

콘크리트 충전 튜브형 상부 플랜지를 갖는 조립 H-Beam 공법 (TH Beam 공법)

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 개발 배경

공장, 물류창고, 저장시설의 장경간 지붕 구조는 압연 H-형강이나 공장에서 용접 제작한 조립 H-형강 단면을 사용하고 있으며, 좌굴방지용 바닥판이 없는 것이 특징이다. 강구조물에 가장 많이 사용되고 있는 압연 H형강은 기존 생산라인을 활용하여 쉽게 제작할 수 있으나 상부와 하부 플랜지 두께가 동일한 대칭단면으로 바닥판이 없는 장경간 지붕 구조물에 적용 시 단면 효율이 떨어진다. 또한 생산 규격이 정해져 있고 단면 최대 크기가 제한되어 있어 초장대 강구조물에 사용하기에는 많은 제약을 가진다.

이와 같은 압연 H형강의 한계에 대한 대안으로

* (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
Dev. of Architecture, Civil & Envi. Engineering, Hoseo University

PEB(Pre-Engineered Building, 공업화박관강구조) 공법이 개발되었다. 이는 구조부재를 모듈로 세분화하여 각 부재의 지점에 발생하는 모멘트와 축력의 크기에 따라 부재의 크기 및 두께를 최적화하여 결정함으로써 경제적인 설계가 가능한 공법으로 장경간 공장, 격납고, 창고 및 체육관 등에 많이 적용되어 왔다. 그러나 PEB 공법은 좌굴에 취약한 세장판재의 사용, 부정 정도의 낮음, Z형강 중도리 및 띠장의 물량 증대 등의 단점이 있다.

경주 마우나 리조트 체육관 붕괴 사고 발생, 인천 조달청 창고 붕괴 사고 발생 등으로 인하여 국토교통부 건축정책과에서는 2014년 12월 9일 기둥과 기둥 사이의 간격이 20m 이상인 장경간을 갖는 PEB 구조물을 특수구조건축물로 포함하여 강화된 설계, 시공, 감리 기준을 바탕으로 한 까다로운 심사를 받도록 규정하였다. 따라서 기존 압연 H형강이나 변단면 조립 H형강을 대체하여 30m 이상의 장경간 구조물에 적용 가능한 새로운 형상의 공법 개발이 필요하다¹⁾.

구조 성능과 구조안전성이 향상되고 물량절감이 가능하며 단면 형태가 단순한 콘크리트 충전 튜브형 상부 플랜지를 갖는 조립 H-Beam 공법(이하 “TH Beam”)을 개발하였다.

2. TH Beam 개요

TH Beam은 <Fig. 1>과 같이 강관으로 구성되는 하부 플랜지와 웨브 및 U자형 단면으로 제작된 튜브에 콘크리트를 충전한 상부 플랜지로 이루어진 구조이다²⁾.

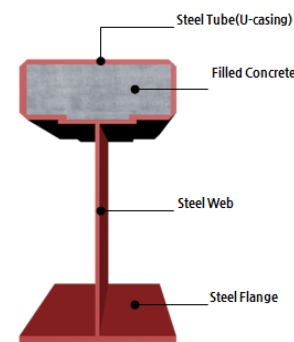
H형강의 장점은 살리고 <Fig. 2>와 같이 횡좌굴, 비틀림에 취약한 단점을 보완하기 위해 상부 플랜지를 튜브로 대체하고 튜브 내부를 콘크리트로 충전하여 구조 성능을 향상시킨 공법이다. 상부 플랜지를 튜브로 대체하면 비틀림상수가 크게 증가하고 좌굴에 대한 안전성이 향상된다. 또한 튜브 내부를 콘크리트로 충전하면 충전된 콘크리트가 강관의 좌굴을 억제하여 휨강도 및 소성변형 능력이 향상된다. 콘크리트

충전 튜브형 상부 플랜지의 효과로 부재의 휨강도 및 비틀림강도가 증대되어 구조안전성이 향상되고, 좌굴 방지용 부재수와 강재물량이 절감되어 경제적이다. 또한 보배치 단순화로 설비 간섭을 최소화하는 등 시공성이 향상되어 장경간 지붕보, 파이프랙, 크레인주행보, 고하중 바닥보 등에 적용 시 효과적이다.

