

하부플랜지에 고강도강(SM460)을 적용한 하이브리드 합성보(HyFo Beam)의 합성율에 따른 휨강도 평가

최인락^{1*} · 임현창² · 강민혁³ · 이승준⁴ · 김성배⁴

¹부교수, 호서대학교, 건축토목공학부, ²수석연구원 POSCO, ³대리, 더나은구조, ⁴소장, 더나은구조엔지니어링

Flexural Strength Evaluation of Hybrid Forming (HyFo) Composite Beams with High Strength Steel (SM460) on Lower Flange According to Composite Ratio

Choi, In Rak^{1*}, Yim, Hyeon Chang², Kang, Min Hyeok³, Lee, Seung Jun⁴, Kim, Sung Bae⁴

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

²Principal Research Engineer, POSCO, Pohang, 37859, Korea

³Assistant Manager, The Naeun Structure, Seoul, 07205, Korea

⁴Manager, The Naeun Structural Engineering, Seoul, 07205, Korea

Abstract – In this study, a flexural performance evaluation experiment was conducted on a filled composite beam (HyFo Beam) in which high-strength steel (SM460) was applied to the lower flange and normal-strength steel (SM355) was combined for the remaining part, with composite ratios of 100 %, 75 %, and 50 % as test variables. The nominal flexural strength was calculated by applying the plastic stress distribution method to the hybrid section with different steel grades. The experimental results confirmed that the ratio of maximum moment to nominal flexural strength (M_{max}/M_n) was 1.05 or greater for all specimens. In addition, the initial stiffness increased by approximately 14 % with the application of high-strength steel, and the displacement ductility ratio exceeded 3.0 for specimens with composite ratios of 75 % or higher, confirming that sufficient flexural strength and ductility were secured for hybrid filled composite beams with SM460 applied to the lower flange.

Keywords – High strength steel, Hybrid forming composite beam, Composite ratio, Flexural strength

1. 서론

최근 물류창고와 데이터센터 등 장스팬·고하중 건축물의 증가로 합성보의 개발과 현장적용 사례가 증가하고 있다. 특히, 절곡형 강재 내부에 콘크리트를 타설되는 충전형합성보가 많이 개발되고 있으며, 충전형합성보는 기존 H형강의 강구조와 비교하여 진동 및 처짐 등의 사용성이 향상되고, 내화성능이 개선되며, 경제성이 향상되는 특징을 갖는다.

충전형합성보의 종류인 하이브리드 합성보(HyFo Beam)는 Fig. 1과 같이 2개의 대칭되는 Z형 상부 절곡강판과 1개의 ㄷ형 하부 절곡강판을 내부 철근과 함께 고력볼트로 접합한 형상을 갖는다. 상기 합성보는 슬래브와 일체성 확보를 위해 슬래브와 접하는 상부플랜지에 강재앵커를 설치하고, 기둥과 접하는 보 단부의 상부슬래브에 철근을 추가한 후 콘크리트를 타설하면 Fig. 2의 형상과 같다.

HyFo 합성보에 대해서는 구조성능, 접합부 내진성능, 내화성능 및 진동성능에 대한 광범위한 연구가 수행되었다. 휨성능 측면에서 Kim *et al.*^[1]은 보 춤과 판 두께 등을 변수로 KBC 합성보 내력평가식 적용 시 설계기준강도의 1.1–1.3배 이상의 내력이 확보됨을 확인하였으며, 접합부 내진성능^{[2],[3]}, 내화성능^{[4],[5]}, 진동성능^[6] 측면에서도 HyFo 합성보의 성능을 검증하였다.

Note.-Discussion open until February 28, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 31, 2026; revised on June 9, 2026; approved on June 25, 2026.

Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. irchoi@hoseo.edu

최근 변형능력이 요구되는 휨재에도 고강도강을 적용하는 연구가 많이 진행되고 있다. 특히 인장력이 크게 작용하는 하부플랜지 부분만 고강도강을 적용한 하이브리드 합성보(Fig. 3)에 대한 다양한 연구와 연구결과에 근거한 현장적용이 이루어지고 있다. 합성보의 증립축으로부터 가장 외단에 위치하는 하부플랜지는 인장력이 가장 크게 작용하므로, 하부플랜지에만 고강도

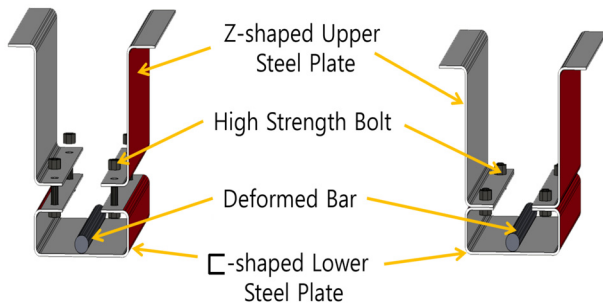


Fig. 1. Shape of Hybrid Forming Beam

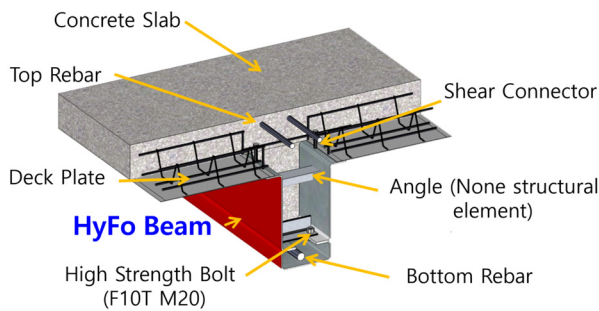


Fig. 2. Shape of hybrid forming composite beam

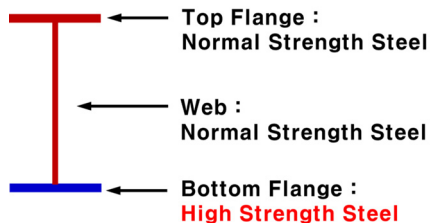


Fig. 3. Concept of Hybrid Beam

강을 적용하면 구조적으로 효율성이 향상된다. Lee *et al.*^[7]은 SM460급 고강도강을 적용한 U형 하이브리드 합성보의 휨거동 실험을 통해 소성응력분포법 적용 가능성을 확인하였으며, Jun *et al.*^[8]은 고강도강 적용 비대칭 하이브리드 합성보 실험에서 HSA650 적용 시 변형경화 부족으로 공칭소성모멘트 대비 약 10 %–15 % 내력 이 저하되므로 강재의 연성 특성에 대한 충분한 검토가 필요함을 보고하였다. Cho and Kim^[9]은 HyFo 합성보에 고강도강 적용 시 충분한 변형능력이 확보됨을 확인하였다. 하지만, 하이브리드 합성보에 적용하는 고강도강은 일반강과 비교하여 강도 증가에 따른 연성 저하가 우려되며, 특히 전단연결재의 종류 및 합성율이 합성보의 휨강도와 파괴모드에 큰 영향을 미친다는 것은 기존 연구^{[10],[11]}를 통해 잘 알려져 있으나, 절곡 앵글을 전단연결재로 함께 사용하는 충전형 하이브리드 합성보에서 합성율 변화의 영향을 종합적으로 검토한 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 하부플랜지에 고강도강(SM460)을 적용하고 나머지 부분은 일반강(SM355)을 조합한 하이브리드 합성보(HyFo Beam)의 휨성능을 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 계획

실험은 하이브리드 합성보의 휨성능에 크게 영향을 미칠 것으로 예상되는 합성보의 합성율과 하부플랜지의 강도를 변수로 설정하였다. 실험변수에 따른 실험체 목록은 Table 1과 같다. 합성율은 강재보와 단부 철근 내력의 합과 콘크리트 슬래브의 강도 중 작은 것에 대해 강재앵커가 저항해야 한다. 이러한 현장여건을 고려하여 합성율이 휨강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 합성율과 하부플랜지 강도를 변수로 선정하였다.

