

대형 산업건축물을 위한 HMB 시스템 접합부 개발

이 승 환

센코어테크 대표이사

shlee@senkuzo.com

01 서론

최근 대형 산업시설(예: 반도체, 전자부품 공장 등)에서는 공기 단축과 현장 작업 최소화를 목표로 하는 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete, 이하 PC) 시스템의 적용이 급격히 증가하고 있다. PC 시스템은 부재의 공장 제작을 통해 시공 품질을 향상시키고, 현장 인력 및 작업시간을 크게 줄일 수 있어 경제성과 시공성 측면에서 뛰어난 장점을 가진다. 특히, 프리스트레싱(Prestressing) 또는 포스트텐셔닝(Post-tensioning) 기법을 적용한 장스팬 PC보는 대공간 확보가 요구되는 산업용 건축물에서 널리 활용되고 있다.

한편, 이러한 대형 산업건축물에서는 장스팬 보와 함께 대형 기둥 부재가 필수적으로 사용된다. 그러나 PC기둥은 경량화가 어렵기 때문에, 자중 증가로 인한 양중 한계와 시공성 저하가 문제로 지적되어 왔다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 제시된 것이 PSRC (Pre-fabricated Steel Reinforced Concrete) 기둥이다. PSRC 기둥은 앵글형 강재를 기둥 모서리에 배치하고, 이를 횡방향 부재로 결속하여 공장에서 선조립 후 현장에 운반하는 앵글 매입형 합성기둥이다. 자체 강성 및 직립성을 확보함으로써 현장에서 비계 및 동바리 없이 콘크리트 타설이 가능한 구조적 이점을 갖는다. 기존 PC기둥 대비 경량화되어 2~3층 모듈화 시공이 가능하며, 구조성능 및 내진성능이 실험적으로 검증된 공법이다.

그러나 PSRC기둥과 PC보를 조합한 하이브리드 골조 시스템의 경우, 보-기둥 접합부에서의 하중 전달 메커니즘이 복잡하다는 한계가 존재한다. 이러한 배경에서 본 연구진은 PSRC기둥과 PC보의 효율적인 접합을 위한 HMB(Hybrid Mounting Bracket) 시스템을 새롭게 개발하였다. HMB 브라켓은 기둥 일체형으로 제작되어, PC보를 볼트나 용접 없이 단순 거치한 후 현장 콘크리트(CIP) 타설을 통해 하중전달경로를 형성하는 새로운 접합방식을 적용한다. 이 시스템은 기존 TSC보나 강재 노출형 보 대비 시공성 향상, 내화성 확보, 그리고 현장 고소작업의 최소화 등의 장점을 지닌다.

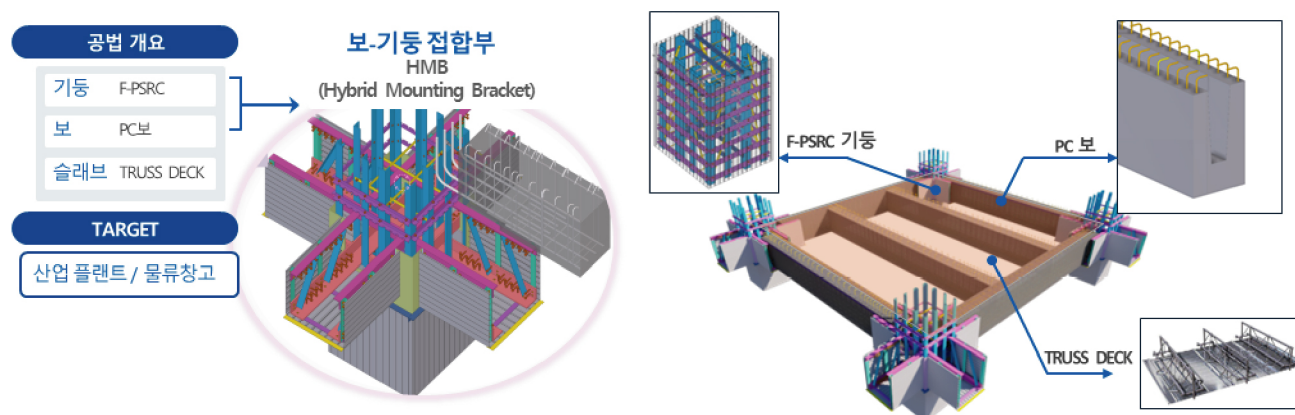
따라서 본 원고에서는 HMB 브라켓을 적용한 PC보-PSRC기둥 접합부 시스템의 소개 및 구조적 성능 및 시공성 검증을 목표로 소개하였다.



