

# 반복하중을 받는 단부에 근접한 개구부를 갖는 강재보의 구조성능에 관한 실험적 연구

한동호<sup>1\*</sup>

## An Experimental Study on the Structural Performance of Steel Beam with Opening Close to End Subjected to Cyclic Loading

Dong-Ho Han<sup>1\*</sup>

**Abstract:** In the existing study of steel beams with openings, openings are located at a location where the distance to the support point is equal to or greater than the section height. Considering the facilities using the openings in the steel beam, the distance from the opening to the support point may be closer than the height of the beam section. Therefore, research on this is needed. This study is an experimental study to understand the structural performance of beams with openings close to the ends subjected to Cyclic Loading. In addition, in this study, we want to understand the structural performance through experiments on beams with openings reinforced with vertical or horizontal steel plates.

**Keywords:** Steel-beam, Cyclic loading, Web-opening, Reinforcement of steel plates

### 1. 서 론

강구조 건축물에 사용되는 유공 강재보는 건축물의 고층화와 함께 공조설비의 발전으로 인하여, 층고 절감과 천정내 설비공간의 최소화 목적으로 사용된다. 유공 강재보는 강재보의 웹 부분에 개구부를 설치하는 것으로, 덕트 및 배관 등의 설비시설을 이 개구부에 관통시킴으로서 천정내 설비공간이 감소로 인한 층고 절감을 할 수 있게 된다. 건축구조적인 측면에서 기둥부재 길이의 감소로 인한 좌굴과 횡하중에 대한 저항성능이 향상되므로 기둥 규격도 줄일 수 있다. 그러므로 유공 강재보의 효과는 강구조 건축물의 건설비용 감소와 함께 유지관리비를 절감할 수 있다.

유공 강재보는 웹에 설치되는 개구부로 인하여 웹의 단면 손실이 발생되어 휨과 전단내력, 강성이 크게 저하되는 문제를 내포하고 있으므로 국내외에서 강재 유공보 시스템에 대한 연구가 진행되어 왔다. 1966년부터 Bower에 의해 직사각형 개구부를 갖는 유공보 실험을 통한 극한강도에 대한 연구(Bower, 1968) 등 유공보 관련된 연구가 수행되기 시작하였다. 이후 직사각형 개구부를 갖는 유공보의 반복하중 작용 시 피로 현상에 대한 연구(Frost, 1971)와 박판 웹에 무보강

유공보에 대한 웹포스트의 좌굴에 대한 연구(Redwood, 1978) 및 유공보의 임계하중에 대한 연구(Redwood, 1979)가 수행되었다. 1990년에는 기존 연구결과를 바탕으로 Darwin 이 Steel and Composite Beams with Web Openings (AISC, 1990)에서 유공보의 공칭 강도 산정 설계식이 제안하였고, 이후 2003년에 수정이 되었다(AISC, 2003). 국내에서는 1978년부터 유공 웹브인 H형강보의 역학적인 거동에 관한 연구(김종락, 1978)를 시작으로 유공 H형강보의 강성에 관한 연구(김규석, 1980), 상부 유공 합성보의 극한 내력(이승준, 1995), 그리고 반복하중을 받는 유공 H-형강 캔틸레버 보의 소성거동(이원석, 2001) 및 반복하중을 받는 유공 강구조 부재의 국부 좌굴 및 소성거동에 관한 연구(이은택, 2003)가 수행되었다.

유공보에 대한 기존연구에서는 단순하중에 대한 연구와 함께 반복하중에 대한 연구가 일부 있지만, 최근 지진하중 및 풍하중의 중요성에 비하여 반복하중을 받는 유공보에 대한 연구가 미흡한 상황이다.

또한 기존연구에서는 개구부의 위치가 강재보 지지점에서 보높이 이상의 이격하는 경우에 대한 연구가 주를 이루고 있는데, 설비시설의 덕트 및 배관의 유지관리 측면을 고려할 때, 개구부의 위치가 강재보 단면의 높이보다 가까운 이격 위치에 대한 유공보의 연구가 필요하다고 할 수 있다.