Table 1. Experiment plan for evaluating flexural performance

No.	Specimen	Size [mm]	Span [mm]	Top Plate F_y [MPa]	Bot. Plate F_y [MPa]	Composite Ratio [%]	Stud	Angle
1	HF 3-100	HF-700×270×8	6,000	355	355	100	2- ϕ 19@125	L-50×50×6@500
2	HF 4-100				460	100	2- ϕ 19@120	L-50×50×6@420
3	HF 4- 75					75	2- ϕ 19@130	L-50×50×6@1000
4	HF 4- 50					50	2- ϕ 19@155	—

합성보의 실험체 규격은 폭 270 mm, 높이 700 mm, 강판 두께 8 mm (HF-700×270×8)이며, 부재의 경간은 6,000 mm이고 슬래브의 폭은 1,200 mm이다. 고강도강 적용 시 휨성능을 확인하기 위해 합성율 100 %의 일반

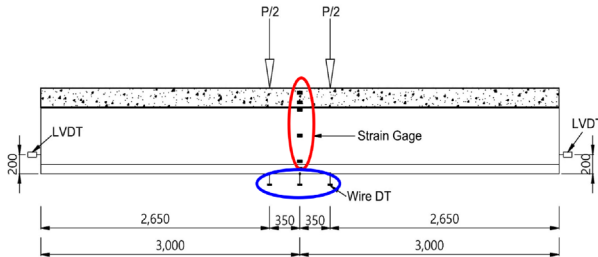


Fig. 4. Position of displacement transducers

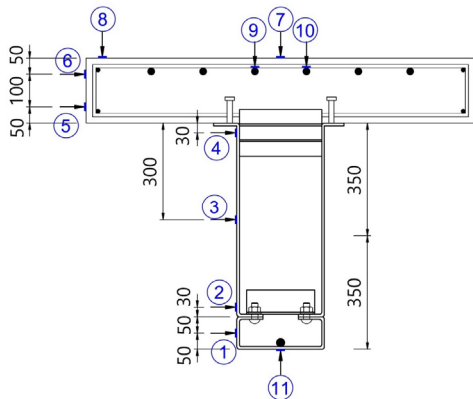


Fig. 5. Position of strain gauges



Fig. 6. Specimens setup

Table 2. Concrete mix proportion

Design based strength [MPa]	W/C Ratio [%]	W/B Ratio [%]	Slump [mm]	Maximum size of coarse aggregate [mm]	Fine aggregate ratio [%]	Compressive strength [MPa]
35	55.8	180	180	25	47.5	46.1

강(SM355) 실험체와 하부플랜지만 고강도강(SM460)을 적용한 실험체로 분류하였다. 또한 합성율에 의한 휨성능의 영향을 평가하기 위해 하부플랜지에 고강도강을 적용한 합성율(재료의 공칭강도 기준 100 %, 75 %, 50 %)에 따라 실험체를 분류하였다. 강재앵커는 Stud Bolt ($\phi 19$) 및 앵글(L-50×50×6)을 사용하였으며, 개수 및 간격은 변수인 합성율에 따라 배치하였다(Table 1 참조).

2.2 실험 방법

실험은 중앙부에서 2점 가력하였으며, 가력에 의한 보 계측은 보 중앙부 및 가력점과 같은 선상의 보 하부에 줄변위계(Wire DT)를 설치하여 측정하였다. 보 양단부에는 철골과 콘크리트의 슬립을 측정하기 위해 보 하부에서 200 mm 떨어진 지점에 변위계(LVDT)를 설치하였다. 또한 하부강판과 콘크리트의 변형량을 측정하기 위해 콘크리트와 강재 표면, 상부 철근(내부)에 변형률 게이지를 부착하였다. 변위계 및 스트레인게이지의 부착 위치는 Fig. 4, Fig. 5와 같다.

휨성능 평가를 위한 실험체의 세팅은 Fig. 6와 같이 단순지지 조건으로 설치하였다. 단부 지점은 실험체의 양단에서 150 mm 떨어진 곳에 설치하였으며, 2점 가력은 보 중앙에서 각각 350 mm 떨어진 점에서 0.03 mm/sec의 속도로 진행하였다. 상세한 지점조건 및 가력 위치는 Fig. 4에 나타내었다. 실험은 최대하중 도달 이후 최대하중의 80 %로 저하될 때까지 가력한 후 실험을 종료하였다.

2.3 재료 특성

합성보에 사용한 콘크리트의 설계기준 압축강도는 35 MPa로이었으며, 압축강도 시험은 KS F 2405에 따라 진행하였다. 콘크리트 배합비 및 공시체의 평균압축강도는 Table 2에 나타내었다. 콘크리트 공시체의 압축강도는 46.1 MPa로 설계기준 압축강도 35 MPa 대비 다소 높게 나타났다.

Table 3. Tensile test result of rebar and steel

Material		Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
Rebar	D10 (SD400)	463.1	573.4	20.2
	D13 (SD400)	465.0	608.4	19.9
	D22 (SD500)	549.1	678.0	10.4
	D25 (SD500)	538.8	668.4	12.9
Steel	SM355 (8mm)	458.5	557.3	21.9
	SM460 (8mm)	535.3	628.2	19.2
Angle	SS275 (ϕ 19)	338.3	464.5	33.5
Stud	HS1	408.7	487.3	23.1

Table 4. Bending test result of composite beams

No.	Specimen	K_i [kN/mm]	P_y [kN]	δ_y [mm]	P_u [kN]	δ_u [mm]	δ'_u [mm]	P_u/P_y	δ'_u/δ_y
1	HF 3-100	117.6	2854.7	31.2	3282.7	59.9	96.6	1.15	3.10
2	HF 4-100	134.5	3096.9	27.1	3468.9	40.1	114.5	1.12	4.23
3	HF 4- 75	116.0	2725.3	29.2	3151.0	76.3	98.2	1.16	3.36
4	HF 4- 50	125.8	2192.2	20.1	2459.7	27.1	56.2	1.12	2.79

