

경계골조 및 접합방법에 따른 3경간 병렬 강판전단벽 내진성능평가

조병현¹·오근영²·장대희¹·이강민^{3*}

¹석사과정, 충남대학교, 건축공학과, ²박사과정, 충남대학교, 건축공학과, ³교수, 충남대학교, 건축공학과

Seismic Performance Evaluation of 3-Bay Coupled Steel Plate Shear Wall on the Boundary Frame and Connection Type

Byeong-Hyeon Jo¹, Keun-Yeong Oh², Dae-Hee Jang¹, Kang-Min Lee^{3*}

^{1,2}Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea ³Professor, Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

Abstract - An experimental study was performed to evaluate seismic performance and to analysis of yielding mechanism and to develop design method of coupled steel plate shear wall (Coupled SPSW) system. It was considered to the length of coupling, beam-column connection, boundary frame-plate connection and aspect ratio as variable. As result, Coupled SPSWs were showed excellent stiffness as well as strength. Also, Coupled SPSWs were redistributed after yielding of plate. And then, boundary frames were showed the plastic deformation after stress redistribution. The difference of seismic performance was shown by aspect ratio and length of coupling. **Keywords -** Coupled Steel Plate Shear Wall, Coupling Beam, Steel Plate, Boundary Frame, Seismic Performance Evaluation

1. 서 론

초고층 건축물은 구조적 관점에서 지진하중, 풍하중 등과 같은 횡하중에 효과적으로 저항해야한다. 전단벽 구조시스템은 우수 한 횡력저항시스템 중 하나로, 횡하중에 대한 전단력을 전단벽체 가 저항하도록 설계되며, 주로 공간이 일정한 면적으로 분할되는 고층구조물에 적용된다. 특히 강판을 전단벽체로 사용하는 강판 전단벽 시스템은 연성과 에너지소산능력이 우수하여 안전성, 사 용성, 시공성 등의 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

초기 강판전단벽은 강판의 전단좌굴을 방지하고자 Fig. 1. (a) 와 같이 두꺼운 강판을 스티프너로 보강한 형태였다^[1]. 하지만 강 판 좌굴 이후 대각방향으로 인장역(Tension-field)이 형성되어

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction **Corresponding author.**

Tel. +82-42-821-5625 Fax. +82-42-823-9467 E-mail. leekm@cnu.ac.kr 후좌굴강도가 발현된다는 이론을 바탕으로 1980년대 실험 및 해 석연구가 활발히 이루어졌다. 이로써 강판 전단좌굴 발생 이후 항 복 메커니즘이 강판 내부 전체에서 인장역으로 진행된다는 것이 실험적·해석적으로 증명되었다⁽²⁾. 이에 따라, 강판이 얇아지고 강판의 전단좌굴 방지를 위한 스티프너 보강이 불필요해졌으며, Fig. 1.(b)와 같은 무보강 강판전단벽 시스템이 현재 강판전단벽 시스템의 주된 시스템으로 자리를 잡았다.



Fig. 1. Typical types of steel plate shear wall system

일반적으로, 강판전단벽 시스템을 실제 구조물에 적용할 경우, Fig. 1.(b)와 같이 구조물 코어(core) 부분에 1경간으로 적용될

Note.-Discussion open until April 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 14, 2018; revised September 18, 2018; approved on September 18, 2018.

수 있으나, 커플링 보를 갖는 병렬 강판전단벽 시스템의 경우, 구 조물 코어 뿐 만 아니라 구조물 외부에도 적용될 수 있다.

최근 국외에서 Borello and Fahnestock(2012)^[3]는 병렬 강 판전단벽의 거동특성을 규명하고자 층 수, 커플링 보 길이 및 단 면을 변수로 커플링 보 회전각과 전단강도에 대한 해석연구를 수 행하였다. 연구를 통해 커플링 보 회전각은 고층구조물일수록 더 큰 영향을 미치고, 커플링 보의 회전각은 0.4~0.6 degree이 가 장 효율적인 범위인 것으로 제안하였다. 강판전단벽은 고층일수 록 전단응력에 의한 인장역이 발생되지 않아 구조물 전체가 휨지 배 항복모드가 발생한다. 이에 대한 방안으로 Li et al.(2011) 연 구자는 두 개의 강판전단벽을 커플링 보로 연결하여 모든 층의 강 판에서 인장역이 발생을 하도록 유도하였고, 이를 실험적으로 검 증하였다^[4]. Aydin and Shekastehband (2017)는 Li et al. (2011)^[4]가 수행한 실험연구를 해석적으로 접근하여 커플링 보 단면 및 길이를 변수로 커플링 보의 전단지배 항복모드, 휨지배 항복모드, 전단 휨지배 복합적 항복모드에 따른 해석연구를 수행 하였다. 해석모델의 커플링 보 단면과 길이가 증가함에 따라 전단 강도와 에너지소산능력이 증가하였고, 커플링 보 단면이 커지거 나 길이가 짧아질 때 강판은 휨지배 항복모드가 나타났다^[5].

