

절곡 강판(Cap)을 전단연결재로 사용한 강판-콘크리트 합성보의 휨강도 분석

조태구, 최병정*
경기대학교 일반대학원 건축공학과

Analysis about Flexural Strength of Steel Plate-Concrete Composite Beam using Folded Steel Plate (Cap) as Shear Connector

Tae-Gu Cho, Byong-Jeong Choi*

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School

요약 본 강판 콘크리트 합성보는 강판, 콘크리트 및 전단 연결재로 구성되어 2개의 이질 재료를 결합한다. 일반적으로 강판은 기존의 합성보에 용접하여 조립된다. 이 연구에서, SPC 보는 스티드가 없는 강판과 콘크리트로 구성된다. 절곡한 강판은 용접 대신 고강도 볼트로 조립된다. 현장 건설의 작업성을 향상시키기 위해 슬래브와 접합부에 모자 모양의 Cap이 부착되어있다. Cap을 전단연결재로 사용하여 SPC 보의 휨성능을 분석하기 위해 변위 제어 모드에서 단조 하중 2점가력 실험을 수행 하였다. 전단 연결재 유형, 돌출 길이, 강판의 두께의 변수를 갖는 5개의 시험편을 제작하여 시험 하였다. KBC 2009에서 제시하는 전단강도비와 휨강도비의 관계를 분석하였다. 시험 결과로 전단 강도비를 40% 이상으로 나타냈다. 전단 연결재와 Cap을 부착하였음에도 완전합성보로 가정된 휨강도의 70% 이상의 휨강도를 발휘하였다. 또한 Cap이 스티드 보다는 작은 전단강도를 보였으나, Cap이 전단연결재 역할을 하였다. 강판두께를 변수로 한 경우, 완전합성보 대비 약 70%의 휨강도를 발휘하였으며, 유사한 변형성능을 나타내었다. 불완전합성거동함에 따라 국부좌굴이 발생하였으나, 상대적으로 두꺼운 강판의 경우 5% 높은 강도에서 국부좌굴이 발생하였다. 또한 좌굴폭이 15% 감소하였다.

Abstract The steel-plate concrete composite beam is composed of a steel plate, concrete and shear connector to combine two inhomogeneous materials. In general, the steel plate is assembled by welding an existing composite beam. In this study, the SPC beam was composed of folding steel plates and concrete, without a headed stud. The folding steel plate was assembled by a high strength bolt instead of welding. To improve the workability in a field construction, a hat-shaped cap was attached to the junction with a slab. Monotonic load testing under two points was conducted under displacement control mode to analyze the flexural strength of the SPC beam using a cap as the shear connector. Five specimens with shear connector types, protrusion length, and different thickness of steel plates were constructed and tested. The experimental results were analyzed through the relationship between the shear strength ratio and flexural strength in KBC 2009. The test results showed a shear strength ratio of more than 40 %. In the case of using a cap-like specimen as the shear connector, the flexural strength was 70% of the value calculated as a fully composite beam. In addition, the cap showed a smaller shear strength than the stud, but the cap served as a shear connection. When the thickness of the steel plate was taken as a variable, the steel plate exhibited a bending strength of approximately 70% compared to a fully formed steel plate, and exhibited similar deformation performance. Local buckling occurred due to incomplete composite behavior, but local buckling occurred at a 5% higher strength for a relatively thick steel plate. The buckling width also decreased by 15%.

Keywords : Steel Plate-Concrete Composite Beam, Shear connector, Shear strength ratio, Partially composite beam, Flexural capacity

본 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20151520400600).

*Corresponding Author : Byong-Jeong Choi(Kyonggi Univ.)

Tel: +82-31-249-9702 email: bjchoi@kyonggi.ac.kr

Received April 16, 2018

Revised (1st May 14, 2018, 2nd June 12, 2018)

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

1. 서론

합성보(Composite Beam)는 구조 및 경제적인 장점으로 인해 활발한 연구개발의 대상이 되어오고 있다. 또한, 최근 건축물의 초고층화와 대형화가 진행됨에 따라 층고 절감의 건축적인 요구가 증가하고 있으며, 재료의 특성을 최적화 하고 보의 춤을 줄이는 복합구조 시스템이 널리 활용되고 필요에 따라 많은 연구도 진행되고 있다.[1] 합성보는 슬래브가 일반적으로 철근콘크리트로 되어있기 때문에 강재가 굳기 전의 콘크리트를 지지하는 형태를 취할 수 있어 공사기간을 단축시킬 수 있고, 시공성 개선을 통한 경제성 확보가 가능하다[2]. 또한 합성보에 휩모멘트 작용 시 철골보 상부에 타설된 콘크리트 슬래브가 압축력을, 강재보가 인장력을 부담하여 비합성보 대비 강성 및 강도가 크게 향상되어 큰 저항력을 발휘할 수 있게 된다[3]. 그러나 H형강 노출형 합성보의 경우 상부 플랜지에 테크슬래브를 거치하여 지지하기 때문에 층고가 증가하게 된다. 또한 합성작용을 돕기 위해 스티드와 같은 전단연결재가 필요하다. 이에 따라 최근에는 층고 절감과 경제성을 확보하기 위한 다른 형태의 합성보가 개발되고 있다. 기존 노출형합성보 및 매립형합성보는 강재보의 상부 플랜지에 부착된 전단연결재에 의해서 합성작용이 이루어지며, 얇은 강판을 사용하기 때문에 용접을 통한 조립이 난해하다. 또한 개방형 단면이므로, 단면 형상을 유지하기 위한 추가 요소가 필요하다 [4][5]. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완한 강판-콘크리트(Steel Plate-Concrete, 이하 SPC) 합성보를 개발하였다. SPC beam은 Fig. 1(a)와 같이 절곡한 U자형 강판 위에 Cap형상의 강판을 용접하고 U자형의 하부 강판 중

양에 ‘ㄷ’형의 강판 한 쌍을 연결한 합성보이다. 절곡한 측면과 ‘ㄷ’형의 하부강판 한 쌍을 하부에서 볼트로 체결하여 용접량을 최소화시키고, 콘크리트 슬래브와 강판 보 사이에 Cap을 설치하여 전단연결재와 작업발판, 폭 고정역할을 한다. 본 연구는 2점가력 휩실험을 통해 Cap을 전단연결재로 사용한 SPC Beam의 형상적 변수에 대한 휩성능을 분석하였다. 또한 Cap의 수평전단내력에 의한 합성정도와 휩강도의 관계를 검토하였다.

