발생하였다. 기둥에 발생한 좌굴로 인해 하중재하능력이 감소하였다. 최대 스트로크 제한인 횡변위 180mm에서 관찰된 하중재하능력은 최대 하중 대비 85% 수준으로 떨어졌고 시험이 종료되었다. SB-WS 시험체는 스트랩 브레이스를 갖는 패널의 전형적인 핀칭 현상을 나타낸다.

모든 실험체에서 설계의 의도와 같이 스트랩 브레이스 항복 이후에도 스크류 볼트 접합부 및 스트랩 브레이스와 스트랩 브레이스-거셋플레이트, 거셋플레이트-연결강판 사이의 스크류 볼트 접합부에는 어떠한 파괴도 발생되지 않았다.

4.2 실험결과 및 예측결과 비교

Table 3은 실험체의 항복강도 V_y (Fig. 6 참조), 항복변위 Δ_y , 항복변위비 δ_y , 최대변위(실험종료 횡변위) Δ_u , 최대변위비 δ_u , 변위연성도 $\mu(=\Delta_u/\Delta_y)$, 탄성강성 k_e 등을 보여준다.

실험체의 항복강도 V_y 는 스트레인게이지를 통해 스트랩

Table 3. Test results and predictions when strap brace yielded

| Specimen | | Test results | | | | | Predictions | | | Comparison | | |
|----------|---|--------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|-------|----------------|-------------------------------------|------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | | V_y kN | $\Delta_y(\delta_y)$ mm(%) | k_e kN/m | $\Delta_u(\delta_u)$ mm(%) | μ | V_{yn} kN | $\Delta_{yn}(\delta_{yp})$ mm(%) | k_{en} kN/m | V_y/V_{yn} | Δ_y/Δ_{yn} | k_u/k_{en} |
| MSB-SS | + | 57.6 | 11.2 (0.37) | 5,085 | 208 (6.93) | 18.51 | 57.7 | 5.3 (0.16) | 10,428 | 1.00 | 2.25 | 0.49 |
| | - | 50.8 | 13.0 (0.43) | 3,920 | 194 (6.48) | 14.98 | | | | 0.88 | 2.61 | 0.38 |
| SB-WS | + | 77.3 | 34.7 (1.16) | 2,228 | 188 (6.28) | 5.42 | 77.8 | 17.1 (0.57) | 4,541 | 0.99 | 2.03 | 0.49 |
| | - | 75.2 | 34.1 (1.14) | 2,203 | 189 (6.29) | 5.54 | | | | 0.97 | 1.99 | 0.49 |

Table 4. Test results, predictions and proposed value

| Specimen | | Test result | Predictions | | | Eq. (12) check at V_n | | | Comparison |
|----------|---|-------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|------|------------|
| | | V_u kN | V_{strap} kN | V_{panel} kN | V_n kN | \overline{P}_r/P_{no} | \overline{M}_{ry}/M_{ny} | Sum | V_u/V_n |
| MSB-SS | + | 109.4 | 50.3 | 47.9 | 98.2 | 0.10 | 0.74 | 0.84 | 1.11 |
| | - | 109.6 | | | | | | | 1.12 |
| SB-WS | + | 94.7 | 76.9 | 3.6 | 80.5 | 1.03 | 0.79 | 1.83 | 1.18 |
| | - | 92.9 | | | | | | | 1.15 |

브레이스에서 항복 발생을 관찰한 변위(Δ_y)에서의 강도이며, 공칭항복강도 V_{yn} 는 Fig. 6 및 식 (4)~(11)에 따라 산정되었다. 실험값과 예측값의 비교 결과 항복강도 V_y 는 예측 항복강도 V_{yn} 의 88~100% 수준으로 예측하였다. SB-WS 실험체에서는 V_y/V_{yn} 값이 0.97~0.99로 매우 정확히 예측하였으나, 초기강성이 상대적으로 높은 MSB-SS 실험체에서는 부방향의 초기강성이 낮게 발견되어 V_y/V_{yn} 값이 0.88로 평가되었다. 탄성강성 k_e 는 공칭탄성강성 k_{en} 의 38~49% 수준으로 평가되었다. 이는 스트랩 브레이스의 설치시 느슨한 상태로 부착되었고, 여러 개의 패널에 설치된 스트랩 브레이스가 동시에 항복하지 않은 이유로 설명된다. 따라서 안전측의 설계를 위해 스트랩스터드패널의 횡강성을 약 50%로 줄여 항복변위를 예측하는 것이 바람직하다^{[10],[11]}.