기 수행된 병렬 강판전단벽 시스템에 관한 연구는 강판전단벽 사이의 커플링 보가 병렬 강판전단벽 시스템에서의 내진성능 및 강판에서 유발되는 인장역에 관한 연구들로 이루어졌다. 하지만, 병렬 강판전단벽 시스템 내에서 접합방식에 따라 접합부에서 발 현되는 강도 및 강성의 차이가 발생하지만, 보와 커플링 보 사이 의 접합방법, 강판와 경계골조의 접합방법에 따른 내진성능 및 커 플링 보의 구조적인 역할에 관한 연구는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 병렬 강판전단벽 시스템에서 보와 커플링 보 사이 의 접합방법을 전단접합, 모멘트접합 그리고 강판과 경계골조 사 이의 접합을 용접접합, 볼트접합 등으로 구분하여 접합방법에 따 른 병렬 강판전단벽 시스템의 내진성능을 평가하였다. 또한, 강 판전단벽의 형상비, 커플링 보의 길이 등을 변수로 하여 다양한 상황에서 병렬 강판전단벽 시스템을 실제 구조물 적용 시 발생할 수 있는 강판 및 커플링 보의 구조적인 역할 및 항복 메커니즘 등 에 대하여 실험적으로 조사·분석하였다.

2. 실험연구 계획 및 방법

2.1 실험개요

본 연구에서의 병렬 강판전단벽은 보강 강판전단벽으로 설계 된 일본 동경의 Nippon Steel Building을 대상으로 병렬 강판 전단벽 시스템으로 재구성하여 실험체를 설계하였다. Fig. 2.에 Nippon Steel Building의 평면도를 나타냈다. Nippon Steel Building은 X축, Y축 방향 지진하중에 대해 각각 두께 4.5mm 10개, 12mm 5개의 앵글로 보강된 강판이 저항한다. X축, Y축 방향 강판전단벽은 H자 형태로 배치되며 강판과 강판 사이는 커 플링 보로 이어져 있다. 하지만, 커플링 보에 대한 설계 및 역할에 대한 자료는 미비하다.

Nippon Steel Building은 2,750mm×3,700mm 강판을 사용하였고, 강판전단벽을 이어주는 커플링 보의 길이는 5,500mm로, 강판 너비의 2배이다. 본 연구에서는 3경간 프로토 타입 병렬 강판전단벽으로 1/3 축소하여 실험체를 설계 및 제작 하였고, 강판 크기를 900mm×1,150mm로 설계하여 형상비가 0.7인 실험체를 기본 실험체로 정의하였다.



Fig. 2. Floor plan of Nippon Steel Building

2.2 실험체 설계 및 구성

본 연구에서 경계골조의 강종은 SHN400으로 기둥부재는 H-150×150×7×10, 보와 커플링 보 부재는 H-200×100× 5.5×8인 부재를 사용하였고, 강판은 두께가 3mm인 SS400 강 종을 사용하였다. 또한 커플링 보 길이는 Nippon Steel Building의 개구부 너비와 마찬가지로 강판 너비의 2배로 설계 하였다. 그 외 보-기둥 접합부, 경계골조-강판 접합부의 용접방 법및 크기 등에 대한 설계는 현행 기준에 따라 설계하였다^{(6,17),18}.

