

# 립c형강과 측면사다리꼴 강판을 사용한 U형 합성보의 구조성능에 대한 실험적 연구

이창용<sup>1</sup> · 소지혜<sup>2</sup> · 김태수<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>박사수로, 한양대학교, 건축공학과, <sup>2</sup>차장, (주)엔알씨구조연구소, <sup>3</sup>교수, 한양대학교 ERICA, 건축학부 및 스마트시티공학과

## Experimental Study on the Structural Behaviors of U-Shaped Steel Composite Beams using Lipped Channels and Side Trapezoidal Plates

Lee, ChangYong<sup>1</sup>, So, Jihye<sup>2</sup>, Kim, TaeSoo<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Candidate, School of Architectural Engineering, Hanyang University Seoul, 04763, Korea

<sup>2</sup>NRC Structure Laboratory Co., Ltd., Seoul, 08503, Korea

<sup>3</sup>Professor, Major in Architectural Engineering and Dept. of Smart City Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea

**Abstract** – In this study, experiments were conducted to investigate the structural performance of U-shaped steel-concrete composite beams utilizing cold-formed lipped channels as web members. Trapezoidal steel plates were additionally installed on both lower sides of the beams to enhance flexural and shear capacities. A total of five specimens were fabricated with two primary variables: the presence or absence of bottom tension reinforcement (R/NR) and different shear span-to-depth ratios (1.5, 2.0, and 2.5). Four-point bending tests and three-point shear tests were performed respectively to evaluate the flexural and shear behaviors. The specimens designed for flexure exhibited typical flexural failure modes. Specifically, specimen T8-R, containing bottom tension reinforcement, exhibited approximately 14.8 % higher flexural strength compared to specimen T8-NR without bottom tension reinforcement. Specimens subjected to shear tests showed typical shear failure patterns, and experimental shear strength decreased as the shear span-to-depth ratio increased, with a maximum reduction of about 15 %. The cold-formed lipped channels provided effective shear connection, enabling a fully composite action between the steel and concrete components, thereby potentially replacing conventional stud anchors. This composite action significantly enhanced the overall structural performance, improved load distribution capacity, and contributed to the stability and robustness of the entire structural system.

**Keywords** - In-filled composite beam, Flexural strength, Shear strength, U-shaped steel section, Lipped channel

### 1. 서론

최근 고층아파트 및 주상복합 건물 등에서는 공간 효율성과 구조적 강도를 동시에 충족시킬 수 있는 U형 단면을 이용한 강재 및 콘크리트 합성보의 사용이 증가하고 있다<sup>[1]-[3]</sup>. 이러한 합성보는 콘크리트 슬래브와 강재보를 전단연결재로 일체화 거동시킨 구조시스템이면

서, 합성보의 정모멘트(Positive bending moment) 상태에서 압축력을 상부 콘크리트 슬래브가 저항하고, 인장력은 하부 강재보가 저항함으로써 콘크리트와 강재 각각 가지고 있는 구조적인 특징 중 장점을 극대화하고 단점을 최소화하기 위해 개발되어 적용되고 있는 공법을 말한다<sup>[4]-[8]</sup>.

기존의 강재와 철근콘크리트를 사용하여 구조적 강도와 변형 능력을 확보할 수 있으며, 이러한 방법은 하부 층의 공간 제한, 비경제적인 디자인, 철근 혼잡 등의 문제를 해결할 수 있다<sup>[9]-[10]</sup>. 최근 콘크리트 충전된 U형 합성보는 많은 관심을 받고 있다. U형 강재 단면에 콘크리트를 충전하여 전단연결재로 슬래브에 연결되며, 강재부분이 콘크리트 거푸집 역할을 하면서 구조적 일

Note.-Discussion open until October 31, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 3, 2025; revised on April 3, 2025; approved on April 4, 2025.

Copyright © 2025 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-400-5131

E-mail. tskim0709@hanyang.ac.kr

체성을 높여 준다. 추가로 U형 강재는 조립 후 현장에 반입되므로 설치가 편리하다. 충전형 합성보는 높은 강도와 변형 능력, 높은 경간 대 깊이 비율을 제공하며 노동 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다<sup>[11]-[14]</sup>.

Kim *et al.*<sup>[15]-[17]</sup>은 Z형 측판과 C형 하부강판을 고장력볼트로 체결하고 콘크리트를 타설한 U형 합성보의 휨성능을 평가하기 위해 실험을 수행하였다. 측면을 냉간성형 평판으로 구성하였고, 보내부에 하부 C형강의 립과 측면 Z형강판의 한쪽 플랜지를 볼트로 체결하여 강재부분과 타설 콘크리트의 합성효과를 유도하였다. 하부강판에 초고강도 강재를 적용한 실험체는 충분한 내력을 발휘하지 못하고 최대내력 이후 급격한 강도저하가 발생하였다. Kim *et al.*<sup>[18]</sup>은 Z형 측판과 C형강을 고장력볼트로 하부강판에 체결하고 콘크리트 타설한 U형 합성보의 휨성능을 평가하기 위해 보춤, 슬래브의 크기 등을 변수로 설정하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 고강도 강재를 사용한 실험체는 휨강도 및 강성이 과대평가 되었다. 기존 U형 합성보에서는 보춤에 대한 변수가 부재의 내력증가에 영향을 미치는 것으로 확인하였지만, 강재와 콘크리트 사이에 슬립이 발생하면서 전단연결재가 충분히 역할을 하지 못하였고, 고강도 강재에 대한 휨강도가 과대평가되었다.