K_i : Initial stiffness

P_u : Maximum load

δ_u : Displacement at maximum load

P_y : Yield load

δ_y : Displacement for expected yield load

δ'_u : Displacement when reduced by 80 % after maximum load

실험체 제작에 사용된 철근 및 강재의 소재인장시험 결과는 Table 3에 나타내었다. 철근은 D10과 D13 (SD400), D22와 D25 (SD500)을 사용하였으며, 인장시험결과 모두 기준에서 요구하는 항복강도를 상회하는 것으로 나타났다. 판재는 동일한 두께인 8 mm의 일반강(SM355)과 고강도강(SM460)을 적용하였으며, 소재인장시험은 KS B 0801에 따라 진행하였다. 시험결과 강판의 기계적 성질은 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 3개의 인장시험편에 대한 SM355와 SM460 강판의 항복강도는 각각 평균 458.5 MPa, 535.3 MPa로 나타났다. 즉, SM355 강판은 공칭항복강도(355 MPa) 대비 약 1.29배 높은 값을 보였으며, SM460 강판은 공칭항복강도(460 MPa) 대비 약 1.16배 높은 값을 보였다. 전단연결재로 사용된 앵글(SS275)과 스티드 앵커(HS1)의 평균항복강도는 각각 338.3 MPa, 408.7 MPa로 측정되었다.

3. 실험 결과

3.1 휨성능 평가

하이브리드 합성보의 휨성능 평가 결과는 Table 4와 같다. 실험 결과 항복하중(P_y)은 하중-변위 곡선에 대한 등가 탄소성 이상화 방법으로 산정하였다(Fig. 7 참

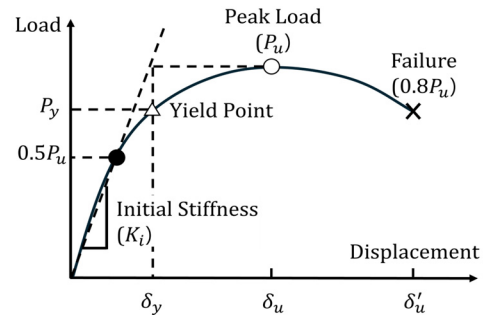


Fig. 7. Definition of yield point and initial stiffness

조). 즉, 원점에서 최대하중의 50% ($0.5 P_{max}$)에 해당하는 점까지 직선을 그은 후, 이 직선의 연장선이 최대하중(P_{max})의 수평선과 만나는 교차점을 항복점으로 정의하였다. 이 교차점에서의 하중과 변위를 각각 항복하중(P_y)과 항복변위(δ_y)으로 정의하였으며, 초기강성(K_i)은 원점에서 $0.5 P_{max}$ 점까지의 직선 기울기로 산정하였다. 실험체의 최종 변위 δ'_u 는 실험체의 변형능력을 고려하여 하중이 최대하중의 80 % 이하로 저하된 시점에서의 변위로 정의하였다.

3.2 모멘트-변위 관계

부재 전체에 일반강(SM355)을 사용한 HF 3-100은 가력 후 선형으로 거동하였다. 이후 약 1,775.1 kN의 하

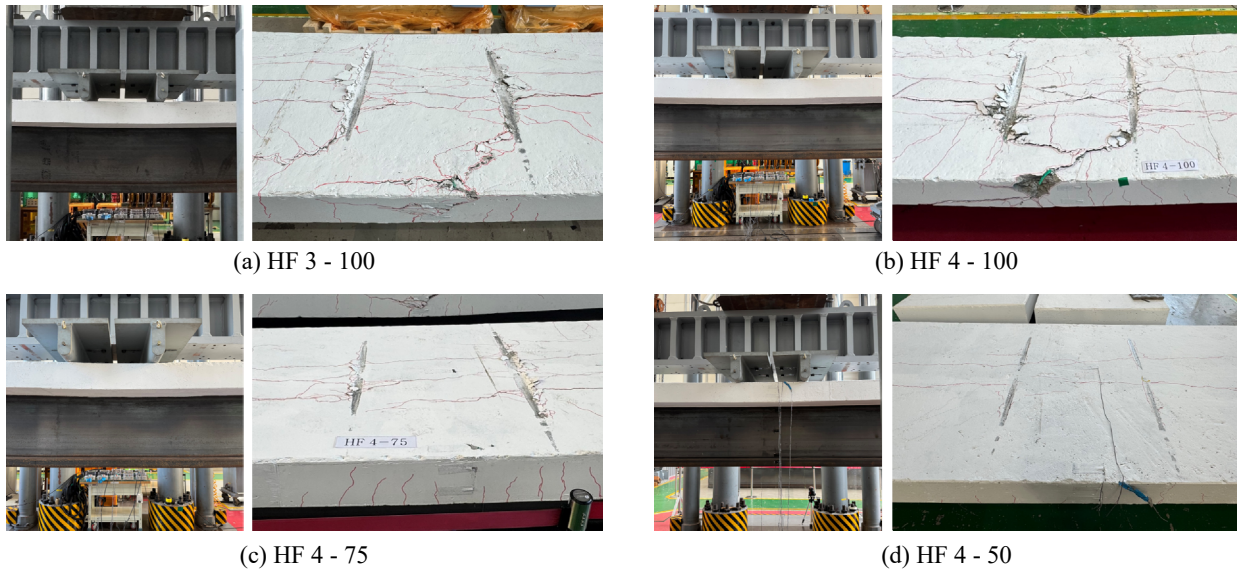


Fig. 8. Failure modes of specimens

중을 가력하였을 때 합성보의 웨브의 콘크리트와 강판의 접합면에서 균열이 발생하였으며, 약 2,146.0 kN 가력하였을 때 상부 슬래브의 가력부위 측면에서 균열이 발생하였다. 이후 약 3,282.7 kN에서 최대하중에 도달하였으며, 이후 슬래브의 압괴로 인해 하중이 저하되었고 약 2,626.2 kN에서 실험을 종료하였다.

하부강판에 고강도강(SM460)을 사용한 합성율 100 %인 실험체 HF 4-100은 가력 후 선형으로 거동하였다. 약 1,300.0 kN의 하중을 가력하였을 때 보 단면의 하부 및 웨브의 콘크리트와 강판의 접합면에서 균열이 발생하였으며, 약 2,946.3 kN에서 상부 슬래브의 가력 부위 중앙에서 균열이 발생하기 시작하였다. 이후 최대하중인 약 3,468.9 kN에 도달하였을 때 슬래브의 중앙부에 균열이 발생하면서 하중이 저하되었으며, 슬래브 압괴가 급격히 진행됨에 따라 약 3,018.8 kN (최대하중의 약 87 % 수준)에서 실험을 종료하였다.

하부강판에 고강도강(SM460)을 사용한 합성율 75 %인 실험체 HF 4-75는 가력 초기 선형으로 거동하였으며, 약 1,502.2 kN의 하중을 가력하였을 때 보 단면의 하부 및 웨브의 콘크리트와 강판의 접합면에서 균열이 발생하였으며, 약 2,833.0 kN에서 슬래브의 가력부에서 균열이 발생하기 시작하였다. 이후 최대하중인 3,151.0 kN에 도달 후 하중이 저하되었고, 약 2,980.7 kN까지 저하되었을 때 앵글의 접합부위에서 파단이 발생하여 하중이 급격히 저하되었고 약 2,677.9 kN에서

실험을 종료하였다.

