

콘크리트 충전 튜브형 상부플랜지를 갖는 조립 H-Beam (TH Beam)의 구조 성능

Structural Performance of the Concrete Filled Tube Flange Built Up H-Beam System



정 석 재*
Suk-Jae, Jung



최 종 문**
Jong-Moon, Choi



한 범 석***
Byum-Seok, Han



고 호 성****
Ho-Seong, Ko



노 송 근*****
Song-Geun, Ro



김 영 호*****
Young-Ho, Kim



최 인 락*****
In-Rak, Choi

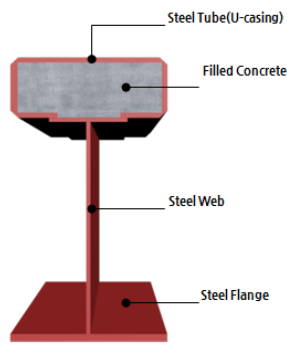
1. TH Beam 개요

- * (주)쓰리디엔지니어링
3D Engineering Co., Ltd.
- ** (주)포스코건설
POSCO Engineering & Construction
- *** 동부건설(주)
DONGBU CORPORATION
- **** 대우조선해양건설(주)
DSME CONSTRUCTION Co., Ltd.
- ***** (주)무영씨엠건축사사무소
MOOYOUNG Construction Management
- ***** 목포대학교 건축공학과 조교수
Dept. of Architectural Engineering, Mokpo
National University
- ***** 호서대학교 건축토목환경공학부 조교수
Div. of Architecture, Civil & Envi. Engineering,
Hoseo University

스팬 20m 이상의 발전소, 공장, 물류, 저장시설에서 지붕구조는 두께 10~20mm 열간압연 H형강이나 공장에서 용접 제작한 Built-up H형강 단면을 사용하고 있으며, 특징은 철근콘크리트 바닥판을 갖지 않는 구조형식이다. 보통 열간압연 H형강은 상부와 하부 플랜지 두께가 동일한 대칭단면으로 바닥판이 없는 장스팬 공장 건축물 등에서는 단면의 효율성이 매우 낮다. 또한 기성 열간압연 H형강은 단면의 높이가 최대 900mm로 바닥판이 없는 대형 장스팬 건축물에 사용하기에 많은 제약이 있다¹⁾. 이러한 문제점을 극복

하기 위해 콘크리트 충전 튜브 플랜지 H형강 보(이하 “TH Beam”)를 개발하였다.

TH Beam은 <Fig. 1>과 같이 H형강의 상부 플랜지를 냉간성형 U casing 튜브 플랜지로 대체하고, 내부에 콘크리트를 충전하여 사용되는 보 부재이다. 압축측인 H형강의 상부플랜지를 튜브형으로 고안하고 내부를 콘크리트 충전함으로써 강관의 국부좌굴이 방지된다. 뿐만 아니라 비틀림상수가 크게 증가하여 좌굴에 대한 안정성이 향상됨에 따라 휨강도 및 소성변형 능력이 향상된다. 이로 인해 좌굴방지용 부재수와 강재 물량이 절감되어 경제적이다. 또한 보배치 단순화로 설비간섭을 최소화하는 등 시공성이 향상되어 장경간 지붕보, 파이프랙, 크레인주행보, 고하중바닥보 등에 적용 시 효과적이다.



<Fig. 1> Component of TH Beam

2. TH Beam의 접합부 성능

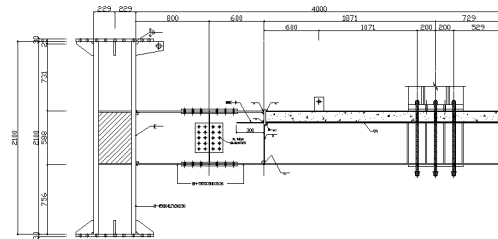
TH Beam과 기둥 접합부의 접합 방식에 따른 성능을 평가하기 위해 2개의 실험체를 계획하였다. 실험체는 2종류의 접합 방식(브라켓타입, 엔드플레이트타입)을 변수로 계획하였다. 실험체는 앞서 휨성능 실험에서 성능평가를 수행한 실험체를 적용하였으며, H형 기둥 플랜지의 국부변형을 방지하기 위해 수평스티프너로 보강하였다. 또한 현장작업성을 고려한 TH 보의 접합 방식을 변수로 하였기 때문에 콘크리트 슬래브의 합성 효과를 배제한 강재 접합부 실험을 수행하였다.