[그림 1] HMB 시스템의 장점

02 HMB 시스템의 구성

HMB(Hybrid Mounting Bracket) 시스템은 PC보, PSRC기둥, 그리고 PSRC기둥과 일체화된 HMB 브라켓으로 구성된다([그림 2] 참조). 본 시스템은 공장제작된 각 부재가 공장으로 운반되어, 현장에서 용접 없는 단순 거치만으로 접합부를 형성할 수 있어, 대형 산업건축물의 빠른 시공성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있다. HMB 시스템의 구조적 핵심은 기둥과 브라켓의 일체화, PC보의 효율적인 하중 전달, 그리고 현장 콘크리트(CIP)를 통한 합성 효과에 있다.



[그림 2] HMB 시스템의 개요

▶▶ PSRC 기둥

PSRC 기둥은 앵글형 강재를 기둥 모서리에 배치하고, 이를 횡부재(L형 앵글 등)로 볼트 조립하여 제작된 앵글 매입형 합성기둥공법이다. 두께 1.6 mm의 강판 거푸집을 횡부재에 체결함으로써 제작공장 내에서 거푸집까지 선조립된다. 즉, OSC (Off-Site Construction) 공법의 현장 작업을 최소화 할 수 있어 비계·동바리 등의 현장작업이 불필요하고, 현장에서는 부재의 볼트조립 및 콘크리트 타설만으로 골조를 완성할 수 있는 시공적 장점을 제공한다.

▶▶ HMB 브라켓

PSRC 기둥은 앵글형 강재를 기둥 모서리에 배치하고, 이를 횡부재(L형 앵글 등)로 볼트 조립하여 제작된 앵글 매입형 합성기둥공법이다. 두께 1.6 mm의 강판 거푸집을 횡부재에 체결함으로써 제작공장 내에서 거푸집까지 선조립된다. 즉, OSC (Off-Site Construction) 공법의 현장 작업을 최소화 할 수 있어 비계·동바리 등의 현장작업이 불필요하고, 현장에서는 부재의 볼트조립 및 콘크리트 타설만으로 골조를 완성할 수 있는 시공적 장점을 제공한다.

PC보 및 이음부

PC보는 별도의 기계적 연결장치 없이 HMB 브라켓 상부에 단순 거치된 후, 현장 콘크리트(CIP) 타설을 통해 브라켓 및 기둥과 일체화된다. 하중 전달을 위해, PC보 단부의 웹(web)에는 깊이 약 30 mm, 폭 120 mm의 전단키(shear key)가 배치되어 있다. 또한 PC보 종공부 내부면을 거친면 처리하여 마찰저항을 증대시킴으로써, 전단키와 함께 전단 전달능력 및 접합강도를 향상시킨다.

보-브라켓의 겹침 이음길이는 실험 결과를 바탕으로 최소 700 mm 이상 확보하도록 하여, 충분한 하중전달을 보장한다. PC보 하부 철근은 기둥면과 간섭을 피하면서 확대머리(headed bar), 지압강판(bearing plate), 또는 갈고리형 정착(hooked bar) 등으로 정착되어 미끄러짐을 방지한다.

03 HMB 시스템 구조성능 검증실험

산업통상자원부의 국제공동기술개발사업의 일환으로 한국-싱가포르 공동연구를 수행하였다. 총 11개의 HMB 외부접합부 반복가력 실험을 통해 구조성능을 입증하였다. 본 원고에서는 8개의 실험결과[1],[2]를 요약하여 설명한다.