각 실험체의 최종 파괴 형상은 Fig. 8과 같다. 완전합성보인 HF 3-100과 HF 4-100은 슬래브 상면의 압괴가 지배적인 파괴모드로 나타났으며, 합성율 75 %인 HF 4-75는 슬래브 균열 이후 앵글 전단연결재의 파단이 발생하였다. 합성율 50 %인 HF 4-50은 전단연결재 접합면에서 미끄러짐이 발생하여 하중이 급격히 저하되었다.

Fig. 9은 각 실험체의 모멘트-변위 관계를 나타낸 것이다. 부재의 모멘트는 가력하중에 의한 모멘트에 자중에 의한 모멘트를 합산하여 산정하였다. 고강도강(SM460)을 사용한 합성율 50 %인 HF 4-50은 가력 초기 선형으로 거동하였지만, 약 1,487 kN에서 단면의 하부에 균열이 발생하였으며 웨브의 콘크리트와 강판의 접합면이 벌어지기 시작하였다. 이후 약 2,460 kN에서 최대하중에 도달하였고, 하중이 저하되면서 약 2,340 kN에서 전단연결재의 용접부에서 파단이 발생하였다.

하부강판의 강도를 변수로 한 실험체 HF 3-100과 HF 4-100의 휨강도를 비교하면, 두 실험체 모두 항복 이후 하중이 지속적으로 증가하여 최대하중에 도달하였다. 하부 절곡강판에 고강도강을 적용 시 최대하중은 약 1.06배 높게 나타났다. 최대하중 도달 이후 상부 슬래브의 압괴로 인해 하중이 저하되었고, 하부 절곡강판에 고강도강을 적용한 경우에도 일반강을 적용한 경우와 마찬가지로 연성적으로 거동하였다. 공칭휨강도에 대한 최대모멘트의 비(M_{max}/M_n)는 HF 3-100의 경우

