

## 슬림플로 합성보의 휨성능 및 접합부 구조성능 실험

최인락<sup>1\*</sup> · 이경률<sup>2</sup> · 박성운<sup>3</sup> · 경제환<sup>4</sup> · 박대원<sup>5</sup>

<sup>1</sup>부교수, 호서대학교, 건축토목환경공학부, <sup>2</sup>석사과정, 호서대학교, 재난안전시스템학과,

<sup>3</sup>부장, GS건설, <sup>4</sup>부장, 제일테크노스, <sup>5</sup>대표, 에이치피엔지니어링건축사사무소

## Flexural Performance and Beam-Column Connection Structural Performance Tests for Slimflo Composite Beam

Choi, In Rak<sup>1\*</sup>, Lee, Gyung Ryul<sup>2</sup>, Park, Sung Woon<sup>3</sup>, Kyung, Jae Hwan<sup>4</sup>, Park, Dae Won<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Dev. of Architecture and Civil Engineering, Hoseo University, Asan, 31499, Korea

<sup>2</sup>Graduate Student (Master Course), Dept. of Disaster Safety System, Hoseo University, Asan, 31499, Korea

<sup>3</sup>Director, GS Engineering & Construction, Seoul, 03035, Korea

<sup>4</sup>Director, Jeil Technos, Seoul, 05836, Korea

<sup>5</sup>CEO, HP Engineering, Seoul, 05836, Korea

**Abstract** - In this study, experiments were conducted to evaluate the structural performance of the proposed steel tube slim-floor (Slimflo<sup>®</sup>) composite beam and the seismic performance of the beam-column joint. In order to verify the flexural performance of the Slimflo composite beam, two-point loading bending test was conducted with different types of shear connectors as a test parameter, and the flexural strength was calculated according to the Structural Steel Building Code (KDS 41 31 00: 2019) and compared with the test results. In addition, end plate-type bracket joint was proposed as beam-column joint of Slimflo composite beam and H-beam column, and the rotational performance of the joint was verified through cyclic loading tests. As a result of the bending test, crushing of the concrete slab or rupture of the steel connections were not occurred until the maximum load of test specimens, regardless of the type of shear connector. Also, flexural strength of the specimen can be evaluated using the plastic stress distribution method with a safety margin. As a result of the beam-column joint cyclic loading tests, both specimens of the same detail showed 4 % and 5 % rotation capacity, exceeding the required performance of the composite intermediate moment resisting frame (IMF), and the maximum moment strengths of test specimens were 1.07 to 1.29 times greater than that of the plastic moment capacity.

**Keywords** - Steel tube slim-floor composite beam, Bending test, Flexural capacity evaluation, Beam-column joint, Joint cyclic loading test

### 1. 서론

최근 건축물의 대형화와 초고층화가 진행됨에 따라 공사물량을 최소화하고 더 많은 유효면적을 확보하기 위하여 다양한 시도와 노력이 이루어지고 있다. 강재와 콘크리트의

합성작용으로 높은 강성과 강도를 발휘할 수 있는 합성구조의 적용은 이에 대한 대표적인 시도 중 하나라고 볼 수 있다. 합성구조의 높은 단면성능을 활용하여 층고절감이나 터파기량 절감 등의 경제적인 효과를 볼 수 있어 합성구조에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 최근에는 기존의 합성구조 단면을 보다 합리적으로 구성하고 건축물의 층고절감 등을 목표로 철골보의 형상을 절단과 절곡 등의 공정을 통해 최적화시켜 적용하려는 시도가 다양하게 이루어지고 있다. 최근 가장 일반적으로 사용되는 합성보는 U형 합성보<sup>[1],[2]</sup>로 U형으로 절곡한 강재 내부에 콘크리트를 충전하여 강재와 콘크리트의 합성작용으로 단면성능을 향상시킴으로써 기존의 H형강 보에 비해 단면의 춤을 줄일 수 있고, 웨브의

Note.-Discussion open until October 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 15, 2021; revised March 20, 2021; approved on March 26, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-41-540-5777 Fax. +82-41-540-5778

E-mail. irchoi@hoseo.edu

국부좌굴 강도를 증가시켜 강재를 효율적으로 사용할 수 있다. 층고절감을 위한 목적으로 슬림플로어 합성보도 개발되고 있다<sup>[3],[4]</sup>. 슬림플로어 합성보는 비대칭 H형강보의 하부 플랜지나 H형강보의 웨브에 별도의 단턱을 설치하여 층이 깊은 데크 플레이트를 설치함으로써 기존의 H형강 보를 적용했을 경우보다 층고를 줄일 수 있으며, 층이 깊은 데크 플레이트를 적용함으로써 골조 평면 내에 작은보 설치를 최소화하여 경제성 확보가 가능하다.

합성보의 단면효율 향상과 층고절감을 위하여 슬림플로어 합성보인 슬림플로(Slimflo<sup>®</sup>) 합성보를 개발하였다. 슬림플로 합성보는 각형강관 상부에 일정간격으로 구멍을 뚫어 강관 내부에 콘크리트를 충전하여 기존의 U형 합성보와 유사하게 거동할 수 있도록 구성하였으며, 강관 하부에 강판을 용접하거나 강관에 구멍을 뚫은 후 ‘C’자 형태로 절곡하고 하부에 강판을 접합한 형태의 슬림플로어 합성보로도 적용할 수 있다(Fig. 1 참조).

본 연구에서는 제안한 슬림플로 합성보의 구조성능과 보-기둥 접합부의 내진성능을 평가하기 위하여 실험을 진행하였다. 슬림플로 합성보의 휨성능을 검증하기 위하여 전단연결재의 배치 방법을 변수로 실험체를 제작하여 2점 가력 휨 실험을 수행하였으며, 제안한 휨강도 평가식에 따라 휨내력을 계산하고 실험결과와 비교하였다. 또한, 슬림플로 합성보와 H형강 기둥의 보-기둥 접합부 구성을 위하여 엔드플레이트 타입의 브라켓 접합부를 제안하였으며, 반복가력실험을 통해 접합부의 회전성능을 검증하였다.

## 2. 휨강도 실험

### 2.1 슬림플로 합성보 단면 상세

Fig. 1은 제안한 슬림플로 합성보의 단면 구성을 나타낸다. 일반적인 H형강을 사용한 슬림플로어 합성보 대비 횡좌굴 강도 및 약축 휨 강성을 향상시키기 위하여 박스형 단면

의 상부 콘크리트 타설 홀이 있는 튜브 형태로 제작하였다. 여기서는 기존의 각형강관 단면을 사용하는 대신에 강관을 ‘C’자로 절곡하여 각형강관과 유사한 형태로 하부 강판 위에 필릿용접하여 제작하였다. 슬림플로 합성보의 하부 강판 위에는 층이 깊은 데크 플레이트(층 250 mm)를 양쪽으로 설치한다. 이때 데크 플레이트 상부 토핑 콘크리트 두께가 얇기 때문에 일반적인 방법으로 ‘C’ 강관 상부에 스티드 앵커를 설치하기에는 콘크리트 슬래브의 두께가 부족하여 설치에 어려움이 있다. 따라서, 스티드 앵커의 설치위치를 변경하거나 철근을 관통하는 방식으로 전단연결재를 설치하여 합성거동 효과를 파악하고자 휨실험을 계획하였다.