이 연구에서는 보 웹 양측면에 수직으로 연결된 립 C형강을 보 하부강판에 용접접합해서 U형상의 강재보와 내부에 콘크리트를 타설한 합성보를 계획하였다. 휨 및 전단성능을 향상시키기 위해 사다리꼴 형태의 강판을 보하부의 양쪽 측면에 설치하였다. 합성보 웹재로 사용된 립C형강의 플랜지는 내부에 충전된 콘크리트와 강재 사이에 전단연결재 역할을 하도록 한다. 이를 통해 립C형강과 측면사다리꼴 강판을 적용한 합성보의 휨 및 전단성능을 실험적으로 평가하고 구조적 효율성을 분석하고자 한다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체 계획

냉간성형 립C형강과 측면사다리꼴 보강판을 사용한 U형 합성보의 휨 및 전단 구조성능을 조사하기 위해, 하부인장철근 유무(R/NR)와 전단경간비(1.5/2.0/2.5)를

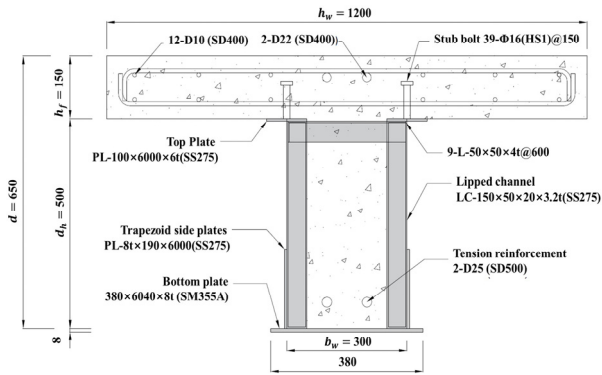
**Table 1.** Specimens list

Specimens	Tensile rebar	Shear span to depth ratio	Trapezoid side plate thickness (mm)	Bottom plate thickness (mm)
T8-R	2-D25 (SD500)	-	8	8
T8-NR	-	-	8	8
T8-1.5	4-D25 (SD600)	1.5	8	20
T8-2.0	4-D25 (SD600)	2.0	8	20
T8-2.5	4-D25 (SD600)	2.5	8	20

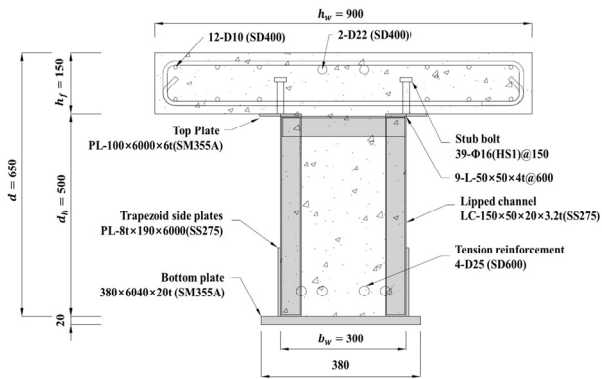
주요 실험 변수로 설정하였고 휨 및 전단 실험을 수행하였다. 실험체 제작 중에 립C형강 사이의 연결을 하기 위해 세로방향으로 일정한 간격을 유지하며 부분용접을 실시하였다. 특히, 립C형강의 웹면 중앙과 측면사다리꼴 보강판이 만나는 접점에서 3 mm 크기의 필릿용접을 하여 두 부재 간에 일체화 거동을 확보할 수 있도록 하였다.

Table 1과 Figs. 1(a), 1(b) 및 1(c)에 각 실험체의 명칭, 구성 및 치수를 상세하게 나타낸다. 기존 U형 합성보 중 고장력볼트 조립형 U형 합성보<sup>[15]-[18]</sup>와 다르게 이 연구의 합성보는 Fig. 1(d)에 표시한 바와 같이, 하부판에 립C형강과 측면사다리꼴 보강판을 용접접합하고 내부콘크리트가 채워지는 콘크리트 충전 개선 U형 합성보의 형태를 갖는다. 콘크리트 슬래브와 U형 강재보가 완전 합성거동을 할 수 있도록 상부플레이트에 전단 스티드(Ø 16)의 설계강도가 콘크리트 슬래브 압축력과 강재보의 인장력 중 작은 값 이상이 되도록 배치하였다.

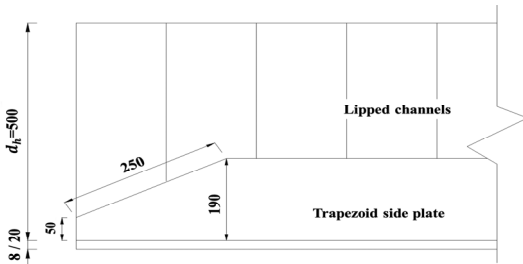
실험체는 T형 단면형태의 합성보로 Fig. 1의 실험체 상세와 같이 하부강판을 제외하고 실험체의 보폭은 300 mm이며, 콘크리트 슬래브를 포함한 전체높이는 650 mm로 계획하였다. 하부강판의 폭은 380 mm로 하고 두께는 휨실험체 8 mm, 전단실험체는 20 mm로 계획하였다. 슬래브의 폭은 슬래브의 압축력이 하부판 강재의 인장력보다 높도록 하였으며, T형 합성보의 중립축이 슬래브에 위치하도록 계획하였다. 실험조건 및 가력범위 등을 고려하여 콘크리트 슬래브의 폭은 전단실험체는 900 mm, 휨실험체는 1,200 mm, 콘크리트 슬래브 두께는 150 mm로 설정하였다. 모든 실험체의 보춤은



