Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.37, No.5, pp.291-303, October, 2025

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2025.37.5.291

수평전단성능을 확보한 매입형 강-콘크리트 합성보의 휨성능 평가

이세정[1] · 홍준서[2] · 정경수[3] · 최성모[4] · 주현진[5*]

[1]박사과정, 서울시립대학교, 건축공학과, [2]석사과정, 한경국립대학교, 건축학과, [3]수석연구원, 철강솔루션연구그룹, 포스코, [4]교수, 서울시립대학교, 건축학부, [5]부교수, 한경국립대학교, 건축융합학부

Flexural Performance of Embedded Steel-Concrete Composite Girders with Horizontal Shear Resistance

Lee, Se-Jung[1], Hong, Junseo[2], Chung, Kyung Soo[3], Choi, Sung-Mo[4], Ju, Hyunjin[5*]

[1]Ph.D. Candidate, Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea
[2]Graduated Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea
[3]Senior Researcher, Steel Structure Research Group, Steel Solution Lab, POSCO Global R&D Center, Incheon, 21985, Korea
[4]Professor, Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea
[5]Associate Professor, School of Architecture and Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea

Abstract – This study investigates the flexural behavior and effective stiffness of the embedded steel-concrete composite girders so-called RCH(Reinforced Concrete with H-Steel) girder, which has the improved fire resistance and constructability compared to conventional exposed and encased composite girders. A total of four specimens with sufficient horizontal shear capacity were fabricated by varying the amount of shear connectors, and flexural tests were conducted using a single-point loading method under simple beam conditions. While the specimens with studs as shear connectors(FS-series) failed due to concrete crushing, the specimen without studs(WR-00) exhibited shear-splitting failure. Nevertheless, all specimens showed desirable flexural performance exceeding the nominal flexural strength. Strain data indicated that all specimens demonstrated stable behaviors close to full composite action under fleuxre. The effective stiffness of the RCH composite girders was evaluated and compared using the formulas from AISC 360-16, KDS 14 31 80(2025), and deflection-based empirical equations, showing good agreement with most of the predictions.

Keywords – Composite beams, Encased composite girders, Horizontal shear, Flexural behavior, Effective stiffness

1. 서 론

최근 국내에서는 OSC(Off-Site Construction) 탈현장 공법을 적용할 수 있는 대규모 물류창고와 대형 공장시설에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다[1]. 이러한 건축 수요는 한정된 토지의 효율적 활용을 위한 고층화와 장스팬 구조물의 필요성을 동반하며, 이에 따라 구조적 효율성과 빠른 공기를 동시에 만족시킬 수 있는 건설 공법이 요구되고 있다[2]-[4]. 이러한 구조물의 시공에는 프리캐스트 콘크리트 또는 (Precast Concrete, PC) 철골 구조 공법이 주로 활용되고 있다[5],[6]. PC 공법은 현장 작업을 최소화하고 공기 단축 및 품질 확보에 유리하다는 장점이 있으나, 최근 코로나19 팬데믹 및 우크라이나 전쟁과 같은 전 세계적 이슈로 인해 강재, 콘크리트, 시멘트 등 주요 건설 자재의 가격이 급등하면서 공사비 상승과 자재 수급 불안이라는 심각한 문제에 직면하고 있다.

이러한 흐름 속에서 건설업계는 기존 공법의 한계를 극복하고, 경제성과 시공성을 동시에 확보할 수 있는 대안적 구조 시스템을 적극 모색하고 있다. 그중 하나로 주목받고 있는 것이 바로 강재와 콘크리트를 조합한 합성보(Composite girder) 시스템이다[7]-[9]. 합성보는 강구조의 높은 강도와 인장 성능, 철근콘크리트 구조의

Note.-Discussion open until April 30, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 17, 2025; revised on August 28, 2025; approved on August 28, 2025.

*Corresponding author.
Tel. +82-31-670-5417 Fax. +82-31-670-5279
E-mail. hju@hknu.ac.kr

우수한 내화성과 내구성, 그리고 진동 저감 효과를 결합한 구조 형식으로, 장스팬 및 고층 구조물에 최적화된 해결 방안으로 평가받고 있다[10]-[12]. 특히 공사 기간 단축, 인건비 절감, 구조적 안정성 확보, 그리고 장기 내구성 향상 등의 효과를 통해 대규모 산업시설의 구조물에 대한 적용 가능성이 더욱 확대되고 있다[13],[14].

현재까지 국내외에서 적용되고 있는 주요 합성보 형식으로는 HyFo 합성보[15], TSC 합성보[16], U자형 합성보[17], S-beam[18] 및 노출형, 충전형 합성보 등이 있으며, 이들은 대부분 강재가 외부에 노출된 형태로, 내화성능을 확보하기 위한 추가 피복 공정이 필요해 경제성 측면에서 한계를 갖는다[19]. 이러한 문제를 해결하기 위해 Lee *et al.*[20]은 내화성과 시공성을 동시에 개선할 수 있는 RCH(Reinforced Concrete with H-Steel) 합성보를 개발하였다.

RCH 합성보는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 H형강 상부 플랜지에 수평 전단 저항을 위한 스터드를 배치하고, 하부 플랜지에는 J형 영구 강재 거푸집을 설치한 구조로, H형강과 거푸집 사이에는 철근 및 스터럽의 배근 간격을 조절하고 선조립 시 H 형강과 거푸집의 형상을 유지하기 위한 직사각형 단면의 보강판(plate)이 배치되어 있다. RCH 합성보는 공장에서 철근, 강재 거푸집, 보강판 등을 선조립한 후 현장에서 콘크리트를 타설하여 완공되며, 강재가 콘크리트에 매입되어 있기 때문에 일반적인 철골 구조에서 고려해야 하는 내화 피복이나 국부 좌굴과 같은 취약점을 효과적으로 보완할 수 있다. 또한, 부분 매입형 합성보로서 철근콘크리트 단면으로 인해 진동 제어 성능이 매우 우수하다.

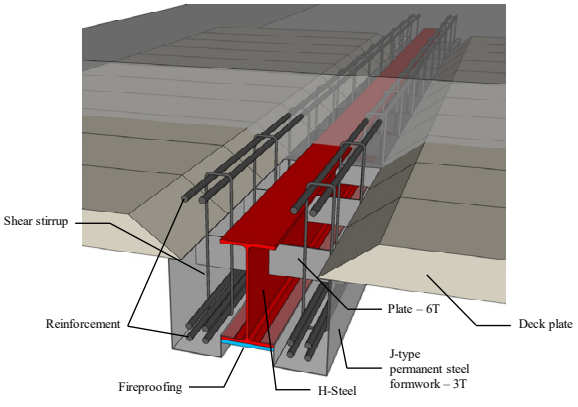


Fig. 1. RCH composite beam

한편, 합성보의 구조적 성능을 확보하기 위해서는 강재와 콘크리트 간의 부착 성능, 즉 수평 전단 저항이 중요한 역할을 한다[21]-[23]. 부재 간 부착 성능이 충분하지 않아 부분합성 상태로 거동하게 되면, 콘크리트와 강재는 서로 다른 중립축을 기준으로 독립적으로 변형하며 완전 합성거동 상태에 비해 구조적 성능이 저하될 수 있다[24].

이에 따라 이 연구에서는 수평 전단 성능을 확보한 RCH 합성보의 휨실험을 진행하여 구조성능을 규명하고자 하였다. 현행 설계기준에 따른 공칭 모멘트 강도뿐만 아니라 AISC 360-16[25], KDS 14 31 80(2025)[26], Lee[27]의 처짐 기반 유효단면 2차모멘트 산정식을 적용하여, RCH 합성보의 유효 휨강성을 평가하였다.

