ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2017.17.3.099

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 17, No. 3 (통권 69호), pp.99~105, September, 2017

슬림 AU 합성보의 전단성능에 관한 실험연구

Experimental Study on the Shear Capacity of Slim AU Composite Beam

이 미 향* 오 명 호** 김 영 호*** 정 석 창**** 김 명 한*****
Lee, Mi Hyang Oh, Myoung Ho Kim, Young Ho Jeong, Sugchang Kim, Myeong Han

Abstract

The SLIM AU composite beam consists of U-shaped steel plate, A-shaped steel cap and infilled concrete. The bottom steel plate acts as tension bars, and the top steel cap takes roles of shear connector and compression bars in the conventional reinforced concrete section. In this paper the shear strength of this composite beam with closed steel section has been evaluated through the concentrated loading shear experiments. Test results under the symmetrical and asymmetrical loading conditions were compared with the predicted values based on the KBC 2016. The composite beam showed the greater shear strength capacities than those of the theoretical evaluation.

Keywords : Composite beam, Shear capacity, Shear test, Asymmetry loading, Symmetry loading

1. 서론

고층 구조물에서 층고는 건물 전체의 경제성을 결정하는 매우 중요한 요소이며, 기존의 층고를 효율적으로 절감하려는 공법이 경쟁적으로 개발되고 있다. 고층 건물에서 층고 절감 효과는 슬래브와 합성보로 구성되는 바닥시스템에서 콘크리트와 강재의 합성작용을 이용하여 보의 춤을 최소화하고, 콘크리트 타설과 바닥 철근 배근 작업을 효율화하는 방향으로 구현되고 있다[1),2)].

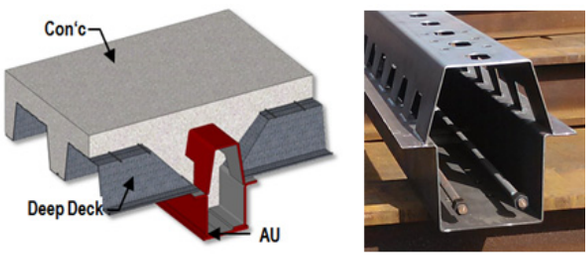
CFT, 합성보, 슬림 플로어 등의 합성 구조부재들이 계속적으로 연구되었으며, 이 중 건물의 부지활용을 극대화하기 위해 다양한 층고 절감형 합성보들이 2000년대 들어 개발되었다. 하부와 측판을 용접, 성형 제작한 U형 강판을 사용하여 휨 강성을 향상시킨 TSC(The Sen Steel Concrete Beam) 합성보는 2000년대 초중반에 개발되어 최근 CRC (Centrifugal Reinforced Concrete Column), PSRC (Prefabricated Steel Reinforced Concrete) 기둥과의 접합부 연구가 진행 중이다.

또한 강재 H형강 보를 허니컴보 절단법으로 제작한 후 하부플랜지를 제외한 강재 단면을 콘크리트로 매립한 iTECH(Innovative, Technical, Economical & Convenient Hybrid) 합성보는 2000년대 중반에 개발되었으며, 그리고 측판과 하부 강판을 고력볼트로 접합한 후 콘크리트를 충진한 HyFo Beam, 바닥판을 강재보 춤내에 시공한 반슬림 플로어가 개발되고 있다[1)]. 이러한 연구 개발 방향에 맞추어 층고를 혁신적으로 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 바닥 공사비의 절감이 가능한 SLIM AU 합성보(SLIM A Plus U-shaped Composite Beam) 바닥시스템이 개발되었다[1),2)].

SLIM AU 합성보 바닥시스템은 <Fig. 1>과 같이

* 정회원, (주)아이스트 소장·이사
I'ST Co., Ltd. Structural Engineering Group, General Manager
** 정회원, 국립목포대학교 건축공학과 부교수
Dept. of Architectural Engineering, Mokpo National Univ., Associate Prof.
*** 정회원, 엔테이지 대표
NTAGE, President
**** 정회원, 부천대학교 건축과 부교수
Dept. of Architecture, Bucheon Univ., Associate Prof.
***** 교신저자, 정회원, 국립목포대학교 건축공학과 부교수
Dept. of Architectural Engineering, Mokpo National Univ., Associate Prof.
Tel: 061-450-1256 Fax: 061-450-6454
E-mail: mhk314@mokpo.ac.kr

골이 깊은 Deep deck plate, A형 강재 캡 및 U형 강판으로 구성된다. U형 강판은 합성보 휨 저항의 핵심 요소가 되며, 시공 과정에서 Deep deck plate의 거치대 역할을 수행한다. A형 강재 캡은 콘크리트와 강재 사이의 합성작용이 가능하게 하는 합성 연결재이며, 동시에 휨 압축 강도에 기여한다.