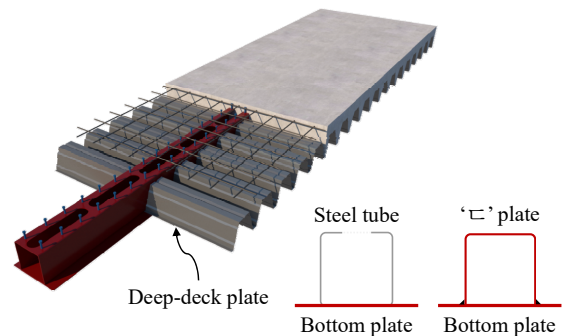


Fig. 1. Slimflo<sup>®</sup> composite beam

### 2.2 실험계획

Table 1과 같이 슬림플로 합성보의 휨성능 평가를 위한 실험체는 2개로 구성하였다. 주요 실험변수는 전단연결재의 배치 방법으로 스티드 앵커를 각형단면 상부의 좌우측에 배치하는 방법(SF-F-S)과 이와 유사하게 철근을 관통하는 방법(SF-F-R)으로 배치하였다.

슬림플로 합성보는 6 mm 두께의 SM355 강판의 상부에 100×500 사이즈의 타원형 홀을 600 mm 간격으로 배치하여 절단한 후 C-300×300 단면으로 절곡하여 제작하고 하부의 6 mm 두께의 폭 500 mm의 SM355 강판에 필릿용접하여 제작하였다(Fig. 2 참조). 합성보의 하부 플레이트에는 슬래

Table 1. Summary of test specimens

Specimen	Slimflo beam		Shear connector	Topping concrete
	Section	Hole		
SF-F-S	C-300×300×6 PL-500×6 (SM355)	100×500@600	Top: stud, 2-φ16@200 (HS1) Bottom: stud, 2-φ16@300 (HS1)	100 mm (27 MPa)
SF-F-R			Top: rebar, D16@200 (SD400) Bottom: stud, 2-φ16@300 (HS1)	

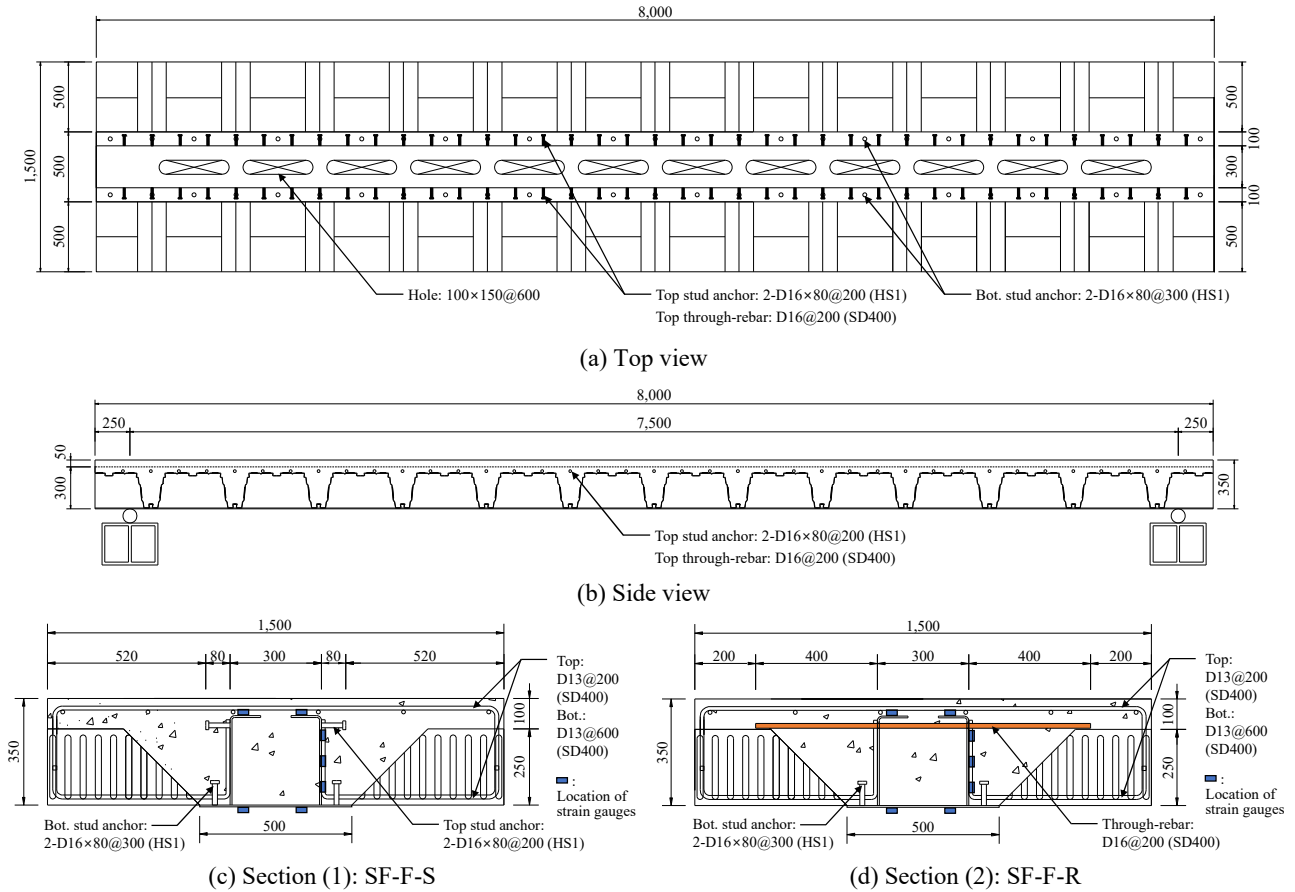


Fig. 2. Details of test specimens (Unit: mm)

브와의 일체 거동을 위하여 직경 16 mm, 높이 80 mm의 스티드 앵커(HS1)를 300 mm 간격으로 설치하였으며, SF-F-S 실험체는 합성보의 상부 웹면에 직경 16 mm, 길이 80 mm의 스티드 앵커(HS1)를 웹면에 수직하게 200 mm 간격으로 설치하였다. SF-F-R 실험체는 스티드 앵커 대신에 직경 16 mm, 길이 1 m의 철근(SD400)을 웹 상부면에 위치한 20 mm 직경의 홀을 관통하도록 설치하여 완전합성거동을 하도록 설계하였다.

슬림플로 합성보의 하부 플레이트에는 춤 250 mm, 폭 600 mm의 춤이 깊은 데크를 좌우측에 대칭되도록 설치하였다. 따라서, 콘크리트 타설 후 실험체의 전체 높이는 350 mm, 폭은 1.5 m이며, 길이는 8 m로 제작하였다(Fig. 2(a) 참조). 슬래브 상부는 온도철근 D13@200으로 배근하였다.

