

강재 단순보 단부에 근접한 개구부의 구조성능에 관한 실험적 연구

한동호^{1*}, 윤성기²

An Experimental Study on the Structural Performance of Openings at End Steel Beams

Dong-Ho Han^{1*}, Sung-Kee Yoon²

Abstract : This study was conducted to identify the structural performance of the opening in a location close to the support point in the perforated beam system of steel beams. In addition, structural performance was determined through experiments on reinforced openings using vertical and horizontal steel plates. In the steel simple beam, it was found that the opening was in a position closer to the support point, half the height of the steel beam ($D/2$), which was more appropriate than the height of the steel beam (D). In addition, the reinforcement effect of horizontal steel plate was greater than that of vertical steel plate reinforcement. Structural performance was improved when there was no gap between openings and steel plates.

Keywords : steel-beam, simple-beam, web-opening, reinforcement of steel plates

1. 서 론

건축물의 각층 층고는 건축 관련 법령의 규제 및 조건을 기준으로 경제성, 공간의 활용성, 디자인요소 등을 반영하여 결정한다. 이러한 사항을 고려하기 위해 건축물을 계획하는 경우에는 골조 시스템의 선택이 중요하다.

골조 시스템 중의 강구조 건축물에서 강재 유공보 시스템은 강재보의 웹 부분에 개구부를 설치하는 것으로서, 설치되는 개구부를 활용하여 설비시설의 덕트 및 배관 등을 관통하면 천정내의 설비공간을 최소화시킬 수 있게 된다. 이로 인한 효과는 층고의 감소와 냉난방 공조에 필요한 공간부피의 최소화, 그리고 건물의 전체 높이가 감소되는 효과를 얻을 수 있다. 이는 건축구조적인 측면에서 기둥부재의 길이가 줄어들어 좌굴에 대한 저항성능과 단면의 횡하중 저항성능의 향상 효과로 인하여 기둥 규격도 줄일 수 있게 된다. 그러므로 강재 유공보 시스템을 적용효과는 건축물의 건설비용 감소와 함께 냉난방 등의 유지관리비를 절감할 수 있다.

강재 유공보 시스템은 웹에 설치되는 개구부로 인하여 웹 단면 손실이 발생하는 문제점이 있다. 개구부로 인한 웹

의 단면 결손은 개구부의 형상, 크기와 함께 강재보 단면상 개구부 위치에 따른 편심, 강재보 길이방향의 위치(중앙부, 단부) 등 조건에 따라 휨 및 전단력의 내력저하를 발생하는 문제에 관한 국내외에서 강재 유공보 시스템에 대한 연구가 진행되어 왔다.

강재 유공보 시스템에 관한 연구는 1966년 Bower에 의해 시작된 이후 다수의 연구가 진행되어 왔다. 이런 기존 연구결과를 토대로 1990년 Darwin이 Steel and Composite Beams with Web Openings(AISC, 1990)에서 유공보 부재의 공칭 강도 산정 설계식이 제안하였으며, 이후 2003년에 수정이 되었다(AISC, 2003).

국내에서는 1980년에 H형강 보의 구조적 거동에 관한 연구(김규석, 1980)를 수행하였으며, 이후 유공 합성 보의 극한 내력에 관한 연구(이승준, 1995)와 반복하중을 받는 유공 강구조 부재의 국부좌굴 및 소성거동에 관한 연구(이은택, 2003)가 이루어졌고, 판폭두께비에 따른 유공보의 내력에 관한 실험(김상대, 2011)이 수행되었다. 이러한 연구들에서는 개구부의 위치를 강재보 지지점에서 보높이 이상의 이격하는 경우에 대한 연구가 대부분이다.

강구조 건축물에서 강재 유공보 시스템을 적용하는 경우에는 설비시설의 덕트 및 배관의 유지관리 측면을 고려한 배치에 따라 강재보 지지점에 근접한 단부, 즉 강재보 단면의 높이보다 가까운 이격 위치에 개구부를 설치할 필요성이 빈번히 발생하게 된다.

¹정회원, 부산대학교, 건설융합학부 박사과정, 교신저자

²정회원, 부산대학교, 건설융합학부 정교수, 공학박사

*Corresponding author : azct99@pusan.ac.kr

Steel Structure Lab (SSL), Pusan National University, Pusan, 46241, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

그러나 국내의 유공보에 대한 구조 설계에서 다수 이용되는 대표적인 국외기준인 Steel and Composite Beams with Web Openings(AISC, 2003)에서는 양단의 지지조건과 관계없이 강재보 지지점에서 최소 보높이 이상 개구부를 이격을 하도록 하고 있으므로, 강재보 지지점에 근접한 단부에 개구부 설치가 불가능한 실정이다.

