

# 패널파괴형 철골 커플링 보-벽체 접합부의 내진거동

## Seismic Behavior of Steel Coupling Beam-Wall Connection with Pane Shear Failure

박 완 신\* 한 민 기\* 김 선 우\* 황 선 경\*\* 양 일 승\*\*\* 윤 현 도\*\*\*\*  
Park, Wan-Shin Han, Min-Ki Kim, Sun-Woo Hwang, Sun-Kyung, Yang, Il-Seung Yun, Hyun-Do

### Abstract

In the past decade, various experimental programmes were undertaken to address the lack of information on the interaction between steel coupling beams and reinforced concrete shear wall in a hybrid coupled shear wall system. In this paper, the seismic performance of steel coupling beam-wall connections in a hybrid coupled shear wall system is examined through results of an experimental research programme where three 2/3-scale specimens were tested under cyclic loading. The test variables included the reinforcement details that confer a ductile behaviour on the steel coupling beam-wall connection, i.e., the face bearing plates and the horizontal ties in the panel region of steel coupling beam-wall connections. Panel shear strength reflects enhancement achieved through mobilization of the reinforced concrete panel using face bearing plates and/or horizontal ties in the panel region of steel coupling beam-wall connections.

### 1. 서 론

최근 미국과 일본 등 선진외국을 중심으로 구조적 성능과 함께 공기단축 및 인건비를 절감하기 위한 노력의 일환으로 새로운 구조 시스템의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 특히, 철골 보와 철근콘크리트 벽체로 구성된 복합 병렬 전단벽(이하, HCWS)은 최근 10여년 동안 미국과 일본을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며 국내에서도 이에 대한 연구가 일부 진행되고 있다<sup>1)</sup>. HCWS 구조는 철골과 철근 콘크리트의 이질 구조재료로 구성되어 있으므로 이들 구조재료간의 응력전달이 발생하는 접합부의 구조성능이 전체 구조물의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 철골과 철근콘크리트 재료의 장점을 최대한 활용한 HCWS 구조의 안정성을 확보하기 위해서는 철골보-철근콘크리트 접합부를 구성하는 저항기구의 성능에 대한 규명이 절실히 필요하다고 할 수 있다. 한편, 미국에서는 1987년 Texas 대학 Sheikh 등<sup>2)</sup>에 의해 패널 전단파괴가 발생하는 철근콘크리트 기둥-철골 보 접합부의 대한 초기 연구가 이루어져 왔으며 1994년 ASCE 합성구조 위원회에서 구조설계 지침서(ASCE Design guideline)<sup>3)</sup>를 작성하는 근간이 되었다. 또한, Cornell 대학에서는 중·저 지진대에 속하는 지역에서 내진성을 갖는 고층건물을 대상으로 콘크리트 기둥과 철골보 접합부 성능에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 일본에서는 고지진대의 중·저층건물을 대상으로 거푸집 공사를 줄여 인건비를 절감하고 강재의 높은 휨강성을 이용한 장스팬을 가능하게 함으로써 공간의 효율을 높이고 건식공법으로 공기를 단축시키기 위한 목적으로 Waksbayssh 등을 중심으로 철골-철근콘크리트(이하, SRC)에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 국내에서는 패널전단파괴가 발생하는 SRC 및 지압파괴가 발생하는 HCWS 구조의 접합부<sup>4)</sup>에 대한 연구가 일부 진행되고 있으나 패널 전단파괴가 발생하는 HCWS 접합부에 대한 연구는 전무한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 접합부 보강 상세에 따른 철골보-철근콘크리트 벽체 접합부의 내진거동을 규명하고자 한다.

### 2. 실험

본 연구대상 건물은 그림 1과 같이 5개의 철근콘크리트 전단벽으로 구성된 내부 중심코어와 외부 철골조로 구성된 이중골조 방식의 50층 규모 사무실 용도의 건물이다. 연구 대상건물의 층고는 3m로 전 층에서 일정하다고 가정한다. 실험 대상부위는 응력해석결과 전단벽과 커플링보 접합부에 임계 응력이 작용된 37층 부위를 1/3 축소 모델링하여 실험체를 계획 및 제작하였다.