2. 실험계획

2.1 실험체 상세

Table 1은 이 연구에서 계획한 휨 실험체 4개의 수평전단력과 스터드 앵커의 양 및 스터럽의 기여분을 바탕으로 산정한 합성률을 나타낸 것이다. 이때, 보강판은 면외 방향의 휨거동이 지배적이므로 수평전단력에 저항하지 못하는 것으로 가정하였다. 요구되는 수평전단력은 KDS 14 31 80(2025)[26]에서 제시된 바와 같이 콘크리트 슬래브의 압축력 및 H형강의 인장력을 고려하여 식(1), 식 (2)와 같이 산정하였으며, 이 중 가장 작은

Table 1. Horizontal shear force and composite ratio in design

Specimen	Horizontal shear strength (V')			Amount of stud anchor	Composite ratio by stud anchors
	$V'_{concrete}$ (kN)	V'_{steel} (kN)	$\sum Q_n$ (kN)	$\frac{V'}{Q_n}$	η_{stud} (%)
FS-100	4,253	2,986	3,063.6	36	102.5
FS-85			2,553	30	85.4
FS-50			1,531.8	18	51.3
WR-00			0	0	0

값을 수평전단강도로 결정된다.

$$V'_{concrete} = 0.85 f_{ck} A_c \quad (1)$$

$$V'_{steel} = F_y A_s \quad (2)$$

여기서, V'는 정모멘트가 최대가 되는 단면과 모멘트가 0이 되는 단면 사이의 총수평전단력으로서 $V'_{concrete}$와 V'_{steel}은 각각 콘크리트 압괴와 강재단면의 인장항복에 따른 수평전단력이다. 또한, f_{ck}는 콘크리트 압축강도(N/mm^2), A_c는 유효폭 내의 슬래브 콘크리트의 단면적(mm^2), A_s는 강재 단면적(mm^2), F_y는 강재의 설계항복강도이다. KDS 14 31 80(2025)[26]에 의하면 요구수평전단력은 플랜지 상부에 설치되는 스터드 앵커에 의해 저항되어야 하며, 강재앵커의 공칭강도(V_{stud})는 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

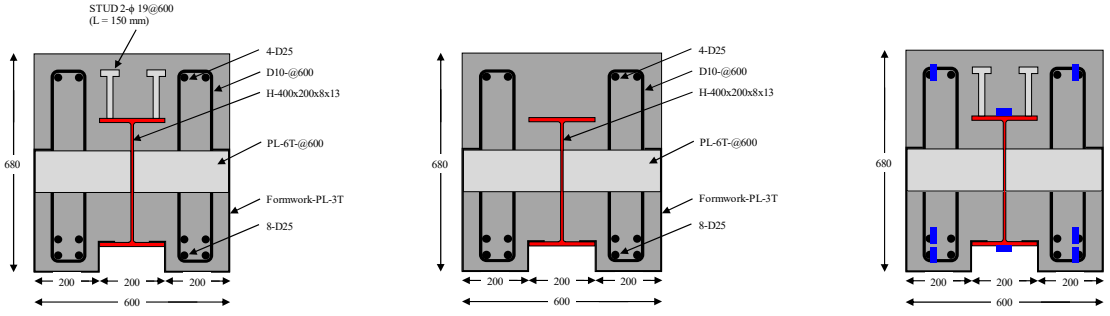
$$V_{stud} = \sum Q_n \quad (3)$$

$\sum Q_n$는 정모멘트가 최대가 되는 단면과 모멘트가 0이 되는 단면 사이의 강재 앵커 공칭강도의 합이다. 스터드 앵커의 공칭강도(Q_n)는 식 (4)와 같이 산정된다.

$$Q_n = 0.5 A_{sa} \sqrt{f_{ck}} E_c \le R_g R_p A_{sa} F_u \quad (4)$$

여기서, E_c는 콘크리트 탄성계수($=8500\sqrt[3]{f_{cm}}$), A_{sa}는 스터드앵커의 단면적(mm^2), F_u는 스터드앵커의 설계기준인장강도(N/mm^2), f_{cm}는 콘크리트의 평균 압축강도로서 f_{ck}가 40 MPa 이하면 f_{ck}+4 MPa, 60 MPa 이상이면 f_{ck}+6 MPa, f_{ck}가 그 사이면 직선보간으로 결정한다(KDS 14 20 00: 2021[28]). 또한, R_g와 R_p는 스터드 공칭강도의 감소계수로서 각각 스터드 앵커 그룹의 효과와 전단연결재 위치에 따른 효과를 고려하며, KDS 41 31 80(2025)[26]에 따라 골데크플레이트를 사용하지 않는 경우로 가정하여 각각 1.0과 0.75를 적용하였다. 일반적으로 설계 시 식 (1)과 식 (2)에 의해 결정된 요구수평전단을 스터드 앵커의 강도(Q_n)로 나누어 필요한 스터드의 개수를 결정한다. Table 1의 수평전단력 검토 및 실험체 계획에는 설계 강도를 고려하였으며, f_{ck}는 27 MPa, H형강, 철근, 그리고 스터드의 설계항복강도는 각각 355 MPa, 500 MPa, 그리고 400 MPa이다.

실험체는 T형보 상부 콘크리트 플랜지의 영향을 배제하고 콘크리트와 H형강의 순수한 합성 거동을 관찰하기 위해 Fig. 2와 같이 직사각형 단면으로 계획하였다. Fig. 2 및 Table 2는 4개의 RCH 합성보 실험체의 단면 상세 및 주요 변수를 제시한 것이다. 모든 실험체에



(a) FS-Series (b) WR-00 (c) Strain gauge

Fig. 2. Detail of specimens

Table 2. Detail of specimens

Specimen	Depth of topping concrete (mm)	H-steel section	Top reinforcement	Bottom reinforcement	Stirrup	Reinforced plate	Stud anchors
FS-100	200	400×200×8×13	4-D25	8-D25	D10@600	6T@600	2∅19@160
FS-85							2∅19@200
FS-50							2∅19@320
WR-00							-

는 H-400×200×8×13 형강이 사용되었으며, 스터드 앵커의 양을 변수로 계획하였다. 스터드 앵커는 H형강 상부 플랜지에 용접하여 부착하였다. 실험체 명칭 중 FS는 Flange Stud를 의미하며, FS-100, FS-85, FS-50에서 숫자는 각각 스터드 앵커의 양에 따라 산정된 콘크리트와 H형강의 합성률을 의미한다. 즉, FS-100는 식 (1) 및 식 (2)에 의해 산정된 요구 수평전단력을 모두 스터드 앵커에 의해 저항할 수 있도록 스터드 앵커의 양을 결정하여 설계한 실험체이며, FS-85와 FS-50은 각각 요구 수평전단력의 85 %와 50 %를 스터드 앵커가 저항할 수 있도록 설계한 실험체이다. 한편, WR-00 실험체는 보강판(plate)에 의한 복부 보강(Web Reinforced)을 의미하며, 00은 스터드 앵커에 의한 합성률이 0 %인 것을 나타낸다. WR-00 실험체에는 스터드 앵커가 설치되지 않았으나, 철근콘크리트 단면에서의 콘크리트와 스터럽으로 인해 일정한 수평전단 저항 성능을 기대할 수 있으며, 이에 대해서는 3.2절에서 자세히 다루었다.