단순보는 전단력이 전구간에 크게 작용하지만 휨은 재하지점 주변구간에 비하여 지지점 주변구간에서는 상대적으로 작게 작용하는 구간이다. 그러므로 단순보에 작용하는 휨과 전단력을 고려할 경우에는 개구부의 위치가 재하지점의 주변구간보다는 지지점 주변구간이 개구부의 위치가 더 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 강재 단순보의 지지점에서 개구부 가장자리가 강재보 높이(D)의 경우와 강재보 높이 절반(D/2)인 경우의 실험을 실시하여 구조성능의 변화를 파악함으로써 강재보 지지점에 근접한 단부에 개구부 설치 가능여부에 대하여 알아보고자 한다. 또한 강재 단순보의 지지점에 개구부 가장자리가 강재보 높이 절반(D/2)인 경우에 수직과 수평 강판보강 및 개구부와 강판 간격여부에 따른 실험을 실시함으로써 구조성능의 변화를 파악하여 보강성능을 확인하고자 한다.

2. 강재 유공보의 관련기준

국내기준에서는 유공보 시스템에 대하여 기술이 없어서, 현재 유공보 시스템의 설계는 설계자마다 AISC, BS(British Standards Institution) 등의 서로 다른 국외 기준을 적용하게 되어 계산방법과 상세도가 제각각인 실정이다. 국내에서 다수가 사용하는 국외기준인 Steel and Composite Beams with Web Openings (AISC, 2003)의 주요내용은 다음과 같다.

설계휨강도와 설계전단강도의 상호관계는 식(1)과 같다.

$$\left(\frac{\phi M_n}{\phi M_m}\right)^3 + \left(\frac{\phi V_n}{\phi V_m}\right)^3 = R^3, R = 1.0 \quad (1)$$

여기서, ϕM_n 는 설계휨강도, ϕM_m 는 극한휨강도이며 ϕV_n 는 설계전단강도, ϕV_m 는 극한전단강도이다.

강재보의 비보강 개구부의 순수 휨에 대한 내력은 식(2)와 같다.

$$M_m = M_p \left\{ 1 - \frac{\Delta A_s \left(\frac{h_0}{4} + e \right)}{Z} \right\} \quad (2)$$

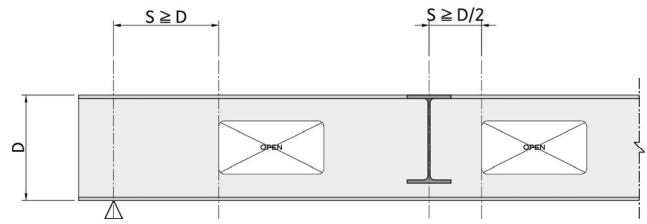


Fig. 1 Opening Position Restriction Regulation

여기서, M_p 는 무공강재보의 소성모멘트, ΔA_s 는 웨브의 단면적, h_0 는 개구부의 춤, t_w 는 웨브의 두께, e 는 개구부의 편심거리($|e|$), Z 는 무공부재의 소성단면계수, F_y 는 항복강도이다.

강재보의 수평 강판보강 개구부의 순수 휨에 대한 내력은 식(3)과 같다.

$t_w e < A_r$ 인 경우

$$M_m = M_p \left\{ 1 - \frac{t_w \left(\frac{h_0}{4} + h_0 e - e^2 \right) - A_r h_0}{Z} \right\} \leq M_p \quad (3)$$

여기서, A_r 은 개구부 수평 강판보강재의 단면적이다.

조밀단면(Compact Section)인 강재부재의 최대전단내력은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} V_m &= V_{mb} + V_{mt} & (4) \\ V_{mb,t} &= \alpha_{vb,t} \times V_{pb,t}, \\ \alpha_{vb,t} &= \frac{\sqrt{6} + \mu}{\nu + \sqrt{3}}, & V_{pb,t} &= \frac{F_y t_w s_{b,t}}{\sqrt{3}} \\ \nu &= \frac{a_0}{s_{b,t} - \frac{A_r}{2b}}, & \mu &= \frac{2 P_r d_r}{V_{pb,t} s_{b,t}} \end{aligned}$$

여기서, ν 는 개구부가 있는 단면에서 티의 형상비, s 는 티의 춤이며, a_0 는 개구부 길이이다.

집중하중 재하지점에서는 개구부 가장자리가 최소 강재보 높이의 절반(D/2)이상 떨어져야 하며, 지지점에서는 개구부 가장자리가 최소 강재보 높이(D)이상 떨어져야 한다고 Fig. 1과 같이 제한하고 있다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험체 종류 및 형상