〈Fig. 1〉 SLIM AU composite beam

이러한 SLIM AU 합성보의 휨 성능에 대해서는 많은 실험을 통해 구조적 우수성을 검증하였으나, 전단성능에 대해서는 아직까지 실험적으로 규명하지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 SLIM AU 합성보의 전단성능을 검증하고자 폐단면을 이루는 강재 보의 내부에 콘크리트를 채운 실험체를 대상으로 전단실험을 수행하여 그 결과를 건축구조기준(KBC 2016)과 비교하여 분석하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 실험체 계획

SLIM AU 합성보의 전단성능을 검증하고자 폐단면을 이루는 강재 보의 내부에 콘크리트를 채운 실험체를 대상으로 전단실험을 수행하였다. 실험체는 덮개형 앵커의 측면에 원형으로 구멍이 있는 강재 보 단면 형상을 대상으로 하였으며, 콘크리트 슬래브는 제외하였다.

또한 실험방법(가력점 위치)을 달리하여 중앙집중하중, 편심집중하중에 대한 전단성능을 평가하였다. 실험체 일람은 <Table 1>에 나타내었으며 상세는 <Fig. 2>와 같다.

실험체에 적용된 콘크리트는 설계기준강도(f_{ck}) 27MPa로 계획하였으며, 강재는 SM 490A 강종을 사용하였다. Z형 측판, 하부판, 덮개형 앵커는 모두 6mm 두께의 강판을 사용하였고, 단면 하부의 인장철근은 1-D19를 사용하였다.

2.2 가력방법

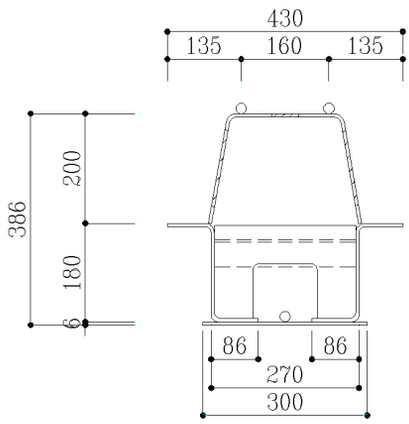
본 실험은 포스코 철강솔루션센터 강구조실험동에서 3,000kN의 UTM을 사용하였다. 하중가력은 변위제어방식을 적용하여 0.05mm/s의 속도로 단조가력하였으며, 실험체의 양단부는 단순지지로 설정하였다. 가력 위치는 비대칭 가력 실험의 경우 실험체 길이(L)의 1/3점에 가력하였고, 대칭 가력 실험의 경우 실험체 길이의 중앙부에 가력하였다. 단순지지된 지점과 가력점의 거리는 900mm이고, 실험체 보 춤의 2.3:1의 전단스팬비를 갖는다. 실험체 세팅을 <Fig. 3>에 나타내었다.

2.3 측정방법

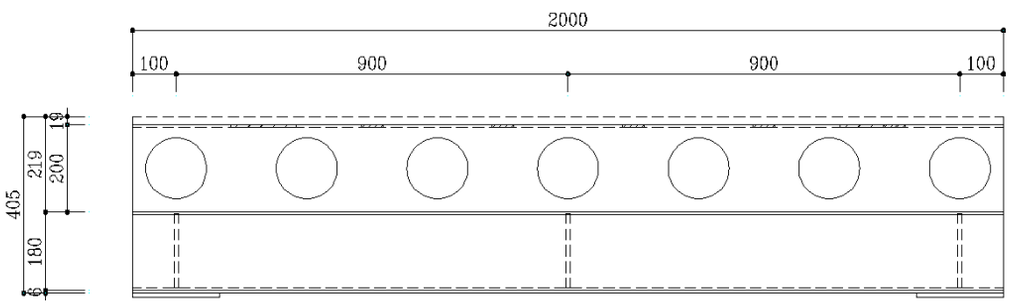
가력점 하부와 실험체 중앙부에 수직 변위계를 설치하여 하중가력에 따른 실험체의 처짐량을 계측하였으며, 실험체 단부에 수평 변위계를 설치하여 콘크리트와 강재의 미끄러짐량을 계측하였다. 실험체별 변위계 설치 위치 및 스트레인 게이지 부착 위치는 <Fig. 4>와 같고, 전단에 대한 게이지는 단부 구멍 사이에 45도 각도로 2개씩 부착하였다. 여기서