Table 4는 실험에 의한 최대강도 V_u , 공칭강도 V_n , 각 실험체들의 식 (12)에 따른 검토값 등을 보여준다. V_u/V_n 값에 영향을 주는 요인은 3가지가 있다. 첫째 테두리골조의 프레임 거동으로 인한 초과강도 발생, 둘째 스트랩 브레이스의 경화거동, 셋째 다이아프램 용접부의 파단이다. SB2-WS 실험체와 MSB-SS 실험체의 횡변위 160 mm($\delta=5.00\%$) 이상에서 기둥의 국부좌굴이 관찰되었다. 특히 SB-WS 실험

체의 수직외측스터드는 휨 비틀림 좌굴로 인해 기능을 거의 상실했으나 실험체는 높은 강도를 보여주었는데, 이는 스트랩 브레이스에 의한 인장력이 상부 보를 통해 기둥으로 전달되어 수직외측스터드의 역할을 기둥이 대신하였기 때문이다. 결과적으로, MSB-SS, SB-WS 실험체에서 실험에 의한 최대강도 V_u 는 각각 공칭강도 V_n 의 111~112%, 115~118% 수준으로 평가되었다.

4.3 에너지 소산능력

Fig. 14은 실험체들의 에너지 소산능력을 비교한 그림이다. 이력곡선의 면적인 한주기당 소산에너지 E_D 가 등가점성감쇠에 의한 소산에너지를 나타내는 타원의 면적과 같다고 가정하고, 정적변형에너지 E_{S0} 를 대입하여 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 를 아래 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_{S0}} \tag{14}$$

Fig. 14에서 보는 바와 같이 스트랩 브레이스의 소성화가 충분히 진행되었다고 판단되는 횡변위 32mm($\delta=1.00\%$)까

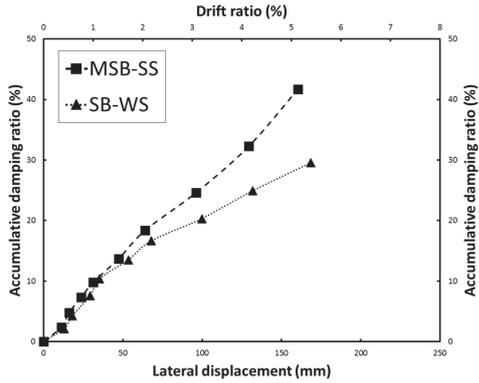


Fig. 14. Energy dissipation per load cycle with varying drift levels

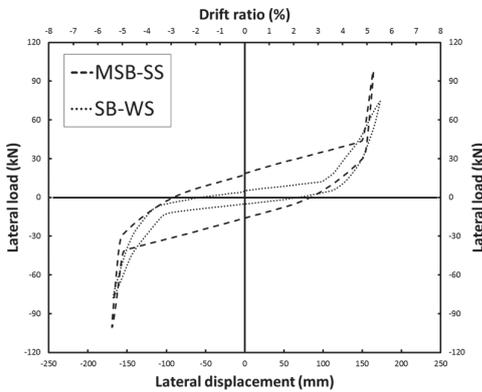


Fig. 15. Lateral load-displacement relationship at 9th cycle ($\delta=6.00\%$)

지 두 실험체의 누적 등가점성감쇠비가 거의 유사하였으나, 이후 프레임거동의 영향을 받아 점차적으로 누적 등가점성감쇠비의 차이가 커짐을 볼 수 있다.

