콘크리트충전 튜브플랜지 H형강 합성보의 휨성능에 관한 실험연구

Experimental Study on the Flexural Capacity of H-shaped Steel Composite Beam with the Concrete-Filled Tubular Flange

오명호* · 김영호** · 정석재*** · 김명한****

Oh, Myoung Ho*, Kim, Young Ho**, Jung, Suk Jae***, and Kim, Myeong Han****

Abstract

H-shaped steel beam with concrete-filled tubular flange, which has greatly increased lateral buckling strength due to the rectangular upper tube filled with concrete in place of steel plate flange in the conventional H-shaped steel beam, has been proposed. This beam member can be connected with concrete slab to develop the composite beam. Experiments on the flexural capacity of the composite beam were performed, and the results were examined. Test parameter was the shape of steel flange. A total of three specimens were prepared and tested under the concentrated loads of two points. Deformation characteristics, failure mode, load-displacement relationship and sectional strain distribution of each specimen were investigated, and the maximum test load and the nominal strength based on the plastic theory were compared. The effects of test parameter on the flexural capacity such as maximum strength, deformation capacity, and load-displacement relationship were examined.

Key words : Concrete-filled Tubular Flange, Composite Beam, Flexural Capacity

요 지

최근 일반적인 H형강 보의 상부 플랜지 요소를 콘크리트가 충전된 튜브로 대체하여 보부재의 횡좌굴강도를 크게 향상시킨 콘크리트충전 튜브플랜지 H형강보를 개발하였다. 장스팬 공장 건축물의 지붕골조 뿐만 아니라 다양한 건물 등에 이러한 TH 보를 적용하기 위해서는 콘크리트 바닥이 있는 합성보에서도 휨성능을 검증할 필요가 있다. 따라서 이 논문에서는 TH 합성보의 휨성능을 평가하기 위해 강재 보의 형상(H, TH, UH)을 변수로 하여 2점 가력 휨실험을 수행하였고, 그 결과를 국내 기준에 따른 이론식과 비교하여 검증하였다. 각 실험체별로 변형특성, 파괴양상, 힘-변위 관계, 변형률 분포 등을 분석하였고, 실험의 최대강도와 이론식에 근거한 공칭강도를 비교하였다. 또한 실험변수가 힘-변위 관계, 최대강도, 변형성능 등의 휨성능에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 TH 합성보에서는 상부 튜브의 형상이 휨성능이 미치는 영향이 작고 매립된 상부 튜브 플랜지는 스티드 볼트와 같은 완전합성거동을 발휘하게 할 수 있으며, 기존의 합성단면 설계방법을 적용하여도 된다.

핵심용어 : 콘크리트충전 튜브플랜지, 합성보, 휨성능

1. 서 론

스팬 20 m 이상의 발전소, 공장, 물류, 저장 시설에서 지붕 구조는 두께 10~20 mm 열간압연 H 형강이나 공장에서

용접 제작한 Built-up H 형강 단면을 사용하고 있으며, 특징은 철근콘크리트 바닥판을 갖지 않는 구조형식이다. 현대제철이나 동국제강에서 생산되는 열간압연 H 형강은 상부와 하부 플랜지 두께가 동일한 대칭단면으로 바닥판이 없는

*정회원, 국립목포대학교 건축공학과 교수(E-mail: ohmho@mokpo.ac.kr)

Member, Professor, Department of Architectural Engineering, Mokpo National University

**정회원, ㈜엔테이지 대표(E-mail: steelkyh@hanmail.net)

Member, President, NTAGE.

***정회원, (주)쓰리디엔지니어링 대표(E-mail: jsj@3ds.co.kr)

Member, President, 3D Structural Engineering

****교신저자, 정회원, 국립목포대학교 건축공학과 부교수(Tel: +82-61-450-2456, Fax: +82-61-450-6454, E-mail: mhh314@mokpo.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Mokpo National University

따라서 이 논문에서는 TH 합성보의 휨성능을 평가하기 위해 강재 보의 형상(H, TH, UH)을 변수로 하여 2점 가력 휨실험을 수행하였고, 그 결과를 국내 기준에 따른 이론식과 비교하여 검증하였다.

Fig. 1. The Concrete-Filled Tubular H Beam

이러한 문제점을 극복하기 위해 Fig. 1과 같은 콘크리트 충전 튜브 플랜지 H 형강 보(H-shaped Steel Beam with

2. 실험 계획

2.1 실험체 계획

TH 합성보의 휨성능을 평가하기 위해 총 3개의 실험체를 계획하였고, 실험체의 스패ンは 6,000 mm이다. 실험체는 3종류의 형상(H, TH, UH)을 변수로 계획하였으며, TH 보의 상부에 콘크리트 슬래브를 포함하여 제작하였다.