〈Table 1〉 Test Specimens

Specimens ID	Plate thickness (mm)			Height of steel cap (mm)	Height of U-type section (mm)	Reinforcement	Deck system	Loading
	Cap	Side	Bottom					
ST-01	6.0	6.0	6.0	200	180	1-D19	Truss deck	Asymmetry
ST-02	6.0	6.0	6.0	200	180	1-D19	Truss deck	Symmetry

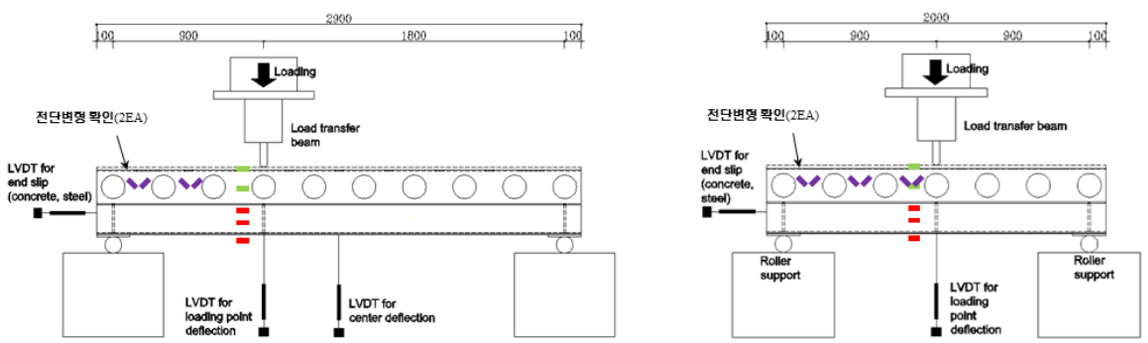


(a) Section(ST-01, ST-02)



(b) Side of specimen(ST-01, ST-02)

〈Fig. 2〉 Details of Specimens



(a) Asymmetry loading(ST-01) (b) Symmetry loading(ST-02)

〈Fig. 3〉 Test set-up

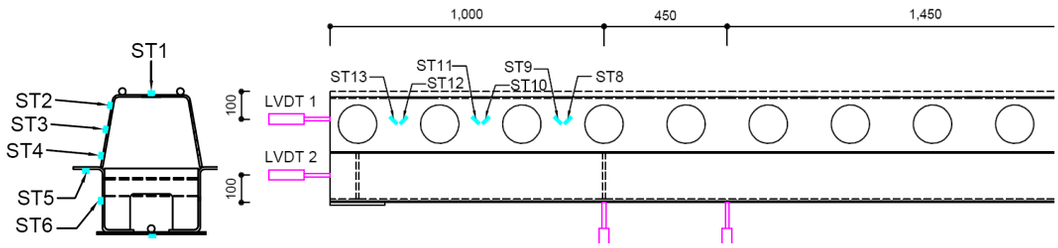
CON은 콘크리트 게이지이며, ST는 외부 강판에 설치한 스틸 게이지를 의미한다. 그 외의 CCT, CCS, R 등은 실험체 내부 철근에 부착되는 게이지를 나타낸다.

3. 실험결과 및 분석

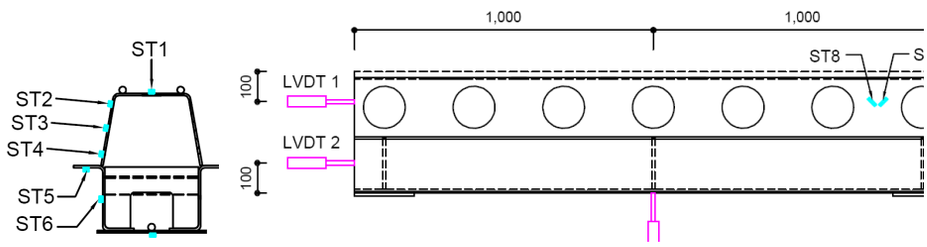
3.1 재료 시험

3.1.1 콘크리트

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도(f_{ck}) 27MPa로 계획하였으며 KS F에 따라 제작한 공시체 3개의 평균 탄성계수는 25,521.3MPa이고, 평균압축강도는 29.4MPa, 이때의 변형률은 0.002047이다. 공시체의 응력-변형률 관계는 <Fig. 5>에 나타내었다.