2. SPC Beam의 공칭휩강도 산정

합성보는 전단연결재의 수평전단 내력이 콘크리트나 강재보의 단면 내력 중 작은 값의 이상일 경우에 단면전체가 휩저항 성능을 발휘하게 되며, 이 경우 최대 휩성능은 KBC2009와 미국의 AISC의 소성응력분포를 적용하여 산정할 수 있다[6][7][8]. 소성응력분포법(Plastic Stress Distribution Method, 이하 PSM)은 단순하면서도 편리한 계산법으로, 단면에 작용하는 변형률이 선형적으로 분포하며 재료가 탄소성으로 거동한다는 가정을 근거로 한다.

2.1 정모멘트역의 휩강도

정모멘트를 받는 합성단면에서 중립축의 위치에 따라 소성중립축이 슬래브에 위치하는 경우(Fig. 2(a))와 강재보의 웨브에 위치하는 경우(Fig. 2(b))로 구분하여 휩강도를 산정한다. 소성중립축의 위치는 압축소성강도와 인장소성강도가 동일함을 이용하여 계산한다. 상부의 Cap은 길이방향으로 단속배치되어 있기 때문에 SPC beam의 휩강도 계산 시 제외하였다.

2.1.1 소성중립축이 슬래브에 위치하는 경우

$$(Y_{P.N.A} < t_{slab})$$

강재보의 인장강도가 콘크리트 슬래브의 압축강도보다 작을 경우, 소성중립축 ($Y_{P.N.A}$)은 슬래브내에 위치한다. 이때 소성중립축은 Eq.(1)로 산정하며, 소성중립축에 대한 공칭휩강도(M_n^+)는 Eq.(2)와 같다. 소성중립축의 위치는 압축소성강도=인장소성강도임을 이용하여 계산하였다.

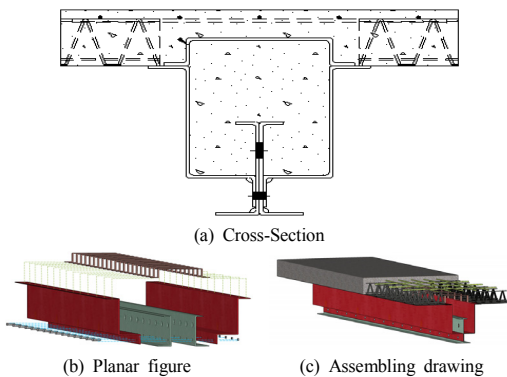


Fig. 1. Assembling drawing of SPC beam

$$Y_{P.N.A} = \frac{P_y}{0.85f_{ck}b_e} \quad (1)$$

$$M_n^+ = C_{con} \left(\frac{Y_{P.N.A}}{2} \right) + P_y (Y_s + t_{slab} - Y_{P.N.A}) \quad (2)$$

- $Y_{P.N.A}$: 소성 중립축(mm)
- P_y : 강재단면의 인장장도(= $A_s F_y$, kN)
- f_{ck} : 콘크리트 설계기준강도(MPa)
- b_e : 상부 슬래브 유효폭(mm)
- C_{con} : 콘크리트 압축력(kN)
- Y_s : 강재단면의 중심으로부터 강재단면의 상단까지 거리(mm)
- t_{slab} : 콘크리트 슬래브의 두께(mm)
- A_s : 강재보의 단면적(mm²)
- F_y : 강재의 항복강도(MPa)

2.1.2 소성중립축이 웨브에 위치하는 경우

$$(Y_{P.N.A} > t_{slab})$$

강재보의 인장장도가 콘크리트 슬래브의 압축강도를 초과할 경우, 소성중립축이 강재보의 웨브에 위치한다. 이때에 공칭휨강도(M_n^+)는 Eq.(3)과 같다. 강재보 내부의 콘크리트 압축력은 생략하였다.

$$M_n^+ = C_{con} \left(Y_{P.N.A} - \frac{t_{slab}}{2} \right) + \frac{P_y - C_{con}}{2} (d_2) + \frac{P_y + C_{con}}{2} (d_1) \quad (3)$$

- d_1 : 인장부 강재단면의 중심으로부터 중립축까지의 거리(mm)
- d_2 : 압축부 강재단면의 중심으로부터 중립축까지의 거리(mm)

2.2 부모멘트역의 휨강도

부모멘트 산정 시 SPC Beam의 경우, Cap의 수평전단저항능에 의해 합성단면의 소성응력분포로부터 부모멘트를 계산한다. 합성단면의 소성응력분포는 유효 슬래브 폭 내에 배근된 길이방향 철근의 인장력과 강재보와 내부 콘크리트의 압축력을 통해 부모멘트를 계산할 수 있다.

부모멘트의 경우 소성중립축은 측판의 웨브에 위치하게 되며, Fig. 2(c)에서와 같이 중립축 하부의 콘크리트가 함께 압축력을 발휘한다. 따라서 부모멘트역의 공칭휨강도(M_n^-)는 Eq.(4)와 같다.

$$M_n^- = P_{re} (Y_{P.N.A} - d_3) + \frac{P_y + C_{con} - P_{re}}{2} (d_1) + C_{con} \left(\frac{H - H_4 - Y_{P.N.A} - t_p}{2} \right) + \frac{P_y - C_{con} - P_{re}}{2} (d_2) \quad (4)$$

- P_{re} : 슬래브 철근의 인장장도(= $A_r F_{y,re}$, kN)
- d_3 : 길이방향 슬래브 철근의 중심으로부터 슬래브 상부면까지의 거리(mm)

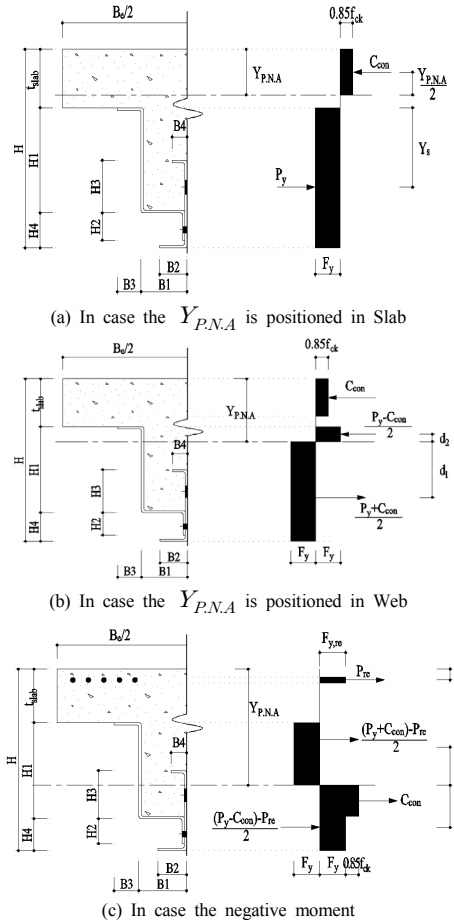


Fig. 2. Plastic stress distribution of SPC Beam section

3. 실험 방법 및 재료시험

3.1 실험체 계획

실험체는 강판보 상부면에 수평전단력에 저항할 수 있도록 Cap을 부착하였다. KBC2009에서 제시하는 휨강도비와 전단연결재 강도비의 관계는 전단연결재 강도

비가 감소할수록 곡선의 기울기가 증가한다[6][7][8]. 전단연결재와 폭고정용 철물, 현장에서 시공자의 발판으로 사용되는 Cap은 4.5mm×60mm×90mm 를 적용하였다. 또한 작업자의 보폭을 고려하여 280mm 간격으로 실험체 전구간에 총 21개를 부착하였다. Cap을 넓게 배치할수록 수평전단저항력이 작아지기 때문에, 실험체는 가장 불리한 조건이며, Cap의 전단성능을 분석하기 위해 불완전합성보로 설계하였다.