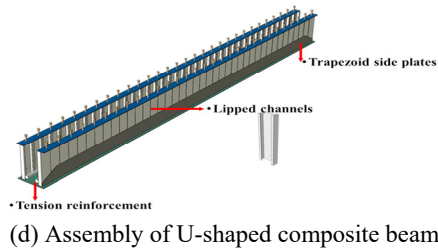
(a) T8-R/NR



(b) T8-1.5/2.0/2.5



(c) Lipped channel and trapezoid side plate



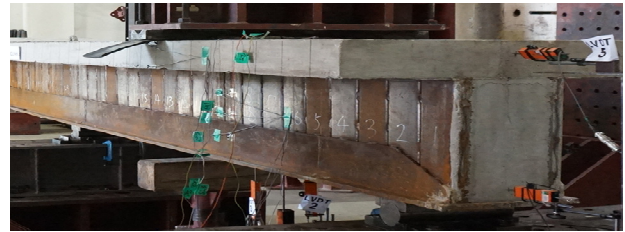
(d) Assembly of U-shaped composite beam

**Fig. 1.** Cross section and configuration of specimens (Unit : mm)

500 mm으로 일정하게 계획하였다. 하부강판의 강종은 SM355A, 공칭두께 3.2 mm의 립ㄷ형강의 강종은 SS275이다. 보상부 간격유지용 앵글의 경우 공칭두께 4 mm의 SS275로 모두 같은 조건으로 제작하였다. 휨 실험체와 전단실험체의 강재제작 및 콘크리트 타설시

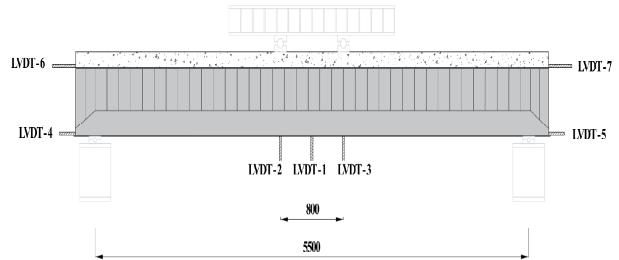


(a) T8-R/NR specimens

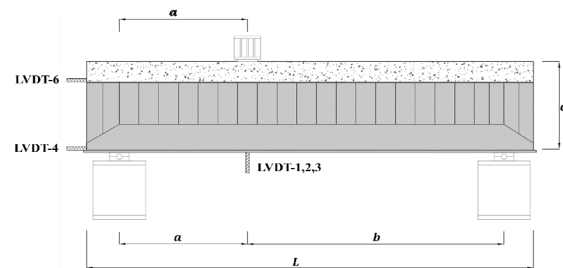


(b) T8-1.5/2.0/2.5 specimens

**Fig. 2.** Set-up of specimens



(a) T8-R/NR



(b) T8-1.5/2.0/2.5

**Fig. 3.** Installation location of LVDTs and loading conditions

기는 다르게 계획·제작하였다.

보 하부인장철근은 D25(휨실험체 대해서는 SD500 와 전단실험체에 대해서는 SD600)이며, 하부강판 상부 면에서 50 mm 띄워서 설치하였다. 콘크리트 설계압축 강도는 24 MPa이며 상부스트럿(∅16)은 150 mm 간격으로, 슬래브의 주 압축철근은 D22(SD400), 온도철근 및 스트럿은 D10(SD400)으로 배근하였다.

Fig. 2는 실험체 설치 상황을 나타낸다. 양쪽 지지점은 단순지지로 설치하였으며, 휨 실험체는 4점가력

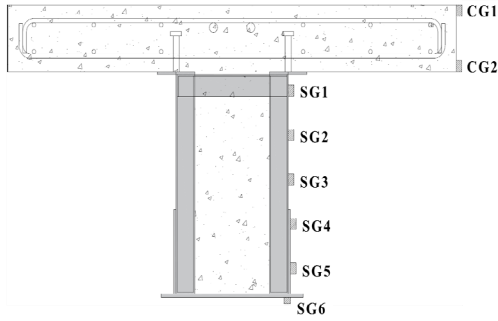


Fig. 4. Location of strain gauge

(Fig. 3(a)), 전단 실험체는 3점 가력(Fig. 3(b))으로 실시한다. 실험 시에 가력지점 보 하부의 수직 처짐을 계측하기 위해 Fig. 3와 같이 보 하부면에 3개의 변위계(LVDTs 1, 2, 3) 설치한다. 보 강재부분과 콘크리트에서 슬립발생 여부를 계측하기 위해 실험체 양단부 측면에 변위계(LVDTs 4, 5, 6, 7)를 설치한다. 휨 및 전단 실험 시 가력에 따른 합성보의 강재 및 콘크리트 표면에서 발생하는 변형도의 추이와 소성중립축(P.N.A)의 위치를 조사하기 위해 Fig. 4와 같이 콘크리트 슬래브 측면(CG1, CG2)과 보 웨브(립C형강), 측면사다리꼴 보강판, 하부강판(SG1-SG6)에 스트레인 게이지를 부착한다. 가력은 10,000 kN 오일잭(Oil jack)를 사용하였으며 최대내력 이후 최대내력의 80 %까지 하중이 저하될 때 실험을 종료하였다.

2.2 재료시험

설계압축강도( $f_{ck}$ )가 24 MPa이 콘크리트의 배합비는 전단실험체와 휨실험체에 대해 각각 Table 2와 Table 3에 정리하였다. KS F 2403<sup>[19]</sup>에 의거하여 지름 100 mm 높이 200 mm의 3구의 콘크리트 압축강도 공시체를 제작하였다. 3구의 공시체는 28일간 양생하여 콘크리트의 압축강도 시험방법인 KS F 2405<sup>[20]</sup>에 규정에 따라 콘크리트 압축강도 시험을 실시하였다. 전단 실험체와 휨실험체 콘크리트의 평균압축강도( $f_{ck}$ )는 각각 24.5 MPa, 38.7 MPa로 나타났다. 두 실험체의 콘크리트는 배합비 및 양생시기, 날씨가 달라 콘크리트 압축강도에 있어 차이가 발생하였다. 철근 및 강재의 재료 특성으로 평가하기 위해 KS B 0801<sup>[21]</sup>의 금속재료 인장시험편 규격에 따라 철근(D10, D22, D25), 강판(SM355A, SS275), 립C형강(SS275), 스티드볼트( $\varnothing$