하부플랜지에 고강도강(SM460)을 적용한 하이브리드 합성보(HyFo Beam)의 합성율에 따른 휨강도 평가

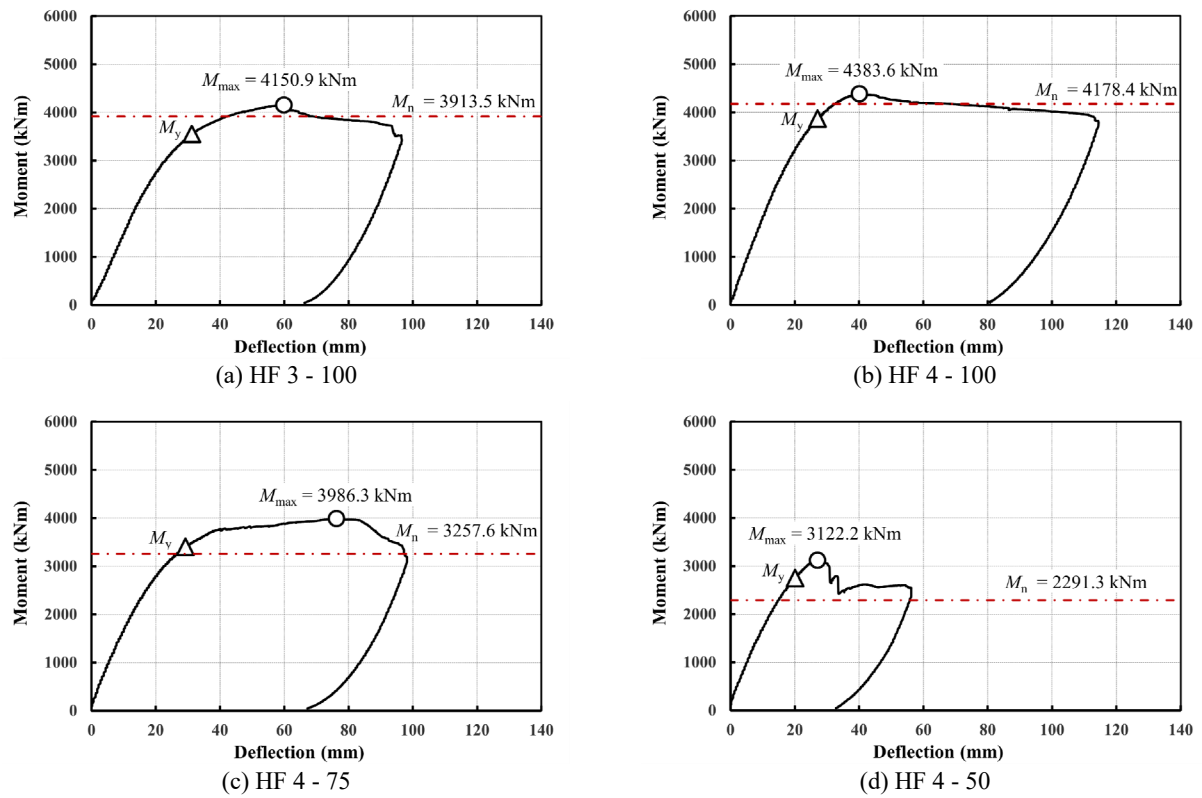


Fig. 9. Moment - Displacement Curves of Test Specimens

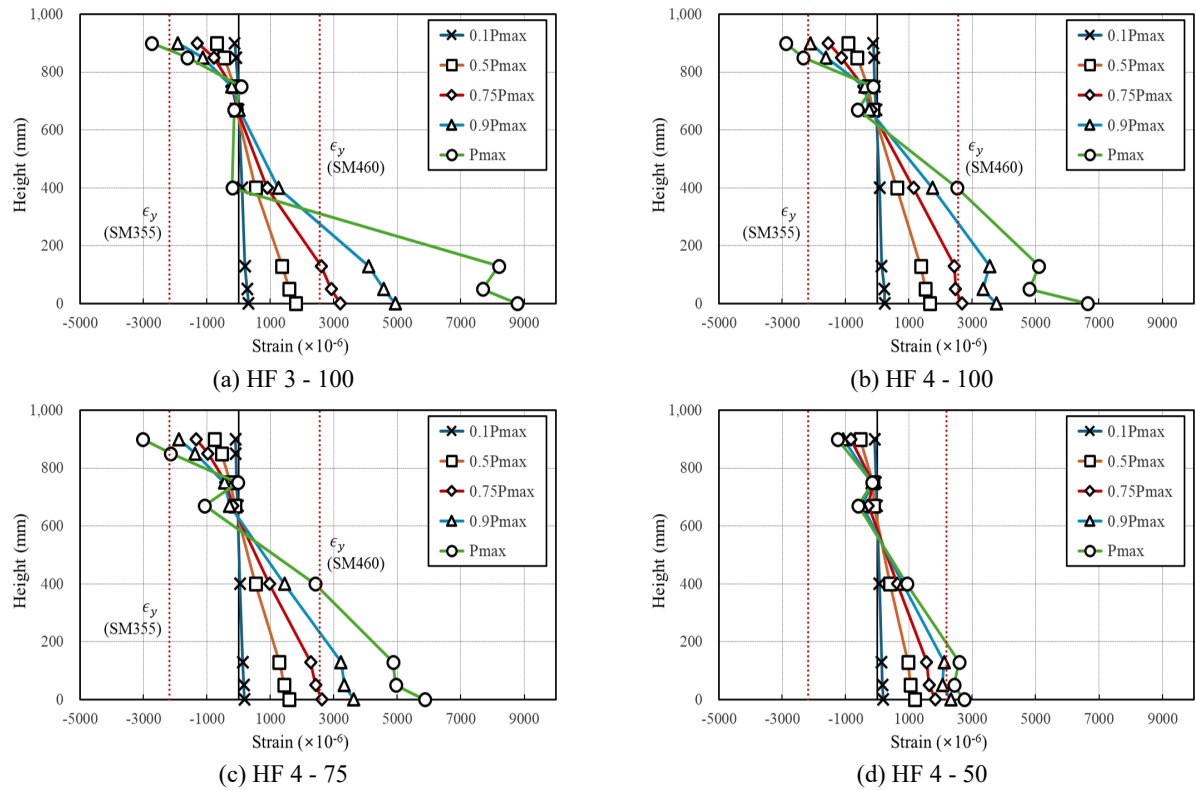


Fig. 10. Strain distributions of test specimens at different load levels

1.06, HF 4-100의 경우 1.05로 두 실험체 모두 공칭휨강도를 상회하였으며, 이중강종 적용에 따른 강도 저하는 나타나지 않았다.

합성율을 변수로 한 실험체 HF 4-75와 HF 4-50의 경우 합성보의 강판과 콘크리트의 접합면에서 균열이 발생한 후 최대하중에 도달하였으며, 합성율 100 %인 실험체 HF 4-100과 최대하중을 비교하였을 때 각각 약 90.8 %, 70.9 %로 감소하였다. 최대하중 도달 이후 합성율이 높은 실험체일수록 우수한 연성거동을 보였으며, 합성율 50 %인 실험체 HF 4-50의 경우 콘크리트와 전단연결재의 접합면에서 파괴가 발생하여 하중이 급격하게 저하되었다. 하부 절곡강판에 고강도강을 적용하는 경우 내력증가와 충분한 연성능력도 확보하는 것으로 확인되었다. 또한 합성율에 따라 부재내력이 상승하는 것으로 나타났으며, 부재의 파괴거동 및 변형능력에 영향이 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 실험체에 부착한 측면 변형률게이지 측값을 항복변형률과 비교하여 주요 하중 단계별 단면의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 부재 전체에 일반강(SM355)을 적용한 HF 3-100은 하중이 증가함에 따라 하부 인장변형률이 증가하여 $0.75P_{\max}$ 에서 하부 강판이 항복변형률에 도달하였고, 이후 최대하중에서 상부 플랜지도 항복변형률에 도달하였다. 하부강판에 고강도강(SM460)을 사용한 HF 4-100과 HF 4-75의 경우에도 일반강을 적용한 HF 3-100과 마찬가지로 $0.75P_{\max}$ 에서 하부 SM460 강판의 항복변형률에 도달하였고, 이후 $0.9P_{\max}$ 나 최대하중 부근에서 상부플랜지도 항복변형률에 도달하였다. 반면 HF 4-50은 전단연결재 접합부의 미끄러짐 및 조기 파괴로 단면 전체가 충분히 항복하지 못하는 것으로 나타났다.

4. 분석 및 고찰

4.1 휨강도 평가

Kim *et al.*^[1]의 선행연구에서는 소성중립축이 슬래브 내에 위치하는 완전합성보의 공칭휨강도(M_n)를 식 (1)과 같이 산정하였다. 이 식은 강재보의 인장력과 철근의 인장력의 합으로 휨강도를 산정하도록 도출되었다.

$$M_n = (A_s \cdot F_y + A_{sr} \cdot f_{yr}) \times (H - y_{st} - a/2) \times 10^{-6} \quad (1)$$

여기서, A_s : 강재보 단면적 [mm^2]

F_y : 강재보 항복강도 [MPa]

A_{sr} : 철근 단면적 [mm^2]

f_{yr} : 철근 항복강도 [MPa]

H : 합성보 전체 층 [mm]

y_{st} : 강재부분 도심거리 [mm]

a : 등가응력블록 깊이 [mm]

본 연구의 하이브리드 합성보는 상부 강판과 웨브에 SM355, 하부강판에 SM460 강종이 조합되므로, Fig. 11에 나타낸 것과 같이 강재보 전체단면의 항복축력($A_s F_y$)을 각 강종별 단면적과 항복강도의 곱으로 분리하여 산정해야 한다. 이에 따라 하이브리드 합성보의 공칭휨강도는 식 (2)와 같이 수정하여 적용하였다.

$$M_n = [A_{s,t} F_{y,t} (d_1 + d_{3,t}) + A_{s,b} F_{y,b} (d_1 + d_{3,b}) + A_{sr} f_{yr} (d_1 + d_{3,r})] \times 10^{-6} \quad (2)$$

여기서, $A_{s,t}$: 상부플랜지 및 웨브 단면적 [mm^2]

$F_{y,t}$: 상부플랜지 및 웨브 항복강도 [MPa]

$A_{s,b}$: 하부플랜지 단면적 [mm^2]

$F_{y,b}$: 하부플랜지 항복강도 [MPa]

d_1 : 강재 상부면으로부터 콘크리트 압축 합력까지의 거리 [mm]

$d_{3,t}$, $d_{3,b}$, $d_{3,r}$: 강재 상부면으로부터 각각 상부 플랜지, 하부플랜지, 철근 도심까지의 거리 [mm]

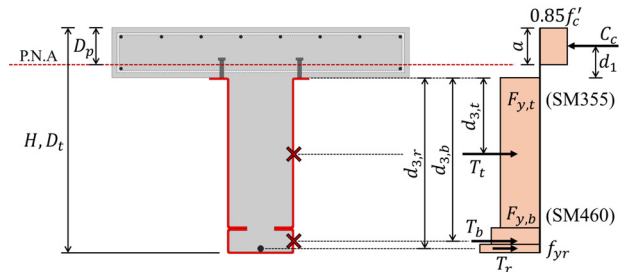


Fig. 11. Plastic stress distribution for flexural strength calculation

식 (2)는 KDS 41 30 20: 2022의 합성단면에 대한 소성응력분포법에서 강재보의 항복강도를 단면 내 위치에 따라 상이하게 적용하여 산정하였으며, 본 연구에서는 상부 강판과 웨브에 SM355, 하부강판에 SM460의 재료 강도를 각각 적용하여 휨강도를 산정하였다. 이때 고강도강의 재료적 특성이 소성응력분포법의 적용 가능성에 영향을 미칠 수 있으나, 본 실험의 SM460 강판 연신율은 19.2 %로 충분한 소성변형 능력을 보유하고 있어 소성응력분포법 적용이 적절한 것으로 판단하였다.