콘크리트 설계기준강도(f_{ck})는 27MPa, 강재는 SM490A를 사용하였다. 모든 실험체의 상부 슬래브는 1,000×200(mm, 폭×두께)이고, 철근트러스스테크는 높이 160mm를 사용하였다. 슬래브에 길이방향에 200mm 간격으로 상부근을 배근하였다. 실험 변수를 전단연결재와 돌출부의 길이, 그리고 강판 두께로 하여 실험을 진행하였다. 전단연결재가 없는 SPC-01, 스테어가 있는 SPC-02 실험체는 600mm 간격으로 횡보강근을 상·하부에 배근하였고, Cap이 있는 SPC-03 실험체는 동일한 간격으로 횡보강근을 상부에만 배근하였다. SPC-04은 앞에 실험체와 비교하여 돌출부의 길이를 120mm에서 100mm로 감소시켰고, SPC-05은 앞에 실험체들과 비교하여 강판두께를 4.5mm에서 6mm로 증가시켰다. 실험체 일람은 Table 1, 실험체 상세를 Fig. 3에 나타내었다.

Table. 1. The list of specimens

NO.	Shear Connector	parameter		M_{fn} (kN·m)
		Thickness of plate (mm)	Area of steel beam (mm ²)	
SPC-01	-	4.5	9,972	1,657
SPC-02	Stud			
SPC-03	Cap			
SPC-04	Cap			
SPC-05	Cap			

3.2 가력 및 측정방법

가력은 5,000kN U.T.M을 사용하여 변위제어로 하였으며, 0.03 mm/s의 속도로 가력하였다. 실험체 세팅은 Fig. 4와 같이 양단 단순지지로 지간(L : 5,600mm)의 1/7간격(800mm)으로 가력보를 사용하여 2점 가력 하였다. 가력부와 중앙부의 처짐을 측정하기 위해 실험체 하부에 3개의 변위계(LVDT)를 설치하였고, 강재와 콘크리트 각 위치에서의 변형도를 측정하기 위해 Fig. 4(b)와 같이 Strain Gauge를 부착하였다.

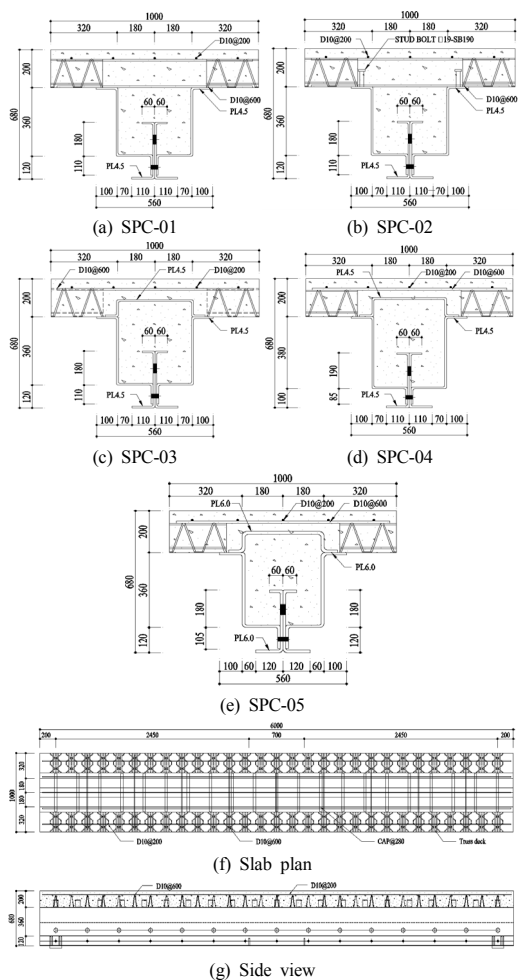


Fig. 3. Detail of specimens

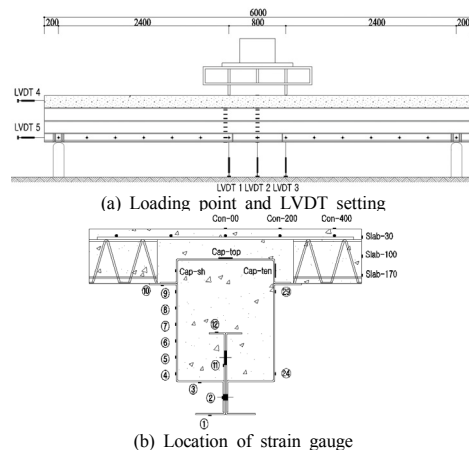


Fig. 4. Test set-up and location of measurement

3.3 재료 시험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도(f_{ck}) 27MPa로 계획하였으며, KS F에 따라 제작한 공시체의 콘크리트 압축강도 시험을 수행하였다[9]. 강재는 SM490A를 사용하였고, 실험체에 사용된 강재(4.5T, 6.0T)의 인장시험편을 채취하여 인장시험을 수행하였다[10]. 콘크리트 공시체와 강재 시험편의 재료시험 결과를 Table 2와 Table 3에 각각 정리하였다.

Table 2. Test result of Concrete

Specific concrete strength (f_{ck} , MPa)	Test		Elastic modulus (E_c , MPa)
	Compressive strength (σ_c , MPa)	Strain (ϵ_{peak})	
27	30.8	0.0026	21,625

Table 3. Test result of steel plate

Item	Size	Stress(MPa)		Yield ratio	Yielding strain (ϵ_y)	Elastic modulus (E_s , MPa)
		Yielding	Tensile			
Plate	4.5T	480	510	0.94	0.002480	207,986
	6.0T	390	470	0.83	0.001900	205,263

4. 실험 결과

4.1 파괴 거동

합성 단면에서 콘크리트의 균열과 이질재료의 탈락은 부재의 거동패턴을 알 수 있는 중요한 요소이다. 각 실험체의 관찰사항들을 Table 4에, 파괴양상을 Fig. 5에 나타내었다.