Table 2는 실험체에 사용된 재료의 소재 인장시험 결과의 평균값을 나타낸다. 슬림플로 합성보 실험체에 사용된 강판은 모두 6 mm 두께의 SM355 강종으로 KS B 0801에 따라 5호 시험편으로 3개를 제작하여 시험을 진행하였다. 실험체에 사용된 6 mm 강판의 실측 두께는 6.05 mm로 항

복강도와 인장강도는 각각 419.0 MPa, 542.9 MPa로 나타났다. 연신율은 19.6%로 나타났다. 휨실험체에 사용된 철근은 모두 SD400 철근으로 직경 13 mm 철근의 항복강도와 인장강도는 각각 469.5 MPa와 599.8 MPa이었으며, 직경 16 mm 철근의 항복강도와 인장강도는 각각 449.1 MPa와 632.2 MPa이었다. 실험체에 사용된 콘크리트는 설계기준강도( $f_{ck}$ )는 27 MPa로 KS F 2405에 따라 시험한 28일 재령의 공시체 3개의 평균 압축강도는 47.3 MPa로 설계기준강도를 크게 상회하는 것으로 나타났다.

Table 2. Material properties of bending test specimens

Material	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Elongation (%)
SM355-6T	6.0	419.0	542.9	19.6
Rebar	D13	469.5	599.8	-
	D16	449.1	632.2	-
Concrete strength		$f_{ck} = 47.3$ MPa		

Fig. 3는 실험체의 실험 셋업 및 계측기 설치 위치를 보여 준다. 실험은 포스코 강구조실험동에서 10,000 kN의 UTM을 사용하여 수행하였다. 하중하력은 변위제어방식을 적용하여 0.05 mm/s의 속도로 단조가력하였으며, 실험체 총 길이는 8 m로 단순지지된 양단부 지점간의 거리는 7.5 m이다. 실험체의 중앙부에 가력보를 두어 실험체를 재하하였으며, 가력점 사이의 간격은 1,200 mm로 합성보의 중앙에서 각각 600 mm 떨어진 지점에서 2점 가력하여 중앙부의 순수 휨모멘트 작용 구간을 중심으로 관측하였다. 양측 가력점 하부와 실험체 중앙부에 수직 변위계를 설치하여 하중가력에 따른 실험체의 처짐량과 전체적인 거동을 계측하였으며, 실험체 단부에 수평 변위계를 설치하여 콘크리트와 강재의 슬립량을 계측하였다. 콘크리트의 압괴, 하부 플랜지의 인장, 웨브의 좌굴 등 국부적인 변형을 분석하기 위하여 변형률 게이지를 부착하였다.

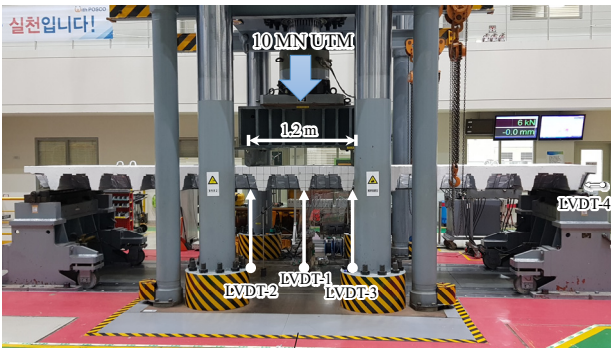


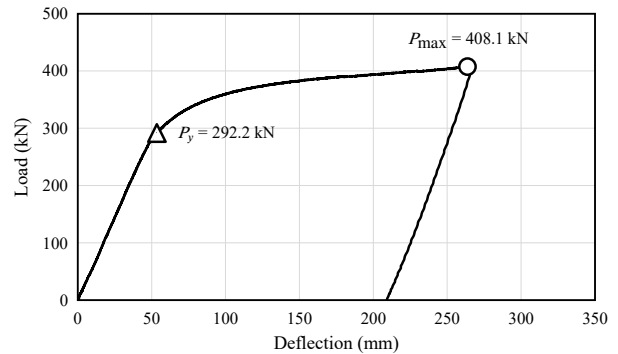
Fig. 3. Test set-up for bending test

## 2.3 실험결과

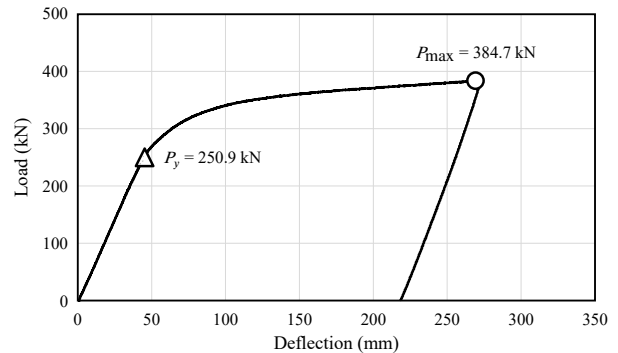
### 2.3.1 하중-변위 관계

전단연결재 설치 위치 및 종류에 따른 슬림플로 합성보의 휨성능을 평가하기 위하여 스티드 앵커와 관통철근을 배근한 상세를 적용한 실험체에 대한 휨실험 결과를 비교하였다. 각 실험체별 하중-변위 관계는 Fig. 4에 나타내었으며, Table 3에 실험체의 초기강성( $K_i$ ), 항복강도( $P_y$ ), 항복변위( $\delta_y$ ), 최대하중( $P_{max}$ ), 최대변위( $\delta_{max}$ )를 나타내었다. 실험체의 항복점은 슬림플로 합성보의 하부 강판에 부착한 변형률 게이지가 항복변형률에 도달하는 시점으로 정의하였다. 실험체의 초기강성( $K_i$ )은 원점과 항복점을 연결한 직선의 기울기로 산정하였다. 두 실험체 모두 가력 초기에는 선형적인 거동을 보였으며 전단연결재의 종류에 관계없이 실험체의 초기강성은 각각 5.48 kN/mm와 5.59 kN/mm로 유사한

값을 보였다. 두 실험체의 항복하중은 전단연결재로 스티드 앵커를 사용한 SF-F-S 실험체에서는 292.2 kN, 관통철근을 사용한 SF-F-R 실험체에서는 250.9 kN으로 나타나 관통철근을 사용한 경우 스티드 앵커를 사용한 경우보다 14% 작은 값을 보였다. 또한 SF-F-S 실험체와 SF-F-R 실험체의 최대하중도 각각 408.1 kN과 384.7 kN으로 나타나 전단연결재로 관통철근을 사용한 경우 최대하중이 5.7% 정도 작은 값을 보였다. 이는 전단연결재로 관통철근을 사용한 경우 강관 웨브면의 상부에 직경 20 mm의 철근 관통홀을 설치하여 이에 따른 단면결손과 철근 관통부에서의 초기변형의 영향에 따른 것으로 판단된다.