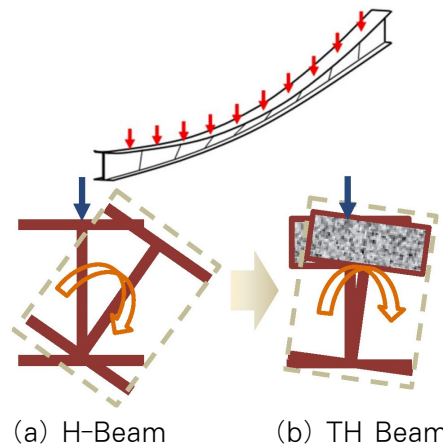
TH Beam의 접합부 형상 및 시공 방법은 기존 H형강 접합상세와 동일하며 <Fig. 3>과 같이 단부 브라켓을 설치하고 볼트접합한다.

3. TH Beam의 구조 성능

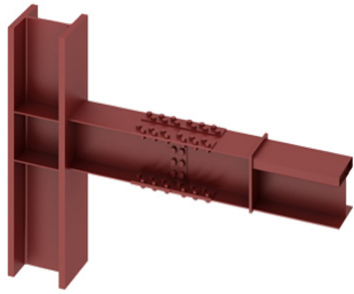
휨 성능을 평가하기 위해 총 5개의 실험체를 계획하였다. 실험체는 콘크리트 충전 정도(가득, 일부)와 충전된 콘크리트와 튜브 간 부착 여부, 상부 튜브의 크기를 변수로 계획하였으며, 실험체의 크기는 일반 건축물에 사용 빈도가 높은 H형강의 크기를 대상으로



<Fig. 1> Component of TH Beam



<Fig. 2> Advantage of TH Beam



〈Fig. 3〉 Detail of TH Beam

하였다. 보 춤은 588mm로 동일하고 상부에 C형의 튜브를 부착한 형상을 적용하였다. 실험체의 C형 박스에 충전된 콘크리트의 강도(f_{ck})는 27MPa로 계획하였으며, 강재의 강도는 SM355를 사용하였다.

각 실험체의 하중가력은 변위제어방식을 적용하여 0.05mm/s의 속도로 단조가력하였으며, 실험체의 양단부는 단순지지로 설정하였다. 가력 위치는 가력보를 사용하여 실험체 길이(L=6,000mm)의 2/5점과 3/5점에서 2점가력하여, 중앙부의 순수 휨모멘트 구간을 중심으로 관측하였다. 〈Fig. 4〉는 휨성능 실험의 실험체 세팅 전경이며, 〈Fig. 5〉는 실험에 대한 실험체의 파괴 양상 및 하중-변형 그래프이다.

실험 결과, TH Beam의 초기강성은 18.6~22.0kN/mm로 평균 20.4kN/mm이며, 최대하중과 항복하중의 비는 1.4배의 유사한 내력비를 나타내었다.

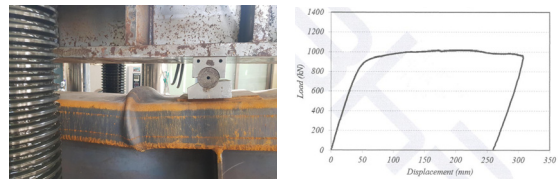
항복하중 시 변위는 36.2~40.9mm의 분포로 평균 38.2mm이며, 최대하중 시 변위는 항복하중 시 변위와 비교하여 5.5~7.9배로써 단면 형상에 따라 변형 성능에 차이가 나타났다.