Table 4. Experimental observation each specimen

Specimens	Observation					
	1st Slip (kN)	2nd Slip (kN)	Cracked at slab (kN)	Separation & Buckling (kN)	Buckling width (mm)	End slip (mm)
SP-01	240	577	420	470	470	17
SP-02	240	590	1,190	1,210	280	10
SP-03	240	577	890	900	280	10
SP-04	240	548	980	1,005	260	10
SP-05	585	750	990	1,000	240	10

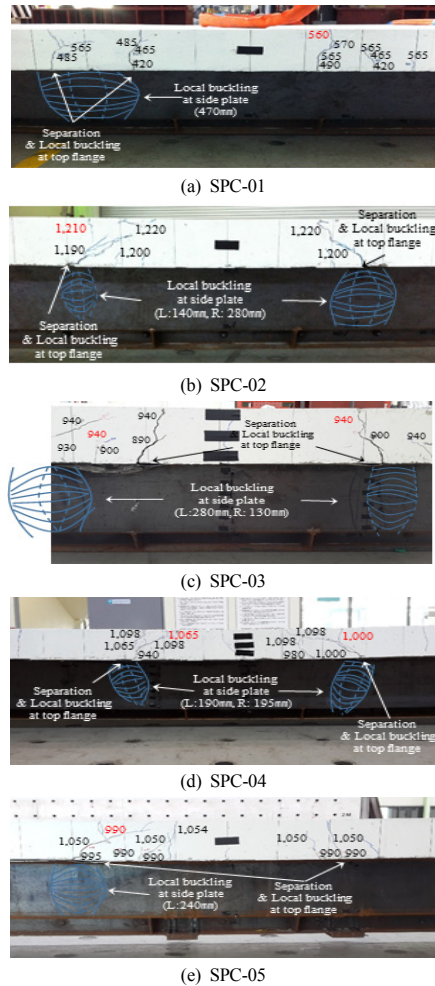


Fig. 5. Load vs. displacement relationships of specimens

전단연결재가 없는 SPC-01 최대하중의 71%인(420 kN)에서 슬래브 측면에 휨균열이 시작하였으며, 실험체 SPC-02는 Stud가 전단연결재의 역할을 하여 선형으로 내력이 증가하였다.

SPC-03 실험체는 최대하중의 97%(890kN)에서 콘크리트 슬래브 하부에 균열이 발생하였다. 또한 강재보와 콘크리트 슬래브가 분리되었고, 강재보 상부플랜지와 측판에 국부좌굴이 발생하였다.

하부의 강재 돌출부 길이가 변수인 SPC-04 실험체도 SPC-03와 유사한 거동을 보였다. 단면 항복 후 약 980 kN에서 휨균열이 시작되었으며 이후 균열과 좌굴폭이 증가하며 최대하중(1,098kN)에 도달하였다.

강판 두께가 변수인 SPC-05 실험체는 단면 항복 후

990kN에서 휨균열이 시작되었으며, 최대내력(1,054.7 kN)에 도달하였다. 최대하중 이후에 하중을 유지하며, 비교적 연성적인 휨 거동을 나타내었다.

4.2 하중-변위 관계

실험체의 하중-변위 관계를 Fig. 6에 나타내었고, 각 실험체별 하중-변위 관계그래프에서 항복하중, 최대하중, 최대하중의 80% 점을 붉은 선으로 이어 함께 나타내었다.

초기 접선강성(K_i), 활선강성(K_s), 슬립하중(P_s), 항복하중(P_y), 최대하중(P_{max}), 슬립하중 시 변위(δ_s), 항복하중 시 변위(δ_y), 최대하중 시 변위(δ_{max})를 Table 5에 정리하였다. 실험 항복하중은 Fig. 7과 같이 하중-변위 곡선에서 초기기울기의 1/3 기울기의 직선으로 항복하중을 산정하는 1/3 접선법을 사용하여 평가하였다. 하중-변위 곡선의 초기강성 접선을 선분(a)와 최대내력의 1/3선분인 선분(b)를 평행 이동하여 하중-변위 곡선과의 접선을 이루는 선분(c)와의 교점을 항복하중, 항복변위로 산정한다.

실험결과, 초기 선형상태의 기울기를 초기 접선강성, 활선강성은 최대강도의 10%점과 50%점을 이은 선분의 기울기로 산정하였다. 실험체의 초기 접선강성은 71.4 ~ 80.5kN/mm로 분포하며 평균 76.8 kN/mm을 나타내었다. 활선강성은 49.8~79.9 kN/mm 로 평균 60.1 kN/mm을 나타내었다.

강성은 49.8~79.9 kN/mm 로 평균 60.1kN/mm을 나타내었다.

접선강성과 활선강성이 동일한 SPC-05를 제외하고, 활선 강성은 접선강성의 약 70%의 값을 보였으며, 접선 강성은 SPC-01 실험체가 가장 크고, 활선강성은 SPC-05 실험체가 가장 큰 값을 나타내었다.

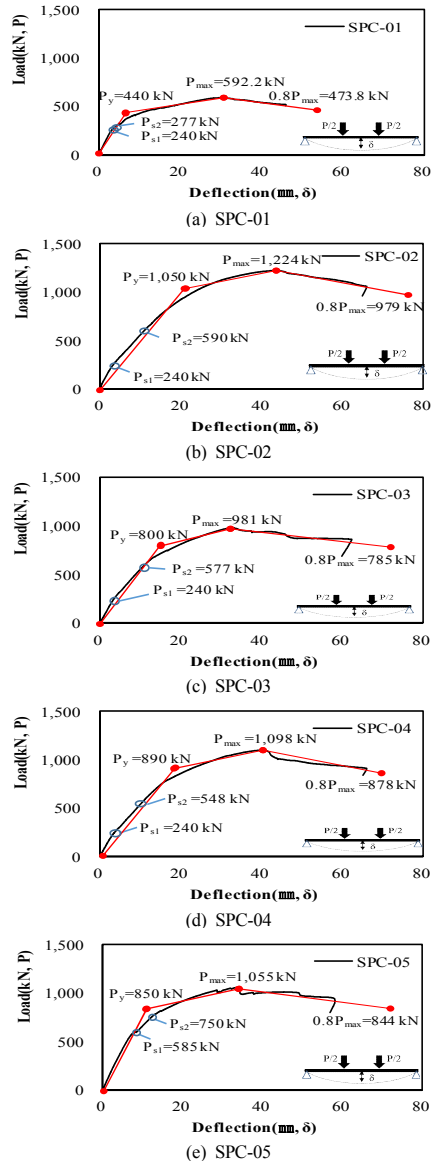


Fig. 6. Load vs. deflection relationships for specimens

Table 5. Test results

Specimens	K_i (kN/mm)	K_s (kN/mm)	P_s (kN)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	P_y/P_{max}	δ_s (mm)	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	δ_{max}/δ_y
SPC-01	80.5	66.9	240	440	592.2	0.74	3.0	6.2	30.5	4.91
SPC-02	78.9	49.8	240	1,050	1224.1	0.87	3.0	20.5	43.3	2.11
SPC-03	73.2	53.3	240	800	981.1	0.82	3.2	14.5	33.2	2.29
SPC-04	71.4	50.4	240	890	1,098	0.81	3.4	17.1	39.9	2.33
SPC-05	80.1	79.9	585	850	1,055	0.79	7.3	10.3	33.5	3.25