Table 1. Test Specimens

Specimens ID	Shape	Size		Concrete Strength	Slab Size
		H	Box		
C-RH-X-X	H	H-588×300×12×20	-	-	150×1500
C-TH-F27-A6T	TH	BH-463×150/300×8×8/16	□-300×125×6	27 MPa	150×1500
C-UH-F27-C8T	UH	T-463×300×8×16	□-300×125×8	27 MPa	150×1500

1) C: with slab	2) RH/TH/UH: Beam shape & Tube shape
3) X/F27: Concrete filled & strength	4) A6T/C8T: Box shape & thickness

Fig. 2. The Section of Specimens

실험체의 크기는 일반 건축물에 사용 빈도가 높은 H형강의 크기(H-588×300×12×20)를 대상으로 하였으며, 이에 대해 보의 춤은 동일하고 상부에 A형(TH 보) 또는 C형의 튜브(UH 보)를 부착한 형상을 적용하였다. 실험체 일람은 Table 1에 나타내었으며 자세한 상세는 Fig. 2와 같다.

실험체 A형 또는 C형 튜브에 충전된 콘크리트 강도(f_{ck})는 27 MPa로 계획하였고, 강재는 SM490A 강종을 사용하였다.

TH 보의 상부 플랜지의 두께는 6 mm이고, 하부 플랜지의 두께는 16 mm이다. UH 보는 상부로 개방되는 단면의 특성으로 상부 플랜지의 두께를 8 mm으로 두껍게 하였고, 하부 플랜지의 두께는 16 mm이다.

콘크리트 슬래브와 합성된 실험체 3개는 모두 완전합성을 위해 직경 19 mm의 스티드 볼트를 2열 200 mm 간격으로 설치하였다.

2.2 가력 방법

본 실험은 포스코 철강솔루션센터 강구조실험동에서 10,000 kN의 UTM을 사용하였다. 하중가력은 변위제어방식을 적용하여 0.05 mm/s의 속도로 단조가력하였으며, 실험체의 양단부는 단순지지로 설정하였다. 가력위치는 가력보를 사용하여 실험체 경간 길이(L)의 2/5점과 3/5점에서 2점 가력하여 중앙부의 순수 휨모멘트 구간을 중심으로 관측하였다(Fig. 3).

Fig. 3. The Set-up of Specimen

2.3 측정 방법

양측 가력점 하부와 실험체 중앙부에 수직 변위계를 설치하여 하중가력에 따른 실험체의 처짐량을 계측하였으며, 실험체 단부에 수평 변위계를 설치하여 콘크리트와 강재의 미끄러짐량을 계측하였다. 실험체별 스트레인 게이지 부착 위치는 Fig. 4와 같다.

(a) C-RH-X-X(Center)

(b) C-TH-F27-A6T(End)

(c) C-UH-F27-C8T(Center)

Fig. 4. Installation Location of Strain Gauge

3. 실험 결과 및 분석

3.1 재료 시험

3.1.1 콘크리트

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도(f_{ck}) 27 MPa로 계획하였으며 KS F 2405에 따라 제작한 공시체 3개의 평균 탄성계수는 25,617 MPa이고, 평균압축강도는 32.8 MPa ($f_{ck}=27$ MPa)이다.

3.1.2 강재 및 철근

실험체에 사용된 강재의 재료 성능을 확인하기 위해 인장 시험을 실시하였다. 실험체에 사용된 강종(SM490 A, Thk.

Table 2. Test Results of Steel Plate and Reinforcement

Name	Thickness of Plate(mm) and Diameter(mm) of Reinforcement	Modulus of Elasticity (E , MPa)	Yield Strength (F_y , MPa)	Tensile Strength (F_u , MPa)	Yield Ratio (F_y/F_u)	Yield Strain (ϵ_y)
SM490A	6	194,545	428.0	535.8	0.80	0.0022
	8	178,431	455.0	553.1	0.82	0.0026
	16	208,134	348.0	544.7	0.64	0.0017
	20	198,685	347.5	506.3	0.69	0.0017
SD400	D10	167,406	498.2	652.7	0.76	0.0030
	D13	164,866	430.3	566.3	0.76	0.0026

6 mm, 8 mm, 16 mm, 20 mm)의 인장시험편을 KS B 0801을 준용하여 14A호 정형시험편으로 각각 3개씩 제작하였다. KS B 0802에 따른 인장시험결과를 Table 2에 나타내었다.