FS 시리즈 실험체에는 직경 19 mm의 스터드 앵커가 2줄로 설치되었으며, 배치 간격은 FS-100, FS-85, FS-50 각각 160 mm. 200 mm, 320 mm이다. 스터럽과 보강판은 각각 D10 철근과 293×130×6(가로×세로×두께)의 강재 플레이트를 사용하였으며, 스터럽과 보강판의 간격은 600 mm로 동일하다. 또한, 길이방향으로 D25 철근을 상부 4개, 하부 8개 배치하였다. 실험체의 전체경간은 6,500 mm의 실대형 크기로 제작하였으며, 순경간 6,000 mm의 단순지지 조건으로 기준으로 실험을 수행하였다.

2.2 제작 및 재료

H형강 상부플랜지 계면에 스터드를 용접 설치한 후 J형 영구 강재 거푸집과 보강판을 H형강에 용접하여 구조체를 제작하였다. 이후 보강판에 스터럽을 가용접하였으며, 길이방향 철근을 배치하고 콘크리트를 타설하여 실험체 제작을 완료하였다.

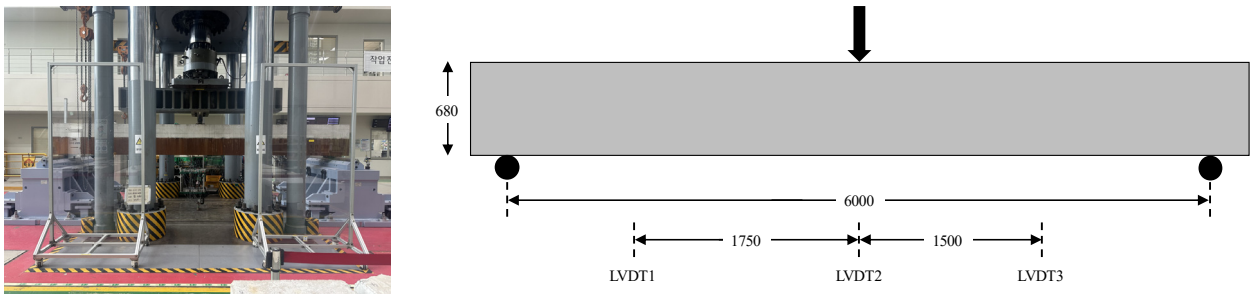
Table 3에는 실험체 제작에 사용된 콘크리트, 강재, 철근, 스터드의 재료시험을 통해 얻은 항복강도 및 극한강도를 정리하여 나타내었다. 콘크리트의 압축강도(f_{ck})는 41.7 MPa이며, SM355 강종의 RH형강의 항복강도(F_y)는 플랜지와 웨브에서 각각 303 MPa과 316 MPa이었다. 상하부의 길이방향 철근(D25) 및 스터럽(D10)의 항복강도(F_{yr}', F_{yr}, F_{yh})는 각각 519 MPa과 433 MPa로 측정되었으며, 스터드 앵커의 항복강도(F_u)는 337 MPa이다. 또한, 보강판 및 J형 영구 강재 거푸집으로 SS275 강종을 사용하였으며, 항복강도(F_y)는 각각 354 MPa과 272 MPa로 측정되었다.

2.3 가력 및 계측

Fig. 3는 실험 환경과 가력조건을 나타낸 것이다. 가력은 1000 ton 용량의 만능시험기(UTM, Universal

Table 3. Material property

Type		Compression strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
Concrete		41.7	-	-
H-Steel	flange	-	399	560
	web	-	408	566
Plate		-	354	484
D25		-	515	652
D10		-	427	562.4
Stud anchor		-	337	452
Steel Form		-	272	348



(a) Test setup (b) Loading condition

Fig. 3. Test setup

testing machine)를 사용하여 수행되었으며, 0.04 mm/sec의 속도로 실험체 중앙부에 1점 가력하였다. 최대하중 도달 이후 속도를 0.02 mm/sec로 줄여 진행하였다. 최대하중 이후 최대하중의 80 % 수준까지 하중이 감소할 때 실험을 종료하였다.

Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 처짐 측정을 위한 LVDT(The linear variable differential transformer)는 실험체 중앙경간에 최대처짐을 측정하기 위해 1개소 설치되었으며,가력점에서 좌우로 1500 mm 떨어진 단면에 각각 1개소 씩 총 3개 설치하였다. 또한, Fig. 2(c)에 나타낸 바와 같이 휨거동을 분석하기 위해 실험체 중앙 단면에 변형률 게이지(Strain gauge)를 H형강 상·하부 플랜지에 각각 1개, 길이방향 철근 상·하부에 각각 2개와 4개 설치하였다.

3. 실험결과 분석

3.1 휨실험 결과

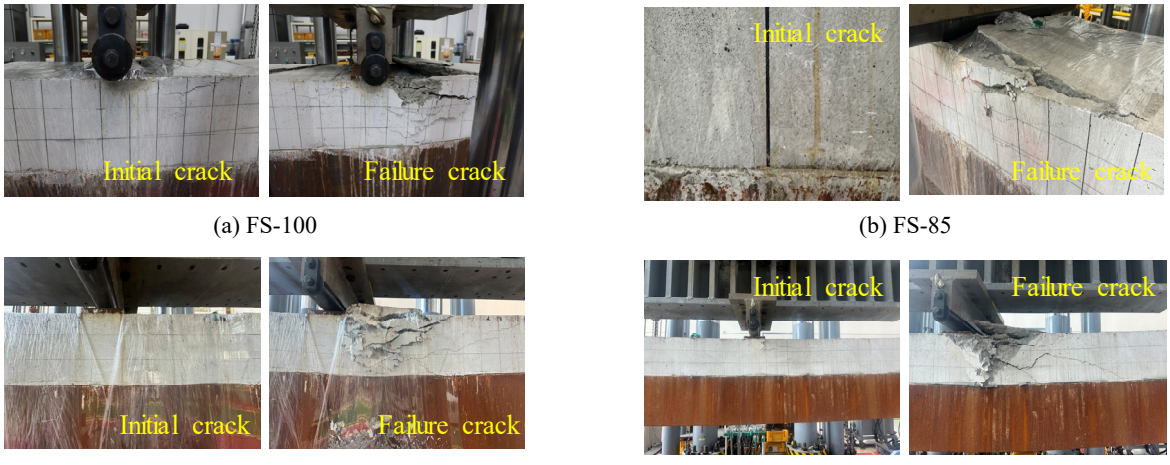
Fig. 4는 실험 중 관측된 사전 균열과 실험 종료 후 실험체 의 상태를 나타낸 것이다. FS 시리즈 3개 휨실험체 모두 중앙 경간 콘크리트 단면에서 초기 휨균열이 발생한 후, 압축대의 콘크리트 분쇄와 함께 휨 파괴되었다. J형 영구 강재 거푸집의 구조적 특성으로 인해 인장측 콘크리트 단면의 상세한 균열 양상은 확인하기 어려웠으나, J형 거푸집 상단의 콘크리트 표면에서 휨 균열이 관찰되었고, 이 균열은 점차 진행되어 가력지점의 콘크리트 분쇄 파괴로 이어졌다. WR-00 실험체에서는 J형 거푸집 상단 절곡 부위에서 약 30°–40° 각도의 대각균열이 관측되었으며, 이후 해당 균열을 따라 파괴가 진행되어 J형 영구 강재 거푸집 상부의 절곡부와 콘크리트 계면 사이에서 전단 부착 파괴(Shear splitting failure)가 발생하였다. 모든 실험체의 단면에서 콘크리트와 H형강 사이의 뚜렷한 미끌림은 관찰되지 않았으며, 이는 실험체가 모두 완전 합성거동한 것으로 판단된다.