본실험연구의 주요 변수는 커플링 보 길이, 강판 형상비, 경계 골조-강판 접합방법, 경계골조의 접합방법이다. 기준 실험체는 M-W-7-LONG으로, 보-기둥 접합은 모멘트접합 하였고, 경계 골조-강판 접합은 용접접합 하였다. 강판 형상비는 0.7, 커플링 보 길이는 1,800mm이다. M-W-7-SHORT 실험체의 커플링 보 길이는 900mm로, 기준 실험체 커플링 보 길이의 0.5배이다. S-W-7-LONG 실험체는 보-기둥접합을 전단탭을 이용하여 M20 TS볼트로 전단접합 하였다. 강판전단벽 설계 시 중요 요소 인 스트립앵글각 산정식은 보-기둥 접합방식에 따라 두 가지로 구분된다⁽⁹⁾. 본 실험체를 통해 현재 제안된 스트립앵글각 산정식 과 병렬 강판전단벽 스트립앵글각을 비교 검토하고자 하며, 이후 병렬 강판전단벽 설계법 개발과정에서 병렬 강판전단벽 스트립 앵글각 산정식 개발의 기초자료로 활용하고자 한다. M-B-7-LONG 실험체는 강판을 용접하지 않고 M24 TS볼트를 100mm 간격으로 볼트접합 하였다. 경계골조-강판 접합부를 시공성이 우 수한 볼트접합으로 하였을 때 나타나는 강판전단벽의 거동특성

을 파악하고자 설계하였다. M-W-5-LONG 실험체는 강판 형상 비에 따른 강판전단벽 시스템의 강도, 강성 및 항복모드를 비교하 고자 설계하였으며, 형상비는 0.5, 강판은 575mm×1,150mm 를 사용하였다. 실험체 구성과 각 실험체 상세 도면을 Table 1과 Fig. 3.에서 각각 나타내었다.





Table 1. Matrix of test specimens

| Specimen | Expected Yield Point | | Beam-to-Column | Boundary Frame-to-Plate | Aspect | Length of | |
|-------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|--------|---------------|--|
| - | $\delta_{ey}({\rm mm})$ | $P_{ey}(\mathrm{kN})$ | Connection | Connection | Kallo | Coupling Beam | |
| M-W-7-LONG | 6.32 | 1,284 | Moment Connection | Weld Connection | 0.7 | 1,800 | |
| M-W-7-SHORT | 6.19 | 1,289 | Moment Connection | Weld Connection | 0.7 | 900 | |
| S-W-7-LONG | 5.80 | 1,043 | Shear Connection | Weld Connection | 0.7 | 1,800 | |
| M-B-7-LONG | - | - | Moment Connection | Bolted Connection | 0.7 | 1,800 | |
| M-W-5-LONG | 6.90 | 1,040 | Moment Connection | Weld Connection | 0.5 | 1,800 | |

Note : M, S = Beam-to-Column Connection Type

W, B = Boundary frame-to-Plate Connection Type

7,5 = Aspect ratio

LONG, SHORT = Length of Coupling Beam

2.3 사전 유한요소해석연구

병렬 강판전단벽의 내진성능을 평가하기 위한 가력계획은 ATC-24에 따라 계획하였다^[10]. ATC-24에 의하면, 전단벽 시스 템일 경우, 항복변위에 따라 가력계획을 계획하도록 제안하고 있 다. 따라서 병렬 강판전단벽의 예상 항복변위를 산출하기 위하여 ABAOUS 유한요소해석 프로그램을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 예상 항복점 산출 이전에 해당 모델에 대한 유효성 검증을 위하여 Fig. 4.에 최인락(Choi, 2009^[11]) 연구자가 수행 한 실험 및 해석결과와 비교·분석하였다. 강판전단벽은 강판 항 복이후 과도한 변형이 발생하여 강판이 찢겨 강도가 감소함에 따 라 최대강도가 나타난다. 하지만 유효성 검증모델과 설계모델 해 석 시, 강판 찢김강도는 고려하지 않아 강도 감도현상 없이 수렴 하는 경향이 나타났다. 유효성 검증 결과, 항복하중 및 항복 시점 은 매우 유사하였으며, 최대강도에서는 약간의 오차가 발생하였 지만, 이는 재료강도의 값으로 인한 차이로 판단된다. 이를 바탕 으로 설계된 모델에 대하여 단조가력을 수행하여 Fig. 5.에 나타 내었고, 각 모델에 대한 예상항복점을 산출하였다.



Fig. 4. Comparison of analytical results subjected to static loading



2.4 가력 및 계측 계획

본 실험연구는 Fig. 6.과 같이 용량 2,000kN, 스트로크 ±250mm의 액츄에이터와 연결하여 변위제어 방식으로 가력 하였으며, 가력계획은 ATC-24에 따라 수행되었다. 사전 유한해석 연구결과 실험체의 항복변위는 6mm로 예측되었으며, 이를 기준 으로 $0.5\delta_y$, $0.75\delta_y$, δ_y , $2\delta_y$, $3\delta_y$, $4\delta_y$, $6\delta_y$, $8\delta_y$, $10\delta_y$, $12\delta_y$ 를 목표변위로 계획하였다. $0.5\delta_y \sim 4\delta_y$ 는 3회 반복가력 하였고 $6\delta_y \sim 12\delta_y$ 는 2회 반복가력 하였다. 가력패턴은 Fig. 7.에 나타 내었다.