(a) SF-F-S



(b) SF-F-R

Fig. 4. Load-displacement curve of test specimens

Table 3. Test results of bending test

Specimen	$K_i$ (kN/mm)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)
SF-F-S	5.48	292.2	53.3	408.1	263.4
SF-F-R	5.59	250.9	44.9	384.7	268.7

SF-F-S 실험체와 SF-F-R 실험체 모두 260 mm 변위까지 가력하였으나 강도저하는 발생하지 않았으며, 콘크리트



슬래브면에서의 파단도 발생하지 않아 실험을 종료하였다. Fig. 5는 실험종료 실험체들의 슬래브 측면 균열 패턴을 보여준다. Fig. 5에서 볼 수 있는 것과 같이 슬래브 상단이나 측면부의 압괴는 발생하지 않았다.

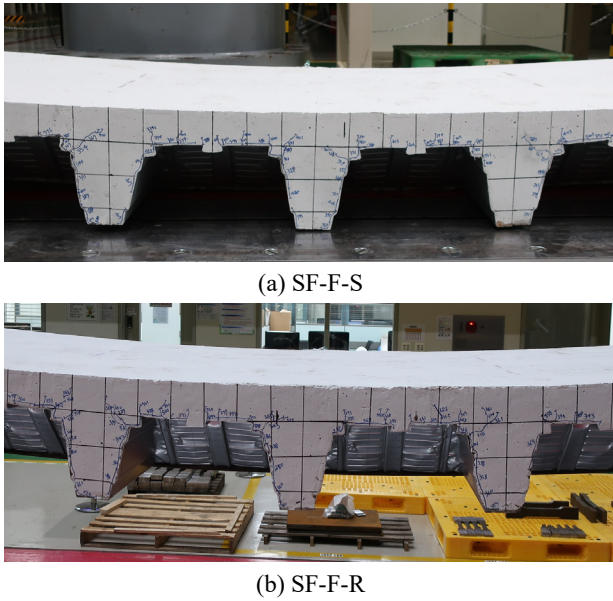


Fig. 5. Slab crack pattern of test specimens

### 2.3.2 합성보 단부 슬립

슬립플로 합성보의 강관부에 충전된 콘크리트의 슬립거동을 평가하기 위하여 변위계를 설치하여 슬립변형을 계측하였다. 실험결과 전단연결재의 종류와 상관없이 최대하중에서 계측된 슬립변형은 두 실험체 모두 0.01 mm로 슬립변형이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 슬립플로 합성보에서 콘크리트가 폐단면인 강관 내부에 충전되어 있고, 강관 상부에 관통홀이 뚫어져 있어 합성보의 휨거동시 슬립변형의 발생을 억제하는 것으로 볼 수 있으며, 강관의 하부 강판에 강재앵커를 설치하지 않더라도 슬립변형이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

### 2.3.3 단면의 변형률 분포

Fig. 6는 슬립플로 합성보 실험체의 강재 단면에 부착한 변형률 게이지로부터 측정된 변형률값을 하중단계별로 나타낸 것이다. 변형률 게이지는 실험체 강재단면의 상부플랜지, 웹, 하부플랜지에서 측정된 변형률값을 계측위치에 따라 하중단계별로 나누어 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있는 것과 같이 슬립플로 합성보 실험체는 전단연결재의 종류와 상관없이 모두 항복하중까지 변형률 분포가 선형적으로 분

포하며, 항복 이후에 하부 플랜지의 변형률이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 중립축의 위치는 강재단면 웹의 상부에 위치하는 것을 알 수 있다.

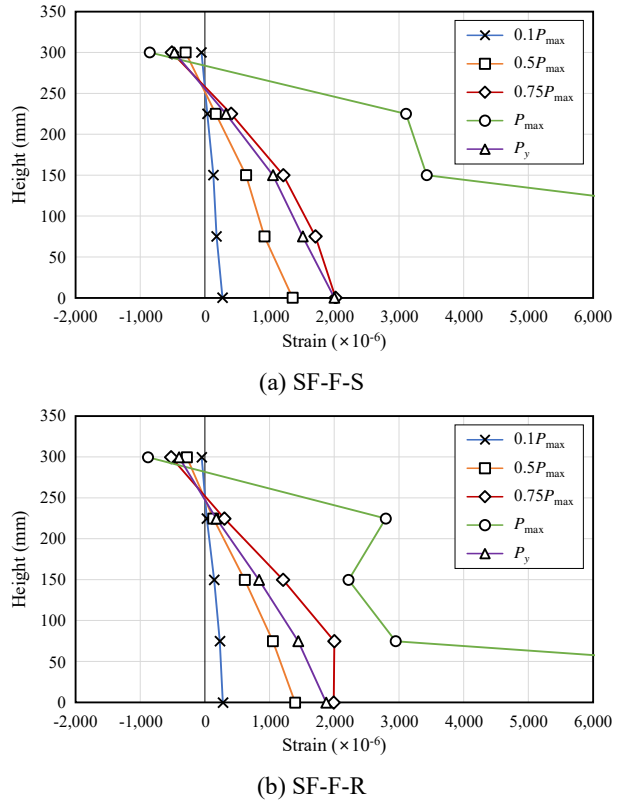


Fig. 6. Strain distribution of test specimens

### 2.4 휨내력 평가

슬립플로 합성보의 휨실험 결과에 대한 휨강도를 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00: 2019)<sup>5)</sup>의 소성응력분포법에 따라 평가하였다. 정모멘트 구간에서의 휨내력 평가시 콘크리트의 유효 압축응력  $0.85f_{ck}$ 가 압축구간에 균등하게 분포하는 것으로 가정하였으며, 콘크리트의 인장강도는 무시하고 강재의 항복강도  $f_y$ 는 강재단면의 인장과 압축구간에 균등하게 분포하는 것으로 가정하였다(Fig. 7 참조). 2.3.2절의 단부 슬립 계측 결과와 같이 슬립플로 합성보의 강재와 콘크리트 슬래브는 완전합성거동을 하며, 콘크리트 슬래브의 구속효과로 합성보의 국부좌굴이 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 슬립플로 합성보의 휨강도는 일반적인 노출형 합성보와 유사하게 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$M_n = C(d_1 + d_2) + P_y(d_3 - d_2) \quad (1)$$

여기서,  $M_n$ : 휨강도(kN·m)

$C$  :  $(0.85f_{ck}A_c, F_yA_s)$  중 최소값

$f_{ck}$  : 콘크리트 압축강도(MPa)

$A_c$  : 유효폭 내의 콘크리트 단면적(mm<sup>2</sup>)

$F_y$  : 강재의 항복강도(MPa)

$A_s$  : 강재의 단면적(mm<sup>2</sup>)

$P_y$  : 강재단면의 인장강도,  $P_y = F_yA_s$  (N)

$d_1$  : 콘크리트의 압축력  $C$ 의 중심으로부터 강재단면의 상단까지 거리(mm)

$d_2$  : 강재단면의 압축력 중심으로부터 강재단면의 상단까지 거리(mm), 강재단면에 압축력이 없는 경우  $d_2 = 0$

$d_3$  :  $P_y$ 가 작용하는 강재단면의 중심으로부터 강재단면의 상단까지 거리(mm)