또한 실험체에 사용된 철근의 재료성능을 확인하기 위해 인장시험을 실시하였다. 실험체에 사용된 철근의 인장시험편을 KS B 0801을 준용하여 각각 3개씩 제작하였다. KS B 0802에 따른 인장시험 결과를 Table 2에 나타내었다.

3.2 파괴 거동

3.2.1 C-RH-X-X

C-RH-X-X 실험체는 기존의 H형강을 사용한 노출형 합성보이다. 가력 초기 선형으로 거동하였으며, 약 1,340 kN에서부터 강성이 급격히 감소하였고 완만한 하중증가를 나타내었다. 약 920 kN에서 좌측 가력부의 슬래브 하부에 균열이 발생하였으며, 지속적으로 하중이 증가함에 따라 슬래브의 측면으로 균열이 진전되었다. 약 1,700 kN에서 좌측 가력부 지압판 주변에 균열이 발생하였으며, 슬래브 상부에서 콘크리트가 압괴되어 최대강도에 도달하였다 (Fig. 5 참조).

Fig. 5. Failure of C-RH-X-X

3.2.2 C-TH-F27-A6T

C-TH-F27-A6T 실험체는 TH 합성보 실험체로 Built-up H 형강 상부에 A형($\square$ -300×125×6) 튜브를 부착하고, 튜브 단면 내부에 콘크리트 강도(f_{ck}), 27 MPa를 충전한 실험체이다. 가력 초기 선형으로 거동하였으며, 약 1,200 kN에서부터 강성이 감소하며 완만한 하중 증가를 나타내었다.

약 750 kN에서 좌측 가력부의 슬래브 하부에 균열이 발생하였으며 지속적으로 하중이 증가함에 따라 슬래브의 측면으로 균열이 진전되었다. 약 1,700 kN에서 가력부의 슬래브 측면에 상·하부 휨균열이 연결되며 콘크리트 슬래브가 파괴되었으나, 변형이 지속적으로 증가하는 연성적인 거동을 보였다. 이후 슬래브의 균열폭이 증가하여 내력저하를 나타내었다(Fig. 6 참조).

Fig. 6. Failure of C-TH-F27-A6T

3.2.3 C-UH-F27-C6T

C-UH-F27-C8T 실험체는 Built-up H 형강의 상부 플랜지를 제거하고 튜브를 상향 배치한 C형($\square$ -300×125×8) 단면의 내부에 콘크리트 강도(f_{ck}), 27 MPa로 충전한 실험체이다. C형 튜브 단면의 상부가 개방된 형상이지만 앵글(L-50×50×4@150)을 이용하여 단면 상부를 고정하였다.

C-UH-F27-C8T 실험체는 C-TH-F27-A6T 실험체와 유사

한 거동을 나타내었다. 가력 초기 선형으로 거동하였으며, 약 1,200 kN에서부터 강성이 감소하며 완만한 하중 증가를 나타내었다. 약 630 kN에서 좌측 가력부의 슬래브 하부에 균열이 발생하였으며, 지속적으로 하중이 증가함에 따라 슬래브의 측면으로 균열이 진전되었다. 약 1,580 kN에서 가력부의 슬래브 상면에 지압 균열이 발생하였으며, 측면의 상·하부 균열이 연결되며 콘크리트 슬래브가 파괴되었다 (Fig. 7 참조).

Fig. 7. Failure of C-UH-F27-C6T

3.3 하중-변위 관계

실험체의 항복하중(P_y)은 하중-변위 곡선에서 초기 기울기의 1/3 기울기의 직선으로 항복하중을 산정하는 1/3 접선법을 사용하여 평가하였다.

Fig. 8과 같이 하중-변위 곡선의 초기 기울기 접선인 선분(a)와 이것의 1/3 기울기를 갖는 선분인 선분(b)를 평행 이동하여 하중-변위 곡선과의 접선을 이루는 선분(c)와의 교점을 항복하중(P_y), 항복변위(δ_y)로 산정하였다. 실험체의 초기강성(K_i)는 최대강도(P_{max})의 10%점과 50%점을 연결한 선분의 기울기로 산정하였다(Kim, 2017; Oh, 2016).

Fig. 8. 1/3 Secant Method

각 실험체 별 초기강성(K_i) 및 항복하중(P_y), 최대하중(P_{max}), 항복하중 시 변위(δ_y), 최대하중 시 변위(δ_{max})를 Table 3에 나타내었다. 또한 각 실험체별 하중-변위 곡선을 Fig. 9에 나타내었다.