\* 충남대학교 건축공학과 대학원  
\*\* 충남대학교 건축공학과 강사, 공박  
\*\*\* 우송대학교 강·전담교수, 공박  
\*\*\*\* 충남대학교 건축공학과 교수, 공박

## 2.1 실험체 계획

실험체 설계시 고려된 변수는 접합부 보강상세이며, 첫 번째는 접합부 매립영역의 무보강 실험체인 HCWS-PSF 이고, 두 번째는 지압플레이트(FBP)에 의한 영향을 평가하기 위한 벽체에 매립되는 철골 커플링 보 웨브영역에 지압 플레이트를 용접하여 보강한 실험체 HCWS-PSFF이며, 세 번째는 지압플레이트 및 수평타이의 기여도를 평가하기 위한 것으로 매립영역에 지압플레이트를 용접하여 보강하고 철골 커플링 보 웨브를 관통하여 수평타이를 추가 보강 한 실험체 HCWS-PSFFT이며 실험체 계획 및 상세는 각각 표 1 및 그림 2와 같다. 본 실험에 사용된 콘크리트, 철근 및 강재의 재료 시험은 KS F 2404 및 KS B 0801의 라호 규정에 따라 시험편을 제작하여 KS F 2404 및 KS B 0802 규정에 따라 실험을 실시하였으며 시험결과는 표 2 및 3과 같다. 실험체 설치상황은 그림 3과 같고, 실험진행은 벽체 중심에서 5cm 떨어진 위치에서  $0.12f_{cu}$ 의 일정한 축응력하에서 철근콘크리트 벽체에 매립된 철골 커플링보의 하중-회전각 관계를 파악하기 위하여 표준 실험체인 HCWS-PSF 실험체를 기준으로 예상 파괴하중의 1/2까지는 하중재어로 가력하였고, 그 이후에는 변위재어로 가력 하였으며 각 사이클별 하중이력은 그림 4와 같다. 또한, 철골 커플링보 매립부의 수직철근, 철골보 및 스테드 볼트의 도입된 하중에 따른 변형상태를 파악하기 위하여 해당부위에 스트레인 게이지를 미리 부착하여 변형률을 측정하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 파괴양상

그림 5는 각 실험체의 최종 파괴양상을 나타낸 것이다. HCWS-PSF 실험체의 파괴양상은 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이 매립부의 패널영역에서 초기 수직균열이 발생한 후, 하중이 증가됨에 따라 수직균열이 사인장 균열로 진이되어 외부 패널영역에 집중되었다. 또한, 철골 커플링 보 웨브가 항복한 후 접합부 패널영역에서 사인열이 집중하였으며 최내내력에 도달한 후, 콘크리트 피복이 10cm 박리되어 파괴되는 양상을 보였다. HCWS-PSFF 실험체의 파괴양상은 그림 5(b)에서 나타난 바와 같이 매립부의 패널영역에서 초기 균열발생 후 하중이 증가됨에 따라 사인장 균열이 집중되었으며 일

표1. 실험체 계획

실험체명	접합부상세			수평타이			스텝드 볼트			벽체 철근	
	①	②	③	철골보 웨브영역	개수 (n)	직경 (mm)	길이 (mm)	중상부	매립부		
HCWS-PSF	-	-	●	-	12	19	125			HD13	HD13
HCWS-PSFF	●	●	-	-	12	19	125			@230	@230
HCWS-PSFFT	●	●	●	HD13@230	12	19	125				

① FBP: 지압플레이트(Face bearing plate)

② HT: 수평타이(Horizontal ties)

③ ST: 스텝드 볼트(stud bolt)

표2. 콘크리트의 기계적 특성

슬럼프 (mm)	28일 압축강도 (MPa)	극한변형률 ( $\times 10^{-6}$ )	탄성계수 (GPa)	포화수비 (-)
145	30.0	3,116	25.3	0.16

표3. 강재의 기계적 특성

구분	구분				
	항복강도 (MPa)	항복변형률 ( $\times 10^{-6}$ )	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	
철근	HD10	398	2,325	566	171
	HD13	400	2,380	555	168
	D 19 스텝드	442	2,650	600	167
철골	Flange	352	1,827	489	192
	Web	339	1,682	461	216