Table 4. Flexural strength and neutral axis

Specimen	y_n (mm)	P_p (kN)	P_n (kN)	M_p (kN·m)	M_n (kN·m)
FS-100	283.3	1340.2	1,491.4	2010.3	2,237.1
FS-85	246.6		1,507.2		2,260.8
FS-50	234.5		1,641.4		2,462
WR-00	243.7		1,604.4		2,406.5

Fig. 5는 각 실험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이며, Table 4에는 변형률 데이터를 통한 중립축 깊이(y_n), 소성강도(P_p)과 최대하중(P_u), 소성모멘트 강도(M_p)와 최대 모멘트 강도(M_u)를 정리하여 나타내었다. 소성강도는 변형률적합법[26]에 기반하여 산정되었으며, 완전합성을 가정하였으며, J형 영구 강재 거푸집의 강도 기여분은 고려하지 않았다.

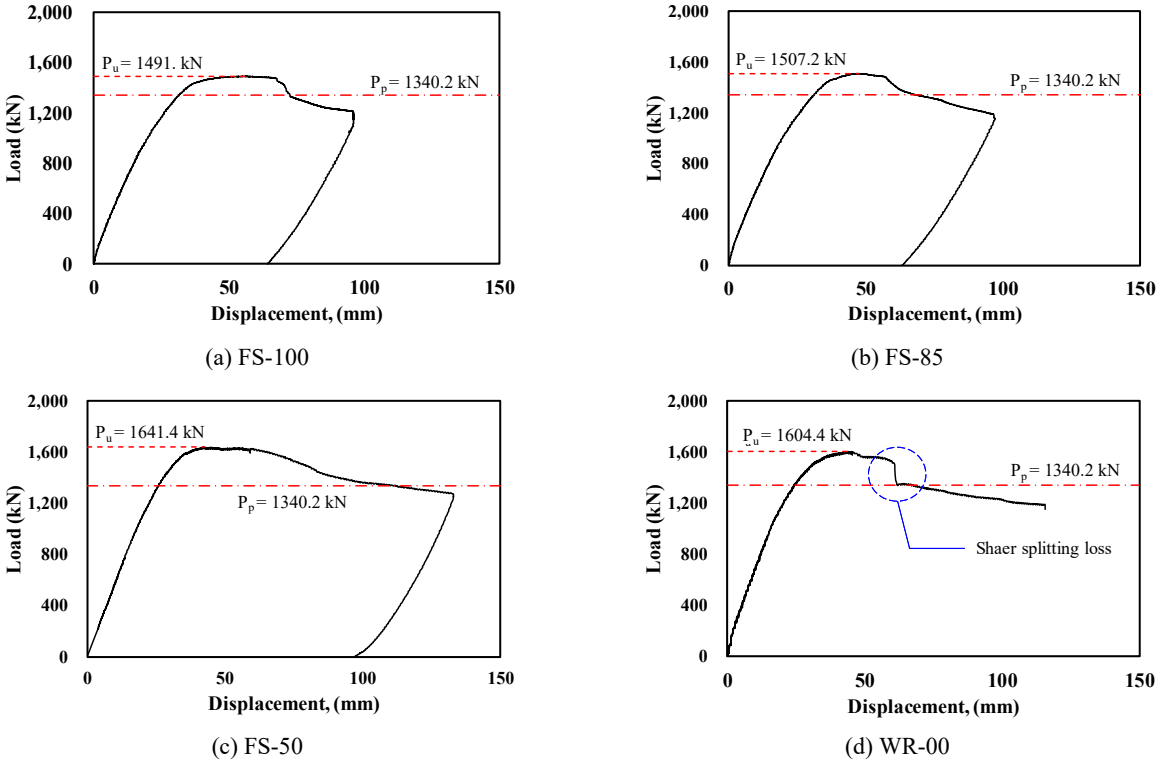
Table 4에는 변형률 데이터를 통한 중립축 깊이(y_n), 소성강도(P_p)과 최대하중(P_u), 소성모멘트 강도(M_p)와



(a) FS-100 (b) FS-85

(c) FS-50 (d) WR-00

Fig. 4. Cracking and failure mode



(a) FS-100 (b) FS-85

(c) FS-50 (d) WR-00

Fig. 5. Load-displacement curves

최대 모멘트 강도(M_u)를 정리하여 나타내었다. 모든 실험체는 예상 강도보다 높은 최대 하중을 기록하였고, 합성률이 가장 높은 FS-100 실험체는 오히려 실험체들 중 가장 낮은 1491.4 kN의 최대하중을 보였다. 반면, FS-50 실험체가 1641.4 kN으로 가장 높은 최대하중을 나타냈으며, WR-00 실험체와 FS-85 실험체는 각각 1604.4 kN, 1507.2 kN으로 확인되었다. 하중-변위 곡선에서 뚜렷한 균열 시작 시점을 확인하기 어려웠는데, 이는 보강판 및 스터럽의 합성효과로 인해 J형 영구 강재 거푸집과 콘크리트 사이의 부착력과 상대적으로 큰 H형강의 강성 때문인 것으로 판단된다. FS-100 실험체가 상대적으로 낮은 강도를 보인 것은 스터럽과 보강판으로 충분한 합성률을 확보할 수 있었으나 다수 배치된 스터드 앵커로 인해 압축력에 저항하는 콘크리트 단면적이 상대적으로 작았기 때문인 것으로 추정된다.

3.2 파괴모드 평가

Fig. 5(d)에 나타낸 바와 같이 WR-00실험체의 거동에서 최대 강도 도달 이후 하중이 급격히 떨어지는 구간을 관찰하였으며, 동시에 Fig. 4(d)의 대각균열을 통한 파괴양상을 관측하였다. 따라서, Weng *et al.*[29]은 전단마찰이론을 기반으로 제안한 매입형 합성보의 H형강 플랜지와 슬래브 콘크리트 사이의 계면에서 전달되는 수평전단력(V_h)에 저항하는 내부 전단 부착 저항력(V_{ss})산정식을 통해 파괴모드를 분류하였다. 내부 전단 부착 저항력은 스터드앵커, 스터럽에 의한 전단마찰, H형강 플랜지 측면의 콘크리트 단면, 그리고 H형강과 이를 둘러싼 콘크리트 계면 사이의 직접마찰의 합으로 제시되었다. 이에 따르면 매입형 합성부재의 내부 전단

Table 5. Comparison of horizontal shear force and failure modes

Specimen	V_{ss} (kN)	V_h (kN)	Estimated failure mode*	Observed failure mode*
FS-100	6910.7	5297.2	F	F
FS-85	6400.1		F	F
FS-50	5378.9		F	F
WR-00	4477.8		SS	SS

*F: Flexural failure, SS: Shear splitting failure

부착 저항력(V_{ss})이 수평전단력(V_h)보다 작을 경우, 합성보의 거동은 휨파괴(Flexural failure)가 아닌 전단 부착 파괴에 지배된다.

$$V_{ss} \geq V_h \tag{5}$$

즉, 식 (4)의 관계를 만족해야 하며, 이때, 수평전단력(V_h)과 내부 전단 부착 저항력(V_{ss})은 다음과 같이 결정된다.