<Fig. 2 (a)> BC-B 실험체는 브라켓 방식으로 길이

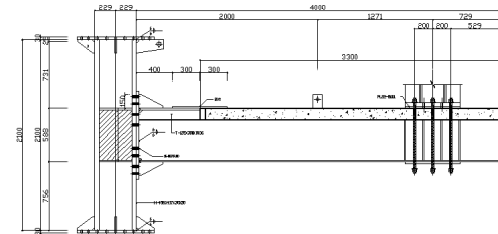
800mm, 크기 H-588 X 300 X 8 X 16의 보가 부착된 H형 강 기둥에 동일한 크기의 H형강 보가 부착된 TH 보를 볼트로 체결하여 접합한 형상이다.

<Fig. 2 (b)> BC-E 실험체는 엔드플레이트 접합방식으로 길이 700mm, 크기 H-588 X 300 X 8 X 16의 보가 부착된 TH 보의 단부에 엔드플레이트를 부착하여 기둥 플랜지와 볼트로 체결하여 접합한 형상이다.

실험은 <Fig. 3> POSCO 건축구조실험동에서 최대 용량 3,000kN의 Actuator로 진행하였으며, 각 실험체는 변위제어 방법으로 초당 0.01mm의 속도로 반복가력을 계획하였다. 하중-변위 측정은 최대내력의 80%로 떨어지거나 실험체가 과도한 파괴에 이르렀다고 판단될 때까지 진행하였다.



(a) BC-B



(b) BC-E

<Fig. 2> Beam-Column connection detail



<Fig. 3> Test setting

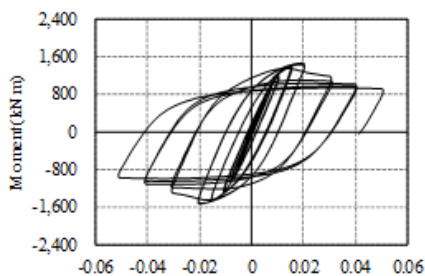


(a) BC-B

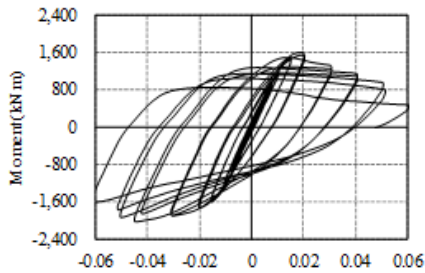


(b) BC-E

〈Fig. 4〉 Failure mode of specimens



(a) BC-B



(b) BC-E

〈Fig. 5〉 Analysis result

BC-B 실험체는 브라켓 방식으로 길이 800mm, 크기 H-588 x 300 x 8 x 16의 보가 부착된 H형강 기둥에 동일한 크기의 H형강 보가 부착된 TH 보를 볼트로 체결하여 접합한 형상이다. 실험체는 6 step에서 〈Fig. 4 (a)〉와 같이 브라켓 H형강 보의 상·하부 플랜지에 국부좌굴이 발생하여 내력저하를 나타내었다. 보 플랜지의 국부좌굴 양상은 6 step에서 동일하게 발생하였다. 이후 7 step에서 국부좌굴이 심화되어 실험이 종료되었다.

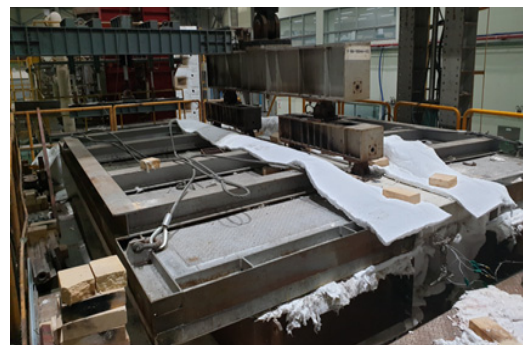
료되었다.

BC-E 실험체는 엔드플레이트 접합 방식으로 길이 700mm, 크기 H-588 x 300 x 8 x 16의 보가 부착된 TH 보의 단부에 엔드플레이트를 부착하여 기둥 플랜지와 볼트로 체결하여 접합한 형상이다. 실험체는 6 step 부모멘트역에서 〈Fig. 4 (b)〉와 같이 H형강 보의 하부 플랜지에서 국부좌굴이 발생하였으며, 이후 정모멘트역에서 튜브 플랜지에 국부좌굴이 나타나며 내력이 저하되었다. 이후 7 step에서 H형강 보 웨브에 국부좌굴이 발생함에 따라 8 step에서 상부 플랜지 국부좌굴이 심화되었다. 실험체는 9 step에서 하부 플랜지와 웨브가 찢어지며 최종 파괴되었다.