다만, Jun *et al.*^[8]의 H형강 하이브리드 합성보 실험에서는 하부플랜지에 SM570 (현 SM460) 및 HSA800 (현 HSA650)을 적용한 경우 웨브와 상부플랜지의 일 반강(SM490, 현 SM355)이 하부플랜지보다 먼저 항복하여 소성중립축 위치가 이동하고, 소성중립축의 상대 위치를 나타내는 D_p/D_t 가 Eurocode 4의 제한값(0.15)에 근접하면서 소성모멘트에 도달하지 못하는 결과가 나타났다. 여기서, D_p 는 슬래브 상단에서 소성중립축까지의 거리, D_t 는 합성보 전체 춤을 나타낸다(Fig. 11 참조). 또한 하부플랜지의 고강도화로 인한 강재단면 인장력 증가가 슬래브 수평전단력을 증대시켜 예상치 못한 슬래브 종방향 전단파괴를 선행시키는 것으로 보고되었다. 하지만 HyFo 합성보의 경우 H형강 하이브리드 합성보와는 다음과 같은 구조적 차이로 다른 거동 특성을 보인 것으로 판단된다. 첫째, 항복강도 비율 측면에서 본 연구의 하부강판(SM460)과 상부강판 및 웨브(SM355)의 실측 항복강도 비는 약 1.17(535.3 MPa/458.5 MPa)로, Jun *et al.*^[8]의 SM570 적용 시 약 1.51(520 MPa/345 MPa), HSA800 적용 시 약 2.3(803 MPa/345 MPa)에 비해 낮은 값을 갖는다. 이는 이중강종 조합에 의한 소성중립축 하향 효과가 상대적으로 작음을 의미한다. 둘째, 본 실험에서 산정된 HF 4-100의 D_p/D_t 는 약 0.19로 Eurocode 4의 제한값(0.15)을 상회하였으나 콘크리트 충전에 의한 웨브 구속 효과와 SM460 강판의 충분한 연신율(19.2 %)로 실험에서는 공칭휨강도 이상의 강도가 발현된 것으로 판단된다. Table 5에 나타난 바와 같이 각 실험체의 소성중립축은 슬래브 내부에 위치하며($D_p < t_s$), 이로 인해 강재보 웨브 전체가 인장역에 놓이게 된다. 인장역의 웨브는 압축좌굴이 발생하지 않으므로, 웨브 국부좌굴이 지배적인 파괴모드로 발현되지 않은 주된 원인은 소성중립축

위치에 기인한 것으로 판단된다. 마지막으로, 슬래브 수평전단력 측면에서 하부강판 항복강도가 SM460 (535.3 MPa, 실측값)에 그치므로 강재 단면의 인장력 증분이 상대적으로 작아, Jun *et al.*^[8]에서 문제가 된 슬래브 종방향 전단파괴에 대한 위험성이 낮아질 수 있을 것으로 판단된다. 본 실험에서도 슬래브 상면에 종방향 균열이 관찰되었으나, Jun *et al.*^[8]의 실험에서와 같이 종방향 전단파괴가 지배적인 파괴모드로 작용하지는 않았으며, 완전합성보에서는 슬래브 압괴가 지배적인 파괴모드로 나타났다.

HyFo 합성보에 적용된 전단연결재의 공칭강도는 스티드 앵커(Q_s)와 앵글(Q_a)에 대해 식 (3)^[12], 식 (4)^[13], 식 (5)^[10]로 산정하였으며, 합성율에 따른 전단연결재 수량을 결정하였다. 다만, Ahn *et al.*^[13]이 제안한 식에서는 Eurocode 4의 안전율(γ_u)을 포함하여 설계강도를 산출하지만, 본 연구에서는 식 (3), 식 (5)와의 공칭강도 기준을 동일하게 적용하기 위해 $\gamma_u=1.0$ 을 적용하였다.

$$Q_s = 0.5A_{sa}\sqrt{f_{ck} \cdot E_c} \leq R_g \cdot R_p \cdot A_{sa} \cdot F_u \quad (3)$$

$$Q_a = \frac{10h^{2/3} \cdot f_{ck}^{2/3}}{(0.0012l_w^2 - 0.057l_w + 1.9)^{2/3}} \quad (4)$$

$$Q_a = \frac{31,000 \cdot h^{3/4} \cdot f_{ck}^{2/3}}{\sqrt{b}} \quad (5)$$

여기서, Q_s : 스티드 앵커의 공칭전단강도 [N]

A_{sa} : 스티드 앵커의 단면적 [mm²]

R_g, R_p : 스티드 앵커 균효과/위치효과 계수

($R_g=1.0, R_p=0.75$)

Q_a : 앵글의 공칭전단강도 [N]

l_w : 앵글의 용접 길이 [mm]

h : 앵글의 높이 [mm]

b : 앵글의 폭 [mm]

식 (2)의 완전합성보에 대한 공칭휨강도 산정식에서 합성율이 100 % 미만인 부분합성보의 경우, 전단연결재의 총 수평전단력($\sum Q_n$)이 슬래브의 유효압축력을 제한하므로, 식 (2)의 인장력 항을 $\sum Q_n$ 으로 대체하여 식 (6)과 같이 공칭휨강도를 산정할 수 있다.

$$M_n = \Sigma Q_n \times (H - y_{sl,h} - a/2) \times 10^{-6} \quad (6)$$

여기서, ΣQ_n : 전단연결재(스터드 앵커+앵글)의 공칭 강도 합 [N]

완전합성보의 경우(합성율 $\eta \geq 100\%$), ΣQ_n 이 강재 및 철근의 인장력 이상이므로 식 (2)와 동일한 결과를 산출한다. 한편, AISC 360-22^[14] Commentary Section C-13에서는 부분합성보의 공칭휨강도를 강재단면(철근 포함)만의 소성모멘트(M_p)와 완전합성보의 공칭휨강도($M_{n,full}$) 사이에서 합성율에 따라 선형보간하여 하한값을 산정하는 간편법을 제시하고 있다.

$$M_n \geq M_p + \eta \times (M_{n,full} - M_p) \quad (7)$$

여기서, M_p 는 강재단면과 하부 철근만으로 구성된 비합성 단면의 소성모멘트이며, $M_{n,full}$ 은 완전합성보의 공칭휨강도(식 (2))이다. 식 (7)은 실제 $M_n - \eta$ 관계가 위로 볼록한 비선형 곡선인 점을 고려하면 보수적인 하한값을 제공하므로, 설계 실무에서 간략 검증용으로 활용 수 있다.

Table 5는 재료시험 실측강도를 적용하여 산정한 공칭휨강도(M_n)와 실험 최대모멘트(M_{max})를 비교한 것이다. 완전합성보에 대해서는 식 (2), 부분합성보에 대해서는 식 (6)으로 산정하였으며, 합성율(η)은 재료강도를 반영하여 산정하였다. 실험체의 최대휨모멘트(M_{max})는 가력하중에 의한 모멘트에 자중에 의한 모멘트를 합산하여 산정하였다.