실험계획은 강재 단순보의 형태로 휨 및 전단력을 동시에

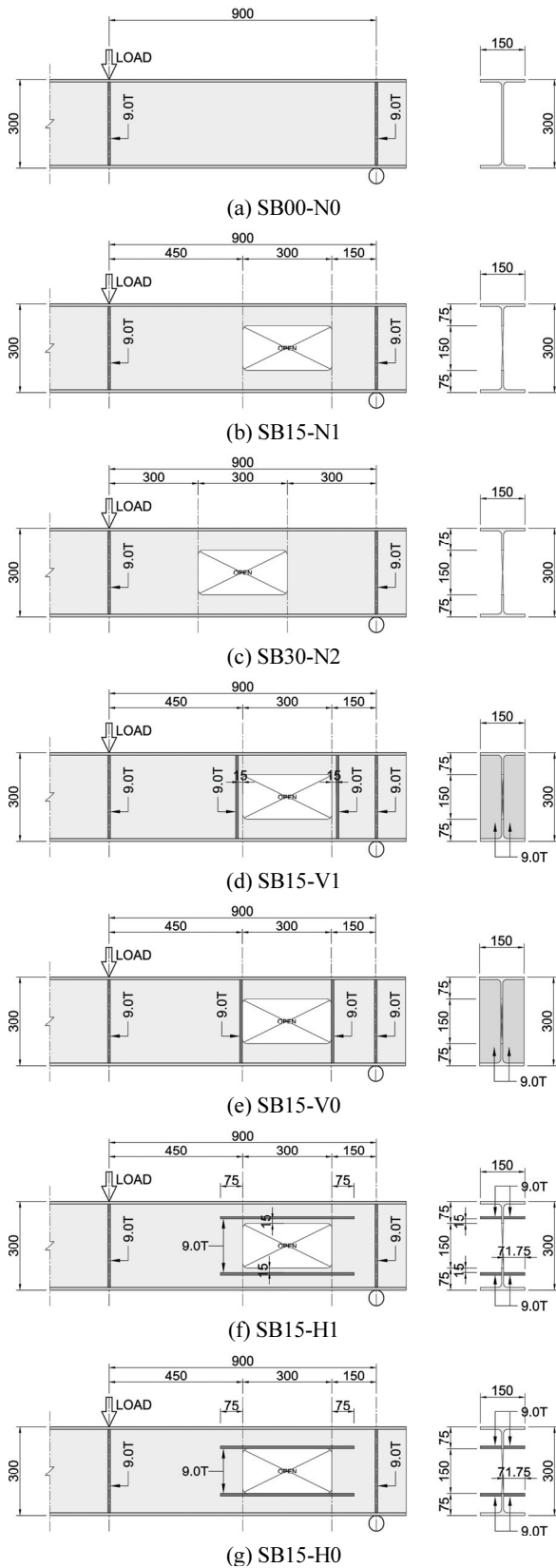


Fig. 2 Specimen detail

Table 1 Specimen schedules

Name	Opening-Support distance [mm]	Reinforcement method	Opening-Plate distance [mm]
SB00-N0	none	-	-
SB15-N1	150	none	-
SB30-N2	300	none	-
SB15-V1	150	vertical plate	15
SB15-V0	150	vertical plate	0
SB15-H1	150	horizontal plate	15
SB15-H0	150	horizontal plate	0

※ SB 15 - H 1
① ② ③④

① simple beam
② opening - support distance
③ reinforcement method
④ none : specimen number
reinforcement : opening - plate distance

작용하도록 실험체 양쪽 지지점에 볼러를 사용한다.

실험체 스케일은 1:1로 다음과 같이 실험계획을 수립한다.

실험체 규격은 H-300×150×9/6.5로서, 일반구조용 압연강재인 SS275로 한다. 실험체의 총길이는 2,000 mm으로 양쪽 끝에 100 mm의 여장과 지지점간의 거리가 1,800 mm이다.

개구부 규격은 300 mm × 150 mm인 2:1비율의 사각형이며, 개구부의 모서리는 라운드(R = 16 mm)형태로 처리한다.

하중전달을 위하여 실험체의 중앙 하중 재하위치, 양쪽 단부 지지점 위치에 하중점 스티프너(t = 9.0 mm)를 설치하며, 개구부 보강에 사용한 보강강판은 일반구조용 압연강재인 SS275(t = 9.0 mm)를 사용한다.

실험체 계획은 강재보 무공 실험체와 함께 개구부 가장자리와 지지점 이격이 150 mm, 300 mm인 강재보 유공 실험체, 그리고 개구부 가장자리와 지지점 이격 150 mm인 강재보 유공 실험체에 수직 강판보강 및 수평 강판보강에 대하여 개구부 가장자리와 보강강판 간격 15 mm인 강재보 경우와 간격 없는 강재보 경우로 나누어서 한다.

강판보강에 사용되는 보강강판은 두께 9 mm로 하고, 수평 강판보강인 경우는 개구부에서 보강강판 내민길이를 개구부 폭의 1/4인 75 mm로 계획한다. 실험체는 Fig. 2, Table 1과 같이 총 7개를 계획한다.

3.2 가력 및 계측계획

본 연구에서의 가력방식은 Fig. 3과 같이 강재 단순보의 형태에서 휨 및 전단을 동시에 작용하는 1점 집중재하방식이다.

사용된 가력장치는 Photo 1과 같이 UTM을 사용하여 가력하며, 가력방식은 변위제어로 1 mm/min의 속도로 한다.

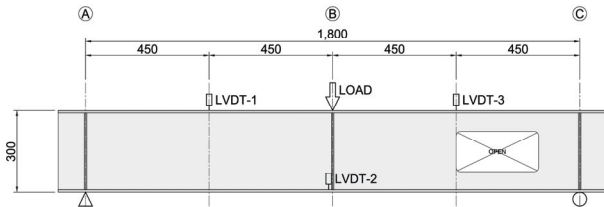


Fig. 3 Loading Plan



Photo 1 Test set up

4. 실험 결과 및 분석

4.1 사용재료의 역학적 성질

본 연구의 재료실험은 KSB0801인 금속재료 인장시험 규정에 따라 일반구조용 압연강재인 SS275인 H-300×150×9/6.5에서 채취한 6.5 mm와 9.0 mm의 시험편을 제작하여 재료실험을 실시하였다.