강재보의 지지점에서 개구부 이격이 강재보 단면 높이의 절반( $d/2$ )인 유공 강재보는 개구부 이격이 강재보 단면 높이( $d$ )인 경우보다 모멘트와 전단력이 큰 부분에 개구부가 위치

<sup>1</sup>정회원, 부산대학교, 건설융합학부 박사과정

\*Corresponding author: azct99@pusan.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2021년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

함으로 강도확보에 불리한 조건이며, 지지점까지의 개구부 이격이 짧으므로 개구부에 대한 강판보강인 경우에 강판 내민길이의 제한과 강판 접합 공간 부족 등의 문제를 갖게 된다.

따라서 본 연구에서는 무공 강재보, 강재보의 지지점에서 개구부 이격이 강재보 단면 높이의 절반( $d/2$ )인 무보강 유공 강재보와 여기에 강판보강한 실험체를 제작하여 각 실험체가 반복하중을 받을 때의 거동과 국부좌굴을 관찰하고, 최대내력, 내력저하 등 구조성능을 연구함으로써 유공 강재보 설계에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 유공 강재보 관련 기준

현재 국내기준에는 의 관련된 내용이 충분하지 않으므로, 대다수의 구조 설계자는 AISC (American Institute of Steel Construction), BS (British Standards Institution) 등의 국외기준을 참고하고, 여기에 경험에 의존하여 강재 유공보의 구조

계산 및 검토를 실시하고 있다.

대표적으로 국내에서 이용되는 국외기준인 Steel and Composite Beams with Web Openings (AISC, 1990)의 주요내용은 Table 1과 같이 강재 유공보 규격과 수평강판 보강에 대하여 기술되어 있다. 여기에 Fig. 1과 같이 무보강 유공보인 경우에는 집중 하중 재하지점과 개구부 가장자리의 이격이 최소 강재보 단면 높이의 절반( $d/2$ ) 이상으로 기술되어 있으며, 지지점에서는 강재보 단면 높이( $d$ ) 이상 개구부를 이격하도록 되어 있다. 강재 유공보에 강판보강한 경우는 지지점에서 강재보 단면 높이의 절반( $d/2$ ) 이상 개구부를 이격을 하도록 기술되어 있다.