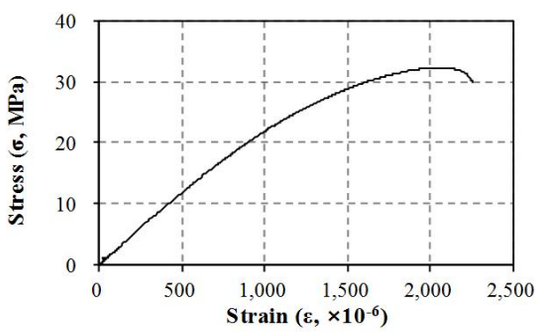


(a) ST-01(Asymmetry loading)

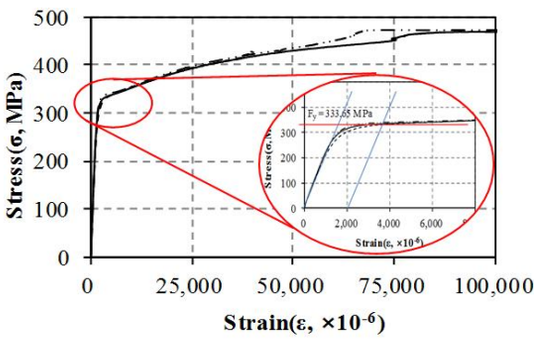


(b) ST-02(Symmetry loading)

〈Fig. 4〉 Installation location of strain gauge



〈Fig. 5〉 Test results of concrete cylinder



〈Fig. 6〉 Test results of steel coupon

3.1.2 강재

실험체에 사용된 강재의 재료 성능을 확인하기 위해 인장시험을 실시하였다. 실험체에 사용된 강종(SS490, Thk. 6mm)의 인장시험편을 KS B 0801을 준용하여 5호 정형시편으로 각각 3개씩 제작하였다. KS B 0802에 따른 인장시험결과, SM490의 탄성계수(E)는 199.3GPa, 항복강도(F_y)는 335.2MPa, 인장강도(F_u)는 522.0MPa이며, 항복변형률(ϵ_y)은 0.0018, 연신율은 평균 36.8%이다. 강재 시편의 응력-변형율 관계는 <Fig. 6>에 나타내었다.

3.2 파괴거동

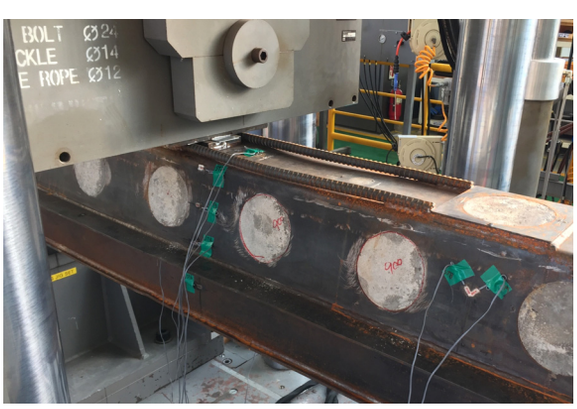
3.2.1 ST-01 실험체

ST-01은 하중 재하 위치를 실험체 편측 단부에서 900mm 이격된 위치에 하중을 재하하여 실험체의 전단저항 성능을 평가하였다. 가력 하중 약 180kN 지점에서 덮개형 앵커와 충전 콘크리트 사이에서 균열이 발생하고, 300~440kN의 하중구간에서 강재와 콘크리트의 마찰음이 발생하였으나, 육안으로 확인 가능한 상대 슬립을 발생하지 않았다. 이후 850kN에서 덮개형 앵커 상부 플랜지의 국부좌굴을 보강하기 위한 상부 철근에 좌굴이 발생하기 시작하였으며, 950kN에서 가력부의 상부플랜지에 국부좌굴이 발생하였다. 덮개형 앵커의 상부 플랜지에 국부좌굴이 발생함에 따라 측면부의 불규칙한 국부좌굴과 함께 구멍을 채우고 있던 콘크리트에 균열이 발생하였다. 콘크리트의 균열은 지속되었으며 강재의 국부적 변형에 의해 충전 콘크리트의 파괴가 가속되었다. 실험체의 파괴양상을 <Fig. 7>에 나타내었다.