4. TH Beam의 유한요소해석

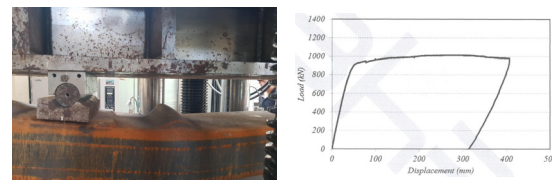
TH Beam의 구성 요소를 바탕으로 모델링을 진행하였다. 강재는 ABAQUS에서 제공하는 4절점 쉘요소(S4R)를 사용하였고, 콘크리트는 8절점 솔리드 요소(C3D8R)를 사용하여 모델링하였다. 강재와 콘크리트 사이의 경계 조건은 ABAQUS의 General Contact 조건을 이용하였으며, 접촉 조건에서 접촉면에 수직하



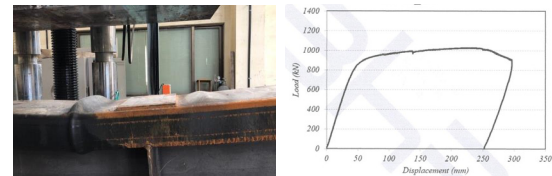
〈Fig. 4〉 Test setting



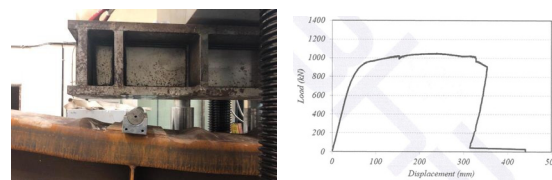
(a) BT-11



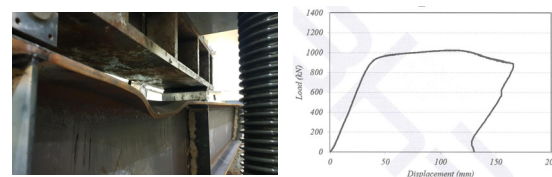
(b) BT-12



(c) BT-13



(d) BT-14



(e) BT-15

〈Fig. 5〉 Failure mode and the load versus

방향에 대한 접촉응력-간격 조건은 Hard contact를 사용하였다. Hard contact는 접촉면 사이의 간격이 일정한 값보다 작아지면 접촉된 것으로 판정하여 완전부착과 같이 거동하게 되며, 접촉 후 응력 상태 및 간격 조건에 따라 접촉면을 구성하는 요소간의 간격이 다시 벌어지게 되면 접촉면이 분리되는 조건을 적용하였다. 접촉면과 평행한 방향으로 Penalty friction formulation을 적용하였으며, 이때 마찰계수 μ 는 0.2를 적용하였고 최대 마찰력은 0.5MPa를 사용하였다.

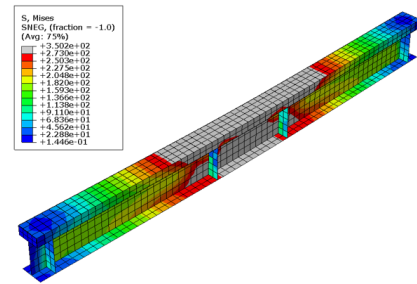
해석 모델의 하중재하는 실험체와 동일한 하중재하 거리를 갖도록 부재 중심에서 1.2m 떨어진 위치에서 2개 절점에 집중하중을 가력하였다. 실험체의 가력부는 해석 시 집중하중으로 인한 응력집중 및 이로 인한 과도한 변형을 방지하기 위하여 실험체와 동일하게 스티프너를 모델링 하였으며, 가력부 위치의 단면을 충분한 강성을 갖는 강체요소(Rigid body)로 모델링하였다. 해석 모델의 지점부는 실험체의 지점 조건과 유사하게 양 단부의 플랜지 하부를 각각 회전단과 이동단으로 모델링하였다.

TH Beam의 유한요소해석 결과를 <Fig. 6>에 나타내었다. 전체적으로 유한요소해석 결과가 실험 결과보다 낮은 강도값을 나타냈지만, 해석 결과는 공칭휨강도와 유사한 값을 보였다. 따라서 동일한 재료강도를 사용한 TH Beam의 소성강도 계산 결과를 실험체의 휨강도 산정에 적용할 수 있음을 확인하였다.