재료실험의 결과는 Table 2와 같고, 측정된 평균값인 항복강도는 339.84 MPa이며, 인장강도는 459.87 MPa로 측정되었다. 이 결과는 추후 실험체의 내력분석 연구에 활용한다.

Table 2 Material experiment results

Name	F_y [MPa]	F_u [MPa]	F_y / F_u
6.5T-1	339.34	463.02	0.733
6.5T-2	324.85	449.61	0.723
6.5T-3	349.01	461.36	0.756
6.5T average	337.73	458.00	0.737
9.0T-1	330.51	457.49	0.722
9.0T-2	334.63	459.01	0.729
9.0T-3	360.71	468.72	0.770
9.0T average	341.95	461.74	0.741
Total average	339.84	459.87	0.739

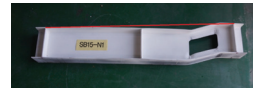
4.2 실험후 실험체 파괴양상

본 연구에서 실시한 실험체별 실험종료 후 파괴된 형태는 Photo 2와 같고, 그리고 각 실험체의 파괴양상은 Table 3과 같이 정리하였다.

무공 강재보인 SB00-N0 실험체의 파괴양상은 가력지점인 중앙부에서 웹 국부좌굴이 발생하고, 이후 플랜지 국부좌굴이 발생한 뒤 극한 내력에 도달하였다. 그리고 수직강관 보강 유공보 실험체(SB15-V1, SB-N0)는 유공보 무보강인 SB15-N1 실험



(a) SB00-N0



(b) SB15-N1



(c) SB30-N2



(d) SB15-V1



(e) SB15-V0



(f) SB15-H1



(g) SB15-H0

Photo 2 Failure Shape of the test Specimen

Table 3 Failure Shape of the test Specimen

Name	Shape of Failure
SB00-N0	1. Web - Local Buckling 2. Flange - Local Buckling
SB15-N1	1. Web - Local Buckling 2. Flange - Local Buckling 3. Edge of Opening to support - Up
SB30-N2	1. Web - Local Buckling 2. Flange - Local Buckling 3. Edge of Opening to support - Up
SB15-V1	1. Web - Local Buckling 2. Flange - Local Buckling 3. Edge of Opening to support - Up
SB15-V0	1. Web - Local Buckling 2. Flange - Local Buckling 3. Edge of Opening to support - Down
SB15-H1	1. Web - Local Buckling 2. Flange - Local Buckling 3. Edge of Opening to support - Down
SB15-H0	1. Web - Local Buckling 2. Flange - Local Buckling 3. Edge of Opening to support - Down

험체와 비슷한 파괴양상과 변형형태를 보였다.

수평강판 보강된 유공보 실험체(SB15-H1, SB-H0)의 파괴 양상은 국부좌굴이 개구부위치의 웹에서 먼저 발생한 후, 플랜지에서 발생하였고, 특이사항은 무공 강재보인 SB00-N0 실험체와 비슷하게 가력지점인 실험체 중앙부 상부 플랜지에서 국부좌굴이 발생되었다. 변형형태는 개구부 양쪽 가장자리에서 발생되었지만 SB00-N0 실험체와 수평강판 보강된 유공보 실험체에 비하여 완만한 형상을 보였다.

무보강 유공보 실험체(SB15-N1, SB30-N2)와 수직강판 보강 유공보 실험체(SB15-V1, SB-N0)는 지지점에 가까운 개구부 가장자리 부위에서 상승되는 변형이 발생되었다. 이는 개구부 가장자리 위치에서 응력이 집중되어 변형이 발생된 것으로 판단된다.

4.3 기본 모델의 실험결과

본 연구의 각 실험체에 대한 실험결과는 하중-변위 곡선으로 나타내었다. 하중은 UTM에서 측정된 가력하중이며, 변위는 중앙부 수직변위를 사용하였다.

실험결과 분석에서 사용한 항복은 탄성구간의 초기강성 기울기의 1/3인 직선과 소성구간의 곡선의 교차점을 항복점으로 한다.