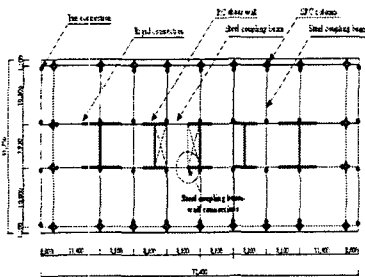


그림 1. 대상평면

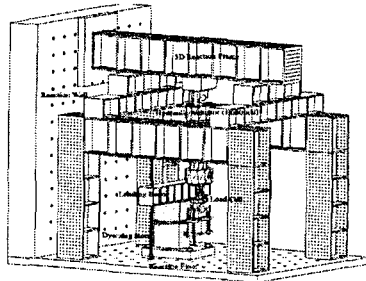


그림3. 시험체 세팅상황

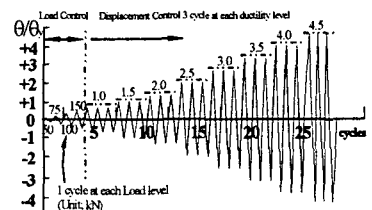
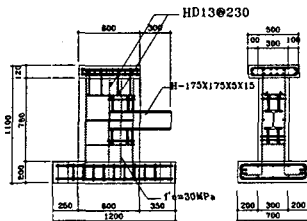
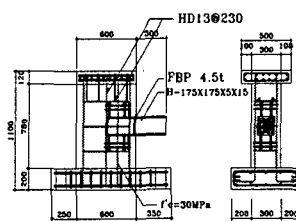


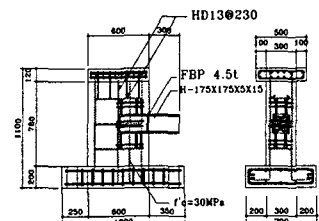
그림4. 하중 이력



(a) HCWS-PSF 시험체



(b) HCWS-PSFF 시험체



(c) HCWS-PSFFT 시험체

그림2. 시험체 상세

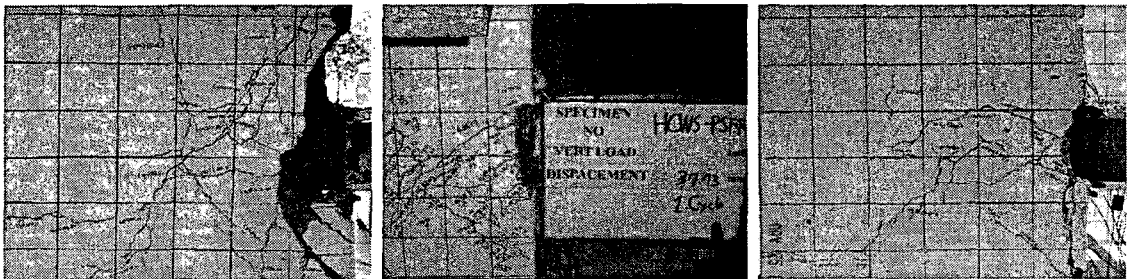
부 균열이 매립된 철골보 상·하부에까지 진전되었다. 특히 동일 회전각에서 내부 패널영역에서의 균열은 HCWS-PSF 실험체에 비해 현저하게 감소하였으며 이는 지압플레이트에 의해 내부패널을 효율적으로 구속하였기 때문으로 판단된다. 최종파괴시 콘크리트 파괴가 약 5cm 박리되어 파괴되는 양상을 보였다. 특히, 내부 패널에서 콘크리트의 손상정도가 HCWS-PSF 실험체에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 지압 플레이트가 내부 패널영역의 콘크리트 압축스트러트를 형성하여 이에 따른 영향에 기인한 것으로 판단된다. HCWS-PSFF 실험체의 파괴 양상은 그림 5(c)에서 나타난 바와 같이 최대하중에 도달할 때까지 HCWS-PSFF 실험체와 전반적으로 유사한 경향을 보였다. 특히 부재각 0.11 rad. 이후, 매립부 내부 패널영역에서 손상이 집중적으로 발생하였으며 이는 수평타이에 의해 콘크리트를 효율적으로 구속하여 경사 압축스트러트를 형성한 것으로 판단된다. 최종파괴시 매립영역의 3cm 깊이까지 내부 및 외부패널에서 콘크리트가 탈락되었다.