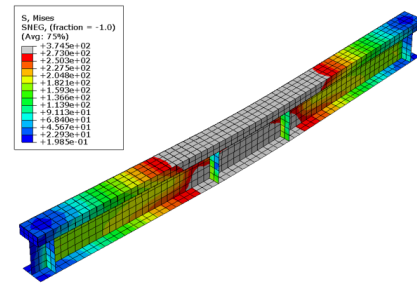
5. 결론

본고에서는 TH Beam의 상부 튜브형 플랜지에 충전되는 콘크리트의 충전 효과를 검증하기 위하여 구조 성능 실험 및 충전성 시험을 진행하였다. 구조 성능 실험에서는 상부 튜브형 플랜지에 콘크리트의 충전 정도와 표면의 부착력을 변수로 휨성능 실험을 진행하고 유한요소해석을 통하여 구조 성능을 검증하였다.

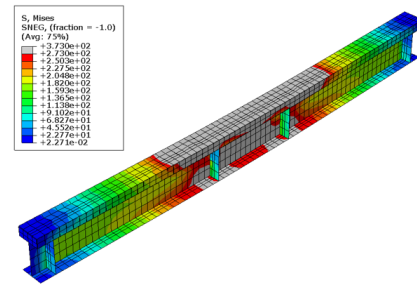
TH Beam 상부 튜브 플랜지에 충전된 콘크리트의 부착력이 보의 휨 성능에 미치는 영향을 평가한 결과,



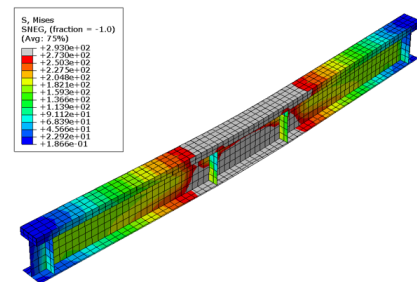
(a) BT-11



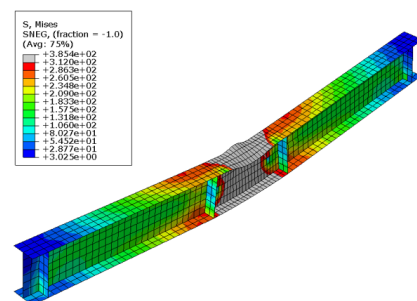
(b) BT-12



(c) BT-13



(d) BT-14



(e) BT-15

<Fig. 6> Analysis result

콘크리트의 부착력은 최대하중과 항복하중에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 부착력이 제거되면 튜브가 국부좌굴이 발생하더라도 콘크리트 접촉면의 슬립에 의해 콘크리트의 지압파괴가 다소 늦춰지기 때문에 변위 연성도는 오히려 증가하는 효과가 있었다.

TH Beam 상부 튜브 플랜지의 콘크리트 충전 정도에 따른 보의 휨성능을 평가한 결과, 최대하중은 콘크리트 충전 정도와 상관없이 비슷한 값을 나타내었고, 변위 연성도는 불완전 충전된 경우가 더욱 유리한 것으로 나타났다. 이는 충전되지 않은 튜브 상부에 빈공간이 생겨 단면 손실이 발생하여 튜브의 국부좌굴에 효과적으로 저항하지 못하지만 연성도 측면에서는 튜브 플랜지의 좌굴에 의해 콘크리트가 지압파괴에 이르는 동안 여유 공간으로 작용하여 콘크리트의 파괴시점을 늦출 수 있기 때문이다.

TH Beam은 튜브 내 콘크리트 충전 유무와 콘크리트 강도에 따른 휨성능 실험 결과, 각 실험체의 실험 강도가 공칭강도보다 약 9~10% 높으며, 콘크리트 충전 효과로 최대강도가 항복강도보다 약 16~19% 높게 발휘되고 안정적인 소성변형능력을 보인다. 이러한 TH Beam의 우수한 구조 성능을 활용하여 장경간 지붕층, 고하중 바닥보, 크레인거더 등 다양한 프로젝트에 적용되고 있다.

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. Oh, M. H., Kim, Y. H., Jung, S. J., & Kim, M. H., "Experimental Study on the Flexural Capacity of H-shaped Steel Composite Beam with the Concrete-Filled Tubular Flange", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.18, No.4, pp.11~18, 2018, doi: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.11