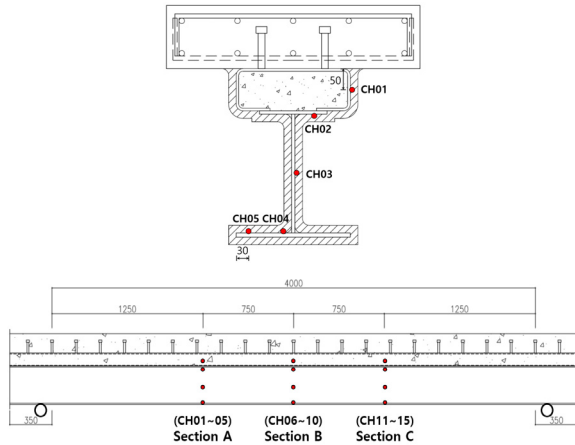
실험 결과, 〈Fig. 5〉와 같이 초기강성은 부모멘트 구간에서는 두 실험체가 유사하게 120,000~122,857 kN-m/rad.을 나타냈으며, 정모멘트 구간에서는 93,846~143,333kN-m/rad.을 나타내었다. 최대모멘트와 항복모멘트의 비도 부모멘트 구간에서는 유사하게 각각 1.13배, 1.16배를 나타냈으나, 정모멘트 구간에서는 각각 1.19배, 1.64배를 보였다.

3. TH Beam의 내화성능

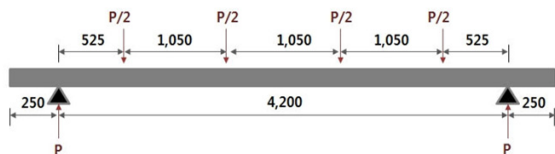
TH Beam 내화성능을 평가하기 위해 총 3개의 실험체를 계획하였다²⁾. 실험체의 스패는 4,700mm로 동일한 단면 형상을 갖도록 구성하였으며, 2시간 내화시간에 대해 18mm 두께의 내화피복을 갖는 실험체로 구성하여 〈Fig. 6〉와 같이 비재하 가열시험과 재하 가열시험을 진행하였다. 비재하 가열시험의 경우 열전대



〈Fig. 6〉 Test setting



〈Fig. 7〉 Installation location of gauge



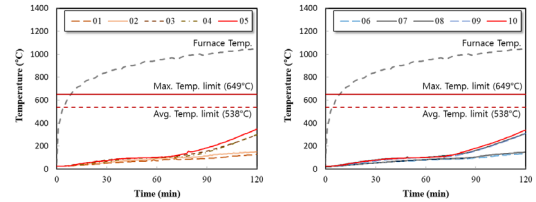
〈Fig. 8〉 Loading plan

부재 위치는 〈Fig. 7〉과 같다. 시험체의 표면 온도 측정을 위해 열전대는 부재 지점 간 길이의 1/4, 2/4, 3/4 위치에 각각 4개씩 표면에 설치하였고, 열전대의 종류는 KS C 1602의 K형을 사용하였다. 열전대 설치하는 열전대의 소선을 3회 이상 꼬아서 접점을 발생시켜 설치 위치의 철골 단면 중앙 부분에 위치하도록 하였다. 재하 가열시험의 경우 하중가력 방법은 〈Fig. 8〉과 같이 2개의 오일 잭을 이용하여 4점 가력하였으며, 처짐은 변위계를 이용하여 중앙에서 최대처짐을 측정하였다(KS F 2257-6). 재하시험의 하중 지지력 판정 기준에 의한 변형량(D)과 변형률(dD/dt)은 식 (1), (2)와 같다.

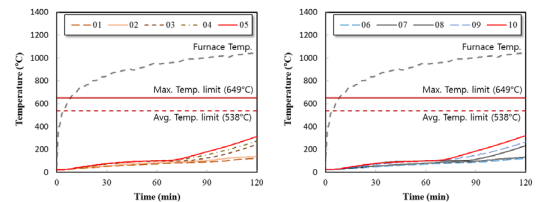
$$D = \frac{L^2}{400d} = \frac{4200^2}{400 \times 550} = 80.2(\text{mm}) \quad (1)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} = \frac{4200^2}{9000 \times 550} = 3.6(\text{mm}/\text{min}) \quad (2)$$