$$V_h = \min(V_{h,c}, V_{h,t}) \tag{6a}$$

$$\text{where } V_{h,c} = 0.85 f_{ck} A_c + A_r' F_{yr}' \tag{6b}$$

$$V_{h,t} = F_y A_s + A_r F_{yr} \tag{6c}$$

$$V_{ss,1} = \mu_f A_{vf} F_{yh} + K_1 A_{ch} + N Q_n \tag{7}$$

$$V_{ss,2} = \mu_f A_{vf} F_{yh} + K_1 A_{ch} + f_s A_{fh} \tag{8}$$

여기서, 수평전단력(V_h) 콘크리트의 압축력과 H형강의 인장력에서 각각 길이방향 압축 및 인장 철근의 힘을 추가적으로 고려하여 결정하였다. 즉, $V_{h,c}$와 $V_{h,t}$는 각각 단면 내에서 압축력과 인장력에 의한 수평전단력이다. 또한, $V_{ss,1}$과 $V_{ss,2}$는 각각 스터드앵커가 있는 경우와 없는 경우에 대한 전단 부착 저항력이다. 따라서, 이 연구의 실험체 중 FS 시리즈는 식 (7)로, WR-00 실험체는 식 (8)로 수평전단력과 파괴모드를 평가하였다. 여기서, A'_r은 압축철근의 단면적, F_{yr}'은 압축철근의 항복강도, F_{yr}은 인장철근의 항복강도, μ_f는 전단마찰계수(콘크리트 계면 사이에서는 0.8 적용), A_{vf}는 전단평면에서 모든 횡방향 보강재의 면적, F_{yh}는 횡보강 보강재의 항복강도, K_1는 경험 상수(보통중량콘크리트에서 2.8 MPa로 가정), A_{ch}는 전단 마찰력에 저항하는 콘크리트의 면적 ($L' \times b'$), L'는 모멘트가 0인 단면과 최대 모멘트가 발생하는 단면 사이의 거리, 그리고 b'는 콘크리트 단면 전체 너비에서 H형강의 플랜지 너비를 제외한 값, N은 최대모멘트와 모멘트가 0인 지점 사이에 배치된 스터드 앵커의 개수, f_s는 콘크리트와 H 형강의 플랜지 사이의 결합 응력(bond stress)이다. 결합응력(f_s)은 식 (9)와 같이 결정된다.

$$f_s = 1.256 - 9.544\rho \tag{9}$$

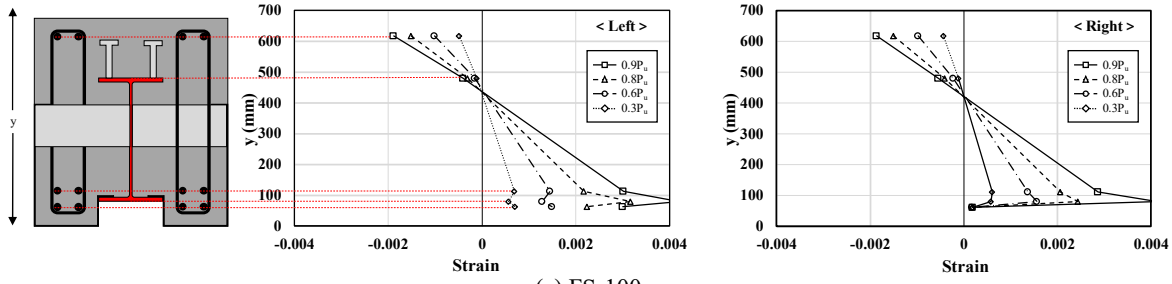
여기서 ρ는 총 단면적에 대한 H 형강의 단면 비율이다.

Table 5에 수평전단력과(V_h) 내부 전단 부착 저항력(V_{ss}) 산정 결과를 정리하였다. 수평전단력 산정에는 Table 3에 나타낸 재료시험을 통해 결정된 재료 물성치를 사용하였다. 평가 결과 FS 시리즈는 모두 휨 파괴가 지배적인 것으로 분석되었으며, WR-00 실험체는 전단 부착 파괴가 지배적인 것으로 나타났다. 다만, 모든 실험체는 휨강도에 안정적으로 도달하여 휨파괴되었으며, 스터드가 없는 WR-00 실험체에서는 휨파괴 이후 전단 부착 손실에 의한 거동을 나타내었다. 이는 RCH 내의 보강판과 강재 거푸집에 의한 구속효과 및 수평전단성능 기여분에 의해 이론 모델에 의해 평가된 것 보다 우수한 수평전단성능이 확보되었기 때문으로 추정된다. 또한, 철근콘크리트 단면 내의 스터럽은 스터드와 같이 합성보에서의 전단연결재로 간주할 수 있을 것이며, 압축력을 받는 콘크리트 전 단면이 아닌 H형강의 상부 플랜지 폭에 해당하는 콘크리트의 압축력을 고려하여 스터드의 양을 결정하는 것이 합리적일 수 있다. 추후 H 형강 상부 플랜지 상부의 단면 수평방향 수평전단력에 저항하는 전단연결재 외에 보강판 또는 H 형강 웨브에 배치될 수 있는 전단연결재와 같이 단면 수직방향 수평전단력에 대한 면밀한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

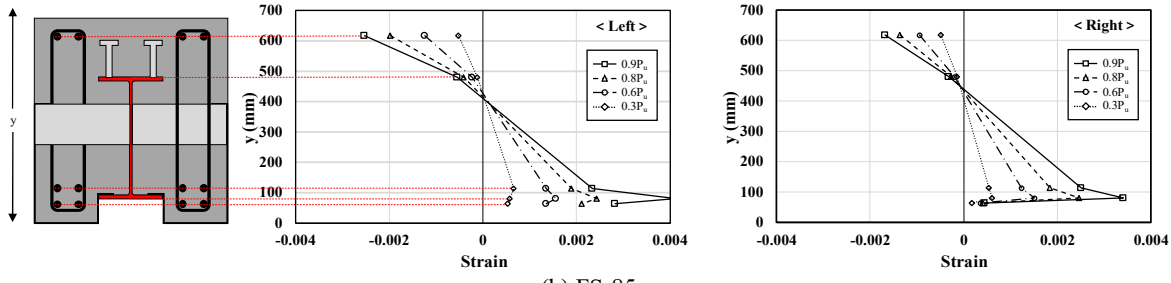
3.3 변형률 분포

Fig. 6는 실험체 중앙 단면에 부착된 변형률 게이지를 통해 계측한 변형률 분포를 실험체 높이에 따라 나타낸 것이다. 상하부의 길이방향 철근과 H형강 상·하부 플랜지에 부착된 변형률 게이지를 통해 최대하중의 30 %, 60 %, 80 %, 90 %에 해당하는 각 시점에서의 변형률을 분석하였으며, 합성부재 단면 H형강의 수직 중심선을 기준으로 좌·우측의 변형률을 각각 나타내었다.

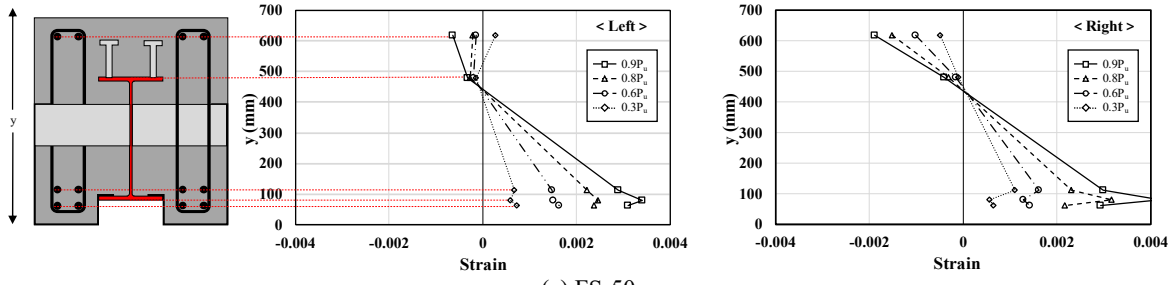
계측된 변형률은 압축철근부터 H형강 하부 플랜지, 인장철근에 이르기까지 선형 분포를 나타냈으며, 모든 하중 단계에서 중립축을 기준으로 선형 분포가 유지되면서 회전하는 경향을 보였다. 이는 해당 실험체가 완전합성 거동을 보이고 있음을 시사한다. 또한, 모든 실험체의 중립축이 콘크리트 상부 표면으로부터 약 250 mm 안팎으로 위치하며, H형강 단면 대부분이 인장영역에 위치해 있기 때문에 휨균열을 효과적으로 제어하는 것