수직외측스터드의 공칭 휨강도가 작은 SB-WS 실험체는 초기에 수직외측스터드에 휨 비틀림 좌굴이 발생함에 따라 내력을 상실하여 에너지소산량이 상대적으로 작게 관찰되었다. 수직외측스터드의 유효높이가 작고 공칭휨강도가 큰 MSB-SS 실험체는 높은 강성으로 인해 작은 변위에서부터 휨모멘트가 수직외측스터드에 가해졌고 안정적인 국부좌굴이 발생함에 따라 에너지 소산에 기여했음을 알 수 있다. 또한 Fig. 11의 하중-변위 관계에서 프레임거동에 의한 강도 $V_{panel,n}$ (식 (4), (5))와 이력곡선의 내부면적 또한 비례한다. 결과적으로, 박판의 스트랩 브레이스는 주기하중에 대하여 핀칭현상으로 인해 에너지 소산능력이 거의 없기 때문에, 각 실험체에서의 잠재적인 최대 에너지 소산량은 수직외측스터드에 의한 프레임거동에 의해 결정된다.

Fig. 15은 사이클 9(횡변위 $\pm 180\text{mm}$, $\delta=6.00\%$)에서의

반복가력의 2번째에서의 하중-변위 관계를 보여준다. 사이클 9에서의 MSB-SS, SB-WS 실험체의 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 는 각각 9.42%, 4.65%로 관찰되었으며, SB-WS 실험체에서는 스트랩 스티드패널에서 전형적으로 나타나는 핀칭현상이 발생하였으나, MSB-SS 실험체에서는 핀칭이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 스티드패널 수직외측스터드의 휨강도와 유효높이 및 스트랩브레이스의 각도 및 강도 등을 달리한 2개의 실험체에 대하여 제안한 설계식을 통해 주기하중에 대한 거동을 예측하였고, 실험을 통해 이를 검증하였다. 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 기존의 설계기준에서는 스트랩 브레이스를 갖는 내력벽식 스티드벽체에 대하여 스트랩 스티드패널의 수직외측스터드의 휨거동은 횡력저항요소로 고려되지 않는다. 하지만, 본 연구에서 제안한 MSB-SS실험체의 경우 수직외측스터드의 유효길이를 줄이고 휨강도를 늘림으로써 전체 시스템의 횡저항능력의 절반 정도를 프레임거동이 분담할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 본 연구에서는 스트랩브레이스를 갖는 모듈러 건축 내력벽식 시스템의 횡력저항성능 및 유효강성을 제안하였다. 스트랩브레이스 뿐만 아니라 수직외측스터드의 특성을 고려할 수 있는 설계식을 제안하고 실험을 통해 검증하였다. 본 연구에서 제안한 설계식을 통해 실험체의 공칭강도, 탄성강성, 항복변위 등을 예측하였고, 실험에 의한 최대강도는 예측식 대비 1.08~1.18배 수준으로 확인되었다.
- (3) 박판의 스트랩 브레이스를 갖는 스트랩 스티드패널은 일반적으로 에너지소산능력이 매우 낮은 것으로 평가되나, 프레임거동에 의한 강도에 비례하게 에너지소산능력이 확보될 수 있음을 보였다. 프레임거동에 의한 강도를 충분히 발현한 이중가새골조를 갖는 MSB-SS 실험체는 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 가 최대 9.42%수준으로 충분한 에너지소산능력이 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원(NRF-2016 R1D1A1 B01010615)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 조봉호, 김홍진, 고광호(2007) 모듈러 건축 시스템의 기술 개발 동향 및 적용 사례, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제19권, 제1호, pp.112-119.
Cho, B.-H., Kim, H.-J., and Ko, K.-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] Lawson, R.M., Ogden, R.G., and Bergin, R. (2012) Application of Modular Construction in High-Rise Buildings, *Journal of Architectural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.18, No.2, pp.148-154.
- [3] 이상섭, 배규웅, 박금성, 홍성엽(2013) 유닛 모듈러 기둥-보 조인트의 구조 성능에 대한 실험적 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.255-265.
Lee, S.S., Bae, K.W., Park, K.S., and Hong, S.Y. (2013) An Experimental Evaluation of Structural Performance for the Beam to Column Joints in Unit Modular System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.255-265 (in Korean).
- [4] 이상섭, 박금성, 홍성엽, 배규웅(2015) 모듈러 골조의 각형 강관 기둥과 C 형강 보 접합부의 거동 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제5호, pp.471-481.
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).
- [5] American Iron and Steel Institute (2007) *North American Standard for Cold-Formed Steel Framing - Lateral Design* (AISI S213-07), USA.
- [6] Serrette, R., and Ogunfunmi, K. (1996) Shear Resistance of Gypsum-Sheathed Light-Gauge Steel Stud Walls, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.122, No.4, pp.383-389.
- [7] Al-Kharat, M., and Rogers, C.A. (2007) Inelastic Performance of Cold-Formed Steel Strap Braced Walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.63, No.4, pp.460-474.
- [8] Casafont, M., Arnedo, A., Roure, F., and Rodríguez-Ferran, A. (2007) Experimental Testing of Joints for Seismic Design of Lightweight Structures, Part 3: Gussets, Corner Joints, X-Braced Frames, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.45, pp.637-659.
- [9] Moghimi, H., and Ronagh, H.R. (2009) Performance of Light-Gauge Cold-Formed Steel Strap-Braced Stud Walls Subjected to Cyclic Loading, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.1, pp.69-83.
- [10] 하태휴, 조봉호, 김태형, 이두용, 엄태성(2013) 내력벽식 스틸스터드패널을 적용한 모듈러건물유닛의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제5호, pp.519-530.
Ha, T.H., Cho, B.-H., Kim, T.H., Lee, D.Y., and Eom, T.S. (2013) Earthquake Resistance of Modular Building Units Using Load-Bearing Steel Stud Panels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.5, pp.519-530 (in Korean).
- [11] Eom, T.-S., Ha, T.-H., Cho, B.-H., and Kim, T.-H. (2014) Cyclic Loading Tests on Framed Stud Walls with Strap Braces and Steel Sheathing, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.141, No. 7, 04014173.
- [12] Mirzaei, A., Sangree, R.H., Velchev, K., Comeau, G., Balh, N., Rogers, C.A., and Schafer, B.W. (2015) Seismic Capacity-Based Design of Narrow Strap-Braced Cold-Formed Steel Walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.115, pp.81-91.
- [13] American Iron and Steel Institute (2012) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISI S100-12), USA.
- [14] American Institute of Steel Construction (2005) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-05), USA.