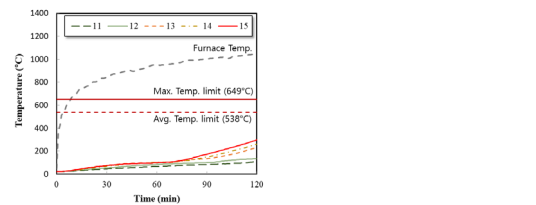
여기서, L = 시험체 지점간 길이(mm), d = 보 춤(mm)
2시간 경과 후 단면의 평균온도는 FU-TH-18-1의 경우 245.6°C, FU-TH-18-2는 212.9°C이며, 최고온



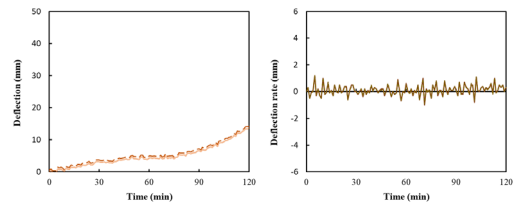
(a) FU-TH-18-1



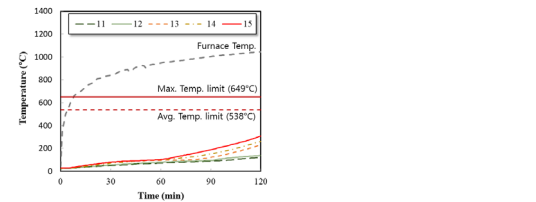
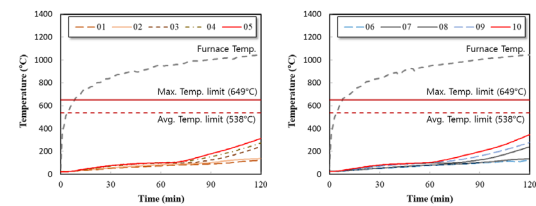
(b) FU-TH-18-2



〈Fig. 9〉 Time-Temperature curve



(a) Deflection & Strain ratio



(b) Time-Temperature curve

〈Fig. 10〉 Load test result

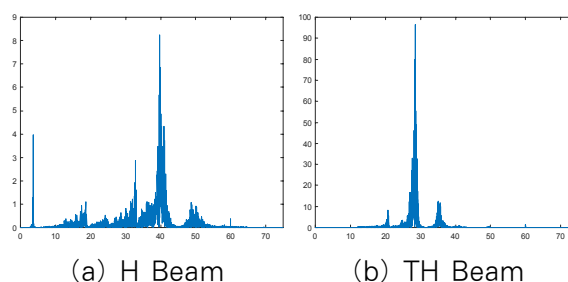
도는 FU-TH-18-1의 경우 348.8℃, FU-TH-18-2는 320.1℃로 두 실험체의 평균온도와 최고온도의 차이는 10% 이하로 크지 않았다. 시험 중 양상도 유사하여 안정적인 성능을 나타낸 것으로 평가할 수 있다.

또한 2시간 내화시험 후 보의 평균온도와 최고온도는 각각 538℃와 649℃ 이하로 KS F 2257-6에서 제시하고 있는 보의 성능기준을 만족하였다. 실험체의 시간에 따른 온도분포는 <Fig. 9>에 나타내었다.

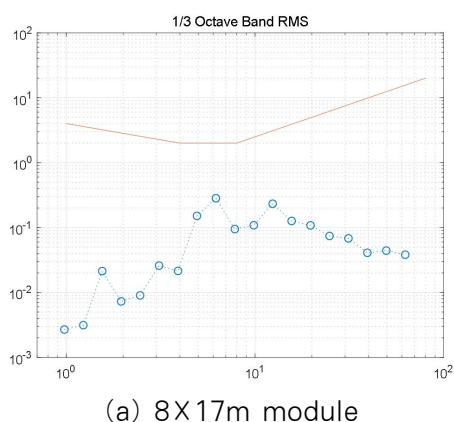
재하 가열시험 결과, 실험체 FL-TH-18-1 중앙에서 측정한 변형량은 <Fig. 10 (a)>에 나타난 것과 같이 90분 이후 크게 증가하는 경향을 보였다. 실험체의 최대 변형률은 1.2mm/min으로 변형량과 변형률 모두 KS F 2257-1의 내화성능 목표치(변형량=80.2mm, 변형률=3.6mm/min)에 비해 매우 낮게 측정되어 보의 재하시험에 대한 성능 목표치를 만족하며 안정적인 거동을 하는 것으로 확인되었다. <Fig. 10 (b)>는 재하 실험체 FL-TH-18-1의 위치별 시간에 따른 온도분포를 나타낸다.