Table 2. Concrete mix proportion (T8-1.5/2.0/2.5)

Design criterion strength $f_{ck}$ (MPa)	W/B (%)	S/A (%)	Unit amount of material ( $kg/m^3$ )				
			W	C	G	S	AE
24	49.4	49.4	179	254	889	858	2.53

Note: W/B=Water/binder ratio, S/A=Fine aggregate ratio, W=Water, C=Cement, G=Coarse aggregate, S=Fine aggregate, AE=Water-reducing admixture

Table 3. Concrete mix proportion (T8-R/NR)

Design criterion strength $f_{ck}$ (MPa)	W/B (%)	S/A (%)	Unit amount of material ( $kg/m^3$ )				
			W	C	G	S	AE
24	54.8	49.4	106	177	890	858	2.57

Table 4. Tensile test results of rebar (T8-1.5/2.0/2.5)

Coupon	$E_s$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_{elo}$ (%)
D10 (SD400)	187.8	421.4	554.5	23.2
D22 (SD400)	188.3	475.3	629.3	16.8
D25 (SD600)	190.1	564.8	710.7	21.4

Note:  $E_s$ =Elastic modulus,  $f_y$ =Yield stress,  $f_u$ =Tensile strength,  $\epsilon_{elo}$ =Elongation at fracture

Table 5. Tensile test results of rebar (T8-R/NR)

Coupon	$E_s$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_{elo}$ (%)
D10 (SD400)	181.7	445.4	577.1	22.3
D22 (SD400)	183.9	473.6	533.7	18.1
D25 (SD500)	186.6	475.4	689.0	21.3

Table 6. Tensile test results of steel (T8-1.5/2.0/2.5)

Coupon	$t_e$ (mm)	$E_s$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_{elo}$ (%)
3.2 mm (SS275)	3.15	184.5	269.2	418.1	31.0
4.0 mm (SS275)	3.78	187.4	326.7	454.5	29.1
6.0 mm (SM355A)	6.04	186.1	433.8	569.8	28.1
8.0 mm (SS275)	7.71	186.8	314.2	469.9	37.6
20.0 mm (SM355A)	18.0	184.2	377.8	555.2	31.4

Note:  $t_e$  = Diameter of tensile coupon,  $E_s$ =Elastic modulus,  $f_y$ =Yield stress  $f_u$ =Tensile strength,  $\epsilon_{elo}$ =Elongation at fracture

16 : HS1)<sup>[22]</sup>에 대해 인장시험편을 각각 3개씩 제작하였고, KS B 0802<sup>[23]</sup>에 준하여 인장시험을 실시하였다. 재료시험결과는 Tables 4, 5와 6, 7에 정리하였다.

**Table 7.** Tensile test results of steel (T8-R/NR)

Coupon	$t_c$ (mm)	$E_s$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_{clo}$ (%)
3.2 mm (SS275)	2.85	197.4	310.9	452.9	32.9
6.0 mm (SS275)	6.15	167.4	297.1	455.9	34.8
8.0 mm (SS275)	7.71	191.6	298.2	472.6	36.0
8.0 mm (SM355A)	7.92	199.0	386.3	539.6	33.7

**Table 8.** Tensile test results of stud (T8-1.5/2.0/2.5)

Coupon	$D_c$ (mm)	$E_s$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_{clo}$ (%)
Ø 16 (HS1)	12.11	186.7	309.8	421.3	33.1

Note :  $D_c$ =Diameter of tensile coupon,  $E_s$ =Elastic modulus,  $f_y$ =Yield stress  $f_u$ =Tensile strength,  $\epsilon_{clo}$ =Elongation at fracture

철근 및 강재 재료시험 결과 KS (한국표준협회)에서 규정하는 최저 항복강도( $f_y$ ), 인장강도( $f_u$ ) 및 연신율( $\epsilon_{clo}$ )을 만족하는 것을 확인하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 하중-변위곡선

실험 결과를 통해 얻은 최대내력, 최대내력 시 변위, 최대내력 시 전단력은 Table 9에 상세히 정리하였다. 또한, 하중과 전단력에 따른 변위 관계는 Fig. 5에 나타내었다.

실험체 제작 시 완전합성보를 기준으로 설계하여 Table 9에 각 실험체에 재료설계기준강도를 적용하여 구한 중립축(N.P.N.A), 콘크리트 압축강도시험 및 강재

의 인장시험결과를 적용하여 구한 중립축(M.P.N.A), 실험결과로 얻은 스트레인 계지로 측정된 중립축(T.P.N.A) 3가지를 구하여 비교하였다. 휨실험에서는 재료설계강도 반영한 중립축(N.P.N.A)보다 재료시험강도 반영한 중립축(M.P.N.A)이 1.48~1.51배 감소하였고, 설계강도 반영한 중립축(N.P.N.A)보다 스트레인 계지로 측정된 중립축(T.P.N.A)이 1.08~1.36배 증가하였다. Table 9으로부터 휨 실험체에 대해 중립축은 모두 콘크리트 슬래브 내에 위치하는 것을 확인할 수 있다. T8-R과 T8-NR 휨실험체의 경우 설계콘크리트 24 MPa 보다 압축재료시험 결과인 콘크리트 압축강도가 38.7 MPa 로 높게 나타나서 콘크리트 압축강도시험결과를 반영해 구한 중립축(M.P.N.A)이 재료설계기준강도를 적용한 중립축(N.P.N.A)보다 낮아진 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)는 8 mm 측면사다리꼴 보강판을 사용한 휨 실험체인 T8-R/NR의 하중-변위 곡선이다. 하부인장철근이 있는 T8-R 실험체는 하부인장철근이 없는 T8-NR 실험체의 최대내력 보다 14.8 % 높게 나타났다. 인장철근은 압축영역에서 인장력에 저항하면서 전체 실험체의 내력 증진에 중요한 역할을 하며, 인장철근이 실험체 내에서 제공하는 구속효과가 콘크리트의 취성파괴를 지연시키고 연성거동을 유도함으로써 초기강성 및 내력을 증가시키는데 기여함을 보여준다.