각 실험체의 면외방향에 대한 변형을 방지하기 위하여 가이드 프레임을 설치하여 액츄에이터와 고정하였다. 강판과 커플링 보 의 전단변형을 측정하기 위하여 강판과 커플링 보 중앙부 웨브에 3축게이지를 부착하였으며, 경계골조의 변형을 측정하기 위하여 기둥의 상 하부 플랜지와 커플링 보 단부와 중앙부 플랜지에 소성 게이지를 부착하였다. 또한 실험체의 횡변위를 측정하기 위하여 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 라인게 이지(Line gauge)를 설치하였으며, 실험체 슬립을 확인하고자 베이스 플레이트에도 LVDT를 설치하였다. 계측기와 게이지 설 치는 Fig. 8.에 나타내었다. 강판의 좌굴 및 전단변형, 부재의 항 복 등을 관찰하기 위하여 화이트워시(White-washed)를 실시하 였다.



Fig. 6. Test set-up



Fig. 7. Loading protocol



Fig. 8. Location of the LVDT and strain gauges

2.5 재료시험 계획 및 결과

인장시편은 동일한 재료에 대해 3개씩 제작하였고, 재료시험 은 「KS B 0801 금속 재료 인장 시험편」^[12]에 준하여 실시하였다. 재료시험을 수행한 결과, 「KS D 3503 일반 구조용 압연 강재」^[13] 와 「KS D 3866 건축 구조용 열간 압연 형강」^[14]의 기준에 만족하 였다. 재료시험결과는 Table 2와 Fig. 9.에 나타냈다.

Table 2. Tensile coupon test results

| Specimen | | Yield Stress(MPa) | Ultimate Stress(MPa) | | |
|------------|--------|----------------------|-------------------------|--|--|
| SS | Design | more than 275 | 410~550 | | |
| | 3T | 304 | 463 | | |
| SHN 400 | Design | 275~395 | 410~520 | | |
| | 5.5T | 359 | 464 | | |
| | 7T | 340 | 453 | | |
| | 8T | 341 | 472 | | |
| | 10T | 311 | 458 | | |



Fig. 9. Stress-strain relationship of coupon test

3. 실험결과 및 분석

3.1 거동특성

본 연구에서는 기준 실험체와 커플링 보 길이, 보-기둥 접합방 식, 경계골조-강판 접합방식, 강판 형상비를 변수로 실험을 수행 하였다. 실험진행 중 목표변위에 이르기 전에 실험체의 경간이 길 고, 높은 강도와 강성으로 가이드프레임에서 과도한 변형이 나타 났다. 이로 인해 초기 실험계획에서 설정한 목표변위까지 가력하 지 못하였고 가이드프레임의 변형이 허용하는 범위까지 가력을 진행하였다.

각 실험체는 인장역에 의해 강판이 항복한 후 하중이 재분배되 었고, 이후 모멘트저항골조와 유사한 소성변형이 진행되었다. Fig 9.는 각 실험체의 변형 모습을 나타내었다.

기준 실험체 M-W-7-LONG은 7cycle (δ_y)에서 강판이 좌굴 되기 시작하여 10cycle ($2\delta_y$)에 강판이 항복되고 영구변형이 발 생하였다. 11cycle ($2\delta_y$)에서 보 플랜지와 웨브, 기둥 하부 웨브 가 항복하였다. 12cycle ($2\delta_y$)에서 커플링 보 플랜지가 항복하였 으며, 13cycle ($3\delta_y$)에서 패널존이 항복하였다. 이후 기존 항복



(a) M-W-7-LONG



(b) M-W-7-SHORT











(e) M-W-5-LONG

Fig. 10. Deformed shapes of specimen during testing

현상이 심화되며 19cycle (6ð_v)에서 기둥 상부 웨브와 기둥 하부 플랜지가 항복하였다. 10ð_v에서 강판과 기둥에서 과도한 변형이 발생하였다.