요약 : 스틸스터드 내력벽 시스템은 국외에서 중고층형 모듈러 건축에 널리 사용되는 구조형식이다. 국내의 중고층형 모듈러 시스템에 스틸스터드 벽체를 적용하기 위해서는 내진성능 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 스트랩브레이스를 갖는 모듈러 건축 스틸스터드 내력벽 시스템의 횡력저항성능 및 유효강성을 제안하였다. 스트랩 브레이스와 수직외측스터드의 사양을 달리하는 2개의 실물 실험체에 대해 주기하중에 대한 실험을 실시하여 제안된 설계식을 검증하였다. 수직외측스터드의 휨거동을 고려할 수 있는 설계식을 통해 실험체의 공칭강도, 탄성강성, 항복변위 등을 예측하고 실험을 통해 검증하였다. 실험에 의한 최대강도는 예측식 대비 1.11~1.18배 수준으로 평가되었다. 박판의 스트랩 브레이스를 갖는 스트랩 스틸스터드패널은 일반적으로 에너지소산능력이 매우 낮은 것으로 평가되나, 본 연구에서 제안한 수직외측스터드의 유효높이를 줄이고 브레이스의 각도를 낮춘 시스템의 경우 등가점성감쇠비가 최대 9.42% 수준으로 충분한 에너지소산능력이 확보될 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 모듈러 건축, 내력벽 구조, 스트랩 브레이스, 내진설계, 에너지 소산