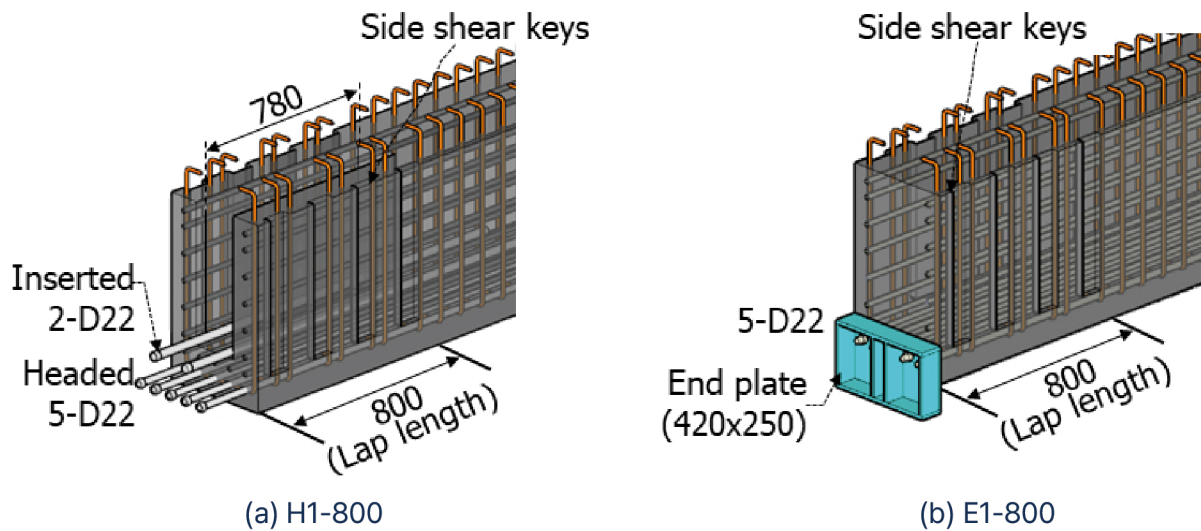
PC보-PSRC기둥 접합부인 HMB 브라켓의 합성작용은 PC보 주철근과 브라켓 주앵글 사이의 하중전달에 의해 지배된다. 따라서 브라켓 내부에 PC보의 겹침길이나 전단키 개수, PC보 상세 등을 변수로 하여 구조실험을 계획 및 수행하였다. PC보 단부상세는 확대머리 철근과 갈고리형 철근 등을 적용하였다.

분류	실험체명	PC보 겹침길이 (mm)	
1차 실험	P1-1200	1200	전단키 개수
1차 실험	P2-900	900	측면 5쌍
1차 실험	B1-700	700	측면 4쌍
1차 실험	B2-700-R	700	측면 3쌍
2차 실험	H1-800	800	측면 3쌍
2차 실험	H2-800	800	측면 4쌍
2차 실험	E1-800	800	측면+하부 4쌍
2차 실험	E2-440	440	측면 4쌍

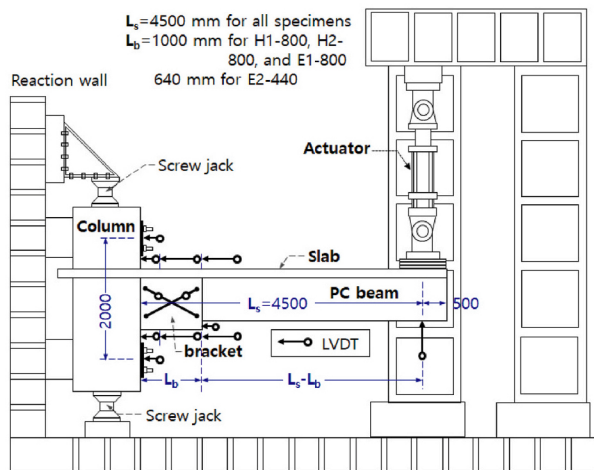
<표 1> HMB 시스템 구조실험 변수

1차 실험은 총 4개의 실험체로 PC보 겹침길이나 전단키 개수를 변수로 실험을 수행하였다. 2차 실험은 총 4개의 실험체로 하부 전단키 유무와, 확대머리 철근과 단부 지압플레이트를 변수로 수행하였다. [그림 3]은 대표적인 실험체의 PC보 단부 상세이다. H1-800 실험체는 전단키와 확대머리 철근을 사용하였고, E1-800 실험체는 전단키와 단부지압강판을 사용하였다.