M-W-7-SHORT은 5cycle (0.75δ_y)에서 강판이 좌굴되기 시작하였으며, 9cycle (δ_y)에서 강판이 항복되어 영구변형이 발 생하였다. 10cycle (2δ_y)에서 보 플랜지와 웨브가 항복하고, 11cycle (2δ_y)에서 기둥 하부 웨브와 커플링 보 플랜지가 항복하 였다. 14cycle (3δ_y)에서 기둥 상부 웨브가 항복하고, 16cycle (4δ_y)에서 기둥과 보의 기존 항복영역이 확대되었으며 패널존이 항복하였다. 커플링 보가 짧아짐에 따라 커플링 보 회전각이 크게 나타났고 기준 실험체에 비해 커플링 보 양 끝단의 플랜지 항복영 역이 광범위하게 나타났다.

S-W-13-LONG은 7 cycle (δ_y)에서 강판이 좌굴되기 시작하 였고 10 cycle (2δ_y)에서 영구변형이 발생하며 항복하였다. 13 cycle (3δ_y)부터는 가력방향에 따라 전단탭과 보 웨브 사이의 슬립현상이 가시적으로 발생하였다. 14 cycle (3δ_y)에서 기둥 상 부 웨브와 하부 플랜지가 항복하고, 6δ_y에서 기존의 항복영역이 확장되었다.

M-B-7-LONG은 7cycle (δ_y)에서 강판 좌굴현상이 나타났 다. 8cycle (δ_y)에서 볼트 슬립 소리가 간헐적으로 작게 들리기 시작하였으며, 10cycle (2δ_y)에서 강판에 영구변형이 발생하며 항복하였고 볼트 슬립 소리의 크기와 빈도가 증가하였다. 13cycle (3δ_y)에서 보 플랜지와 웨브, 패널존이 항복하고, 14cycle (3δ_y)에서 기둥 상부 웨브와 하부 플랜지가 항복하였다. 15cycle (3δ_y)에서 강판과 피쉬플레이트 간의 이격현상이 시작 되었고, 16cycle (4δ_y)에서 기둥 하단 웨브가 항복하였다. 이후 8 δ_y에서 기존의 항복영역과 강판과 피쉬플레이트의 이격현상이 심화되었다.

M-W-5-LONG은 7cycle (δ_y)에서 강판이 좌굴되기 시작하 여 10cycle (2δ_y)에서 강판이 항복하였다. 13cycle (3δ_y)에서 기 등 하부 플랜지와 커플링 보 양 끝단 플랜지가 항복하고, 14cycle (3δ_y)에서 커플링 보의 기존 항복영역이 확장되었다. 17cycle (4 δ_y)에서 기둥 상단 웨브가 항복하여 6δ_y부터는 기둥과 커플링 보 양 끝단을 중심으로 항복영역이 확장되었다.

3.2 하중-변위 곡선

본 실험 중 정가력 시 가이드프레임의 강재 봉이 압축력으로 좌굴 변형되었고 실험이 진행되며 하중이 커질수록 변형 또한 증 가하였다. 부가력 시에는 강재 봉에 인장력이 발생하여 변형 없이 가력을 진행하였다. 이로 인해 부방향에 비해 정방향의 하중이 다 소 작게 나타났으며, 가이드프레임의 변형으로 초기 실험계획에 서 설정한 목표변위까지 가력하지 못하고 가이드프레임의 허용 범위까지 반복가력 후 부방향으로 단조가력 하였다.

Table 3은 각 실험체의 이력거동을 바탕으로 초기강성(k_y), 항복하중(P_y), 항복변위(δ_y), 최대하중(P_{max}), 최대하중 변위 ($\delta_{P_{max}}$)를 나타냈고, Fig. 11.은 각 실험체에 반복가력을 수행한 이력거동과 포락곡선을 나타내었다.

기준 실험체 M-W-7-LONG의 실험결과, 정가력 시 초기강성 은 88.23kN/mm, 최대강도는 6&에서 1070.20kN, 부가력 시 동일 변위에서 -1190.21kN으로 10% 차이가 발생하였다. 최종 적으로 부방향으로 10&까지 단조가력 하였으며, 최대강도는 -1284.42kN으로 나타났다. 탄성영역에서 높은 강성이 나타났고 강판 항복 이후 하중이 재분배되어 경계골조에서 보 양단, 기둥 하부, 커플링 보 양단 순으로 항복이 진행되었다.

M-W-7-SHORT 실험체를 통해 커플링 보 길이에 따라 병렬 강판전단벽의 구조 성능에 대한 차이를 비교하고자 한다. 정가력 시 초기강성은 86.41kN/mm, 최대강도는 4&,에서 1105.08kN, 부가력 시 동일 변위에서 -1113.12kN으로 나타났다. 기준 실험 체에 비해 경간이 짧아 정방향과 부방향 간의 하중차이가 크지 않 았다. 최종적으로 부방향으로 8&,까지 단조가력 하였으며, 최대 강도는 -1247.48kN으로 나타났다. 커플링 보가 짧아지며 링크 회전각이 증가하였고 이에 따라 높은 강성과 강도를 나타낸 것으 로 보인다. 항복 메커니즘은 기준 실험체와 동일하게 보, 기둥, 커 플링 보 순으로 진행되며 큰 차이를 보이지 않았다.