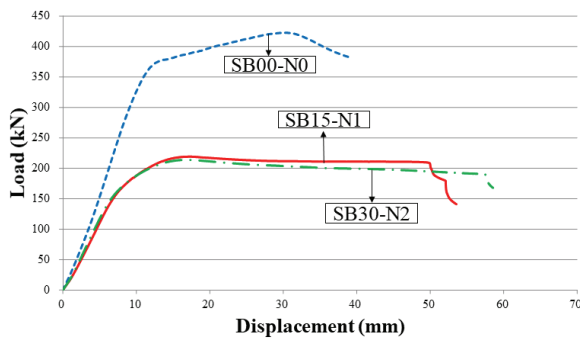


Fig. 4 Load-Displacement Relationship - 1

Table 4 SB00-N0, SB15-N1, SB30-N2 Load and Displacement

Name	Yield		Ultimate	
	Load [kN]	Displacement [mm]	Load [kN]	Displacement [mm]
SB00-N0	377.12 (1.895)	13.36 (1.171)	422.61 (1.929)	30.10 (1.747)
SB15-N1	199.04 (1.000)	11.41 (1.000)	219.08 (1.000)	17.23 (1.000)
SB30-N2	195.30 (0.981)	11.05 (0.968)	213.74 (0.976)	16.95 (0.984)

※ () : ratio to result of SB15-N1

Table 4와 Fig. 4는 무공 강재보인 SB00-N0 실험체와 무보강 유공보인 SB15-N1 실험체와 SB30-N2 실험체의 실험 결과를 나타낸 것이다.

SB00-N0 실험체의 하중-변위 곡선은 전반적으로 안정적인 거동 양상을 보였다. 가력 초기에는 선형거동을 하다가 가력하중이 377.12 kN에서 항복하며, 이후 422.61 kN에서 극한하중을 도달한 하였고, 이후 가력하중이 감소하였다.

개구부 이격 150 mm인 무보강 유공보 SB15-N1 실험체의 하중-변위 곡선은 가력 초기에는 선형 거동 이후, 199.04 kN에서 항복하고, 219.08 kN에서 극한하중을 도달한 후 서서히 감소하는 거동을 보였다.

개구부 이격 300 mm인 무보강 유공보 SB30-N2 실험체의 하중-변위 곡선은 가력 초기의 선형 거동을 하다가 195.04 kN에서 항복, 213.74 kN에서 극한하중을 기록한 후 서서히 감소하였다. SB15-N1 실험체의 결과와 비교하면 항복하중, 극한하중 모두에서 작은 것으로 나타났다.

무보강 유공보인 실험체(SB15-N1, SB30-N2)는 무공 강재보인 SB00-N0 실험체와 비교분석해 보면 상이하게 항복하중 이후 극한하중 위치가 항복하중에 가깝고, 변형도경화 구간 보이지 않는 특징이 있는 것으로 나타났다.

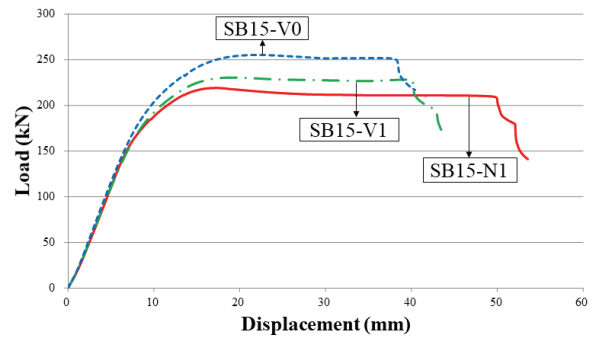


Fig. 5 Load-Displacement Relationship - 2

Table 5 SB15-N1, SB15-V1, SB15-V0 Load and Displacement

Name	Yield		Ultimate	
	Load [kN]	Displacement [mm]	Load [kN]	Displacement [mm]
SB15-N1	199.04 (1.000)	11.41 (1.000)	219.08 (1.000)	17.23 (1.000)
SB15-V1	208.59 (1.048)	12.01 (1.053)	230.51 (1.052)	19.11 (1.109)
SB15-V0	223.50 (1.123)	12.16 (1.066)	255.23 (1.165)	22.22 (1.290)

※ () : ratio to result of SB15-N1

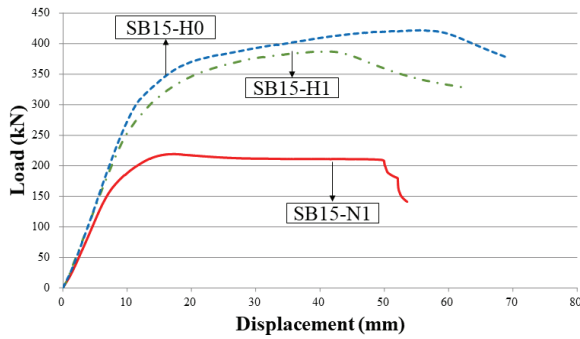


Fig. 6 Load-Displacement Relationship - 3

Table 6 SB15-N1, SB15-H1, SB15-H0 Load and Displacement

Name	Yield		Ultimate	
	Load [kN]	Displacement [mm]	Load [kN]	Displacement [mm]
SB15-N1	199.04 (1.000)	11.41 (1.000)	219.08 (1.000)	17.23 (1.000)
SB15-H1	308.69 (1.551)	14.45 (1.266)	387.07 (1.767)	41.25 (2.394)
SB15-H0	329.34 (1.655)	14.01 (1.228)	421.87 (1.926)	55.47 (3.219)

※ (): ratio to result of SB15-N1

4.4 수직보강 모델의 실험결과

Table 5와 Fig. 5는 수직강판 보강 유공보인 SB15-V1 실험체와 SB15-V0 실험체의 실험 결과를 나타낸 것이다.