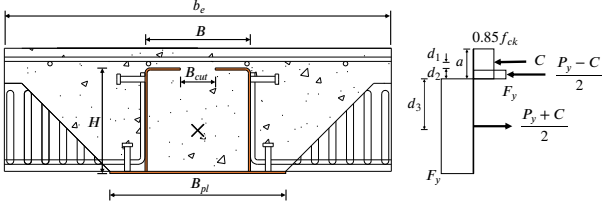


Fig. 7. Stress distribution in Slimflo composite beam section

식 (1)에 Table 2의 재료시험 결과를 반영하여 계산한 휨강도( $M_n$ )를 실험체의 최대휨모멘트( $M_{test}$ )와 비교하여 Table 4에 나타내었다. 여기서, 실험체의 최대휨모멘트는 가력 하중에 의해 실험체의 중앙 구간에서 작용하는 휨모멘트로 계산하여 나타내었으며, 실험체의 자중으로 인한 휨모멘트를 추가하여 계산하였다. Table 4에서 볼 수 있는 것과 같이 슬림플로 합성보의 최대휨모멘트에 대한 휨강도 비( $M_{test}/M_n$ )는 전단연결재로 스티드 앵커를 적용한 SF-F-S 실험체의 경우 1.06, 관통철근을 사용한 SF-F-R 실험체의 경우 1.04로 콘크리트 슬래브의 재료강도가 설계강도를 초과하여 압축대가 좁은 면적에서 형성됨에도 불구하고 전단연결재의 종류와 관계없이 건축물 강구조 설계기준의 소성응력분포법을 적용하여 휨강도를 안전측으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

Table 5. Summary of test specimens

Specimen	Slimflo beam		Column	Slab concrete
	End	Center		
SF-J-01	H-300×300×10×15 (SM355)	□-300×300×6	H-400×400×13×21 (SM355)	120 mm (27 MPa)
SF-J-02		PL-500×9 (SM355)		

Table 4. Comparison of calculated bending moment strength with test results

Specimen	$M_{test}$ (kN·m)	$M_n$ (kN·m)	$M_{test}/M_n$
SF-F-S	697.3	657.3	1.06
SF-F-R	680.8	657.3	1.04

### 3. 보-기둥 접합부 반복하중 실험

#### 3.1 실험계획

본 연구에서 제안한 슬림플로 합성보 접합부의 구조성능을 검증하기 위하여 브라켓 타입의 보-기둥 접합부 실험체를 구성하였다. 실험체는 동일한 상세의 접합부 실험체 2개로 제작하였다. 실험체의 구성은 Table 5와 같으며, 접합부 상세는 Fig. 8에 나타내었다.

보-기둥 접합부 실험체의 기둥은 H-400×400×13×21 (SM355)를 사용하였다. 기둥의 길이는 양 단부 엔드플레이트를 포함하여 2,000 mm로 제작하였으며, 기둥의 양단에 각각 길이 750 mm의 단부 핀 지그를 연결하였다(Fig. 8 참조). 기둥의 중앙부에는 H형강 브라켓으로 H-300×300×10×15(SM355)를 완전용입용접(CJP)하여 접합하였다. 접합부 패널존에는 H형강 보 플랜지와 동일한 두께의 수평 스티프너를 설치하였으며, 패널존은 PL-9×300×220(SM355) 판재로 보강하였다. 슬림플로 합성보는 단부 H형강 브라켓과 접합하기 위하여 두께 20 mm의 엔드플레이트(PL-350×350×20)를 사용하여 브라켓과 동일한 사이즈의 H형강(H-300×300×10×15, SM355)과 완전용입용접(CJP)하여 접합하였다. 이때, 슬림플로 합성보의 하부 강판은 층이 깊은 데크 플레이트를 거치시키는 역할을 하므로 브라켓 부분까지 이를 연장하였으며, H형강 하부 플랜지와 필릿용접하여 제작하였다. 슬림플로 합성보의 상부 플랜지의 두께는 6 mm로 브라켓의 플랜지 두께 15 mm와 단차가 발생하므로 폭 250 mm, 두께 9 mm 강판(PL-250×300×9, SM355)을 강판 상부 플랜

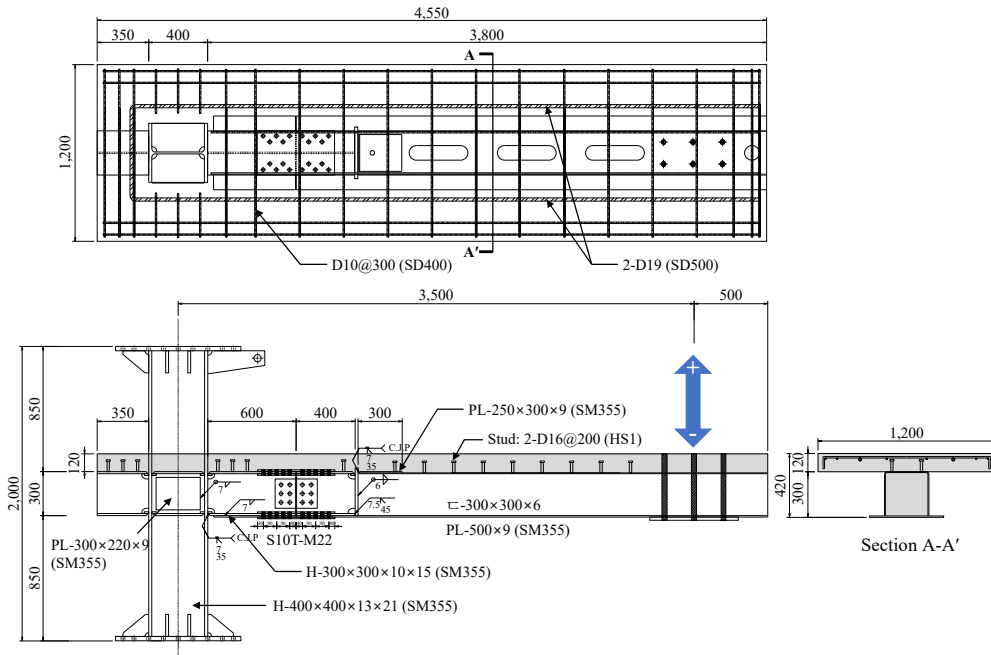


Fig. 8. Specimen details of column-beam joint tests (Unit: mm)

지에 300 mm 길이로 필릿용접하여 부착하였다(Fig. 8 참조). 최종적으로 기둥의 보 브라켓과 슬림플로 합성보 단부는 고장력볼트(S10T-M22)로 체결하여 접합하였다.