S-W-7-LONG 실험체는 보-기둥접합을 전단접합으로 설계 하였으며, 이에 따른 거동특성을 규명하고자 하였다. 정가력 시 초기강성은 76.11kN/mm, 최대강도는 3&에서 940.12kN, 부 가력 시 동일 변위에서 -940.88kN으로 나타났다. 최종적으로 부 방향으로 6&,까지 단조가력 하였으며, 최대강도는 -1107.20kN 으로 나타났다. 기준 실험체와 비교했을 때 보-기둥 접합부의 차 이로 강도는 다소 작아졌지만 강판 형상비, 골조 형상이 유사하여 초기강성과 항복점, 경향에서 큰 차이가 나타나지 않다.

M-B-7-LONG 실험체는 경계골조와 강판을 볼트접합 하였 다. 정가력 시 초기강성은 94.08kN/mm, 최대강도는 48,에서 981.48kN, 부가력 시 동일 변위에서 -1081.60kN으로 10% 차 이가 발생하였다. 최종적으로 부방향으로 68,까지 단조가력 하였 으며, 최대강도는 -1111.56kN으로 나타났다. 기준 실험체와 강 판 형상비, 골조 형상이 유사하여 초기강성과 항복점, 최대강도 에서 큰 차이는 나타나지 않았지만 경계골조와 강판의 볼트접합 으로 인하여 볼트슬립현상이 발생되었다. 볼트슬립현상으로 인 하여 기준 실험체에 비하여 초기강성 및 항복강도, 최대강도가 소 폭 감소함을 알 수 있었다.

M-W-5-LONG 실험체는 강판 형상비에 따른 병렬 강판전단 벽 시스템의 내진성능을 평가하고자 하였다. 정가력 시 초기강성 은 55.36kN/mm, 최대강도는 8&,에서 1036.01kN, 부가력 시 동일 변위에서 -1089.62kN으로 5% 차이가 발생하였다. 강판 형 상비가 감소함에 따라 시스템 내에서 전단강도에 저항할 수 정도 가 감소하였기 때문에 초기강성 및 최대강도 등이 감소한 것으로 판단된다.

3.3 유효강성

유효강성은 각 사이클의 최대하중을 최대변위로 나눈 기울기 로 정의하며, 각 실험체의 유효강성을 Fig. 12.에 나타냈다. 그래 프를 보면 모든 실험체의 유효강성이 &y부터 감소하기 시작하였 으며, 2&y에서 강판 항복 이후 경계골조의 형상이 동일한 실험체

| Specimen | Positive (+) | | | | Negative (-) | | | | | |
|-------------|---------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|
| | k _y (kN/mm) | P _y (kN) | δ_y (mm) | P _{max} (kN) | $\delta_{P_{ m max}}$ (mm) | k _y (kN/mm) | P _y (kN) | δ_y (mm) | P _{max} (kN) | $\delta_{P_{ m max}}$ (mm) |
| M-W-7-LONG | 88.23 | 910.71 | 10.32 | 1070.20 | 36.04 | 86.28 | -1102.68 | -12.78 | -1284.42 | -59.73 |
| M-W-7-SHORT | 86.41 | 986.61 | 11.42 | 1105.08 | 23.83 | 88.65 | -1098.21 | -12.39 | -1247.48 | -47.72 |
| S-W-7-LONG | 76.11 | 797.30 | 10.48 | 940.12 | 18.14 | 68.02 | -1000.22 | -14.70 | -1107.20 | -35.73 |
| M-B-7-LONG | 79.03 | 819.82 | 10.37 | 981.48 | 23.85 | 94.08 | -1018.02 | -10.82 | -1111.56 | -35.96 |
| M-W-5-LONG | 55.36 | 914.41 | 16.52 | 1036.01 | 47.84 | 63.68 | -932.43 | -14.64 | -1089.62 | -47.84 |