### 3.2 하중-회전각 관계 곡선

그림 6은 각 실험체의 하중-회전각 관계 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 모든 실험체의 경우 전반적으로 부재 회전각 0.11rad. 이전에는 동일 회전각의 반복 사이클에서는 강도 및 강성감소가 없는 안정적인 거동특성을 보였다. 그러나, 부재 회전각 0.11rad. 이후 접합부 외부 및 외부 패널영역에서 국부적인 콘크리트 압괴가 발생되면서 강도 및 강성이 급격하게 감소하는 불안정적인 거동특성을 보였다. 특히, 이와 같은 경향은 무보강 실험체인 HCWS-PSF가 지압플레이트만을 보강한 HCWS-PSFF 및 지압플레이트와 수평타이에 의해 접합부 보강된 HCWS-PSFFT 실험체에 비해 현저하게 나타났다. 이는 접합부 영역의 내부 및 외부패널을 효율적으로 구속하지 못하기 때문으로 사료된다. 지압플레이트 및 수평타이에 의해 접합부 보강된 HCWS-PSFFT 실험체의 정가력시 최대강도는 345.3kN이며 무보강 실험체인 HCWS-PSF 및 지압플레이트만을 보강한 HCWS-PSFF 실험체에 비해 각각 53 및 19% 높게 나타났다.

### 3.4 포락선(Envelope curve)

그림 7은 각 실험체의 부재 회전각에 따른 포락선(Envelope curve)을 실험값과 유사구조시스템인 철근 콘크리트 기둥-철골보(이하, SRC) 접합부에 대한 ASCE 표준식과 비교하여 무차원화한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 ASCE 표준식에 의한 값은 예측값은 각각 실험값의 1.14, 1.06 및 1.08로 다소 안전측인 것으로 나타났다. 본 연구의 실험결과를 ASCE 표준식과 비교·분석한 결과 SRC 접합부에 대한 ASCE 표준식은 병렬전단벽 접합부의 내력을 예측하기 위한 설계 표준식으로서 적용이 가능한 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