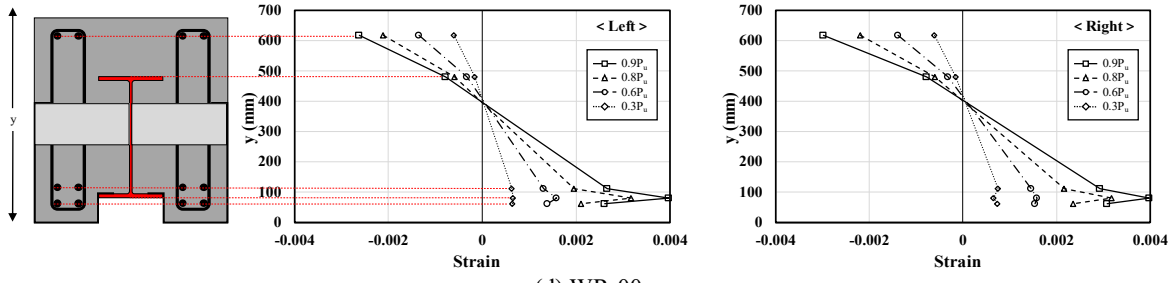
(a) FS-100



(b) FS-85



(c) FS-50



(d) WR-00

Fig. 6. Strain distribution of steel and reinforcement at mid span

으로 판단된다.

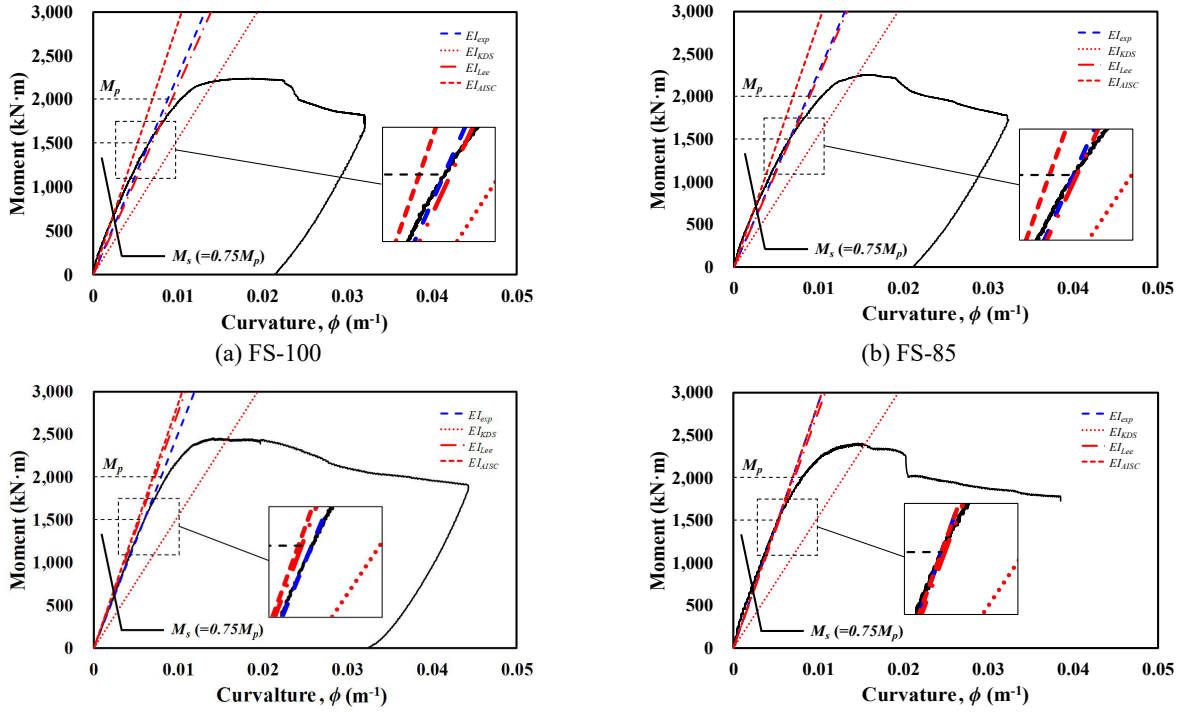
3.4 강성평가

각 실험체의 유효강성($EI_{\exp}$)은 공칭 항복모멘트 강도의 75 %를 사용하중상태(M_s)로 가정하고, 모멘트-곡률 곡선에서 원점과 사용하중 점까지의 할선 기울기로 정의하였다. 또한, 각 실험체의 유효강성은 다음 세 가지 방법에 따라 평가하였다.

(1) AISC 360-16[25]의 설계기준에 기반한 평가식 (EI_{AISC})

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c \tag{10}$$

$$C_1 = 0.25 + 3\left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g}\right) \le 0.7 \tag{11}$$



(a) FS-100 (b) FS-85

(c) FS-50 (d) WR-00

Fig. 7. Moment-curvature curves

Table 6. Evaluation of effective stiffness

Specimen	AISC 360-16			KDS 14 31 80(2025)			Lee(2010)		
	EI_{AISC} (10^5kN·m)	$EI_{\exp}$ (10^5kN·m)	$\frac{EI_{AISC}}{EI_{\exp}}$	EI_{KDS} (10^5kN·m)	$EI_{\exp}$ (10^5kN·m)	$\frac{EI_{KDS}}{EI_{\exp}}$	EI_{Lee} (10^5kN·m)	$EI_{\exp}$ (10^5kN·m)	$\frac{EI_{Lee}}{EI_{\exp}}$
FS-100	2.87	2.27	1.27	1.55	2.27	0.68	2.15	2.27	0.91
FS-85	2.87	2.29	1.25	1.55	2.29	0.67	2.24	2.29	0.94
FS-50	2.87	2.52	1.14	1.55	2.52	0.61	2.77	2.52	1.10
WR-00	2.87	2.88	1.00	1.55	2.88	0.54	2.79	2.88	0.96

(2) KDS 14 31 80(2025)[26]의 매입형 합성기둥 기준에 기반한 평가식(2025, EI_{KDS})

$$EI_{eff} = E_s I_s + 0.5 E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c \quad (12)$$

$$C_1 = 0.1 + 2\left(\frac{A_s}{A_c' + A_s}\right) \le 0.3 \quad (13)$$

(3) Lee[27]이 제안한 처짐 기반 유효단면2차모멘트 (EI_{Lee})

$$EI_{eff} = M\frac{\delta_m^2 + a^2}{2\delta_m} \quad (14)$$

여기서, E_s는 H형강 및 철근의 탄성계수, I_s는 탄성중립축에 대한 H형강의 단면2차모멘트, I_{sr}는 탄성중립축에 대한 철근의 단면2차모멘트, I_c는 탄성중립축에 대한 콘크리트 단면의 단면2차모멘트, A_s는 H형강의 단면적, A_c'는 콘크리트의 단면적, A_{sr}는 철근의 단면적, A_g는 합성단면의 총단면적, C_1은 매입형합성압축부재의 유효강성을 구하기 위한 계수이다. Lee[27]은 휨경간에서 모멘트가 일정한 구간에선 유효단면2차모멘트가 균일 할 것으로 가정하고, 순수휨구간에서 모멘트 곡률 관계를 이용하여 유효단면2차모멘트를 계산하였다. 이를 바탕으로 Lee[27]의 평가식을 적용하였다. 또한, δ_m은 중앙 경간에서의 처짐과 거리 a만큼 떨어진 단면에

Table 7. Evaluation of effective stiffness

Specimen	Mean	Standard deviation	COV
AISC	1.163	0.108	0.093
KDS	0.623	0.058	0.093
Lee	0.977	0.071	0.072

서 계측된 처짐의 차이이다.