〈Fig. 7〉 Failure shape of ST-01

3.2.2 ST-02 실험체

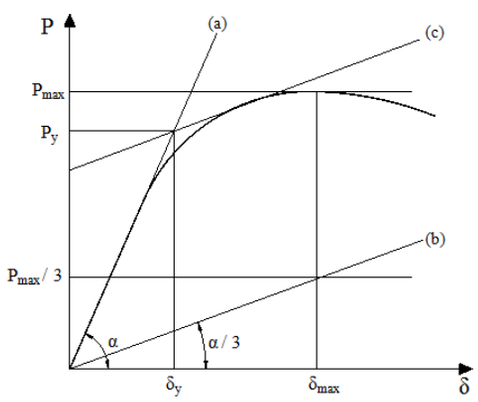
ST-02 실험체는 실험체 중앙에 하중을 재하하여 실험체의 전단성능을 평가하였다. 가력 하중 약 250kN에서 실험체 내부에서 마찰음이 발생하였으며, 400kN에 실험체 우측 단부에서 강판과 콘크리트의 박리가 확인되었고, 좌측 단부는 가력 하중 약 900kN에서 동일한 현상이 확인되었다. 1,200kN에서 가력부의 덮개형 앵커 상부 플랜지의 국부좌굴이 발생하였고, 1,320kN에서 내부 충전된 콘크리트의 압괴가 확인되었다. 최대하중은 약 1,419kN으로 계측되었다. 실험체의 파괴양상을 <Fig. 8>에 나타내었다.



〈Fig. 8〉 Failure shape of ST-02

3.3 하중-변위 관계

실험체의 항복하중(P_y)은 하중-변위 곡선에서 초기 기울기의 1/3 기울기의 직선으로 항복하중을 산정하는 1/3 접선법을 사용하여 평가하였다. <Fig. 9>와 같이 하중-변위 곡선의 초기 기울기 접선인 선분 (a)와 초기 기울기의 1/3인 선분 (b)를 평행 이동하여 하중-변위 곡선과의 접선을 이루는 선분 (c)와의 교점을 항복하중(P_y), 항복변위(δ_y)로 산정하였다. 실험체의 초기 강성(K_i)은 최대강도(P_{max})의 10% 점과 50%점을 연결한 선분의 기울기로 산정하였다.



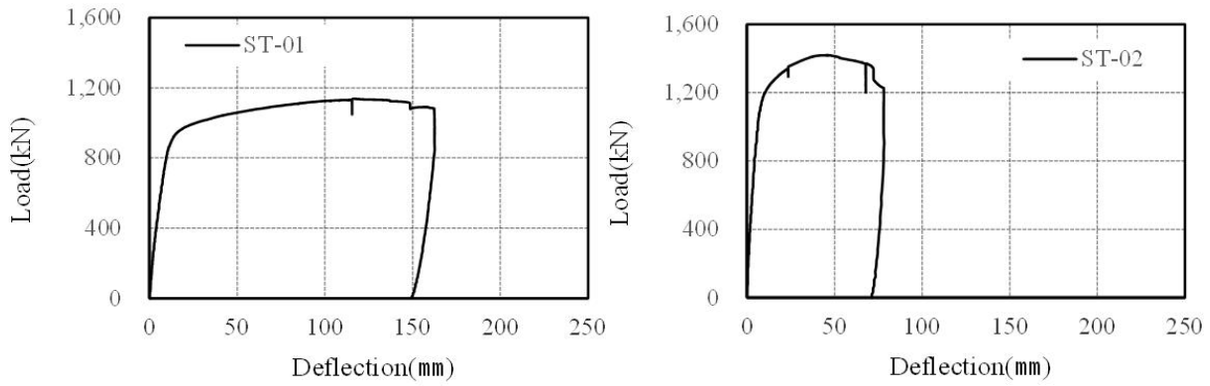
〈Fig. 9〉 1/3 secant method

각 실험체별 초기 강성(K_i) 및 항복하중(P_y), 최대하중(P_{max}), 항복하중 시 변위(δ_y), 최대하중 시 변위(δ_{max})를 <Table 2>에 나타내었으며, 하중-변위 곡선을 <Fig. 10>에 나타내었다.