모든 실험은 외부접합부 실험체로 제작되었으며, AISC 341 하중 프로토콜에 따라 횡변위비 $\pm 0.375\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 0.75\%$ 에서 각각 6번, 횡변위비 $\pm 1.0\%$ 에서 4번, 횡변위비 $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$, $\pm 5.0\%$ 에서 각각 2번 가력하였다.

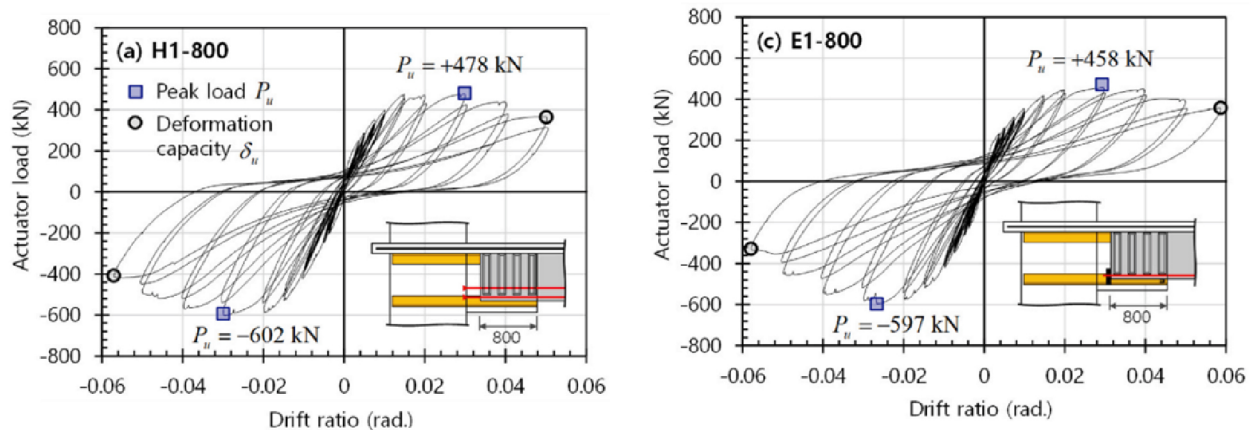


[그림 3] H1-800, E1-800 실험체의 PC보 단부상세



[그림 4] HMB 시스템 구조실험 셋팅

실험 결과의 대표적인 하중-변위 관계와 파괴모드는 [그림 5]와 같다. 모든 실험에서 부모멘트(슬래브 인장측, PC보 하부 압축측) 강도는 콘크리트 지압 및 슬래브 철근 등으로 인하여 설계강도 P_n 을 다소 상회하는 결과를 보였다. 반면, 정모멘트(슬래브 압축측, PC보 하부 인장측) 강도는 각 실험체의 PC보 단부 상세, 전단키의 개수, 겹침길이 등에 따라서 실험강도에 차이가 발생하였다.



(a) 하중-변위의 관계



(b) 파괴모드

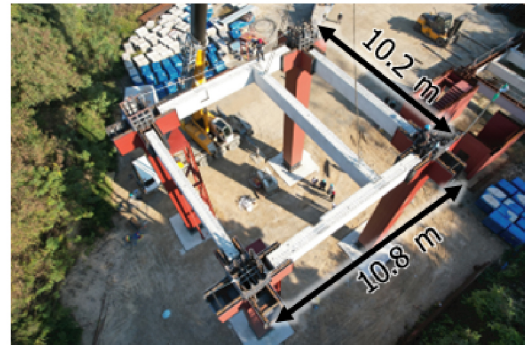
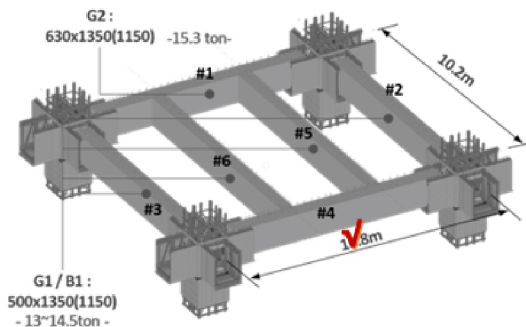
[그림 5] HMB 시스템 구조실험 결과