각 유효강성 산정식 및 평가방법을 사용하여 실험체의 유효강성을 평가하여 Fig. 7의 모멘트-곡률 곡선에 나타내었으며, Table 6는 실험에서 얻은 유효강성과 ($EI_{\exp}$) 각 평가식의 계산값을 정리한 것이다. 참고로 AISC 360-16[25]과 KDS 14 31 80(2025)[26]에 의한 유효강성 평가 시 영구 강재 거푸집의 휨 강성 기여분은 단면요소는 고려되지 않았다.

Table 7에 각 평가식을 통해 산정된 유효강성의 평균, 표준편차 및 변동계수(COV)를 정리하였다. AISC 360-16[25]평가식에 의해 산정된 강성을 실험으로부터 추출한 강성으로 나눈 비율(예측값/실험값, $EI_{eff}/EI_{\exp}$)의 평균은 1.163으로, 모든 실험체에 대해 평균적으로 16.3 % 과평가하는 경향을 보였으며, COV는 9.3 %로 나타났다. 한편, KDS 14 31 80(2025)[26]의 평가방법을 적용한 경우, 예측값/실험값($EI_{eff}/EI_{\exp}$)의 평균은 0.623로, 평균적으로 37.7 % 과소평가하였으며, COV는 9.3 %로 나타났다. AISC 360-16[25]의 평가식은 모든 실험체들의 유효강성을 과평가하였으며, 합성률이 높아질수록 유효강성을 더욱 과평가하였다. 반면, KDS 41 31 80(2025)[26]의 평가식은 모든 실험체들의 유효강성을 저평가하였으나, 합성률이 높아질수록 유효강성을 저평가하는 정도가 감소하였다. Lee[27]의 평가방법에 따른 예측값/실험값($EI_{eff}/EI_{\exp}$)의 평균은 0.977로, 모든 실험체를 평균적으로 2.3 % 과소평가하였으며, COV는 7.2 %로 가장 낮은 산포를 나타났다. 실험에서 측정된 처짐을 바탕으로 유효강성을 평가하는 Lee[27]의 평가방법이 가장 정확했으며, FS-50 실험체를 제외한 나머지 실험체들의 유효강성을 안전측으로 평가하였다. 다만, 처짐이 측정되는 경간내(a)에서 곡률이 일정하다는 가정을 기반으로 유효강성(EI_{eff})을 평가하기 때문에 다소 보수적인 결과를 나타내었다.경간에 따른 곡률 분포를 합리적으로 고려한다면 좀 더 정확하게 유효강성(EI_{eff})을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

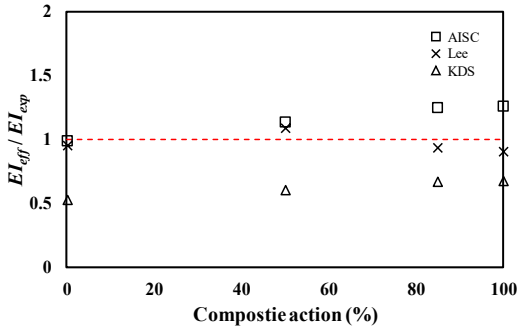


Fig. 8. Evaluation of effective stiffness

Fig. 8에는 3가지 유효강성 평가방법에 따라 산정한 예측값/실험값($EI_{eff}/EI_{\exp}$)의 분포를 스터드 앵커에 의한 합성률에 따라 나타내었다. WR-00 실험체를 포함하여 스터드 앵커에 의한 수평전단성능 확보와 관계없이 사용하중 상태에서의 유효강성을 대체로 잘 평가하였으며, AISC은 모두 휨강성을 크게 평가하여 사용하중 상태에서의 변형을 다소 저평가할 수 있는 우려가 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서 내화피복 면적 감소 및 시공성을 향상시키기 위해 개발된 RCH 합성보의 휨실험을 진행하였으며, 휨거동 및 유효휨강성을 평가하였다. 4개의 실험체에는 수평전단력에 저항하기 위한 스터럽 및 스터드 앵커가 배치 및 부착 되었다. 스터드 앵커의 양을 변수로 1점가력 휨실험을 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 스터드 앵커에 의한 합성률 50 %(FS-50), 합성률 0 %(WR-00), 합성률 85 %(FS-85), 합성률 100 %(FS-100) 순으로 높은 강도를 보였다. 각 실험체의 최대 강도는 각각 1641.4 kN, 1604.4 kN, 1507.2 kN, 1491.4 kN이었으며, 모두 소성 휨모멘트 강도 이상의 강도를 나타내었다. 이는 스터드 앵커뿐만 아니라 철근콘크리트 단면의 스터럽과 콘크리트가 수평전단력에 저항하여 H형강과 철근콘크리트 단면 사이에 충분한 합성이 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 실험 중 실험체 끝단에서 콘크리트와 H형강 계면

에서의 미끌림이 관측되지 않았으며, 철근과 H형강에서 계측한 변형률이 단면 높이에 따라 선형 분포를 나타내는 것으로 보아 완전합성거동을 한 것으로 판단된다.

(3) FS 시리즈 실험체는 스터드 앵커의 수평전단저항 성능으로 인해 철근콘크리트 단면과 함께 충분한 내부 전단 부착 저항력을 확보하였으며, 휨파괴 모드를 나타내었다. 반면, WR-00 실험체는 스터드 없이 철근콘크리트 단면의 콘크리트 및 스터럽의 수평전단저항만으로 요구 수평전단력에 저항하였으며, 불충분한 전단 부착 저항력으로 인해 최대 휨강도 도달 이후 영구 강재 거푸집 상단 절곡부와 콘크리트 사이의 전단 부착 파괴가 발생하였다.

(4) AISC 360-16[25], KDS 14 31 80(2025)[26]의 매입형 합성보 유효강성 평가식과 Lee[27]의 처짐기반 모델은 실험체들의 유효휨강성을 대체로 정확하게 평가하였다. 이 중에서 Lee[27]의 평가식이 COV 7.2 %로 가장 높은 정확도를 보였으며, 스터드 앵커가 설치된 FS 실험체들의 유효휨강성은 KDS[26] 기준에 의해 합리적으로 평가되었다.

(5) 스터드가 배치되지 않은 WR실험체가 FS 시리즈 실험체보다 높은 강도를 보이는 경향이 나타났는데, 이는 FS 시리즈 실험체의 압축측에 배치된 스터드와 스터럽이 유효 콘크리트 단면적을 감소시켜, 압축 콘크리트의 휨 거동 기여분을 줄였기 때문으로 판단된다. 따라서, 향후 연구에서 유효콘크리트의 영향과 함께 보강판의 수평전단저항 성능 및 영구 강재 거푸집의 구속 효과에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C2093437). 또한, 포스코 R&D센터의 실험연구지원에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] Park, S.J., Son, D.H., Bae, B.I., Jeong, D., and Choi, C.S. (2023) Horizontal Shear Strength in Precast Concrete Composite Beams with Shear Keys, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.35, No.6, pp.625−633, https://doi.org/10.4334/JKCI.2023.35.6.625 (in Korean).