개구부 가장자리와 보강강판 간격 15 mm인 수직강판 보강한 SB15-V1 실험체의 하중-변위 곡선은 하중의 가력 초기에 선형 거동을 하며, 이후 가력하중이 증가하여 208.59 kN에서 항복하였고, 230.51 kN에서 극한하중을 도달하였다. 이후 서서히 감소되는 형태를 보였다. 무보강 유공보인 SB15-N1 실험체와 비교하면 항복하중은 4.8 %, 극한하중은 5.22 % 큰 것으로 평가되었다.

개구부 가장자리와 보강강판 간격 없이 수직강판 보강한 SB15-V0 모델의 하중-변위 곡선은 가력 초기에는 선형 거동을 하며 가력하중이 223.50 kN에서 항복하였으며, 255.23 kN 지점에서 극한하중을 기록하였다. 무보강 유공보인 SB15-N1 실험체와 비교하면 항복하중은 12.29 %, 극한하중은 16.50 % 큰 것으로 나타났다.

수직강판 보강 유공보 실험체(SB15-V1, SB15-V0)의 실험 결과에서 분석된 하중-변위 곡선의 형태는 무보강 유공보 실험체(SB15-N1, SB30-N2)와 비슷한 형상을 보이며, 또한 기본 모델의 실험체에 보다 항복 이후 강성비가 낮은 특징이 발견되었다.

4.5 수평보강 모델의 실험결과

수평강판 보강 유공보 실험체(SB15-H1, SB15-H0)의 실험 결과는 Table 6, Fig. 6과 같다.

개구부 가장자리와 보강강판 간격 15 mm으로 수평강판 보강된 유공보인 SB15-H1 실험체의 하중-변위 곡선은 가력 초기에 선형 거동하며, 가력하중이 308.69 kN에서 항복한 후, 하중이 계속 증가하여 387.07 kN 극한하중을 기록한 이후 서서히 감소되는 형태를 보였다. 무보강 유공보인 SB15-N1 실험체와 비교하면 항복하중은 55.09 %, 극한하중은 76.68 % 크게 나타났다.

개구부 가장자리와 보강강판 간격 없이 수평강판 보강 유공보인 SB15-H0 실험체의 하중-변위 곡선은 가력 초기에는 선형 거동한 후, 329.34 kN에서 항복, 421.87 kN에서 극한하중을 도달하고 이후 감소되는 거동을 보였다. 무보강 유공보인 SB15-N1 실험체와 비교하면 항복하중은 65.46 %, 극한하중은 92.56 % 큰 것으로 나타났다.

수평 강판보강 실험체(SB15-H1, SB15-H0)의 하중-변위 곡선의 형태는 무공 강재보인 SB00-N0시험체 결과와 비슷한 한 형상이었으며 변형도경화 구간도 보이고 있다.

4.6 AISC 제안식 비교

무보강 유공보 실험체(SB15-N1, SB30-N2)와 수평강판 보강 유공보 실험체(SB15-H0)의 실험결과를 적용하여 AISC의 제안식을 이용하여 휨내력과 전단내력 상호관계를 평가하였다. 개구부 양쪽 중 휨과 전단력이 큰 위치인 강재보 실험체의 중앙쪽 개구부 가장자리 부분의 실험값을 적용하였다.

첫 번째로는 실험결과 중 항복하중 시의 실험값을 설계강도(M_{n1}, V_{n1})로 적용하고, 극한강도는 이론값(M_{m1}, V_{m1})과 실험의 극한값(M_{m2}, V_{m2})을 각각 적용하여 AISC의 제안값(R_{11}, R_{12})을 산출하였으며 그 결과는 Fig. 7과 Table 7과 같다.

극한강도를 이론값(M_{m1}, V_{m1})과 실험시 극한값(M_{m2}, V_{m2})을 적용한 식(1)의 AISC의 제안값(R_{11}, R_{12})을 비교해 보면, 이론값을 적용한 경우가 실험 시 극한값을 적용한 경우보다 AISC의 R 값이 크게 평가되었다.

무보강 유공보 실험체(SB15-N1, SB30-N2)는 개구부의 위치가 상이한 경우에도 비슷한 AISC의 R 값을 나타내고 있다. 개구부 가장자리와 보강강판 간격 없이 수평강판 보강한 유공보인 SB15-H0 실험체는 AISC의 R 값은 무보강 유공보인 SB15-N1 실험체와 비교해 보면 보강효과가 있는 것으로 평가되었다. 특히 R_{12} 는 0.98로 보강을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

두 번째로는 실험체의 중앙부에 임의의 가력하중 300 kN 인 경우에 대하여 설계강도(M_{n2}, V_{n2})를 적용하고, 극한강도

를 이론값(M_{m1} , V_{m1})과 실험시 극한값(M_{m2} , V_{m2})을 각각 적용하여 AISC의 제안값(R_{21} , R_{22})을 산출하였으며 그 결과는 Table 8, Fig. 8과 같다.