접합부 실험체의 슬래브는 슬림플로 합성보와 단부 H형강 브라켓 이음부의 거동을 명확히 파악하기 위하여 휨실험과 다르게 보 플랜지에만 120 mm 두께의 콘크리트를 타설하여 제작했다. 슬래브에는 SD400 D10 철근을 300 mm 간격으로 슬래브의 상부에 배근하였으며, 부모멘트에 대한 인장 보강근으로 2-D19, SD500 철근을 설치했다. 슬래브 콘크리트는 기둥의 반대편으로도 350 mm 길이로 연장하여 타설했으며 전체 슬래브 폭은 1.2 m, 길이 4.55 m로 제작하였다.

Table 6는 실험체에 사용된 재료의 소재시험 결과를 나타낸다. 실험체에 사용된 강종은 모두 SM355로 KS B 0801에 따라 1A와 5호 시험편으로 각각 3개씩 제작하였다. 슬림플로 합성보에 사용된 두께 6 mm의 강판은 휨실험에 사용된 재료와 동일하며, 하부 플랜지에 사용된 두께 9 mm의 SM355 강판의 항복강도는 415.0 MPa, 인장강도는 542.7 MPa이고, 연신율은 25.3 %였다. H형강 보 브라켓에 사용된 10 mm 두께의 웨브는 항복강도 407.0 MPa, 인장강도는 563.1 MPa, 연신율은 22.7 %였으며, 15 mm 두께의 플랜지는 항복강도 388.0 MPa, 인장강도는 559.2 MPa, 연신율은 26.4 %로 웨브의 재료강도보다 약간 작은 값을 나타내었다. 기둥에 사용된 13 mm 두께의 웨브는 항복강도 419.3 MPa, 인장강도는

545.0 MPa, 연신율은 22.5 %이었으며, 21 mm 두께의 플랜지는 항복강도 402.7 MPa, 인장강도는 548.9 MPa, 연신율은 26.6 %이었다. 슬래브에 사용된 D10 철근(SD400)의 항복강도와 인장강도는 각각 433.0 MPa와 548.1 MPa였으며, D19 철근(SD400)의 항복강도와 인장강도는 각각 356.5 MPa와 528.5 MPa로 항복강도가 기준강도보다 작은 값을 나타내었다. 슬래브에 타설한 콘크리트의 압축강도( $f_c$ )는 40 MPa로 설계기준강도인 27 MPa보다 높은 값을 나타내었다.

Table 6. Material properties of column-beam specimens

Material	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Elongation (%)
SM355-6T	6.0	419.0	542.9	19.6
SM355-9T	9.0	415.0	542.7	25.3
SM355-10T	9.7	407.0	563.1	22.7
SM355-15T	15.0	388.0	559.2	26.4
SM355-13T	12.9	419.3	545.0	22.5
SM355-21T	21.1	402.7	548.9	26.6
Rebar	D10	433.0	548.1	-
	D19	356.5	528.5	-
Concrete strength		$f_c' = 40.0$ MPa		



Fig. 9은 실험 세팅과 계측기 설치위치를 보여준다. 실험에는 3,000 kN 용량의 actuator가 사용되었으며, 접합부 반복하중 실험은 T형 접합부의 외팔보 끝단에 수직하중을 반복하여 재하하는 방식으로 진행되었다. 기둥 상하부 수평반력 간 유효길이와 기둥 중심축에서부터 가력부까지의 길이는 모두 3.5m이고, 기둥면에서부터 가력부까지의 순길이는 3.3 m이다. 실험 중 보의 횡좌굴을 방지하기 위하여 횡지지를 설치하였다(Fig. 9 참조). 하중재하 방법은 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00: 2019)에 따라 보 회전각 0.375 %, 0.5 %, 0.75 %를 각각 6 사이클씩 반복가력하고, 1.0 %를 4 사이클, 1.5 %, 2.0 %, 3.0 %, 4.0 %, 5.0 %, 6.0 %는 2 사이클씩 반복가력하였다. 보 가력부의 변위와 실험체의 강체변형, 접합부 패널의 전단변형 등을 계측하기 위하여 LVDT를 설치하였으며, 강재의 국부적인 변형을 분석하기 위하여 변형률 게이지를 부착하였다.

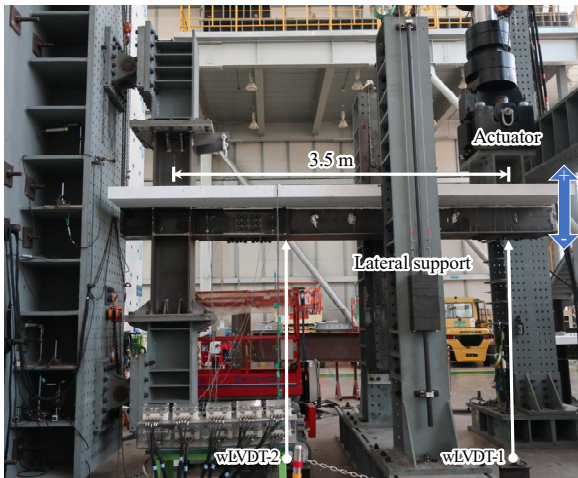


Fig. 9. Test Set-up for beam-column joint tests

3.2 실험결과

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 접합부 실험체의 모멘트-회전각 관계와 파괴양상을 나타낸다. Table 7은 실험결과를 요약하여 정리한 것이다. 여기서, 접합부에 작용하는 휨모멘트값은 기둥면에서의 휨모멘트값으로 계산하여 나타내었다. 실험결과 동일한 상재를 사용한 두 실험체 모두 유사한 거동 특성을 보였으며, 보 단부에 뚜렷한 소성힌지가 발생하며 우수한 변형능력을 나타냈다.

SF-J-01 실험체는 회전각 0.75 %에서 슬래브와 기둥 접합면, 슬래브 중앙부에서 미세균열이 발생하기 시작하였다. 이후, 회전각 1 %에서 슬래브 균열 발생이 증가하였으며, 회