[2] Ban, H., and Bradford, M.A. (2013) Flexural Behaviour of Composite Beams with High Strength Steel, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.56, pp.1130−1141.

[3] Nie, J., Fan, J., and Cai, C.S. (2008) Experimental Study of Partially Shear-Connected Composite Beams with Profiled Sheeting, *Engineering Structures, Elsevier*, Vol.30, No.1, pp.1−12.

[4] Chen, A., and Yossef, M. (2016) Analytical Model for Deck-On-Girder Composite Beam System with Partial Composite Action, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE. Vol.142, No.2, 04015087.

[5] Kim, C.-G., Park, H.-G., Hong, G.-H., Kang, S.-M., and Suh, J.-I. (2014) Shear Strength of Prestressed PC-CIP Composite Beams without Vertical Shear Reinforcements, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.26, No.4, pp.553−543 (in Korean).

[6] Ryoo, J.-Y., Chae, H.-S., and Choi, S.-M. (2011) Economic Evaluation of Composite Beams(Eco-girder) Characterized by End-Reinforcement with Steel Plates and Concrete, *Proceedings of Spring Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.31, No.1, pp.33−34 (in Korean).

[7] Kim, K.S., Lee, D.H., Choi, S.M., Choi, Y.H., and Jung, S.H. (2011) Flexural Behavior of Prestressed Composite Beams with Corrugated Web: Part I. Development and Analysis, *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, Vol.42, No.6, pp.1603−1616.

[8] Kim, D.-H., Lee, K.-K., Kim, Y.-G., Min, K.-C., Byeon, T.-W., and Joo, E.-H. (2022) Flexural Capacity Evaluation of Hybrid Composite Beam Using High Strength Steel, *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*, KIC, pp.146−147 (in Korean).

[9] Ju, H., Lee, D., and Choi, D.-U. (2022) Finite Element Analysis of Steel-Concrete Composite Connection with Prefabricated Permanent Steel form, *Journal of Asian Concrete Federation*, ACF, Vol.8, No.1, pp.1−15.

[10] Lee, J.W., Kim, D.H., Kim, S.B., Lee, C.N., Kim, S.S., and Kim, K.S. (2004) An Experimental Study on the Structural Behavior for TSC Compostie Beams with

Various Manufacturing Methods, *Proceedings of the Spring Annual Conference Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.24, No.1, pp.67−70 (in Korean).

[11] Zhang, Y., Liu, A., Chen, B., Zhang, J., Pi, Y.-L., and Bradford, M.A. (2020) Experimental and Numerical Study of Shear Connection in Composite Beams of Steel and Steel-Fibre Reinforced Concrete, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.215, 110707.

[12] Chae, H.S (2011) *A Study on Structural Performance of Composite Beams(Eco Girder) Characterized by End-reinforcement with Steel Plates and Concrete*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University (in Korean).

[13] Seo, K.D. (2014) *A Development of Design Program of Partially Embedded Composite Beam*, Master's Thesis, Yonsei University (in Korean).

[14] Yun, J.H. (2021) *An Experimental Study on the Flexural Performance of Composite Beams having Built-up Steel Truss Embedded in Concrete Master's Thesis*, Seoul National University (in Korean).

[15] Kim, S.-B., Kim. S.-S., Lee.K.-K., and Kim. M.-S.(2019) Seismic Performance of Hybrid Forming Composite Beam, *Korean Association for Spatial Structures*, KASS, Vol.19, No.3, pp.9−13 (in Korean).

[16] Lee, C.-N. (2002) TSC Structural System, *Structural Engineefing*, KSEA, Vol.9, No.2, pp.42−44. (in Korean).

[17] Eom, T.-S., and Lim, J.-J. (2022) Flexural Behavior of Noncompact and Slender Concrete-Filled U-Section Beams under Negative Bending, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.148, No.10, 04022157.

[18] Kim, D.H., Lee, K.K., Kim, J.W., Kim, Y.G., Min, K.C., Byeon, T.W., and Shin, Y.S. (2022) Flexural Capacity Evaluation of Exposed Hybrid Composite Beam (S-beam) Using High-Strength Steel in the Bottom Flange, *Proceedings of the Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.135−136 (in Korean).

[19] Eom, T.S., Lim, J.J., Moon, S.H., Youn, S.H., and Chung, J.C. (2023) Flexural Behavior of Prestressed Concrete-Encased Steel Composite Beams with Hollow Core, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.5, pp.249−260 (in Korean).

[20] Lee, S.J., Chung, K.S., Bang, J.S., Chae, H.S., and Choi, S.M (2022) An Evaluation of Flexural Performance of Reinforced Concrete with H-section Girder for Logisics Ware house, *Proceedings of the Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.121-122 (in Korean).

[21] Benedetty, C.A., dos Santos, V.B., Krahl, P.A., Rossi, A., de Andrade Silva, F., Cardoso, D.C.T., and Martins, C.H. (2023) Flexural and Shear Behavior of Steel-UHPC Composite Beams: A Review, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.293, 116649.

[22] Shin, H.S., Heo, B.W., Bae, K.W., and Kim, K.H. (2008) Analysis of the Load Carrying Behavior of Shear Connection at the Interface of Encased Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.1, pp.67−79 (in Korean).

[23] Diep, H.T., and Choi, B.H. (2023) Shear Transfer Resistance with Different Interface Conditions: Evaluation of Design Provisions and Proposed Equation, *Applied Sciences*, MDPI, Vol.13, No.14, 8203.

[24] Chung, H.M., Jung, C.Y., Ahn, J.H., and Kim, S.H. (2008) Behavior Evaluation of Steel-Concrete Composite Beam Considering Shear Connector, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.12, No.2, pp 133−136 (in Korean).

[25] American Institute of Steel Construction. (2016) *Specification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-16, AISC, USA.

[26] Korean Design Standard. (2025) *Design Standard for Composite Members (Load and resistance factor Design)*, KDS 14 31 80: 2025, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korea).

[27] Lee, S.B. (2010) *A Study on the Behavior of Deflections and Cracking of Reinforced Concrete Beams for Serviceability Assessment*, Ph.D. Dissertation, Inha University (in Korean).

[28] Korean Design Standard. (2021) *Design of Concrete Structures (Strength Design Method)*, KDS 14 20 00: 2021, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korea).

[29] Weng, C.C., Yen, S.I., and Jiang, M.H. (2002) Experimental Study on Shear Splitting Failure of Full-Scale Composite Concrete Encased Steel Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.128, No.9, pp.1186−1194.

요 약: 이 연구에서는 기존 노출형 및 충전형 합성보에 비해 화재 저항성과 시공성을 개선한 RCH (Reinforced Concrete with H-Steel Girder) 합성보의 휨거동 및 유효강성을 평가하였다. 전단연결재의 설치량을 변수로 하여 수평 전단 성능이 확보된 4개의 실험체를 제작하고, 각 실험체에 대해 단순보 조건에서 1점 가력 방식의 휨 실험을 수행하였다. FS 시리즈 실험체는 콘크리트 압괴에 의해 파괴되었으며, WR-00 실험체는 전단 부착 파괴가 발생하였다. 그러나 모든 실험체는 설계 강도를 초과하는 우수한 휨성능을 보였다. 변형률 분석 결과, 모든 실험체는 완전합성에 가까운 거동을 나타냈다. RCH 합성보의 유효강성은 AISC 360-16, KDS 14 31 80 (2025), 그리고 처짐 기반의 경험식에 따라 평가되었으며, 대부분의 평가 결과와 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 매입형 합성보, 수평전단저항, 합성률, 휨거동, 유효강성