Table 3에서 보는 바와 같이, 각 실험체의 초기강성은 55.3~77.4 kN/mm이고, 최대하중과 항복하중의 비는 1.2배로 유사한 내력비를 나타내었다. 또한 항복하중 시 변위는 22.0 mm ~ 25.3 mm이고, 최대하중 시 변위는 항복하중 시 변위와 비교하여 4.98~6.31배로 단면 형상에 따라 변형성에 차이를 나타내었다.

(a) C-RH-X-X

(b) C-TH-F27-A6T

(c) C-UH-F27-C8T

Fig. 9. Load-Deflection Curve of Specimens

Table 3. Test Results

Specimens ID	K_i (kN/mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	P_{max}/P_y	δ_y (mm)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	$\delta_{P_{max}}/\delta_y$
C-RH-X-X	77.4	1,635	2,014.6	1.23	22.0	122.8	5.58
C-TH-F27-A6T	55.7	1,430	1,704.5	1.19	24.0	151.5	6.31
C-UH-F27-C8T	57.3	1,430	1,709.4	1.20	25.3	126.1	4.98

3.4 하중-변형률 분포

각 실험체별 하중-변형률 분포를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, 모든 실험체는 하중 증가에 의해 중립축을 기준으로 압축 및 인장 거동을 나타내었으며, 인장측의 안정적인 소성화를 통해 연성적인 거동을 나타내었다. 또한 상부에 부착된 A형, C형 튜브는 콘크리트 슬래브에 매립되어 좌굴이 억제되었다.

Fig. 10. Load-Deflection Curve of Specimens

3.5 분석 및 평가

3.5.1 초기 강성 및 최대 휨강도

각 실험체의 하중-변위 관계에서 선정한 초기강성, 항복하중, 최대강도를 Table 3에 나타내었다. H형강을 적용한 실험체는 77.4 kN/mm로 높은 강성을 나타내었으나, TH 및 UH 실험체는 55.7 및 57.3 kN/mm의 강성을 나타내었다. 또한 항복하중 및 최대강도도 초기강성과 동일하게 C-RH-X-X 실험체가 가장 높게 나타내었다. 이는 C-RH-X-X 실험체에 사용된 H형강 보는 열간 압연 H-588 $\times$ 300 $\times$ 12 $\times$ 20으로 다른 실험체에 비해 가장 면 성능이 크기 때문이다.

한편 TH 및 UH 실험체는 유사한 하중에서 항복과 최대하중이 결정되었다. TH 실험체는 튜브 단면이 완전 폐단면을 이루고, UH 실험체는 상부가 부분적으로 개방된 형상이지만 콘크리트 슬래브에 매립되었기 때문에 두 실험체가 유사한 휨강도를 발휘한 것으로 판단된다.

따라서 합성보에서는 상부 튜브의 형상을 C형으로 하여도 A형이 비교하여 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

3.5.2 변위연성도

변위연성도는 실험결과로 계측된 최대 하중 시 변위(δ_{max})와 항복하중 시 변위(δ_y)의 비로 나타내며 내진성능과 거동특성을 파악하기 위해 이용된다. 각 실험체별 변위연성도를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11. Ductility of Specimens

C-TH-F27-A6T 실험체가 6.31로 가장 큰 변위연성도를 발휘하였으며, C-RH-X-X 실험체가 5.58, C-UH-F27-C8T 실험체가 4.98의 변위연성도를 발휘하였다. 이는 콘크리트

슬래브가 압괴에 의해 압축력에 저항하지 못하더라도, 콘크리트가 충전된 A형 튜브단면이 압축력에 저항하여 합성단면의 응력이 재분배됨에 따라 안정적인 소성변형이 이루어졌기 때문이다. 반면 C형 박스단면은 콘크리트 슬래브가 파괴된 후, 상부가 부분적으로 개방되었기 때문에 변위연성도가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

3.5.3 단면의 변형률 분포

TH 합성보 단면의 각 요소에 부착한 스트레인 게이지로부터 하중 단계에 따른 단면의 변형률 분포를 Fig. 12에 나타내었다.

실험체 3개는 모두 변형률 분포가 합성단면에 선형으로 분포하며 상부 플랜지에 부착된 스티드 볼트에 의해 완전합성보의 거동을 보였고, 이에 따라 중립축이 단면의 상부로 이동하며 안정적인 소성거동을 보였다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이, 모든 실험체는 중립축의 위치가 유사하다. 하중 초기, 합성단면의 탄성중립축(Y_{na})은 단면의 인장측으로부터 405 mm ~ 425 mm 높이에 위치하였으며, 최대하중 시 소성중립축($Y_{p,na}$)은 495 mm ~ 505 mm 높이에 위치하였다.