• K_i : Initial tangential stiffness • K_s : Secant stiffness • P_s : Load at the time of primary slip occurrence • P_y : Yielding load • P_{max} : Maximum load
 • δ_s : Displacement at the time of 1st slip occurrence • δ_y : Displacement at yielding load point • δ_{max} : Displacement at Maximum load point

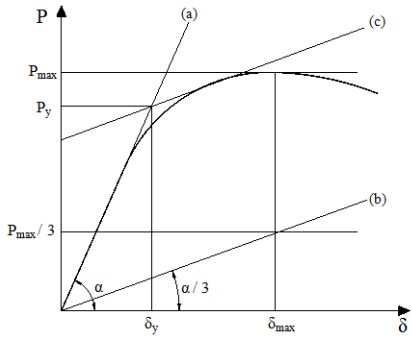


Fig. 7. Yield load calculation method

4.3 단면의 변형을 분포

실험체에 부착한 Strain gauge를 통해 합성단면의 위치에 따른 변형률 분포를 나타내었다. Fig. 8에서 종축은 변형률 게이지의 부착위치를 나타내고, 횡축은 하중에 따른 변형률의 분포를 나타낸 것이다. 모든 실험체의 동일한 높이에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다.

실험체들은 1:2차의 슬립거동을 보였으며, 하중 초기에 발생하는 1차 슬립은 부착력을 손실하여 발생하였다. 이후 전단연결재에 의해 수평전단력에 저항하였으나, 2차 슬립이 발생하며 비합성거동을 보였다.

실험값과 합성단면의 공칭휨강도의 비가 큰 SPC-02 (89%), SPC-04(79%) 실험체는 불완전 합성거동을 하였으나, 콘크리트 슬래브 상부가 압괴변형률에 근접하였으며, 하부의 인장영역에서 높은 변형율을 보였다. 또한 중립축의 이동이 상대적으로 작았다.

5. 비교 분석 및 고찰

5.1 초기강성 및 내력

각 실험체의 하중-변위 관계에서 선정한 초기강성, 항선강성, 측정된 하중에 지점까지의 거리를 곱하여 항복모멘트(M_y), 최대모멘트(M_{max}), 그리고 완전합성보로 가정하고 계산한 소성모멘트(M_n)를 Table 6에 정리하였고, Fig. 9와 Fig. 10에 비교하여 나타내었다.

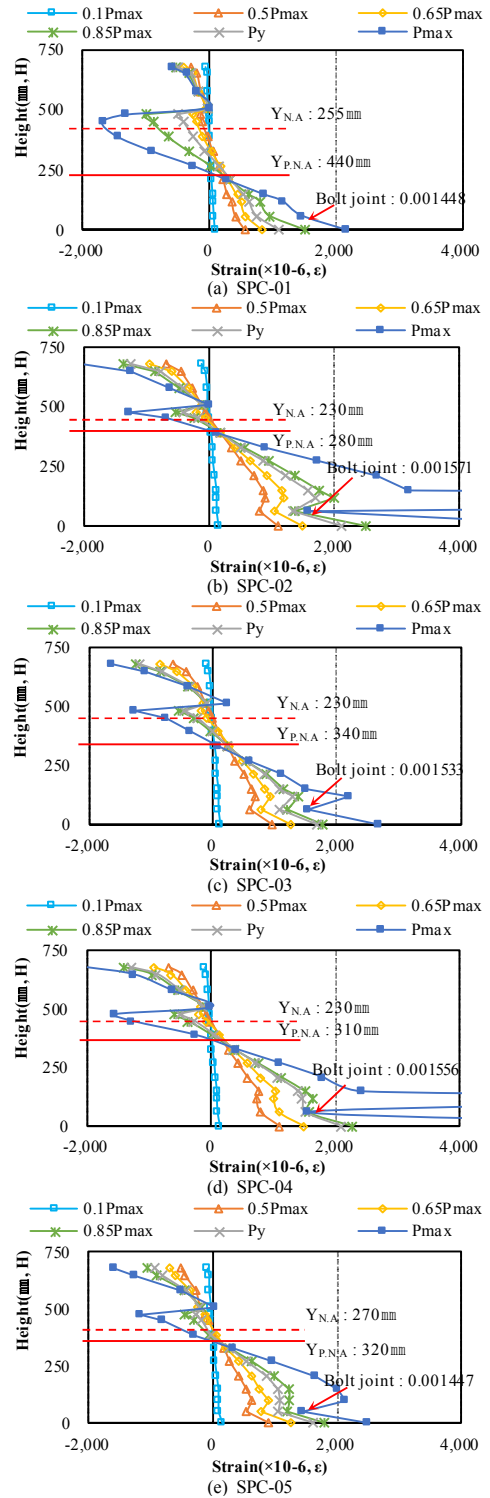


Fig. 8. Strain distribution of composite section

Table 6. Initial stiffness and maximum load of specimens

Specimens	Test					M_n (kN·m)	$\frac{M_{test}}{M_n}$	
	K_i (kN/mm)	K_s (kN/mm)	M_y (kN·m)	M_{max} (kN·m)	$\frac{M_{max}}{M_y}$			
SPC-01	80.5	66.9	528	711	1.35	1,657	0.43	
SPC-02	78.9	49.8	1,260	1,469	1.17		0.89	
SPC-03	73.2	53.3	960	1,177	1.23		0.71	
SPC-04	71.4	50.4	1,068	1,318	1.23		1,660	0.79
SPC-05	80.1	79.9	1,020	1,266	1.24		1,729	0.73
Aver.	76.8	60.1	967	1,188	1.24	1,695	0.71	