무보강 유공보 실험체(SB15-N1, SB30-N2)는 개구부의 위치가 상이한 경우에도 비슷한 AISC의 R 값을 나타내고 있다. 개구부 가장자리와 보강강판 간격 없이 수평강판 보강 유공보인 SB15-H0 실험체의 AISC의 R 값은 무보강 유공보인 SB15-N1 실험체와 비교해 보면 보강효과가 있는 것으로 평가되었다. 특히 R_{22} 는 0.90로 보강을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

Table 7 AISC Propose Value - 1

Name	SB15-N1	SB30-N2	SB15-H0
M_{n1} [kN·m]	44.78	58.59	74.10
V_{n1} [kN]	99.52	97.65	164.67
M_{m1} [kN·m]	118.78	118.78	127.40
V_{m1} [kN]	56.56	56.56	132.33
R_{11}	1.77	1.74	1.29
M_{m2} [kN·m]	49.29	64.12	94.92
V_{m2} [kN]	109.54	106.87	210.94
R_{12}	1.14	1.15	0.98

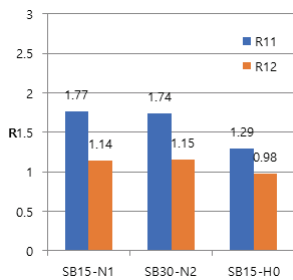


Fig. 7 AISC Propose Value - 1

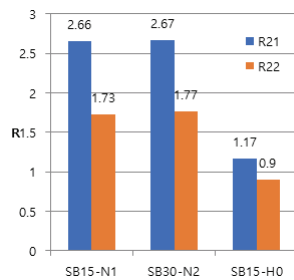


Fig. 8 AISC Propose Value - 2

Table 8 AISC Propose Value - 2

Name	SB15-N1	SB30-N2	SB15-H0
M_{n2} [kN·m]	67.50	90.00	67.50
V_{n2} [kN]	150.00	150.00	150.00
M_{m1} [kN·m]	118.78	118.78	127.40
V_{m1} [kN]	56.56	56.56	132.33
R_{21}	2.66	2.67	1.17
M_{m2} [kN·m]	49.29	64.12	94.92
V_{m2} [kN]	109.54	106.87	210.94
R_{22}	1.73	1.77	0.90

4.7 실험 결과 비교 분석

지지점과 개구부의 가장자리까지 거리가 150 mm인 무보강 유공보 SB15-N1 실험체와 300 mm인 무보강 유공보 SB30-N2 실험체의 실험 결과를 볼 때, SB30-N2 실험체보다 SB15-N1 실험체가 항복하중은 1.88 %, 극한하중은 2.44 %, 항복변위는 3.16 %, 극한하중시 변위는 1.63 % 더 크게 측정되었다. 이는 단순보에서 중앙부에서의 거리가 먼 위치에 개구부가 있으므로, 모멘트가 상대적으로 작게 작용하기 때문이다.

수직강판 보강 유공보인 SB15-V1 실험체가 무보강 유공보 SB15-N1 실험체보다 항복하중은 4.80 %, 극한하중은 5.22 %, 항복변위는 5.26 %, 극한하중시 변위는 10.91 % 증가되었다.

수평강판 보강된 SB15-H1 실험체는 항복하중 50.29 %, 극한하중 71.46 %, 항복변위 21.38 %, 극한하중시 변위 128.50 %로 더 크게 증가되었다. 이는 수평강판 보강은 단면손실이 발생하는 개구부 부분에 집중되는 응력을 개구부 주변 부분으로 분산시키는 역할이 효과적이기 때문으로 판단된다.

개구부와 보강강판의 간격에 유무에 따른 강제보 실험체의 결과를 각각 비교해보면, 간격이 없는 실험체(SB15-H0, SB15-V0)가 간격 15 mm인 실험체(SB15-H1, SB15-V1)에 비하여 항복하중 7.49~10.37 %, 극한하중 11.28~15.88 %로 증가되었으며, 항복변위는 -3.85~1.31 %로 비슷하지만, 극한하중 시 변위는 18.05~82.53 %로 크게 증가되는 것으로 나타났다. 이는 개구부 가장자리에 집중되는 응력을 바로 보강강판으로 전달되어 응력 집중을 완화하기 때문으로 판단된다.

강판보강 유공보 실험체 중 가장 효율적인 결과로 측정된 개구부와 보강강판의 간격이 없는 수평강판 보강 유공보인 SB15-H0 실험체와 무공 강제보 SB00-N0 실험체의 결과를 비교하면, SB00-N0 실험체보다 SB15-H0 실험체가 항복하중 24.01 %, 극한하중 0.34 %로 작게 측정되었지만, 항복변위는 5.7 % 크고, 극한하중 시 변위는 147.24 %로 상당히 크게 나타났다.

AISC의 제안값 R 평가에서 항복하중 시의 실험값을 설계 강도로 적용하고, 극한강도를 이론값을 적용한 경우가 실험 시 극한값을 적용한 경우보다 AISC의 R 값이 크게 평가되었다. 이는 이론값과 상이하게 실험값이 모멘트보다 전단력이 지배하는 보의 형태이기 때문으로 판단된다. 그리고 무보강 유공보 실험체(SB15-N1, SB30-N2)는 개구부의 위치가 상이한 경우도 비슷한 AISC의 R 값이 평가되었다.