3.5.4 설계강도 평가

TH 합성보 휨성능을 평가하기 위해, 단면의 소성응력분포로부터 산정한 공칭강도(P_n)와 각 실험체가 최대강도(P_{max})를 비교하여 Table 4에 나타내었다(MOLIT, 2016). 공칭강도는 강재와 콘크리트의 재료 시험강도를 적용하여 산정하였다. 각 실험체의 최대강도는 공칭강도 대비 1.25~1.4배의 휨강도를 발휘하였다.

콘크리트 슬래브가 없는 TH 및 UH 실험체의 실험결과, A6T의 경우 최대강도는 공칭강도 대비 1.10배의 강도를 발휘하였으나, 콘크리트 슬래브와 합성한 실험체 C-TH-F27-A6T는 1.25배의 강도를 나타내었다. 이와 동일하게 콘크리트 슬래브가 없는 C8T를 적용한 강재 보 실험체의 경우 공칭강도 대비 최대강도가 1.36배를 발휘하였으나, C-UH-F27-C8T 합성보의 경우 1.40배의 강도를 발휘하였다(Oh, 2018). 따라서 상부 튜브 단면이 A형 형상이 콘크리트 슬래브와의 합성효과가 더 뛰어남을 알 수 있다.

Fig. 12. Strain Distribution of Specimens

4. 결 론

이 연구에서는 Built-up H 형강의 상부에 콘크리트를 충전한 튜브 단면을 설치하여 구성한 TH 보에 콘크리트 슬래브가 합성된 TH 합성보의 휨성능을 평가하기 위해 강재 보의

Table 4. The Comparison of Test Results and Nominal Strength

Specimens ID	P_n (kN)	P_{max} (kN)	P_{max}/P_n	Specimens ID	P_n	P_{max}	P_{max}/P_n
C-RH-X-X	1,526	2,014.6	1.32	S-RH-X-X*	1,140	1,403.7	1.23
C-TH-F27-A6T	1,358	1,704.5	1.25	S-TH-F27-A6T*	970	1,070.2	1.10
C-UH-F27-C8T	1,220	1,709.4	1.40	S-UH-F27-C8T*	768	1,047.4	1.36

* Specimens without Concrete Slab(Oh, 2018).

형상을 변수로 하여 단순지지된 실험체를 대상으로 2점 가력 휨실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) TH 합성보 실험체는 가력 초기 선형적으로 하중이 증가하였으며, 콘크리트 슬래브의 파괴에 의해 최대 강도가 결정되었다. 또한 합성 단면의 항복 후 완만한 내력증가를 보였으며, 응력재분배를 통해 연성적인 거동을 발휘하였다.
- (2) 강재 보 상부에 콘크리트가 충전된 튜브 단면이 있는 TH 및 UH 실험체는 유사한 하중에서 항복하중과 최대하중이 결정되었고 이는 상부 튜브가 콘크리트 슬래브에 매립되었기 때문이다. 따라서 합성보에서는 상부 튜브의 형상이 큰 영향을 미치지 않는다.
- (3) 설계강도 평가 결과, TH 및 UH 합성보에서의 콘크리트 슬래브에 매립된 상부 튜브 플랜지는 스티드 볼트와 같은 완전합성거동을 발휘하게 할 수 있으며, 기존의 합성단면 설계방법을 적용하여도 된다.

감사의 글

이 연구는 (주)엔아이스틸의 연구비 지원을 받아 수행된 연구의 일부이며, (주)3D구조엔지니어링과 포항산업과학 연구원의 지원에 감사드립니다.

References

- Kim, D.B., Kim, Y.H., Oh, M.H., and Kim, M.H. (2017) Experimental Study on the Flexural Capacity of the Concrete-Filled Composite Beam with Exposed Top Flange. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-9.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016) *Korea Building Code*.
- Oh, M.H., and Kim, M.H. (2016) Fire Resistance Evaluation of SLIM AU Composite Beam. *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 16, No. 4, pp. 53-58.
- Oh, M.H., Kim, Y.H., Jeong, S.J., and Kim, M.H. (2018) Experimental Study on the Flexural Capacity of H-shaped Steel Beam with the Concrete-Filled Tubular Flange. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4 pp. 1-9.

Received	March 14, 2018
Revised	March 15, 2018
Accepted	April 4, 2018