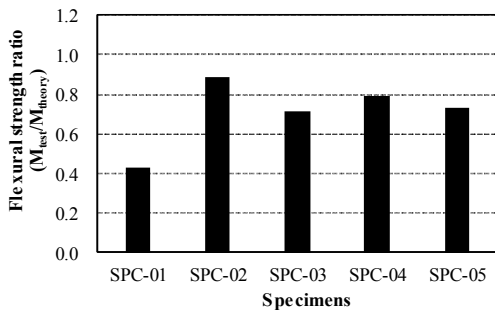


Fig. 9. Comparison of flexural strength ratio

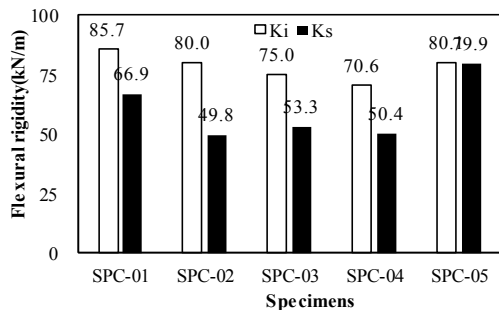


Fig. 10. Comparison of Flexural rigidity

실험체 중 상대적으로 두꺼운 강관(6.0T)을 사용한 SPC-05 실험체가 초기 접선강성보다 활선강성이 작은 값을 보였으나, 차이는 미소하였다. 이것은 타실험체보다 강재량이 많고, 높은 성능점에서 슬립이 발생하였기 때문에 활선강성이 높은 것으로 판단된다. 4.5T 강관을 사용한 SPC-01~SPC-04 실험체는 평균 76.0kN/m의 접선강성을 보였다.

실험결과를 완전합성보로 가정하였을 때의 공칭휨강도와 비교할 경우, 전단연결재가 없는 SPC-01 실험체는 43%의 휨강도를 발휘하였으나, 전단연결재로 Stud를 부착한 SPC-02 실험체는 89%, Cap을 사용한 실험체는

71%~79%의 휨강도를 나타내었다. 따라서 본 실험체는 280mm의 간격으로 배치한 Cap이 전단연결재로써, Stud와 유사한 성능을 발휘함을 알 수 있다.

5.2 변형성능 평가

실험 중 변위계의 제한으로 중앙부의 변위를 약 60 mm까지 가력하였다. Fig. 6에 측정된 하중-변위 관계를 바탕으로 최대하중의 80% 점을 가정하여 붉은 선으로 나타내었고, Table 7과 Fig. 11에 각 하중점에서의 변위를 비교하였다. 항복하중 시 변위와 최대하중의 80% 하중 시의 변위를 비교하여 취성 거동 없이 큰 변형 하에 있을 수 있는 성능 즉 연성도를 평가할 경우, 3.7~8.6의 분포를 보인다. Stud를 사용한 SPC-02 실험체가 3.7로써 가장 작으며, 전단연결재가 없는 SPC-01이 8.63으로 가장 큰 값을 보였다. 전단연결재로 Cap을 사용한 실험체는 Stud 실험체 대비 1.4배의 연성도를 가지고 있는 것으로 나타났다.

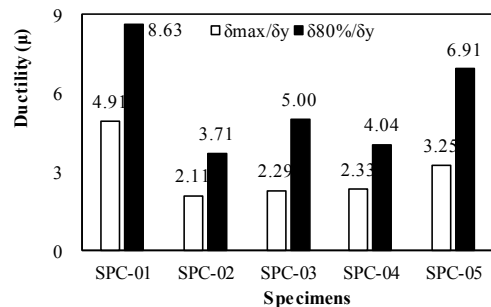


Fig. 11. Comparison of ductility

Table 7. Ductility evaluation for specimens

Specimens	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	$\delta_{80\%}$ (mm)	δ_{max}/δ_y	$\delta_{80\%}/\delta_y$
SPC-01	6.2	30.5	53.5	4.9	8.6
SPC-02	20.5	43.3	76.0	2.1	3.7
SPC-03	14.5	33.2	72.5	2.3	5.0
SPC-04	17.1	39.9	69.0	2.3	4.0
SPC-05	10.3	33.5	71.2	3.2	6.9
Aver.	13.7	36.1	68.4	3.0	5.6

5.3 강도비에 따른 전단강도비 평가

실험체의 실험값과 완전합성보로 가정한 공칭휨강도의 비(휨강도비)를 통해 Stud와 Cap의 전단강도를 평가하였다. 완전합성거동을 위해서는 요구되는 수평전단력이 있으며, 이보다 수평전단내력이 작을 경우 강재와 콘

크리트 사이에 슬립이 발생하게 된다[11]. 이러한 불완전합성보는 콘크리트의 전 강도나 강재의 전 강도가 발휘될 수 없다. 따라서 불완전합성보의 휨강도는 수평전단강도에 영향을 받는다. KBC 2009에서 제시하는 불완전합성보의 단면2차모멘트(I_{eff})를 Eq.(5)로 나타내었으며, 강재단면의 인장플랜지에 대한 유효단면계수(S_{eff})를 Eq.(6)으로 제시하였다[6],[7],[8]. 본 연구에서는 Eq.(6)의 단면계수를 휨강도로 변환하여 Eq.(7)과 같이 나타내었다.

$$I_{eff} = I_s + \sqrt{(\sum Q_n/C_f)} (I_{tr} - I_s) \quad (5)$$

$$S_{eff} = S_s + \sqrt{(\sum Q_n/C_f)} (S_{tr} - S_s) \quad (6)$$

$$M_{eff} = M_s + \sqrt{(\sum Q_n/C_f)} (M_{tr} - M_s) \quad (7)$$

- I_s : 강재 단면의 단면2차모멘트(mm^4)
- I_{tr} : 균열이 없는 완전합성환산단면의 단면2차모멘트(mm^4)
- $\sum Q_n$: 정모멘트가 최대가 되는 위치와 모멘트가 0이 되는 위치사이의 시어커넥터의 공칭강도의 합(N)
- C_f : 완전합성보의 콘크리트슬래브의 압축력 $\min(A_s F_y, 0.85f_{ck}A_c)$
- S_s : 강재 단면의 인장플랜지에 대한 단면계수(mm^3)
- S_{tr} : 균열이 없는 완전합성환산단면의 강재 단면의 인장플랜지에 대한 단면계수(mm^3)
- M_s : 강재 단면의 소성모멘트($kN \cdot m$)
- M_{tr} : 균열이 없는 완전합성환산단면의 소성모멘트($kN \cdot m$)

실험체 강재보의 소성모멘트(M_s)와 완전합성단면으로 가정한 소성모멘트(M_{tr})를 Eq.(7)에 적용하여 휨강도비에 따른 전단강도비를 Fig. 12에 실선으로 나타내었다. 그리고 각 실험체의 계산된 휨강도(M_n)에 대한 실험값(M_{max})에 대한 전단강도비를 유추하여 실험체별 Table 8에 정리하였다.