Table 3. Test results of specimens



Fig. 11. Load versus displacement relationship of specimens



Fig. 12. Effective stiffness of specimens

M-W-7-LONG, S-W-7-LONG, M-B-7-LONG은 유사한 강 성변화를 나타냈다. 이는 강판 항복 이전에는 강판이 시스템 전체 의 강성에 영향을 미치지만 항복 이후 경계골조가 전체 강성에 영 향을 미치는 것으로 나타난다. 또한 기준 실험체와 비교하여 M-W-7-SHORT의 초기강성은 유사하지만 항복 이후의 전체적 인 강성이 크게 나타났고, M-W-5-LONG의 초기강성과 전체적 인 강성이 작게 나타난 것으로 보아 커플링 보 길이가 짧아지면 초기강성은 유사하지만 항복 이후 강성이 비교적 크게 나타나고, 강판 형상비가 작아지면 초기강성부터 전체적인 강성까지 작게 나타나는 것으로 알 수 있다.

3.4 에너지소산능력 비교

에너지소산능력은 하중-변위 곡선에서 둘러싼 면적으로 구할 수 있다. 본 실험에서는 가이드프레임의 변형으로 각 실험체별 가 력횟수에 차이가 발생하였고, 이에 따라 변위별 에너지소산능력 과 비율을 Table 4에 나타냈으며, 모든 실험체를 비교할 수 있는 40, 사이클까지의 에너지소산능력을 Fig. 13.에 나타냈다.

 $2\delta_y$ 에서 M-W-7-LONG : M-W-7-SHORT = 1 : 0.67 비율 로, 초기에는 다소 차이를 보였지만, $3\delta_y$ 에서 1 : 0.95 비율로 점 차 차이가 감소하였다. $2\delta_y$ 에서 M-W-7-LONG : S-W-7-LONG = 1 : 0.86 비율로, 초기에는 다소 차이가 발생하였고, M-W-7-LONG : M-B-7-LONG = 1 : 1.32, $3\delta_y$ 에서 1 : 1.05 비율로, 볼트에서 슬립이 발생하여 우수한 에너지소산을 보여주 었다. $2\delta_y$ 에서 M-W-7-LONG : M-W-5-LONG = 1 : 0.95 비 율로, 항복 이전에는 큰 차이가 없지만 $3\delta_y$ 에서 1 : 0.84, $4\delta_y$ 에 서 1 : 0.78 비율로, 에너지소산능력이 점차적으로 감소하였다.

Table 4. Results of Energy dissipation capacities

| Specimen | 2δ _y | 3δ _y | 4δ _y | | |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|--|
| MW7LONC | kN∙m | 17.33 | 68.57 | 155.37 | |
| M-W-/-LONG | 비율 | 1 | 1 | 1 | |
| M W 7 SHOPT | kN∙m | 11.56 | 64.80 | - | |
| M-w-/-SHOKI | 비율 | 0.67 | 0.95 | - | |
| S W 7 LONC | kN∙m | 14.95 | - | - | |
| 5-w-/-LONG | 비율 | 0.86 | - | - | |
| M D 7 LONG | kN∙m | 22.95 | 71.73 | - | |
| MI-D-/-LUNG | 비율 | 1.32 | 1.05 | - | |
| MW5LONC | kN∙m | 16.53 | 57.48 | 120.54 | |
| WI-W-J-LUNG | 비율 | 0.95 | 0.84 | 0.78 | |



Fig. 13. Energy dissipation capacities of specimens

4. 결 론

본 연구에서는 병렬 강판전단벽 시스템에서 보와 커플링 보사 이의 접합방법, 강판과 경계골조 사이의 접합을 구분하여 접합방 법에 따른 병렬 강판전단벽 시스템의 내진성능을 평가하였다. 또 한, 강판전단벽의 형상비, 커플링 보의 길이 등을 변수로 하여 실 제 구조물 적용 시 발생할 수 있는 강판 및 커플링 보의 구조적인 역할 및 항복 메커니즘 등에 대하여 실험연구를 수행하였고, 다음 과 같은 결론을 도출하였다.

 1) 각 병렬 강판전단벽 실험체는 인장역에 의해 강판이 선행항 복한 후 하중이 재분배되었고, 이후 경계골조에서 소성변형이 진 행되었으며, 1경간 강판전단벽 시스템과 같은 항복 메커니즘을 보여주었다.

2) 커플링 보 길이를 변수로 설계한 실험체는 기준 실험체와 마 찬가지로 강판 항복 이후 보, 기둥, 커플링 보 순으로 항복이 진행 되었으며, 항복점, 초기강성이 유사하였지만 전체적인 강도와 강 판 항복 이후의 강성이 크게 나타났다. 이는 커플링 보의 길이가 짧아져 링크회전각이 증가하였고, 이에 따라 강판에 집중되었던 하중이 커플링 보에 분배된 것으로 판단된다.