실험결과, 초기 강성은 87.9kN/mm(ST-01), 183.6 kN/mm(ST-02)로 비대칭 가력한 실험체가 경간이 크기 때문에 초기 강성이 더 작은 값을 가지며, 또한 최대하중도 1,137.8kN (ST-01), 1,418.5(ST-02)으로 비대칭 가력한 실험체가 더 작은 값을 가지고 있다. 최대하중은 항복하중 대비 약 1.25배로 두 실험체가 유사한 내력비를 나타내었다. 또한 항복하중 시 변위는 10.60mm(ST-01) 및 5.80mm(ST-02)이고,

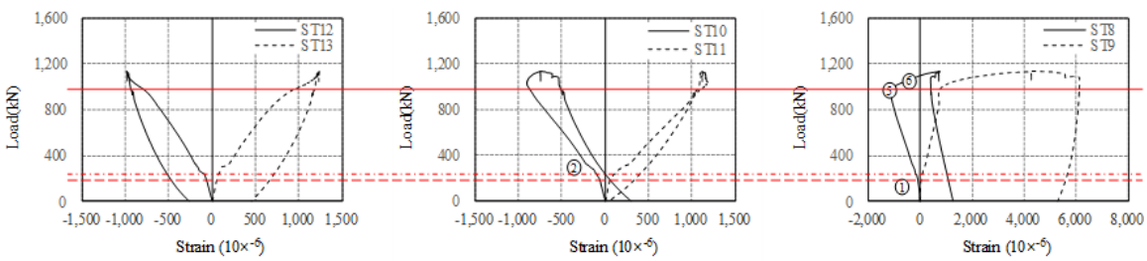
〈Table 2〉 Test results

Specimens ID	K_i (kN/mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	P_{max}/P_y	δ_y (mm)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	$\delta_{P_{max}}/\delta_y$
ST-01	87.9	900	1,137.8	1.26	10.60	116.11	10.95
ST-02	183.6	1,135	1,418.5	1.25	5.80	45.79	7.89

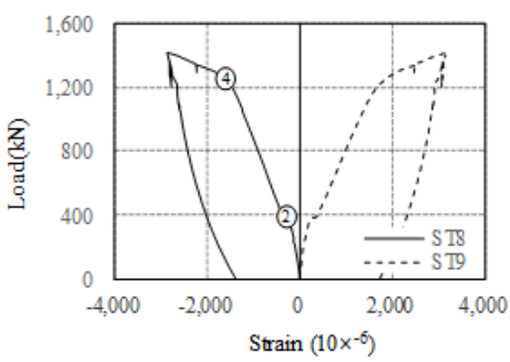


(a) ST-01(Asymmetry loading) (b) ST-02(Symmetry loading)

〈Fig. 10〉 Load-displacement curve



〈Fig. 11〉 Load-strain curve(ST-01)



〈Fig. 12〉 Load-strain curve(ST-02)

최대하중 시 변위는 각각 116.11mm(ST-01) 및 45.79mm(ST-02)이다. 항복하중 시 변위와 비교하여 비대칭 가력한 실험체의 경우 더욱 연성적인 변형 거동을 나타내는 것으로 분석되었다.

3.4 하중-변형률 관계

콘크리트 슬래브를 제외한 ST-01, ST-02 실험체는 SLIM AU 합성보의 전단강도를 평가하기 위한 실험체이다. 두 실험체는 가력 위치를 달리한 실험체로 ST-01 실험체는 전단과 휨이 동시에 작용하기 때문에 ST-02 실험체와 비교하여 낮은 강성과 강도를 발휘하였다.

각 실험체의 덮개형 앵커의 측면에 45도로 부착된 변형률 게이지의 측정값을 파괴거동과 비교하여 <Fig. 11> 및 <Fig. 12>에 나타내었다.