HF 3-100은 설계 시 공칭강도 기준으로 합성율 100%로 계획되었으나, 재료강도 기반으로 재산정한 결과 합성율이 96.7%로 나타났다. 이는 SM355 강판의 실측

항복강도(458.5 MPa)가 공칭항복강도(355 MPa) 대비 크게 상회하여 강재 인장력이 증가한 반면, 전단연결재의 수평전단력(ΣQ_n)은 이에 미치지 못하였기 때문이다. 즉, 열연 판재 사용에 따른 SM355 강재의 항복강도 상승이 합성을 저하의 주요 원인으로 나타났다. HF 4-100은 재료강도 기준 합성율이 100.2%로 완전합성조건을 만족하였다.

모든 실험체에서 휨강도비 M_{max}/M_n 이 1.05–1.36으로 실험 최대모멘트가 공칭휨강도를 상회하는 것으로 확인되었다. 완전합성보의 M_{max}/M_n 은 HF 3-100의 경우 1.06, HF 4-100의 경우 1.05로, 일반강 실험체가 약간 높게 나타났지만 그 차이는 크지 않았다. 이는 Kim *et al.*^[11]의 선행연구에서 제시한 합성보 내력평가식을 이중강종 단면으로 확장 적용하여도 안전측의 강도 예측이 가능함을 보여준다. 부분합성보의 경우 합성율이 감소할수록 M_{max}/M_n 이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 부분합성보 공칭휨강도 산정(식 (6))에서 전단연결재의 공칭강도(ΣQ_n)에 근거한 보수적 하한값을 적용하였기 때문으로 판단된다. 실제 실험에서는 전단연결재가 공칭강도 도달 이후에도 일정 수준의 변형능력과 잔류저항을 발휘할 수 있으며, 강재-콘크리트 사이의 부착과 국부 접촉 효과도 일부 기여할 수 있다. 따라서 제시한 부분합성보의 휨강도 산정식이 부분합성보의 휨강도를 정확하게 예측하기에는 한계가 있음을 나타낸다.

4.2 강성 비교

Table 4에 나타난 실험체의 초기강성(K_i)을 비교하면, 완전합성보인 HF 4-100 (134.5 kN/mm)은 HF 3-100 (117.6 kN/mm)에 비해 약 14% 높은 강성을 나타냈다. 이는 SM460 하부강판의 높은 항복강도로 인해 항복 이

Table 5. Comparison of nominal flexural strength and composite ratio

No.	Specimen	M_n [kN]	M_{max} [kN]	M_{max}/M_n	ΣQ_n [kN]	Steel tensile force [kN]	η [%]	Classification
1	HF 3-100	3,913.5	4,150.9	1.06	7360.6	7609.0	96.7	Full composite
2	HF 4-100	4,178.4	4,383.6	1.05	7965.6	7953.1	100.2	Full composite
3	HF 4-75	3,257.6	3,986.3	1.22	5959.9	7953.1	74.9	Partial (75%)
4	HF 4-50	2,291.3	3,122.2	1.36	4041.2	7953.1	50.8	Partial (50%)

M_n : Nominal flexural strength (measured material strength)

Steel tensile force: $A_{st} \cdot F_{y,t} + A_{sb} \cdot F_{y,b} + A_{sr} \cdot f_{gr}$

M_{max} : Maximum moment (test, including self-weight)

$\eta = \Sigma Q_n / \min$ (Steel tensile force, Slab compressive force)

전 구간에서 단면의 유효강성이 증가하였기 때문으로 판단된다. 한편 부분합성보인 HF 4-75 (116.0 kN/mm)는 HF 3-100과 유사한 수준이며, HF 4-50 (125.8 kN/mm)은 HF 4-75보다 높게 나타났다. 이는 합성율의 차이보다는 실험체별 콘크리트 충전 상태, 강재-콘크리트 접합면의 초기 부착력 등의 영향이 복합적으로 작용한 결과로 판단되며, 합성율에 따른 초기강성의 뚜렷한 상관관계를 도출하기는 어려운 것으로 분석된다.

4.3 연성능력 및 변형능력 평가

Table 4에 각 실험체의 변위연성도(δ_u/δ_y)를 나타내었다. 완전합성보인 HF 3-100과 HF 4-100의 변위연성도는 각각 3.09와 4.23으로 우수한 연성 거동을 보이는 것으로 나타났다. HF 4-100 ($\delta_u=114.5$ mm)이 HF 3-100 ($\delta_u=96.6$ mm)에 비해 최종 변위가 오히려 증가한 것은, SM460 적용으로 최대하중이 높아지면서 슬래브 압괴 이후에도 더 긴 변형 구간이 형성되었기 때문으로 판단된다. 이는 하부플랜지에 고강도강을 적용하더라도 부재 전체의 연성능력이 크게 저하되지 않음을 나타낸다.

실험체별 최대하중 시의 변위(δ_u)는 HF 3-100이 59.9 mm, HF 4-100이 40.1 mm로 고강도강 적용 시 다소 감소하였다. 이는 SM460 적용시 강재 인장력 증가로 콘크리트 슬래브에 전달되는 압축력이 증가하여 슬래브 압괴가 상대적으로 작은 변위에서 발생하였기 때문으로 판단된다.

4.4 합성율 영향 분석

합성율을 변수로 한 실험체 HF 4-75와 HF 4-50의 경우, 합성율 100 %인 실험체 HF 4-100과 최대하중을 비교하였을 때 각각 약 90.8 %, 70.9 %로 감소하였다. 합성율이 25 % 씩 감소할 경우 최대하중은 각각 9 %와 29 % 감소함을 의미한다. 최대하중 도달 이후 합성율이 높은 실험체일수록 우수한 연성적인 거동을 보였으며, 합성율 50 %인 실험체인 HF 4-50의 경우 콘크리트와 전단연결재의 접합면에서 파괴가 발생하여 하중이 급격하게 저하되는 것으로 나타났다. 그러나 합성율이 75 %인 실험체(HF 4-75)는 합성율 100 % 실험체(HF 4-100)의 공칭휨강도(M_n)와 비교하면, 최대모멘트(M_{max})