Fig. 5(b)는 오일잭을 사용하여 측정된 실험 하중을 바탕으로 계산된 실험 전단력과 각 실험체의 수직 변위와의 관계 곡선을 나타내었다. 모든 실험체에서 콘크리트 슬래브의 전단파단과 립형강 웨브의 전단항복이 최대내력을 결정하는 주된 요인으로 나타났다. 실험체의 끝단에서 콘크리트와 립형강의 격리는 관찰되지

**Table 9.** Test results

Specimens	$P_{uc}$ (kN)	$V_{uc}$ (kN)	$\delta_{uc}$ (mm)	$M_c$ (kN · m)	$M_t$ (kN · m)	$V_{ns1}$ (kN)	$V_{ns2}$ (kN)	$V_{nc}$ (kN)	N.P.N.A (mm)	M.P.N.A (mm)	T.P.N.A (mm)
T8-R	1593.2	-	53.2	1872.0	1785.7	-	-	-	129.6	85.7	140
T8-NR	1388.1	-	60.9	1631.0	1533.3	-	-	-	109.6	73.9	149
T8-1.5	2764.3	1834.9	14.4	-	-	504.8	1056.8	162.8	-	-	-
T8-2.0	3122.5	1722.8	18.7	-	-	504.8	1056.8	162.8	-	-	-
T8-2.5	2348.2	1565.5	26.0	-	-	504.8	1056.8	162.8	-	-	-

Note:  $P_{uc}$ =Test maximum load  $V_{uc}$ =Test shear force,  $\delta_{uc}$ =Displacement at the maximum load,  $M_c$ =Test bending strength,  $M_t$ =Bending strength based on the material test result,  $V_{ns1}$ : Nominal shear strength calculated based on the nominal design strength of the lipped channel steel section alone,  $V_{ns2}$ : Nominal shear strength calculated based on the nominal design strength of the lipped channel and side plate steel section alone,  $V_{nc}$ : Nominal shear strength of the concrete alone. N.P.N.A=Values calculated from nominal strength. M.P.N.A=Values calculated from material test results. T.P.N.A=Values obtained from the strain distribution of specimens test results.

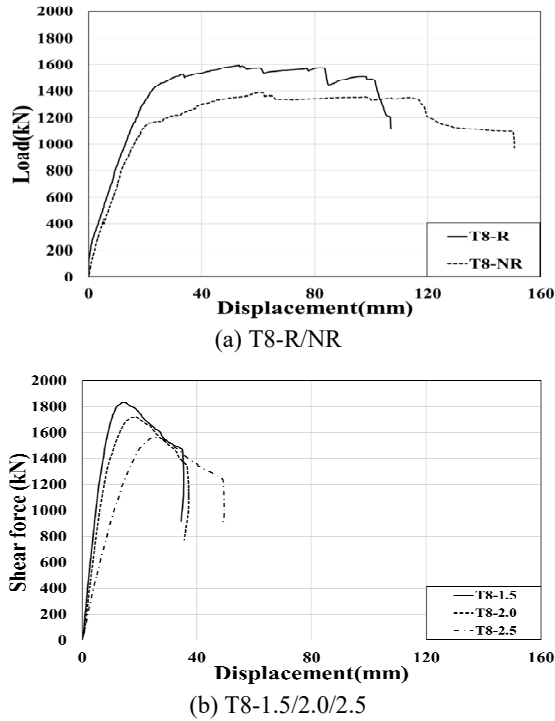


Fig. 5. Load/shear force-displacement curves

않았으며, 일체화된 거동이 확인되었다. 실험체별 초기 강성은 전단경간비가 감소에 따라 증가하였고, 실험체별 실험 전단내력은 전단경간비 증가에 따라 최대 15% 감소하는 경향을 보였다.

하부인장철근이 합성보의 휨내력에 상당한 기여하고 있음을 의미하며, 콘크리트 슬래브가 압축력을 담당하는 동안 하부인장철근은 인장력을 효과적으로 분담하여 단면 전체의 저항력을 증진시키는 것으로 판단된다. 하부인장철근은 단순히 인장력만을 분담하는 역할을 넘어서, 콘크리트 취성파괴를 지연시키고 항복 후의 연성거동을 유도함으로써 전체적인 거동과 안전성 측면에서도 기여하였다. 또한, 콘크리트와 강판 사이에 별도의 전단연결재를 사용하지 않고, 립C형강의 플랜지가 콘크리트와 강재 간의 일체화 거동을 하도록 하였다. 실험 중 파괴형상을 통해 립C형강의 연속적인 플랜지가 전단연결재 역할을 수행하며 콘크리트와 강재 사이의 미끄러짐을 효과적으로 억제한 것으로 판단된다. 이러한 일체화 거동은 하중 재하시 강재와 콘크리트가 함께 저항하도록 유도하며, 결과적으로 합성효과를 극대화하고 구조적 성능을 향상시키는 데 기여한다.

### 3.2 파괴모드

Figs. 6와 7은 실험 과정에서 발생한 콘크리트 슬래브와 강재부분의 파단및좌굴 현상을 상세하게 나타냈다. 실험은 최대내력의 80%까지 저하되었을 때 종료하였다. 하중 증가에 따른 실험체의 강재 내부의 콘크리트에서 발생하는 초기균열, 휨균열 및 전단균열 확장 상황 등을 파악할 수 없었다.