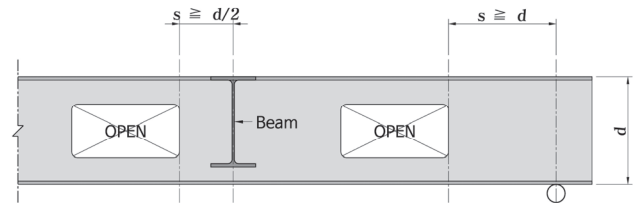


Fig. 1 Opening position restriction regulation

Table 1 AISC Design guide

Parameter	Limit		Comment on Limit
	Circular Opening	Rectangular Opening	
Max depth of opening	$\leq 0.8h$	$\leq 0.7h$	Experience shows this to be a practical limit for economic design. This is consistent with the other geometrical limits below
Min depth of Tees	$\geq t_f + 30\text{mm}$	$\geq 0.1h$	Practical limit, based on draft Annex N of ENV 1993-1-1:1992.
Min depth of Top Tee	As above	As above and $\geq 0.1l_o$ if unstiffend	To limit local deformation and stability of the top Tee during construction.
Max ratio of depth of Tees			Asymmetry of opening position can cause web-post moments. It is preferable to provide an upward (positive) eccentricity of the opening in the web depth.
$h_b/h_t$	$\leq 3$	$\leq 2$	
$h_t/h_b$	$\geq 0.5$	$\geq 1$	
Max unstiffend opening length, $l_o$	-	$\leq 1.5h_o$ high shear	The limit of the aspect ratio, $l_o/h_o$ , limits the deformation across the opening and also tension in the shear connectors. Stricter limits are required for openings in high shear regions.
	-	$\leq 2.5h_o$ low shear	
Max stiffend opening length, $l_o$	-	$\leq 2.5h_o$ high shear	
	-	$\leq 4h_o$ low shear	
Min width of web-post			The design of the web-posts is subject to further checks. It is recommended that stricter limits are adopted for openings in high shear regions,
Low shear regions	$\geq 0.3h_o$	$\geq 0.5l_o$	
High shear regions	$\geq 0.4h_o$	$\geq l_o$	
Corner radius of rectangular openings	-	$r_o \geq 2t_w$	Pre-drilled holes at the corners of the opening ensure no over-cutting and avoid a reduction in local plastic resistance of the Tee.
		but $r_o \geq 15\text{mm}$	
Min width of end-post, $s_e$	$\geq 0.5h_o$	$\geq l_o$ and $\geq h_o$	The minimum width of web-post depends also on the type of end connection and the build-up of forces in the shear connectors.
Min horizontal distance to point load			The distance to the point load is measured from the nearer edge of the opening. A separate check is required on web buckling at point load positions.
No stiffeners	$\geq 0.5h$	$\geq h$	
With stiffeners	$\geq 0.25h_o$	$\geq 0.5h_o$	

강재 유공보와 관련 기존연구와 구조설계에서는 지지점과 개구부 가장자리의 이격이 강재보 단면 높이( $d$ ) 이상인 경우를 기본으로 하고 있기에 본 연구에서는 이격이 단면 높이의 절반( $d/2$ ) 이상인 경우에 대하여 연구를 실시한다.

## 2.2 실험체 계획

본 연구에서의 실험체는 Fig. 2와 같이 일반적으로 사용되는 일반구조용 압연강재 SS275인 H-300×150×9/6.5을 사용하며, 실험체 지지점과 가력위치까지의 길이 1,395 mm에 여장 길이를 포함한 총길이 1620 mm로 한다. 그리고 하중전달을 위하여 실험체의 가력위치에 스티프너( $t = 9.0$  mm, SS275)를 설치한다.

개구부는 2:1 비율인 사각형인 300 mm × 150 mm이며, 강재보 단면 중앙에 위치하고, 지지점에서의 개구부 이격은 강재보 단면 높이 절반( $d/2$ )으로 한다. 또한 개구부의 천공은 모서리에 드릴로 구멍을 뚫고 Milling 작업을 하여 열응력에 의한 잔류응력이 최소화되도록 제작한다. 개구부 모서리는 응력집중을 완화하기 위하여 곡률( $R = 16$  mm) 형태로 처리한다.

강판보강에 사용되는 강판은 SS275인 두께 9 mm로 하며, 수평 강판보강인 경우는 개구부의 가장자리에서 강판 내민길이를 개구부 폭의 1/4인 75 mm로 한다.

실험체의 가력위치에 설치하는 스티프너와 개구부 주변에 설치하는 보강 강판은 모살용접으로 실험체와 접합한다.

본 연구에서의 실험체는 Table 2와 Fig. 3과 같이 총 6개로 무공 강재보와 유공 강재보, 그리고 수직 강판보강 및 수평 강판보강에 대하여 개구부 가장자리와 보강강판 간격 15 mm인 경우와 간격 없는 강판보강 강재보 경우로 나누어 계획한다.

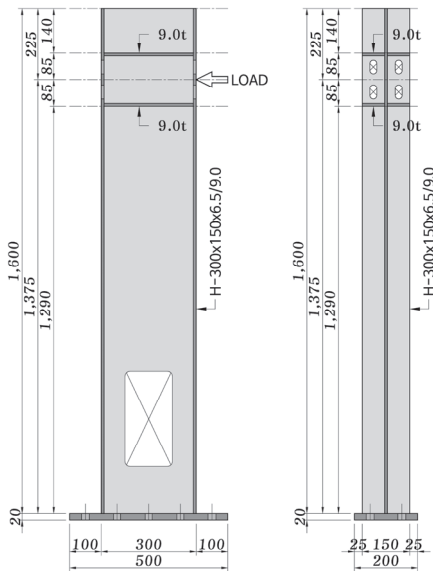


Fig. 2 Specimen detail

Table 2 Specimen schedules

Name	Opening-Support distance [mm]	Reinforcement method	Opening-Plate distance [mm]
CB00-N0	none	-	-
CB15-N1	150	none	-
CB15-V1	150	vertical plate	15
CB15-V0	150	vertical plate	0
CB15-H1	150	horizontal plate	15
CB15-H0	150	horizontal plate	0