3) 보-기둥을 전단접합으로 설계한 실험체는 초기강성이 다소 작게 나타났지만 전체적인 강도와 항복점이 유사하게 나타났으 며, 경계골조-강판을 볼트접합으로 설계한 실험체는 볼트 슬립이 발생하여 에너지소산능력이 우수하게 나타났다. 또한 두 실험체 와 기준 실험체를 비교했을 때, 강판 형상비와 경계골조가 동일할 경우 강판 항복 이후 강성이 동일한 것으로 나타났다.

④ 강판 형상비를 작게 설계한 실험체는 항복변위가 더 크게 나 타났으며, 전체적인 강도와 강성은 작게 나타났다. 기준 실험체와 비 교했을 때 강도와 강성은 강판 형상비에 따라 변화함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 충남대학교 학술연구비 지원사업의 연구 비지원(2016-1442-01)에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌(References)

[1] Takahashi, Y., Takemoto, Y., Takeda, T., and Takagi, M.

(1973) Experimental Study on Thin Steel Plate Walls and Particular Bracings Under Alternative Horizontal Load, *Proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Portugal, Vol.13, pp.185-191.

- [2] Thorburn, L.J., Kulak, G.L., and Montgomery, C.J. (1983) Analysis of Steel Plate Shear Walls, Structural Engineering Report No. 107, University of Alberta, Canada.
- [3] Borello, D.J., and Fahnestock, L.A. (2012) Behavior and Mechanisms of Steel Plate Shear Walls with Coupling, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.74, pp.8-16.
- [4] Li, C.H., Tsai, K.C., Chang, J.T., and Lin, C.H. (2011) Cyclic Test of a Coupled Steel Plate Shear Wall Substructure, *Procedia Engineering*, Elsevier, Vol.14, pp.582-589.
- [5] Shekastehband, A.P.B. (2017) Hysteretic Behavior of Coupled Steel Plate Shear Walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.133, pp.19-35.
- [6] 대한건축학회(2016) 건축구조기준 및 해설, 기문당.
 Architectural Institute of Korea (2016) Korean Building Code and Commentary, Kimundang, Korea (in Korean).
- [7] American Institute of Steel Construction (2012) Seismic Design Manual (2nd Ed.), AISC, USA.
- [8] Canada Standards Association (2009) Design of Steel Structures (CAN/CSA-S16-09), Canada.

- [9] Timler, P.A., and Kulak, G.L. (1983) *Experimental Study of Steel Plate Shear Walls*, Structural Engineering Report No. 114, University of Alberta, Canada.
- [10] Applied Technology Council (1992) Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures (ATC-24), ATC, USA.
- [11] 최인락(2009) 얇은 강판을 사용한 강판벽의 내진거동 및 설계, 박사학위논문, 서울대학교.
 Choi, I.-R. (2009) Seismic Behavior and Design of Steel Plate Walls with Thin Infill Plates, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea.
- [12] 국가기술표준원(2017) 금속 재료 인장 시험편(KS B 0801: 2007).

Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).

- [13] 국가기술표준원(2016) 일반 구조용 압연 강재(KS D 3503: 2016).
 Korean Agency for Technology and Standards (2016) *Rolled Steels for General Structure* (KS D 3503: 2016),
- Korea (in Korean). [14] 국가기술표준원(2016) 건축 구조용 열간 압연 형강(KS D 3866: 2016).

Korean Agency for Technology and Standards (2016) *Hot Rolled Steel Sections for Building Structure* (KS D 3866: 2016), Korea (in Korean).

요 약: 본 연구에서는 병렬 강판전단벽 시스템의 내진성능평가와 항복 메커니즘 분석 및 설계법 개발을 위해 실험연구를 수행하였다. 기준 실험 체와 커플링 보 길이, 보-기둥 접합방식, 경계골조-강판 접합방식, 강판 형상비를 변수로 총 5개의 실험체에 대하여 실험연구를 수행하였다. 병렬 강 판전단벽은 1경간 강판전단벽 항복 메커니즘과 마찬가지로 인장역에 의해 강판이 선행항복한 후 하중이 재분배되었고, 이후 경계골조에 소성변형 이 진행되었으며, 강판 형상비와 커플링 보 길이에 따라 내진성능의 차이가 발생하였다. 핵심용어: 병렬 강판전단벽, 커플링 보, 강판, 경계골조, 내진성능평가