Figs. 6(a)와 6(b)는 8 mm 측면사다리꼴 보강판을 사용한 T8-R/NR 휨실험체의 파괴형상을 나타냈다. 최대 하중 도달한 후 콘크리트 슬래브의 압괴로 인한 하중 감소가 관찰되었고, 립C형강에서는 좌굴현상이 발생하지 않았다. 하부인장철근의 유무에 따라 콘크리트 슬

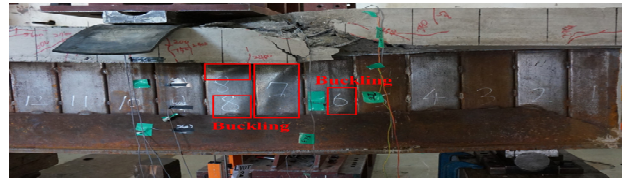


(a) T8-R



(b) T8-NR

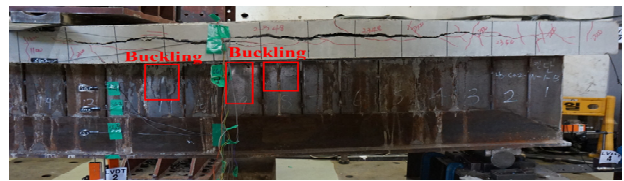
Fig. 6. Failure shapes of concrete slab



(a) T8-B-1.5



(b) T8-B-2.0



(c) T8-B-2.5

Fig. 7. Local shear buckling of lipped channels

래브의 변형과 내력에서 차이가 나타났다. 하부인장철근이 있는 실험체에서는 콘크리트 슬래브의 균열이 상대적으로 적게 발생하였고, 휨저항 성능을 더욱 안정적으로 유지하는 데 기여하였다. 콘크리트 슬래브와 강재간의 상호작용에서 밀림 및 좌굴에 의한 성능 저하가 없었다는 것을 보여준다.

Figs. 7(a), 7(b)와 7(c)에서는 콘크리트 슬래브 측면에서 경사전단균열이 발생하였다. 균열은 최종적으로 콘크리트의 전단파괴와 웨브 강재의 항복으로 이어져 최대내력이 결정되었다. 전단실험체에서는 전단경간비가 다른 실험체들간에 유사한 거동 패턴이 보였다. 전단경간비 1.5인 T8-1.5 실험체는 가력부 하단 슬래브에서 초기 휨균열이 발생하였으며, 이 균열은 최대내력 약 75 % 수준에서 확장되어 가력지점과 지지점을 연결하는 방향으로 콘크리트 슬래브 측면에서 전단균열을 유발하였다(Fig. 7(a)). 전단경간비 2.0과 2.5에서도 초기 휨균열이 발생하였으며, 최대내력의 약 70 %에서 가력지점과 지지점을 잇는 방향으로 콘크리트 슬래브 측면에서 휨전단 균열이 발생하였다. 이후 콘크리트 슬래브 상면에서 균열이 점차 확장되면서 측면사다리꼴 보강판에서 좌굴이 발생했으며, 가력부에서는

전단균열이 발생하여 균열이 추가적으로 확장되었다 (Fig. 7(b), 7(c)).

### 3.3 변형도 분포

립치형강을 사용한 합성보의 변형률을 확인하기 위해, Fig. 4와 같이 콘크리트 슬래브(CG1, CG2)와 강재 웨브(립치형강(SG1, SG2, SG3)), 측면사다리꼴 보강판(SG4, SG5), 하부강판(SG6)에 스트레인게이지를 부착하여 측정하였다. 스트레인 게이지를 통해 최대내력의 25 %, 50 %, 75 % 그리고 100 % 도달 시점에서 하부강판의 높이별 변형률을 측정하고 Figs. 8과 9에 정