※ CB 15 - H 1  
① ② ③④

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

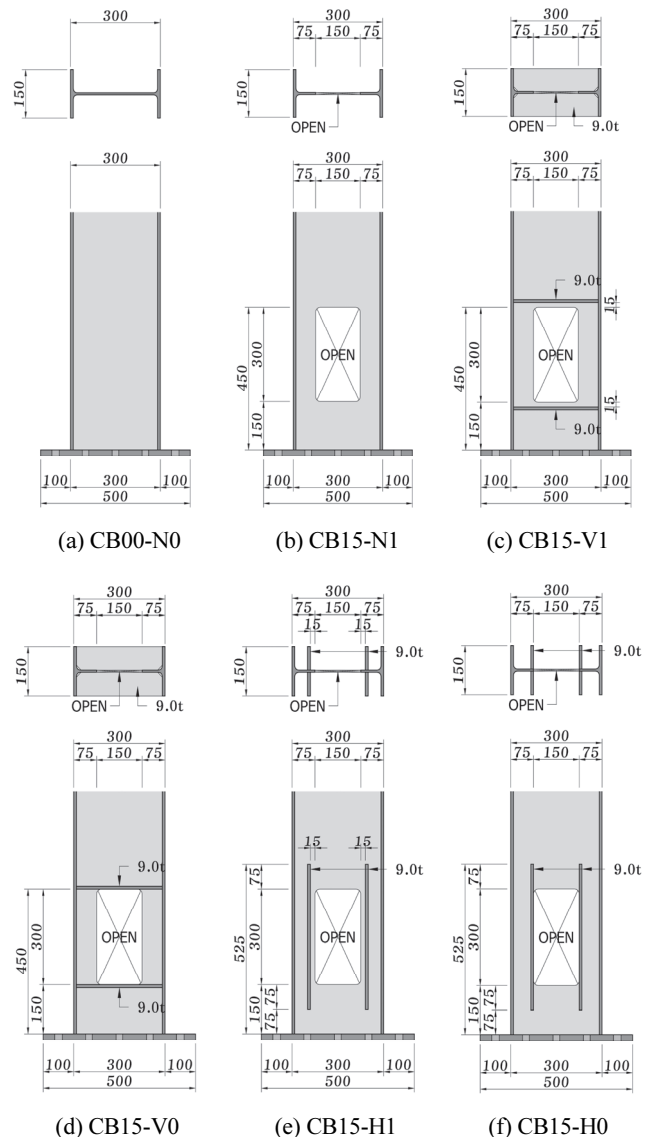


Fig. 3 Specimen schedules

### 2.3 가력 계획

본 연구에서의 하중가력은 Fig. 4와 photo 1과 같이 실험체에 휨과 전단이 동시에 작용되도록 1점 집중재하 방식으로 하며 실험체 거치는 실험체를 캔틸레버 형태로 지지 프레임에 고력볼트로 접합한다. 가력장치는 500 kN 용량의 Actuator를 사용한다.