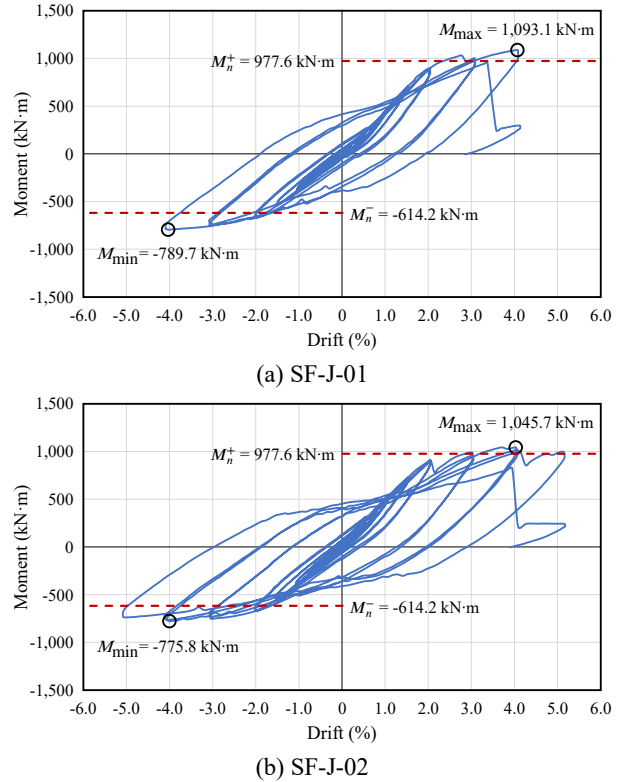


Fig. 10. Moment-story drift relationships of test specimens

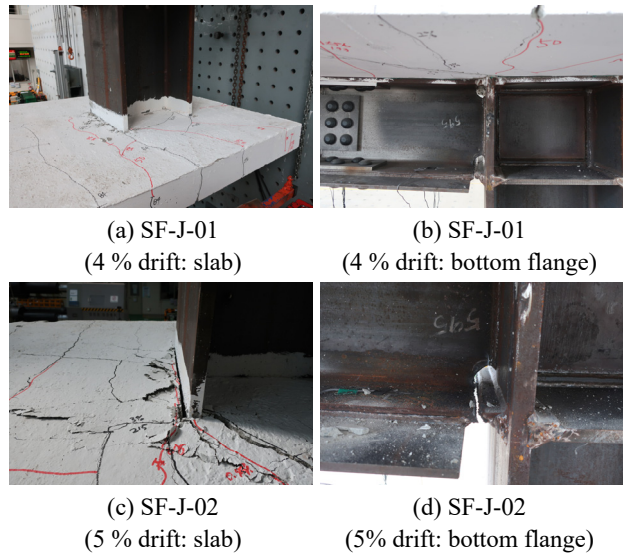


Fig. 11. Failure modes of test specimens

Table 7. Summary of beam-column joint test results

Specimen	Test				Capacity	
	$M_{max}^{(+)}$ (kN·m)	$\theta_{max}$ (rad.)	$M_{min}^{(-)}$ (kN·m)	$\theta_{min}$ (rad.)	$M_n^{(+)}$ (kN·m)	$M_n^{(-)}$ (kN·m)
SF-J-01	1,093.1	4.1	-789.7	4.0	977.6	-614.2
SF-J-02	1,045.7	5.1	-775.8	5.0		



전각 1.5 %에서 슬래브 측면에서 발생한 균열이 슬래브 하부로 진행되었다. 회전각 2 %에서 슬래브 상부에 길이방향으로 수평 균열이 발생하였다. 회전각 4 % 첫 번째 사이클에서 슬래브 하부 기둥면에서 다수의 균열이 발생하였고, 이후 H형강 브라켓 하부플랜지 용접면에서 파단이 발생하여 실험을 종료하였다(Fig. 11(b) 참조).

SF-J-02 실험체도 SF-J-01 실험체와 유사하게 회전각 0.75 %에서 슬래브와 기둥 접합면, 슬래브 상부에서 미세균열이 발생하기 시작하였다. 회전각 1 %에서 슬래브 측면으로 균열이 진전되었으며, 회전각 2 %에서 슬래브 측면과 슬래브 하부에서 균열이 다수 발생했다. 회전각 3 %에서 볼트 접합부의 미끄러지는 소리와 함께 일시적으로 하중이 감소하였고, 기둥과 슬래브 접합면 사이에서 균열이 심화되었다. 이후 회전각 4 %에서 볼트 접합부에서 지속적으로 미끄러지는 소리와 하중이 감소했으며, 슬래브 하단에 다수의 균열이 발생하여 일부 콘크리트가 탈락되었다. 회전각 5 % 첫 번째 사이클에서 슬래브와 기둥 접합면의 콘크리트가 압괴되었고, 두 번째 사이클에서 H형강 브라켓 하부플랜지 용접면에서 파단이 발생하며 실험을 종료하였다(Fig. 11(d) 참조).

### 3.3 실험결과 분석

Table 7에 나타난 것과 같이 제안한 슬림플로 합성보의 접합부 회전성능은 합성중간모멘트골조(IMF) 요구성능인 3 %를 초과하여 안정적인 거동을 보였으며 각각 4 %와 5 %의 회전성능을 보였다. 슬림플로 합성보 접합부의 단부 상

세는 일반적인 H형강 노출형 합성보와 동일하며, 단부에서 H형강 접합부의 정모멘트와 부모멘트 휨성능  $M_n^{(+)}$ 와  $M_n^{(-)}$ 는 Table 7에 나타난 것과 같이 각각 977.6 kN·m와 -614.2 kN·m로, 콘크리트 슬래브의 압축강도가 설계강도 대비 크게 증가하여 접합부 단부에서의 정모멘트 휨성능이 부모멘트에 비해 크게 증가한 값을 나타내었다. 따라서, SF-J-01 실험체의 최대 정모멘트( $M_{max}^{(+)}$ )와 부모멘트( $M_{min}^{(-)}$ ) 휨강도는 각각 1,093.1 kN·m와 -789.7 kN·m로 휨성능 대비 1.12배와 1.29배 큰 값을 나타내었다. SF-J-02 실험체의 경우에도 실험결과 최대 정모멘트와 부모멘트 휨강도는 각각 1,045.7 kN·m와 -775.8 kN·m로 휨성능 대비 1.07배와 1.26배 큰 값을 나타내었다.

Fig. 12는 슬림플로 합성보 접합부 기둥면으로부터의 거리에 따른 접합부의 정모멘트와 부모멘트 휨성능을 실험체에 작용하는 휨강도와 비교하여 나타난 것이다. Fig. 12에서 볼 수 있는 것과 같이 단부 H형강 브라켓 부분까지 춤이 깊은 테크 플레이트 설치를 위해 설치한 하부 강판이 H형강 보의 하부 플랜지와 필릿용접하여 연장됨에 따라 접합부 기둥면의 용접부를 제외한 단부 연장부까지 휨성능을 급격히 증가시켜 소성변형이 보 브라켓 용접부 쪽으로 집중되는 것을 볼 수 있다. 다만, 전단지연효과로 인하여 실제 접합부의 휨성능은 Fig. 12에 제시한 것보다 작아질 수 있다. 따라서, 제안한 접합부의 회전성능을 향상시키기 위하여 H형강 브라켓 보 부재의 하부에 하부 강판을 설치하는 경우 단속용접으로 접합하여 접합부 단부의 휨성능을 과도하게 증가시키는 것을 방지할 필요가 있다. 또한, 슬림플로 단면과 단부