H1-800 실험체는 800mm의 PC보 겹침길이와 양측면 전단키 4쌍을 가진 표준형 상세를 적용하였으며, 보 정착은 확대머리철근을 사용하였다. 이로 인해 정모멘트 하중에서도 구조적 강도를 비교적 안정적으로 유지하였으며, PC보-브라켓 사이의 슬립변형은 제한적인 수준에 그쳤다. E1-800 실험체는 단부지압강판을 통해 보 하부근을 그룹 정착시킨 형태로, 정착력은 매우 우수하였고, 특히 정모멘트 방향에서의 가장 좋은 변형성능을 보였다. 이는 전단키와 정착 보조장치가 동시에 작용함으로써, 보-브라켓 경계부의 강성과 에너지 소산능력을 향상시킨 결과로 해석된다.

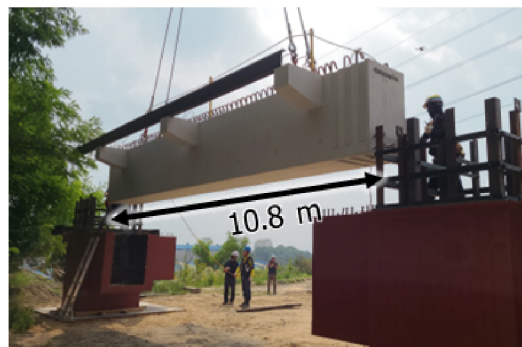
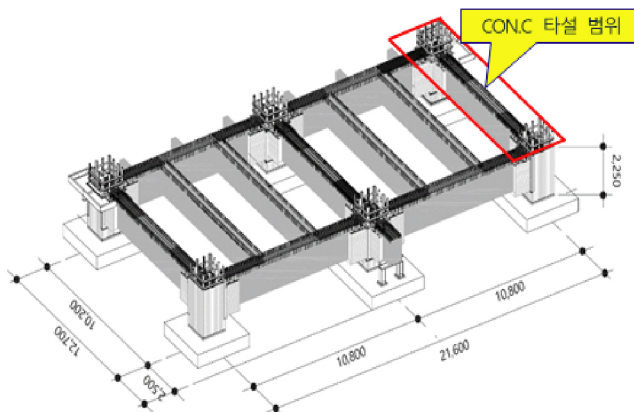
1차 실험결과 및 도출된 설계 방법을 바탕으로 콘크리트학회 기술인증서를 발급 받았다(KCIC 22-006).

04 HMB 시스템 목업 (Mock-up) 실험

현장 적용성 및 시공 안전성을 사전에 검증하기 위해, 실제 산업시설 프로젝트와 동일한 조건 하에 HMB 시스템의 실물 크기 목업 실험을 총 2차례에 걸쳐 수행하였다. 각 목업은 시공 절차 검토, 구조적 안정성 확인, 예상 Risk 도출 및 개선안을 마련하는 것을 목적으로 하였다.



(a) 1차 목업실험



(b) 2차 목업실험

[그림 6] HMB 목업 실험

1차 목업은 HMB 시스템의 첫 실물 크기의 실험으로, 시공성과 시공하중에서의 구조안전성을 동시에 검토하는 데 목적이 있었다. 실험에서는 다음과 같은 항목들로 평가하였다.