ST-01 실험체는 약 300kN의 하중 재하 시 파열음과 함께 하중-변형률 관계에서 작은 슬립 구간이 발생하였으나, 전체적으로 선형적인 변형을 나타내었다. 하중점과 단부 지점의 구간에 부착된 ST8~ST13의 측정값으로부터 압축변형과 인장변형이 대칭으로 작용하는 것을 알 수 있으며, 가력부로 갈수록 강재의 국부좌굴이 심하게 발생하였다.

합성보의 전단강도는 건축구조기준(KBC 2016)에 의해 산정한 결과, 공칭전단강도(V_n)은 439.4kN이다[3].

실험체에 국부좌굴이 발생하는 950kN을 전단강도 한계값으로 평가할 경우, 건축구조기준에 의해 산정한 공칭전단강도(V_n)와 비교하여 2.16배, 최대강도를 한계값으로 평가할 경우 약 2.6배의 매우 높은 전단강도를 나타내었다.

ST-02 실험체는 덮개형 앵커의 단부에 부착한 변형률 게이지의 측정값을 확인하였다. 중심 가력에 의해 휨모멘트보다 실험체에 작용하는 전단력이 파괴거동을 결정하며, 가력점으로부터 지점까지 작용하는 전단력에 대해 안정적인 전단거동을 나타내었다. <Fig. 12>에 나타낸 바와 같이 약 400kN 지점에서 강재와 내부 충전 콘크리트의 경계면에서 분리가 발생하며 미소한 슬립 구간이 있으나, 전체적으로는 선형적인 변형을 나타내었다. 또한 덮개형 앵커의 상부 플랜지에 국부좌굴이 발생하여 변형이 급증하였다. ST-01과 동일하게 덮개형 앵커의 국부좌굴에 의해 강성이 감소되는 점을 전단강도의 한계값으로 평가할 경우, 공칭전단강도 대비 약 2.7배, 최대강도값을 한계값으로 평가할 경우 약 3.2배이다. 따라서 설계 시 반영 가능한 2가지 하중 재하조건에 따른 실험결과로부터, 건축구조기준(KBC 2016)에 의한 기준식으로 산정한 공칭전단강도(V_n)와 비교할 때 매우 높은 전단내력을 가지고 있음을 확인하였다.

4. 결론

이 연구에서는 Z형의 강판 한 쌍과 평판을 조립제작한 U형의 강재 단면 상부에 덮개형 앵커를 부착한 SLIM AU 합성보의 집중 하중 전단 실험을 통해 폐단면 합성 보의 전단강도를 평가하였다. 콘크리트 슬래브를 제외한 강재 보와 폐단면 내부에 콘크리트를 충전한 합성 보를 대상으로 대칭 가력, 비대칭 가력의 하중 조건을 달리한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모든 실험체는 하중 초기 선형적으로 하중이 증가하였으며, 강재와 내부 충전 콘크리트의 경계면에서 부착력이 손실되어 미소한 슬립이 발생하였으나, 큰 강성 저하 없이 선형적인 탄성 거동을 유지하였다. 또한 가력부의 덮개형 앵커 상부 플랜지에서 발생한 국부좌굴에 의해 강성이 저하되었으며, 완만한 내력 증가를 보였다. 이후 내부 충전 콘크리트가 압괴되며 최대 내력이 결정되었다.

2) 실험체의 중심가력과 1/3점에 가력하는 하중조건을 달리한 두 실험체에 부착한 변형율 게이지의 측정값으로부터 덮개형 앵커의 측면에 발생하는 국부좌굴에 의한 한계상태와 실험 최대 내력점에 의한 한계상태를 건축구조기준(KBC 2016)에 의한 기준식과 비교한 결과, SLIM AU 합성보는 매우 높은 전단성능을 발휘하였다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2016R1D1A1B03934316)이며, (주)액트파트너와 (주)엔아이스틸의 제작지원에 감사드립니다.

References

1. Kim, M.H., Oh, M.H. and Min, J.K. (2016) Fire Performance Analysis of SLIM AU Composite Beam, Journal of the Association for Spatial Structures, Vol. 16, No. 4, pp.133-140.
2. Oh, M.H. and Kim, M.H. (2016) Fire Resistance Evalution of SLIM AU Composite Beam, Journal of the Association for Spatial Structures, Vol. 16, No. 4, pp.53-58.
3. MOLIT (2016) Korea Building Code, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

- Received : August 11, 2017
- Revised : September 14, 2017
- Accepted : September 14, 2017