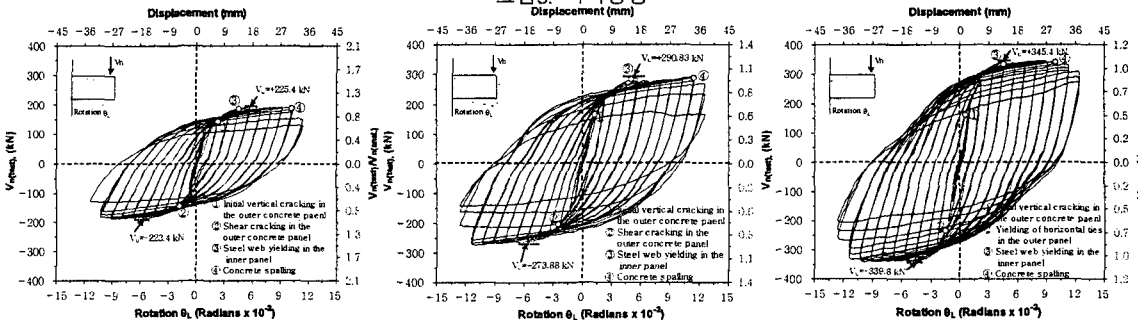


(a) HCWS-PSF 시험체

(b) HCWS-PSFF 시험체

(c) HCWS-PSFFT 시험체

그림 5. 파괴양상



(a) HCWS-PSF 시험체

(b) HCWS-PSFF 시험체

(c) HCWS-PSFFT 시험체

그림 6. 하중-회전각 이력곡선

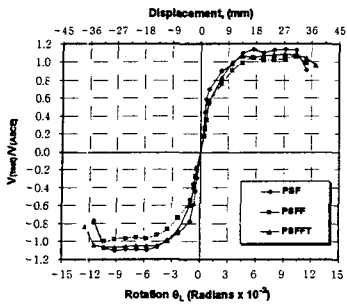


그림7. 포락선

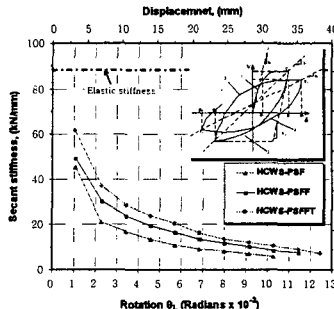


그림8. 활성 강성 특성

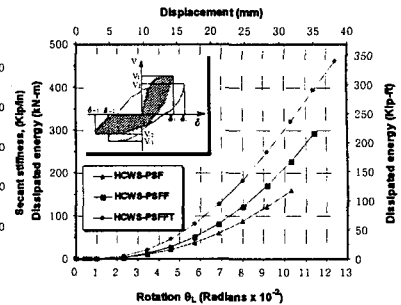


그림9. 에너지 소산면적

### 3.4 활성강성(Peak-to-peak stiffness)

그림 8은 각 실험체의 부재 회전각에 따른 강성특성(Peak-to-peak stiffness)을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 모든 실험체의 경우 초기 강성은 45.46~61.60kN/mm 범위로 철골 커플링 보가 고정되어 있다고 가정하여 구한 탄성강성(88.43kN/mm)의 0.5~0.7범위로 나타났다. HCWS-PSF 실험체의 경우 부재 회전각 0.023rad.에서의 강성은 21.04kN/mm로 초기강성에 비해 약 44% 감소하였으며 이는 외부 패널영역의 균열이 집중적으로 발생하여 이에 따른 영향에 기인한 것으로 판단되며 HCWS-PSFF 및 HCWS-PSFFT 실험체의 0.57~0.69의 범위로 지압플레이트 및 수평타이로 보강된 실험체에 비해 현저하게 낮게 나타났다. 또한, 최대강도 이후 부재 회전각 0.045rad.에서 HCWS-PSFFT 실험체의 강성은 23.81kN/mm로 HCWS-PSF 및 HCWS-PSFF 실험체에 비해 각각 21 및 43% 높게 나타났으나 강성저하율은 대등하게 나타났다.

### 3.5 누적 에너지 소산면적(Accumulated Dissipated energy)

그림 9는 각 실험체의 부재 회전각에 따른 누적에너지 소산면적을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 모든 실험체의 경우 부재 회전각 0.023rad.에서의 누적 에너지 소산면적은 0.26~0.52kN·m 범위로 대등한 값을 보이고 있다. 그러나, 부재 회전각 0.023rad.에서 HCWS-PSF의 누적 에너지 소산면적은 3.15kN·m로 HCWS-PSFF 및 HCWS-PSFFT 실험체의 0.46~0.81범위로 나타났다. 이는 HCWS-PSFF 및 HCWS-PSFFT 실험체가 FBP 및 수평타이에 의해 HCWS-PSF 실험체에 비해 상대적으로 접합부 내부 및 외부 패널을 효율적으로 구속하였기 때문으로 판단된다. 또한 최대강도 이후 부재 회전각 0.10rad.에서 HCWS-PSFFT의 에너지소산면적은 321.1kN·m로 HCWS-PSF 및 HCWS-PSFF 실험체에 비해 각각 42 및 101% 높게 나타나 내진성능이 우수한 것으로 나타났다.

## 4. 결론

(1) 접합부 영역을 지압플레이트 및 수평타이로 보강된 HCWS-PSFFT 실험체의 최대내력은 정가력시 345.4kN으로 HCWS-PSF 및 HCWS-PSFF 실험체에 비해 내력이 각각 53 및 19%증가하는 것으로 나타났으며 이는 지압플레이트에 의한 내부 압축스트리트와 수평타이에 의해 내부 및 외부 패널을 효율적으로 구속하였기 때문으로 판단된다.

(2) 모든 실험체의 경우 전반적으로 부재 회전각 0.11rad. 이전에는 동일 회전각의 반복 사이클에서는 강도 및 강성감소가 없는 안정적인 거동특성을 보였으나, 부재 회전각 0.11rad. 이후 접합부 외부 및 외부 패널영역에서 국부적인 콘크리트 압괴가 발생되면서 강도 및 강성이 급격하게 감소하는 불안정적인 거동특성을 보였다.

(3) 모든 실험체의 경우 초기 강성은 45.46~61.60kN/mm 범위로 철골 커플링 보가 고정되어 있다고 가정하여 구한 탄성강성(88.43kN/mm)의 0.5~0.7범위로 나타났다.

(4) HCWS-PSFFT의 에너지소산면적은 321.1kN/mm로 HCWS-PSF 및 HCWS-PSFF 실험체에 비해 각각 42 및 101% 높게 나타나 내진성능이 우수한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- Gong B, Shahrooz B. M., Gillum A. J., "Cyclic Response of Composite Coupling Beams," ACI Committee 335 Special Publication, 1997.
- ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete. Guideline for design of joints between steel beams and reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1994; 120(8), 2330-51.
- Sheikh TM, Deierlein GG, Yura JA, Jirsa JO. Beam-column moment connections for Composite Frames: Part 1, *Journal of Structural Engineering*, 1989; ASCE, 115(11), 2858-76.
- Yun, Hyun-Do et al. "Shear strength of the connection between a steel coupling beam and a reinforced concrete shear wall in a hybrid wall system, *Journal of Constructional Steel Research*, 61(7), 2005, In press