- HMB 설치 전 수직도 확보 여부
- PC 거더 설치 소요 시간
- 설치 직후 수직·수평 변위
- 시공 중 처짐 및 지속처짐 발생 여부

실험 결과, PC 보의 평균 설치 시간은 약 6분 17초로 측정되었으며, 이는 기존 일반 PC 보의 거치 속도와 유사하다. HMB 브라켓 내부에는 Guided Plate가 설치되어있어서 PC 보가 브라켓 중앙에 정확히 시공되어 시공 편의성이 우수함을 확인하였다. 또한, 특수한 공구 없이도 설치가 가능하여 현장 활용성이 높다고 볼 수 있다.

NEWS LETTER PC Now & Future

구조 안전성 평가를 위해, 브라켓 끝단부의 수직 처짐을 계측한 결과, 0.3~2.3mm 범위의 처짐이 발생하였고, 이는 사전 수행된 ABAQUS 유한요소해석 결과 대비 1~2mm 작은 값으로 나타났다. 실측과 해석 간의 오차가 크지 않아 해석 기반 예측이 충분히 유효함을 보여주었다. 이어서 30일간의 지속처짐 계측을 수행하였고 추가 처짐은 1mm 내외로 나타나 PC 보 설치 이후 구조적 안정성에 대한 우려는 없는 것으로 판단하였다.



[그림 6] HMB 목업 실험

2차 목업 실험은 HMB 시스템을 포함한 전체 골조공법(F-PSRC + HMB + PC 보)과 콘크리트 타설에 대한 시공성을 검증하고, 실제 시공 시 예상되는 Risk 요소를 사전에 식별하고 개선방안을 마련하기 위하여 진행하였다. 주요 검토 항목은 다음과 같다.

- 골조공법의 단계별 시공성 확인
- PC 보-HMB 접합부의 안착성 및 설치시간 측정
- Deck 판개 설치 및 콘크리트 타설 전후 문제 발생 여부

실험 결과, HMB 내부에 PC 보의 안착은 정확하게 이루어졌으며, 시공 중 추락방지망을 보 하단부에 설치하여 안전성도 확보하였다. PC 보 1부재 설치 평균 시간은 약 10분 30초로, 설치 높이(2.25m)를 고려할 때 양호한 시공성과 작업 효율을 보였다. 또한, 데크 판개 설치 시 걸침 길이를 충분히 확보하여, 후속 콘크리트 타설 작업까지 별다른 문제 없이 마무리되었다.

결론적으로, 두 차례의 목업 실험을 통해 HMB 시스템은 설계 시 예상된 시공성과 구조 안정성 요건을 만족하였으며, 실무 적용에 필요한 설치 시간, 처짐 예측, 공법 간 호환성에 대한 실질적 검증 결과를 확보할 수 있었다.

05 맺음말

본 연구에서는 대형 산업건축물의 시공 효율성과 구조적 신뢰성을 동시에 확보하기 위한 HMB(Hybrid Mounting Bracket) 시스템을 제안하고, 그 구조성능 및 시공성을 실험적으로 검증하였다. HMB 시스템은 PSRC 기둥과 일체화된 브라켓 구조를 통해 현장 용접 및 볼트 체결을 제거하고, PC 보를 단순 거치만으로 접합할 수 있는 새로운 OSC(Off-Site Construction) 기반 공법이다.

구조실험 결과, HMB 접합부는 우수한 하중전달 성능과 변형 능력 및 내진성능 확보가 가능한 것으로 확인되었으며 콘크리트학회 기술인증서를 발급받았다. 또한 실물 목업(Mock-up) 실험을 통해 실제 시공 시 높은 정밀도와 설치 효율성이 입증되었으며, 해석결과와의 일치성 역시 높은 수준으로 나타나 설계 단계의 신뢰성을 확보하였다.

결론적으로, HMB 시스템은 대형 산업시설 등에 최적화된 하이브리드 접합 기술로서, 향후 국내외 산업건축물의 표준화된 PC 접합 공법으로의 발전 가능성을 제시한다. 본 연구는 구조적 안전성과 시공 자동화를 동시에 달성할 수 있는 차세대 OSC 구조시스템의 실질적 전환점으로 평가될 수 있을 것이다.