개구부 가장자리와 보강강판 간격 없이 수평강판 보강 유공보인 SB15-H0 실험체에 대한 극한강도를 이론값을 적용한 AISC의 제안값 R 평가는 보강 성능을 만족하지 못하지만, 실험 시 극한값을 적용한 경우에는 보강을 만족하는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 지지점과 개구부 가장자리의 이격이 강재보 높이(D)보다 가까운 위치일 경우($D/2$)에 대하여 무보강 유공보 실험체와 강판보강 유공보 실험체에 대한 실험을 실시한 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강재 단순보에서 지지점과 개구부의 이격이 강재보 높이 절반($D/2$)인 경우가 높이(D)인 경우보다 강도와 연성 능력이 부족하지 않다고 평가되므로, 개구부에 덕트 및 배관 등의 설비시설의 시공이 용이한 개구부의 이격이 강재보 높이 절반($D/2$)인 경우를 사용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 지지점과 개구부의 이격이 강재보 높이 절반($D/2$)인 모델의 보강형태에 따른 실험체의 결과에서, 수평강판 보강 실험체가 수직강판 보강 실험체보다 항복하중과 극한하중 측면에서 보강효과가 큰 것으로 평가되었다.
- 3) 개구부와 보강강판의 간격이 없이 강판보강을 하는 방법은 시공시 정밀한 작업이 필요하다는 단점이 있으나 개구부와 보강강판의 간격이 15 mm인 경우보다 보강효과는 큰 것으로 평가되었다.
- 4) 보강효과가 가장 큰 개구부의 간격이 없는 수평강판 보강 유공보 실험체는 무공 강재보인 실험체와 실험 결과를 비교해보면 항복하중은 작게 측정되지만, 극한하중은 거의 비슷하게 측정되어 내력에 대한 보강이 충분히 된 것으로 평가된다. 또한 극한하중시 변위는 147.24%로 크게 측정되어 연성증대 효과가 있는 것으로 판단된다.
- 5) 본 실험의 항복시 결과값을 적용하여 AISC의 제안값(R)을 산정하면 강재보 무보강 실험체는 개구부의 위치가 상이한 경우에도 비슷한 AISC의 제안값(R)을 나타내고 있으며, 수평강판 보강 유공보 실험체는 AISC의 제안값(R) 1.29~0.98로 유공보의 내력 보강 효과를 얻는 것이 가능한 것으로 판단된다.
- 6) 강재 유공보에서 지지점과 개구부 가장자리의 이격이 강재보 높이보다 가까운 위치인 경우($D/2$)에 개구부 보강방법으로 수평강판 보강을 한다면 내력에 대한 보강

효과와 함께 연성의 증가로 인한 에너지흡수능력이 증대되는 효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1D1A1B07049559).

References

1. Darwin(1990), Steel and Composite Beams with Web Openings, Report, *University of Kansas Center for Research*, University of Kansas Center.
2. AISC(2003), Steel and Composite Beams with Web Openings, *AISC Steel Design Guide Series 2*, AISC, Inc.
3. Kim, K.S.(1980), A Study on the Structural Rigidity of H-Shape Steel Beam with Hole in Web, *Journal of the architectural institute of Korea*, The Architectural Institute of Korea, 24(1), 57-60.
4. Lee, S.J.(1995), Ultimate Load Capacity of Composite Beams with Upper Web Openings, *Journal of the architectural institute of Korea*, The Architectural Institute of Korea, 11(6), 137-143.
5. Lee, E.T(2003), Local Buckling and Plastic Behavior of Perforated Steel Members under Cyclic Loading, *Journal of the architectural institute of Korea*, The Architectural Institute of Korea, 19(11), 23-32.
6. Kim, S.D(2011), The Experiment on the Capacity of Web-opening Steel Beams according to the Width-thickness Ratio, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korea Society of Hazard Mitigation, 11(6), 9-16.
7. Kim, K.H(2018), Evaluation of Shear Performance of Reinforced Concrete Beams for Varying Reinforcement Details of Web Opening, *Journal of Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection, 22(4), 19-26.

Received : 11/05/2020

Revised : 11/26/2020

Accepted : 12/23/2020

요 지 : 본 연구는 강재 단순보의 유공보 시스템에서 개구부를 지지점에 근접한 위치에 설치하는 경우에 대하여 구조성능을 파악하고자 실험을 실시하였다. 또한 수직·수평 강판을 이용한 개구부 보강에 대하여도 실험을 통하여 구조성능을 파악하였다. 강재 단순보에서 개구부가 지지점에 근접한 위치인 강재보 높이의 절반($D/2$)인 경우에 강재보 높이(D)인 경우보다 적절한 개구부 위치인 것을 알 수 있었다. 또한 보강방법으로는 수직강판 보강보다는 수평강판 보강이 보강효과가 크며, 개구부와 강판의 간격이 없는 것이 구조성능이 더 큰 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 강재보, 단순보, 유공보, 강판보강