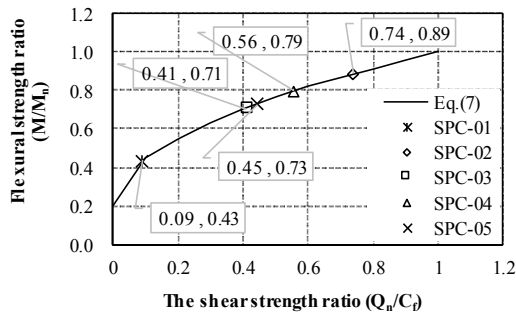


Fig. 12. Comparison of ductility for specimens

Table 8. Evaluation of shear strength ratio according to flexural strength ratio

Specimens	M_{max}	M_n	M_{max}/M_n	Q_n/C_f
SPC-01	711	1,657	0.43	0.09
SPC-02	1,469		0.89	0.74
SPC-03	1,177		0.71	0.41
SPC-04	1,318		0.79	0.56
SPC-05	1,266		0.73	0.45

Table 8와 같이 전단강도비와 휨강도를 비교했을 때 KBC에서 제시하고 있는 것과 같이 전단강도비와 휨강도비의 관계는 비선형적인 관계로써 전단연결재 강도의 증가는 휨강도의 증가를 나타내지 않는다. 따라서 Cap을 280mm 간격으로 배치하여도 약 40% 이상의 전단강도비를 확보할 수 있으며, Cap의 개수를 조절하여 전단강도비를 증가시킬 수 있다.

5.4 변수 비교

5.4.1 전단연결재 성능

Table 9와 Fig. 13(a)에 전단연결재를 변수로 실험한 결과를 비교하여 나타내었다. 전단연결재가 없는 SPC-01 실험체 대비 Stud를 부착한 SPC-02는 항복하중과 최대하중이 각 2.4배, 2.1배 높은 값을 보여준다. 변형성능은 항복점에서 3.3배, 최대점에서 1.4배 증가하였다. 그러나 항복점에 대한 최대점의 변위비는 0.4배로 감소하였다.

Table 9. Comparison of shear connector type

Specimens	Shear connector	P_y (kN)	P_{max} (kN)	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$
(1)SPC-01	non	440	592.2	6.2	30.5	4.9
(2)SPC-02	Stud	1,050	1224.1	20.5	43.3	2.1
(3)SPC-03	Cap	800	981.1	14.5	33.2	2.3
(2)/(1)	-	2.43	2.07	3.31	1.42	0.43
(3)/(1)	-	1.82	1.66	2.34	1.09	0.47
(3)/(2)	-	0.75	0.80	0.71	0.77	1.08

강판보 상부플랜지에 다용도 전단연결재(Cap)를 부착한 SPC-03 실험체는 항복하중과 최대하중이 증가하고, 변위도 증가하였다. 그러나 SPC-02 실험체와 동일하게 연성도를 나타내는 변위비는 0.4배로 감소하였다. 따라서 강판보와 콘크리트 슬래브의 경계면에 발생하는 슬립에 대해 저항하는 전단연결재를 부착함으로써 높은 합성강도를 발휘할 수 있다.

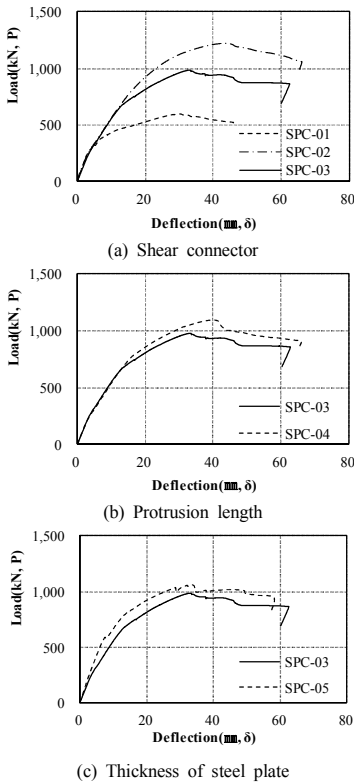


Fig. 13. Load vs. Deflection relationship by variable

Cap이 Stud와 같은 전단연결재의 역할하며 합성단면의 강도를 증가시켰으나, Stud 실험체 대비 약 80%의 휨강도를 발휘하였다. 5.3에서 비교한 것과 같이 전단강도비와 휨강도비는 비선형적인 관계이므로 Cap이 Stud보다 작은 전단강도를 보였으나, 상당히 높은 합성효과를 발휘한 것을 알 수 있다.

5.4.2 강재 돌출부 길이

강관보의 단면적과 보 축은 동일하며, 단면 하부의 돌출부의 길이를 변수로 하였다. 강관보의 치수를 규칙적으로 조정하기 위해 축관 높이(H1)의 1/3배와 1/4배의 휨거동을 비교하였다. 돌출부에서 볼트를 체결하기 때문에, 사용되는 체결장비의 크기 제한으로 돌출부의 길이는 최소 100mm로 제한하였다.

두 실험체의 휨성능을 Table 10에 비교하였고, Fig.13(b)에 나타내었다. SPC-03 대비 돌출부 길이가 짧은 SPC-04는 항복강도와 최대강도가 1.1배로 높았으며, 변형성능면에서도 1.2배로 증가하였다. 그러나 변위비는

미소하게 높은 값을 보였다. 따라서 돌출부의 길이를 축관 높이의 1/4배로 설계할 경우 휨강도와 변형성능이 모두 증가함을 알 수 있다.

Table 10. Comparison of thickness of steel plate

Specimens	Thickness (mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$
(1)SPC-03	4.5	800	981	14.5	33.2	2.3
(2)SPC-05	6.0	830	1,055	10.3	33.5	3.3
(2)/(1)	-	1.04	1.07	0.71	1.01	1.42

5.4.3 강판 두께

강판-콘크리트 합성보는 얇은 강판을 사용하기 때문에 강판의 국부좌굴이나 휨거동에 대해 검토되어야한다. SPC-03, 05 실험체는 동일한 보 축과 폭을 사용하나, 강판의 두께에 따라 좌굴양상을 검토하기 위해, 강판 두께를 4.5T에서 6.0T로 증가시켰다. 이에 따라 강판보 단면적은 약 30% 증가하였다.

SPC-03 대비 두꺼운 강판을 사용한 SPC-05는 휨강도가 약 5% 정도 증가하였으나, 최대점에서의 변위는 동일하게 나타났다.