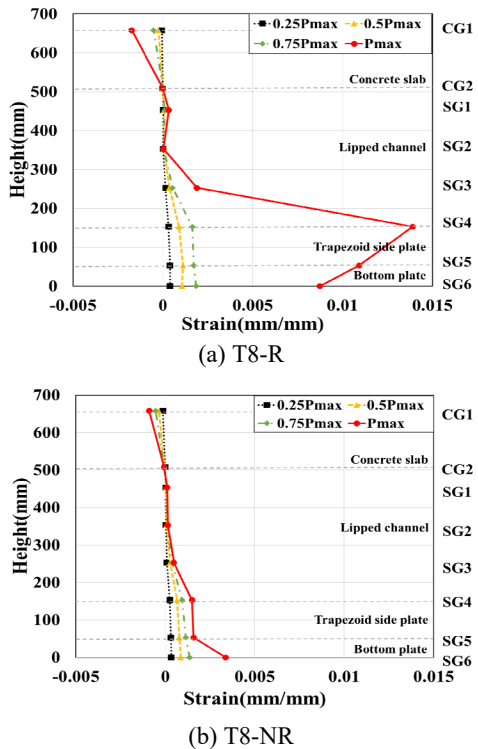


Fig. 8. Strain distribution of T8-R/NR

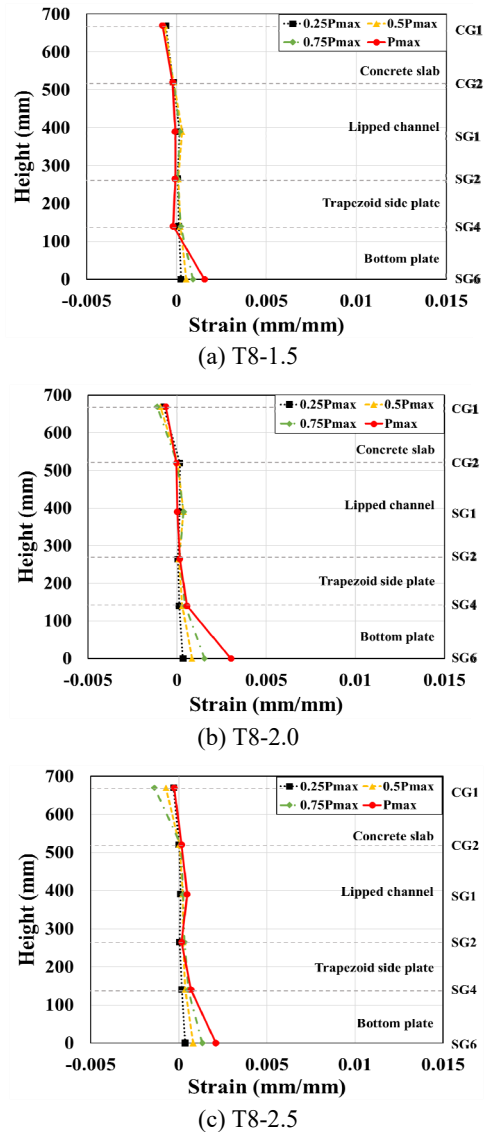


Fig. 9. Strain distribution of T8-1.5/2.0/2.5

리하였다.

Fig. 8은 T8-R/NR 실험체의 변형도 분포를 나타냈다. 립 $\pi$ 형강 변형률(SG1)은 초기에 거의 0에 가깝다가 최대내력에 도달할 때 인장영역에 들어가면서 변형률이 증가하였다. Figs. 8(a)와 8(b)에서 볼 수 있듯이 실험체 T8-R과 T8-NR에서 립 $\pi$ 형강의 변형률(SG1, SG2)은 하중 증가에 따라 점진적으로 인장변형률이 증가하고 있으며, 하부강판이 립 $\pi$ 형강과 함께 하중을 분담하고 있음을 보여준다.

Fig. 9은 T8-1.5/2.0/2.5 실험체의 변형도 분포를 나타낸 것이다. 웨브인 립 $\pi$ 형강 부분에서 가력지점에 가까운 SG1의 변형률은 전단경간비가 증가할수록 변형률이 증가하다가 최대내력의 75 % 이후에 감소하는 경향을 보였다. 반면에 Fig. 9(a)에서와 같이 전단경간비가 낮은 1.5 실험체인 T8-1.5에서는 최대내력의 50 %까지 변형률이 증가하다가 그 이후부터는 감소하였다. 또한, Fig. 9에서와 같이 가력지점에 가까운 콘크리트 슬래브 상단에 설치된 CG1은 압축력을 받아 압축변형이 발생하였으며, CG2에서는 전단경간비가 증가함에 따라 최대변위(처짐)이 증가하였고, 콘크리트 슬래브 내에서 휨변형이 발생하여 압축에서 인장으로 전이되었다.

#### 4. 결론

립 $\pi$ 형강과 측면 사다리꼴 강판을 사용한 콘크리트 충전 U형 합성보의 휨 및 전단 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 실험 중 하중 증가에 따라 실험체의 강재내부에 충전된 콘크리트에서 발생하는 초기균열, 휨균열 및 전단균열의 확장을 직접 관찰하는 것은 불가능했지만, 립 $\pi$ 형강을 사용한 합성보의 휨 실험체에서는 하중 증가에 따라 콘크리트 슬래브에서 휨 균열이 발생하였다. 전단실험체에서는 전단경간비에 따라 콘크리트의 전단파괴와 립 $\pi$ 형강의 전단항복으로 최대내력이 결정되었다.
- (2) 휨실험체 변수인 하부인장철근 유무(R/NR)는 실험체의 구조적 성능 및 휨균열 발생에 큰 영향을 미친 것으로 나타났다. 하부인장철근 유무를 변수로 실험한 결과 하부인장철근이 있는 T8-R 실험

체의 최대내력이 하부인장철근이 없는 T8-NR 실험체의 최대내력 보다 14.8 % 높게 나타났다. 하부인장철근이 콘크리트 슬래브의 압축력을 증가시키고 콘크리트 슬래브의 변형을 감소시키는 데 기여하는 것을 확인하였다.

- (3) 전단경간비를 변수로 한 전단 실험체에서는 초기 강성이 전단경간비가 감소함에 따라 증가하였다. 반대로 전단경간비가 증가함에 따라 실험 전단내력은 감소하는 경향을 보였으며, 최대 15 % 감소하였다. 합성보 내부에 별도의 전단스터드 없이 연속된 립 $\pi$ 형강의 플랜지에 의해 충전된 콘크리트와 일체화 거동을 확인하였다.
- (4) 립 $\pi$ 형강과 콘크리트 사이의 일체화된 거동은 합성보의 구조적 성능에 매우 중요한 영향을 미쳤다. 실험을 통해 도출된 결과에 따르면 립 $\pi$ 형강을 사용한 U형 합성보는 강재와 콘크리트 사이의 일체화 거동으로 좌굴현상 없이 높은 구조적 안정성을 보였다. 이러한 일체화 거동은 연속된 립 $\pi$ 형강의 플랜지와 콘크리트 사이에서 이루어졌으며, 강재와 콘크리트 간의 합성작용을 구조적 성능과 강도를 증진시키는 핵심 요소로 작용하였다.