4. TH Beam의 진동성능

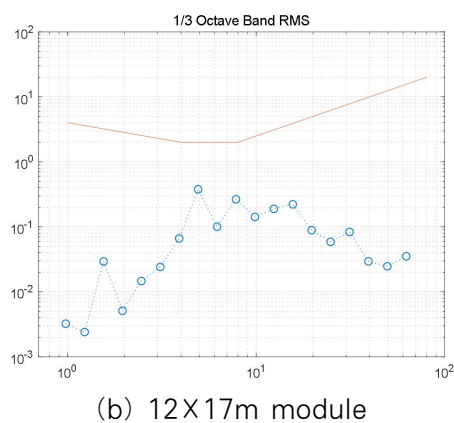
동일한 휨강도를 가지는 일반 H형강보와 TH Beam의 진동성능을 비교 분석하기 위해 실험을 진행하였다. 실험 결과, <Fig. 11>과 같이 일반 H형강보의 진동주파수는 40Hz, TH Beam의 진동주파수는 29Hz로 측정되었다. 감쇠율 또한 일반 H형강보는 2.3%, TH Beam은 3.5%로 측정되어 동일한 휨강도를 갖는 H형강보 대비 진동성능이 향상되는 것으로 나타났다. TH 보가 적용된 건물을 선정하여 바닥 수직 진동을 계측하고 계측 자료를 바탕으로 합성보 바닥시스템의 동적 특성과 거주성능을 평가하였다. 진동성능 평가 결과, <Fig. 12>와 같이 일반적인 사무공간에 해당하는 ISO2631-2 성능기준(1/3 Octave Band RMS Acceleration)을 모두 만족하는 것으로 나타났다.



<Fig. 11> Vibration test result



(a) 8X17m module



(b) 12X17m module

<Fig. 12> ISO 2631-2 criteria

5. 결론

TH Beam의 접합 방식에 따른 성능을 평가하기 위해 TH Beam-Column 접합부 시험을 진행하였다. 아울러 TH Beam의 내화성능 및 진동성능을 평가하기 위해 내화시험 및 진동시험을 진행하였다. H형강 보 상·하부 플랜지에 수직 스티프너로 보강한 엔드플레이트 접합 방식이 정·부모멘트 구간에서 더 높은 휨강도를 발휘하였다. 또한 수평 스티프너로 보강된 효

과로 인해 튜브 단면에 작용하는 압축력을 기둥으로 원활히 전달하고, H형강 웨브의 국부좌굴을 지연시킴으로써 더 높은 휨강도를 발휘한 것으로 판단된다. 튜브 단면 내부에 콘크리트가 충전되어 있기 때문에 정모멘트 구간에서 더 높은 휨강도와 회전성능을 발휘하였으며, 수평 스티프너로 보강된 엔드플레이트 방식이 브라켓 방식보다 더 높은 연성도를 나타내었다. 두 실험체 모두 3%의 층간변위 수준을 만족함은 물론, 이때의 접합부 강도는 원단면 공칭소성모멘트의 100%를 상회하고 있으므로 중간모멘트골조에서 요구되는 접합부 내진성능을 만족하고 있다.

TH Beam 내화시험 결과, 18mm 두께의 내화피복재를 TH Beam 강재면에 뿔칠하여 2시간 내화조건에 대한 단면의 한계온도 및 변형량과 변형률 기준을 모두 만족하여 2시간의 내화성능을 확보함을 확인하였다.

TH Beam의 진동성능을 확인한 결과, 기존 H형강보다 우수한 진동성능을 확보하였으며, ISO2631-2 성능기준 (1/3 Octave Band RMS Acceleration)을 모두 만족하였다.

이러한 TH Beam의 우수한 구조성능을 활용하여 장경간 지붕보, 고하중 바닥보, 크레인거더 등 다양한 현장에 적용되고 있다.

감사의 글

본 연구는 포스코와 (주)N.I스틸의 지원을 받아 수행되었습니다. 포스코와 (주)N.I스틸의 지원에 감사드립니다.

References

1. Choi, I. R., Kim, Y. H., Jung, S. J., & Lee, J. H., "Flexural Performance Tests for Steel and Composite U-Tube Flange H-Beam Structure", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.31, No.3, pp.199~209, 2019, doi: 10.7781/kjoss.2019.31.3.199

2. Choi, I. R., "튜브플랜지 TH Beam 시스템의 충전 및 구조/내화 성능 평가 연구(Tubular H Beam 공법)", Korean Society of Steel Construction, 2019