가 약 5 % 저하되어 완전합성보의 공칭휨강도에 근접하는 것으로 나타났다. 따라서 HyFo 합성보 설계 시 합성율은 구조적 성능과 안전성을 고려하여 가능한 완전합성보로 설계하거나 적어도 75 % 이상의 부분합성보로 계획하는 것이 바람직하며, 합성율 50 % 이하의 적용 시에는 전단연결재의 파괴모드 및 취성 거동에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 다만, 이러한 결과는 합성율 변화의 영향뿐 아니라 전단연결재의 종류, 배치 간격 및 상세의 영향이 함께 반영된 결과로 순수 합성율 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는 동일한 전단연결재 형식에 따른 비교 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 하부플랜지에 고강도강(SM460)을 적용하고 나머지 부분은 일반강(SM355)을 조합한 하이브리드 합성보(HyFo Beam)에 대해, 합성율(100 %, 75 %, 50 %)과 하부플랜지 강도를 주요 실험변수로 하여 4개 실험체의 휨성능 평가 실험을 수행하였다. 이중강종 단면에 소성응력분포법을 적용한 합성율에 따른 공칭휨강도를 산정하고, 모멘트-변위 관계, 초기강성, 연성능력, 합성율 영향 및 파괴모드를 분석하였다. 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 완전합성보 실험체(HF 3-100, HF 4-100)는 항복하중 도달 후 지속적으로 하중이 증가하여 최대하중에 도달하였으며, 이후 슬래브 압괴에 의해 하중이 저하되었다. 하부플랜지에 고강도강(SM460)을 적용한 HF 4-100은 일반강(SM355) 실험체 HF 3-100 대비 최대하중이 약 1.06배 증가하였고, 최대하중 이후 80% 저하 시 변위(δ_u)도 약 19 % 증가하여, 고강도강 적용에 따른 변형능력 저하는 발생하지 않았다.
- (2) 합성율 75 %인 실험체(HF 4-75)의 최대모멘트(M_{max})는 합성율 100% 실험체(HF 4-100)의 최대모멘트의 약 91%, 공칭휨강도(M_n)의 약 95 % 수준으로 나타났으며, 합성율 50 %인 실험체(HF 4-50)는 전단연결재 접합부의 파단에 의해 하중이 급격히 저하되었다. 따라서 HyFo 합성보 설계 시 합성율은 75 % 이상으로 계획하는 것이 바람직하며, 50 % 이하의 적용 시에는 전단연결재의 파괴모드에 대

한 충분한 검토가 필요하다.

- (3) 이중강종을 적용한 HyFo 합성보의 경우에도 상부 및 웹 강판과 하부 고강도 절곡강판을 분리하여 소성응력분포법으로 휨강도 산정이 가능하며, 전단연결재의 강도를 반영하여 부분합성보로 설계할 수 있다. 실험체의 최대 휨강도 대비 제안식에 의한 휨강도 비($M_{\max}/M_n$)은 완전합성보에서 1.05–1.06, 부분합성보에서 1.22–1.36으로 나타나 모든 실험체에서 충분히 안전측으로 평가 가능한 것으로 나타났다.
- (4) HyFo 합성보의 소성중립축의 상대 위치 D_p/D_t 는 Eurocode 4의 소성응력분포법 적용 제한값(0.15)을 상회하였으나, 소성중립축이 슬래브 내부에 위치하여 강재보 웹 전체가 인장역에 위치함으로써 웹 국부좌굴이 억제되었고, SM460 강판의 충분한 연신율(19.2 %)에 의해 모든 실험체에서 공칭휨강도 이상의 강도가 발현되었다. 이는 충전형 합성보의 단면 특성이 소성응력분포법의 적용 범위를 확장할 수 있음을 보여준다.
- (5) 고강도강(SM460)을 적용한 완전합성보 HF 4-100의 초기강성은 일반강(SM355) 실험체 HF 3-100 대비 약 14 % 높게 나타나 사용성 측면에서도 유리한 것으로 나타났다. 또한, 합성율이 75 % 이상인 경우 변위연성도가 3.0 이상으로 나타나 하부플랜지에 SM460을 적용하더라도 충분히 연성적으로 거동 가능함을 보여주었다.
- (6) 본 연구는 제한된 실험체와 특정 단면 및 전단연결재 상세에 기반한 실험적 연구로, 연구 결과를 일반적인 설계기준으로 확대 적용하기 위해서는 추가적인 실험 및 해석적 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 POSCO 솔루션 과제의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] 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).
- [2] Kim, S., Kim, S., and Ryu, D.S. (2013) Study on the Cyclic Seismic Testing of U-shape Hybrid Composite Beam-to-Composite Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.1, pp.47-59 (in Korean).
- [3] Kim, S.B., Jeon, Y.H., Cho, S.H., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2017) Seismic Performance of HyFo Beam with High Depth-to-SRC Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.2, pp.135-145 (in Korean).
- [4] Kim, S., Kim, S., Ryu, D.S., and Choi, S.K. (2013) Fire Resistance of U-shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.379-388 (in Korean).
- [5] Kang, M., Choi, Y.H., Kim, S.B., and Kim, S. (2023) An Experimental Study on the Fire Resistance Performance and Residual Strength of U-shaped Composite Beams after Fire, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.39, No.1, pp.225-232 (in Korean).
- [6] Kim, S.B., Kim, J.Y., Lee, E., Ryu, D.S., Ryu, G.C., and Kim, S.S. (2018) Evaluation for vibration performance of long span HyFo beam by walking load, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction* (in Korean).
- [7] Lee, C.-H., So, H.J., Park, C.H., Lee, C.N., Lee, S.H., and Oh, H. (2016) Flexural Behavior and Design of Concrete-filled U-shape Hybrid Composite Beams Fabricated from 570MPa High-Strength Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.2, pp.109-120 (in Korean).
- [8] Jun, S., Han, K.H., Lee, C.-H., and Kim, J.W. (2017) Flexural Testing of Asymmetric Hybrid Composite Beams Fabricated from High-strength Steels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.3, pp.217-228 (in Korean).
- [9] Cho, S.H., and Kim, S. (2016) Experimental Study on the Flexural Performance of HyFo Composite Beam Applying High Strength Steel, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.16, No.6, pp.9-19 (in Korean).
- [10] Kim, Y.J., Bae, J.-H., Ahn, T.S., and Jang, D.W. (2014) Push-out Test on Welded Angle Shear Connectors Used

- in Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.155-167 (in Korean).
- [11] Kim, Y.J., Bae, J.-H., Ahn, T.S., and Choi, J.K. (2015) Flexural Capacity of the Composite Beam using Angle as a Shear Connector, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.63-75 (in Korean).
- [12] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Standard for Steel Composite Structures of Buildings*, KDS 41 30 20:2022 (in Korean).
- [13] Ahn, H.-J., Jeong, I.Y., Kim, Y.J., and Hwang, J.S. (2015) Shear Resistance of BESTOBEAM Shear Connector According to the Length, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.5, pp.483-491 (in Korean).
- [14] AISC (2022) *Specification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-22, American Institute of Steel Construction, USA.

요 약: 본 연구에서는 하부플랜지에 고강도강(SM460)을 적용하고 나머지 부분은 일반강(SM355)을 조합한 충전형 합성보(HyFo Beam)에 대해 합성율(100 %, 75 %, 50 %)을 변수로 휨성능 평가 실험을 수행하였다. 이종강종 단면에 소성응력분포법을 적용하여 공칭휨강도를 산정한 결과, 모든 실험체에서 공칭휨강도에 대한 최대모멘트의 비(M_{max}/M_n)가 1.05 이상으로 나타났다. 또한 고강도강 적용 시 초기강성이 약 14 % 증가하였고, 합성율 75 % 이상인 경우 변위연성도가 3.0 이상으로 나타나 하부플랜지에 SM460을 적용한 하이브리드 충전형 합성보의 충분한 휨성능과 연성능력이 확보됨을 확인하였다.

핵심용어: 고강도강, 하이브리드 합성보, 합성률, 휨강도