#### 감사의 글

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 이공분야기초 연구지원사업(과제번호 No. RS-2024-00346347)의 연구비와 (주)엔알씨 구조연구소의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌(References)

- [1] Heo, B.W, Bae, K.W., Moon, T.S. (2004) Flexural Capacity of Encased Composite Beam with Hollow Core PC Slabs, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.5, pp.587-598 (in Korean).
- [2] Ryu, S.-H., and Ahn, H.-J. (2005) An Experimental Study on the Flexural Strength of SC-beams with Rectangular



- Shape, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.21, No.9, pp.55-61 (in Korean).
- [3] Heo, B.W., Kwak, M.K., Bae, K.W., and Jeong, S.M. (2007) Flexural Capacity of the Profiled Steel Composite Beams -Deep Deck Plate-, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.3, pp.247-258 (in Korean).
- [4] Kim, Y.J., Bae, J.H., Ahn, T.S., and Choi, J.G. (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).
- [5] Lee, C.H., So, H.J., Park, C.H., Lee, C.N., Lee, S.H., and Oh, H.N. (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).
- [6] Kim, D.-B., Lee, M.-H., Lee, Y.-S., Kim, D.-J., and Kim, M.-H. (2018) The Flexible Capacity Evaluation about Composite-stage of Semi Slim AU Composite Beam for Saving Story Height, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol.9, No.1, pp.17-25 (in Korean).
- [7] Choi, I.R., Kim, Y.H., Jung, S.J., and Lee, J.H. (2019) Flexural Performance Tests for Steel and Composite U-tube Flange H-beam Structure, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.199-209 (in Korean).
- [8] Yan, J.-B., Guan, H., and Wang, T. (2020) Steel-UHPC-steel Sandwich Composite Beams with Novel Enhanced C-channel Connectors: Tests and Analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.170, 106077.
- [9] Liu, Y., Guo, L., Qu, B., and Zhang, S. (2017) Experimental Investigation on the Flexural Behavior of Steel-concrete Composite Beams with U-shaped Steel Girders and Angle Connectors, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.131, pp.492-502.
- [10] Lee, J., Haroon, M., Kang, S.-H., Shin, K.-J., and Lee, H. (2023) Flexural Behavior of Large-scale U-shaped Steel-concrete Infilled Composite Beams with Flat and Embossed Webs, *Structures*, Elsevier, Vol.55, pp.1949-1959.
- [11] Yan, Q., Zhang, Z., Yan, J., and Laflamme, S. (2021) Analysis of Flexural Capacity of a Novel Straight-side U-shaped Steel-encased Concrete Composite Beam, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.242, 112447.
- [12] Choi, I.R., Lee, G.R., Park, S.W., Kyung, J.H., and Park, D.W. (2021) Flexural Performance and Beam-column Connection Structural Performance Tests for Slimflo Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.2, pp.131-141 (in Korean).
- [13] Lee, M.H. (2018) *Structural Characteristics of Closed Type U-shaped Composite Beam using n-shaped Shear Connectors*, Ph.D. Dissertation, Wonkwang University (in Korean).
- [14] Oh, H.S. (2021) *Experimental Study on the Composite Beam using U-shaped Steel Beam and Angle Shear Connectors*, Master's Thesis, Seoul National University (in Korean).
- [15] 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).
- [16] Kim, S.B., Cho, S.H., Oh, K.S., Jeon, Y.H., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2016) Bending Performance Evaluation of Hybrid Composite Beam with Low Depth and New Shape, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.3, pp.151-162 (in Korean).
- [17] Kim, S.B., Cho, S.H., Lee, J.Y., and Kim, S.S. (2016) Bending Performance Evaluation of Hybrid Forming Composite Beam with High Depth, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.6, pp.403-414 (in Korean).
- [18] Kim, C.-G., Kim, H.-S., and Lee, S.-H. (2023) Flexural Behavior of U-shaped Steel-concrete Composite Beams under Positive Bending, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.208, 108008.
- [19] Korean Agency for Technology and Standards (2019) *Standard Test Method for Making Concrete Specimens*, KS F 2403:2019, KATS (in Korean).
- [20] Industrial Standards Council (2022) *Test Method for Compressive Strength of Concrete*, KS F 2405:2022, Korean Agency for Technology and Standards (in Korean).
- [21] Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials*, KS B 0801:2007, KATS (in Korean).

- [22] Korean Agency for Technology and Standards (2014)  
*Headed Stud*, KS B 1062:2014, KATS (in Korean).  
[23] Korean Agency for Technology and Standards (2003)

*Method of Tensile Test for Metallic Materials*, KS B 0802:2003, KATS (in Korean).

---

**요약**: 이 연구에서는 냉간성형 립 $\pi$ 형강을 웹재로 한 U형 단면의 강재-콘크리트 합성보의 구조성능을 조사하기 위해 실험을 수행하였다. 휨 및 전단 성능을 향상시키기 위해 보 하부 측면에 사다리꼴 형태의 강판을 추가하였다. 하부 인장철근 유무(R/NR)와 전단 경간비(1.5/2.0/2.5)를 변수로 하여 5개의 실험체를 제작하였다. 4점 가력 휨실험과 3점 가력 전단실험을 각각 수행하였다. 휨실험체는 전형적인 휨파괴가 발생하였다. 하부인장철근 있는 T8-R 실험체는 하부인장철근이 없는 T8-NR 실험체에 비해 14.8% 높게 나타났다. 전단실험체는 전형적인 전단파괴가 관찰되었다. 전단경간비가 증가함에 따라 실험 전단내력이 감소하는 경향을 보였고 최대 15% 감소하였다. 립 $\pi$ 형강에 의해 콘크리트와 강재부분의 완전합성을 기대할 수 있으며 스티드 앵커를 대체 할 수 있으며, 전체 구조적 성능을 향상 시키는데 기여하고 전체적인 하중 분배 능력을 강화하고 구조의 안정성 및 성능을 향상시키는데 기여한다.

**핵심용어**: 충전형합성보, 휨강도, 전단강도, U형 단면, 립 $\pi$ 형강

---