SPC-03은 최대하중의 90%에서 좌굴이 발생하여 최종 좌굴폭은 280mm이다. SPC-05는 95%에서 좌굴이 발생하며, 실험 종료 후 좌굴폭은 240mm이다. 좌굴은 Cap의 사이에 발생하며, 6.0T의 경우 상대적으로 강판이 두껍기 때문에 Cap의 구속력이 작용하여 좌굴폭이 약 15% 작아진 것으로 판단된다. 두 실험체의 휨성능을 Table 11에 비교하였고, Fig.13(c)에 나타내었다.

Table 11. Comparison of Protrusion length

Specimens	Protrusion length (mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$
(1)SPC-03	1/3 × H1	800	981	14.5	33.2	2.29
(2)SPC-04	1/4 × H1	890	1,098	17.1	39.9	2.33
(2)/(1)	-	1.11	1.12	1.18	1.20	1.02

6. 결론

Z형과 ㄷ형으로 절곡한 한쌍의 얇은 강판을 볼트로 체결하고, 다용도 전단연결재를 부착한 SPC Beam의 휨

성능을 검토하였다. 6m의 실험체 2점가력 휨 실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 양단 단순지지된 SPC Beam의 휨실험 결과, 강판과 콘크리트의 부착력에 의해 하중 초기 합성거동 하였으며, 슬립발생 이후에는 부착한 전단연결재에 의해 합성효과를 발휘하였다. 2차 슬립에 의해 불완전합성거동을 보였으며, 최대강도 이후 완전한 내력저하를 보였다.
2. 단면의 변형률 분포를 통해, 탄성중립축은 강판보의 상부에 위치하였다. 불완전합성거동을 보임에 따라 중립축이 하부로 이동하였으며, 전단강도비에 의해 중립축의 이동정도가 결정되었다. 또한 볼트 체결부와 같이 단면 결손부는 합성단면의 휨강도 산정 시 제외하여야 할 것으로 판단된다.
3. 슬립을 억제할수록 접선강성과 할선강성이 유사한 값을 나타내었으며, 작업자의 보 폭을 고려하여 최소한의 Cap을 부착하였음에도 완전합성보로 가정할 휨강도의 70% 이상의 휨강도를 발휘하였다.
4. KBC2009에서 제시하는 전단강도비와 휨강도비를 이용하여 불완전합성거동을 보이는 실험체의 합성정도를 평가하였다. 전단연결재가 없는 실험체는 약 10%의 전단강도비를 보였으며, 280mm 간격으로 Cap을 부착한 실험체들은 약 47%의 전단강도비를 나타내었다. 또한 Cap이 Stud보다는 작은 전단강도를 보였으나, Cap이 전단연결재 역할을 하였다. Cap의 전단성능검증을 위해 Cap의 간격에 따른 전단성능에 대한 추가적인 실험 및 연구가 필요하다.
5. 강판보의 단면 형상을 변수로 비교하였다. 돌출부의 길이에 대해, 측판 높이의 비율로 선정하였으며 측판 높이의 1/3배 보다 1/4배의 휨강도가 약 10% 이상, 변형성능이 약 20% 증가하였다. 강판두께를 변수로 한 경우, 완전합성보 대비 약 70%의 휨강도를 발휘하였으며, 유사한 변형성능을 나타내었다. 불완전합성거동함에 따라 국부좌굴이 발생하였으나, 상대적으로 두꺼운 강판(6.0T)의 경우 5% 높은 강도에서 국부좌굴이 발생하였다. 또한 좌굴 폭이 15% 감소하였다.

따라서, SPC보는 기존의 합성보와 비교하여 시공성의 뛰어나고 경제적인 단면임에도 불구하고 완전합성보

의 70%이상의 휨강도를 발휘할 수 있음을 알 수 있다. Cap의 전단성능에 대한 추가적인 연구가 이뤄진다면 건설현장에서 공기단축과 시공성 향상에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] Jae-Sub Lee, Bong-Ho Cho, Dae-Jin Kim, Young-Ho Kim, Flexural Performance of Composite Beam with Concrete-filled Tubular Flange, April, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app7010057>
- [2] RIST, Composite slabs and beams using steel decking, Research institute of Industrial Science and Technology, Goomibook, 2011.
- [3] Sung-Pil Chang, Chang-Su Shim, Composite structures, Goomibook, 2006.
- [4] Sang-Seup Kim, Sang-Mo Kim, Sung-Bae Kim, Dong-Gee Seo, Yu-Suk Kim, An Experimental Study on the Behavior of the T-type Steel Composite Beam, Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol. 16, No. 2, pp.225-233, 2004.
DOI: http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=GGJHBP_2004_v16n2s69_225
- [5] Byung-Wook Heo, Myong-Kwak Kwak, Kyu Woong Bae, Sang-Min Jung, Suk-Kuy Kang, Flexural Capacity of the Profiled Steel Composite Beams with Truss Deck Plate, Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol. 19, No. 4, pp.413-423, 2007.
DOI: http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=GGJHBP_2007_v19n4_413
- [6] AIK, Korea building code and commentary-structural, Architectural Institute of Korea, 2009.
- [7] KSSC, Standard of design of steel structure by load and resistance factor design method, Korean Society of Steel Construction, 2014.
- [8] AISC, Steel Construction Manual, American Institute of Steel Construction, 2011.
- [9] KSA, KS F 2405; Standard test method for compressive strength of concrete, Korean Industrial Standards, Korean Standards Association, 2001.
- [10] KSA, KS B 0801; Test pieces for tensile test for metallic materials, Korean Industrial Standards, Korean Standards Association, 2007.
- [11] William T. Segui, Steel Design (International Student Edition), Thomson, 2006.

조 태 구(Tae-Gu Cho)

[정회원]



- 1982년 3월 ~ 1987년 2월 : 중앙대학교 공과대학 건축공학과(학사)
- 2006년 8월 ~ 2009년 2월 : 서울산업대학교 주택대학원 주택개발관리학과(석사)
- 1990년 5월 ~ 현재 : 동부건설 건축사업본부(상무)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 경기대학교, 일반대학원, 건축공학과(박사과정)

<관심분야>
건축, 건축시공

최 병 정(Byong-Jeong Choi)

[정회원]



- 1999년 1월 ~ 1999년 3월 : (미)BSW ARCHITECT (Enginnering Specialist)
- 1999년 4월 ~ 2000년 12월 : (미)HARZA ENGINEERING COMPANY (구조설계부)
- 2001년 3월 ~ 2017년 3월 : 경기대학교(정교수)
- 2016년 10월 ~ 현재 : 경기대학교 공학대학원(공학대학원장)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 창의공과대학(이공대학장)

<관심분야>
건축, 토목