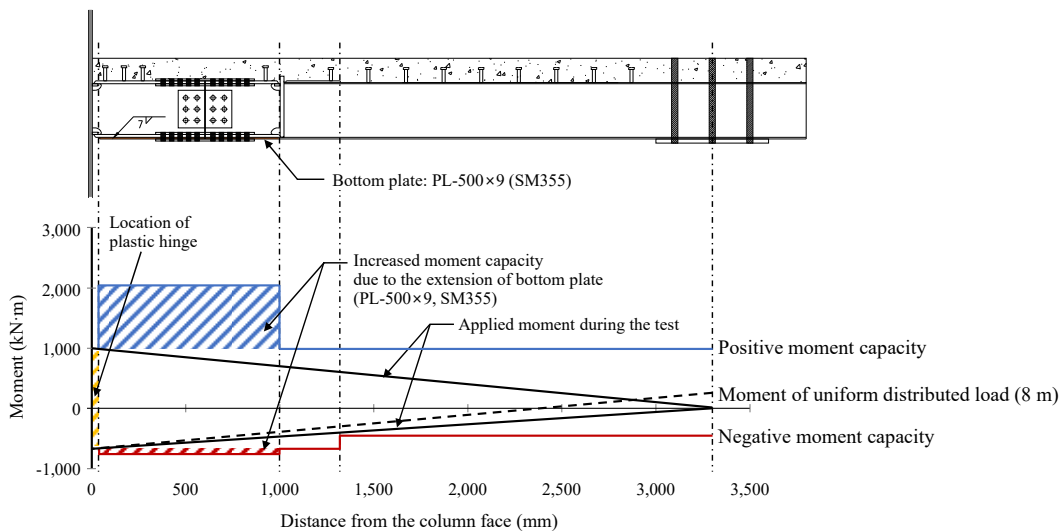


Fig. 12. Moment capacity and applied moment of test specimen

H형강 브라켓 단면의 이음부의 경우 이음부에 작용하는 휨 모멘트에 따라 접합부를 설계하는 것이 필요하며, 일반적으로 실험조건이 아닌 설계조건에서는 등분포하중이 작용하므로 이음부에서의 파괴 가능성은 상대적으로 더 낮을 것으로 판단된다(Fig. 12 점선 참조).

#### 4. 결론

본 연구에서는 제안한 슬림플로 합성보의 구조성능과 보-기둥 접합부의 내진성능을 평가하기 위하여 실험을 진행하였다. 슬림플로 합성보의 휨성능을 검증하기 위하여 전단연결재의 배치 방법을 변수로 2점 가력 휨실험을 진행하였으며, 제안한 휨강도 평가식에 따라 휨내력을 계산하고 실험 결과와 비교하였다. 또한, 슬림플로 합성보와 H형강 기둥의 보-기둥 접합부 구성을 위하여 엔드플레이트 타입의 브라켓 접합부를 제안하였으며, 반복가력실험을 통해 접합부의 회전성능을 검증하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전단연결재 설치 위치 및 종류에 따른 슬림플로 합성보의 휨성능을 평가 결과 스티드 앵커나 철근을 전단연결재로 사용한 실험체 모두 우수한 변형능력과 소성휨강도 이상의 휨성능을 발휘하였다.
- (2) 휨실험 결과 가력 초기에는 모두 선형적인 거동을 보였으며, 초기강성도 유사한 값을 보였다. 그러나 실험체의 항복하중과 최대하중은 전단연결재로 스티드 앵커를 사용한 경우가 관통철근을 사용한 경우보다 각각 14%와 5.7% 큰 값을 보였다.
- (3) 휨실험 결과 최대하중에 도달할 때까지 콘크리트 슬래브의 압괴나 강재 파단은 발생하지 않았으며, 합성보의 단부에서 측정할 슬립변형도 거의 발생하지 않아 강관 단면 내부에 스티드 앵커를 설치하지 않더라도 슬립변형이 발생하지 않음을 알 수 있다.
- (4) 슬림플로 합성보의 휨강도는 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00)의 소성응력분포법에 따라 산정할 수 있으며, 실험 결과 제안한 슬림플로 합성보의 휨강도는 계산한 소성휨성능 대비 4% - 6% 큰 값을 나타내었다.
- (5) 슬림플로 합성보의 보-기둥 접합부 상세로 단부 H형강 브라켓을 적용한 엔드플레이트 용접이음부 상세를 제안하였으며, 기둥면에는 일반적인 H형강 브라

켓 타입의 접합부와 동일하게 볼트접합하는 상세를 적용하였다. 접합부 반복가력실험 결과 동일한 상세의 2개의 실험체 모두 회전각 4%와 5%를 나타내어 합성중간모멘트골조(IMF)의 요구성능을 초과하여 만족하였으며, 실험체의 최대 휨강도는 휨성능 대비 1.07배 - 1.29배 큰 값을 나타내었다.

- (6) 슬림플로 합성보 접합부 단부 H형강 브라켓의 하부에 층이 깊은 데크 플레이트를 거치하기 위한 하부 강판을 설치하는 경우 접합부 단부의 휨성능을 과도하게 증가시키지 않기 위하여 단속용접으로 하부 강판을 접합하는 것이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 2019년 포스코와 유석철강, 제일테크노스의 연구비 지원에 의한 연구로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌(References)

- [1] Kim, S.-B., Kim, S.-M., Lee, C.-N., and Kim, S.-S. (2003) Development of Composite Beam System with Steel Framed, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.4, pp.99-106 (in Korean).
- [2] Kim, S.B., Kim, S.S., Lee, W.R., Kim, J.Y., Lee, S.B., Ryu, D.S., and Kim, D.H. (2012) Study on the Flexible Strength of U-Shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.5, pp.521-534 (in Korean).
- [3] Heo, B.W., Bae, K.W., and Moon, T.S. (2004) Flexural Capacity of the Encased (Slim Floor) Composite Beam with Deep Deck Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.235-245 (in Korean).
- [4] Lee, E.T., Lee, S.H., and Jang, B.R. (2008) Flexural Performance Evaluation of Semi-Slim Floor Composite Beams for Reduction of Story Height, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.1, pp.165-173 (in Korean).
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Steel Structures Design Standard* (KDS 41 31 00: 2019), Korea (in Korean).

---

**요 약**: 본 연구에서는 제안한 슬림플로 합성보의 구조성능과 보-기둥 접합부의 내진성능을 평가하기 위하여 실험을 진행하였다. 슬림플로 합성보의 휨성능을 검증하기 위하여 전단연결재의 배치 방법을 변수로 2점 가력 휨실험을 진행하였으며, 제안한 휨강도 평가식에 따라 휨내력을 계산하고 실험결과와 비교하였다. 또한, 슬림플로 합성보와 H형강 기둥의 보-기둥 접합부 구성을 위하여 엔드플레이트 타입의 브라켓 접합부를 제안하였으며, 반복가력실험을 통해 접합부의 회전성능을 검증하였다. 휨실험 결과 전단연결재의 종류에 상관 없이 실험체의 최대하중에 도달할 때 까지 콘크리트 슬래브의 압괴나 강재 파단은 발생하지 않았으며, 실험체의 휨강도는 건축물 강구조 설계기준 (KDS 41 31 00: 2019)의 소성응력분포법에 의해 안전측으로 평가할 수 있었다. 접합부 반복가력실험 결과 동일한 상세의 2개의 실험체 모두 회전각 4%와 5%를 나타내어 합성중간모멘트골조(IMF)의 요구성능을 초과하였으며, 실험체의 최대 휨강도는 휨성능 대비 1.07배 - 1.29배 큰 값을 나타내었다.

**핵심용어**: 강관 슬림플로어 합성보, 휨실험, 휨강도 평가, 보-기둥 접합부, 접합부 반복가력 실험

---