하중가력 방식은 Table 3와 Fig. 5와 같이 변위제어 방식으로 실험체 지지점과 가력위치까지의 길이 1,395 mm에 대한

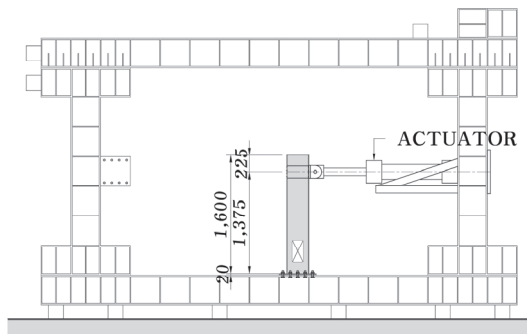


Fig. 4 Loading plan

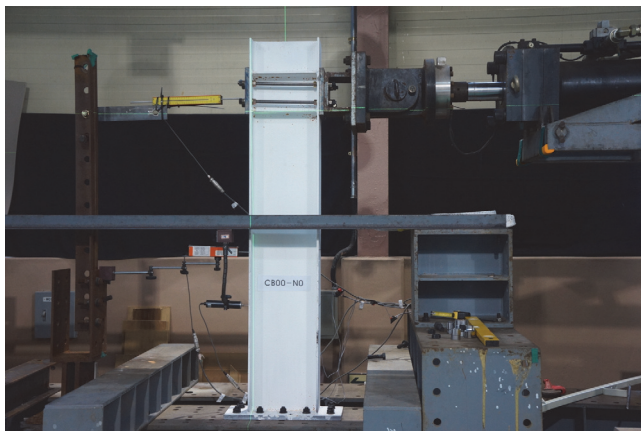


Photo 1 Testing set-up of specimen

Table 3 Standard loading history

Step	Cycle	Radian	Displacement [mm]
1	01~06	0.00375	5.23
2	07~10	0.00500	6.98
3	11~14	0.00750	10.46
4	15~18	0.01000	13.95
5	19~20	0.01500	20.93
6	21~22	0.20000	27.90
7	23~24	0.30000	41.85
8	25~26	0.40000	55.80

각 Step의 Radian 기준에 따라 산정한 변위를 증가시키는 방법으로 반복하중을 가력한다. 하중가력은 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC, 2016)를 참고하여, Step 1은 Cycle 6회, Step 2와 Step 3 및 Step 4에서는 Cycle 4회로 진행하며, Step 5 이후에는 전부 Cycle 2회로 계획한다.

본 실험에서는 하중 가력 시 실험체에 Crack 및 좌굴 발생으로 인한 내력저하가 심화되면 가력을 중지하고 실험을 중지한다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 사용재료의 역학적 성질

본 연구의 재료실험은 실험에 사용된 SS275인 H-300 × 150×9/6.5 강재에서 웨브(6.5 mm)와 플랜지(9.0 mm)에서 2개씩 시험편을 채취하여 KSB0801인 금속재료 인장시험 규정에 따라 제작, 실험을 실시하였다. 재료실험의 결과는 Table 4에 나타내었으며, 이 결과는 추후 실험체의 내력분석 연구에 활용하고자 한다.

#### 3.2 실험체의 파괴 및 국부좌굴 양상

본 연구에서 실시한 실험의 실험체별 파괴 및 국부좌굴 양

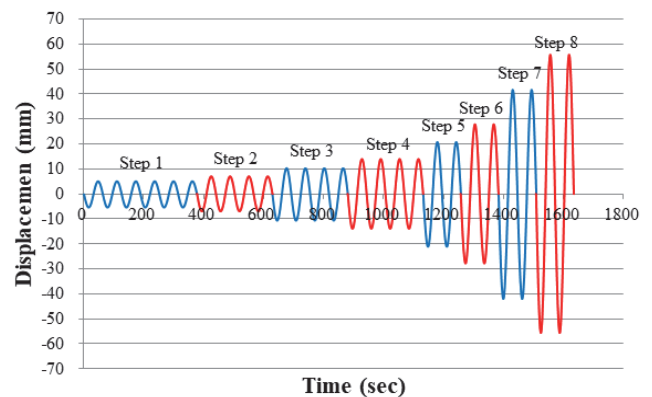


Fig. 5 Standard loading history

Table 4 Material experiment results

Name	$F_y$ [MPa]	$F_u$ [MPa]	$F_y / F_u$	$\epsilon$ [%]	$E$ [MPa]
6.5T-1	339.34	463.02	0.733	0.1677	202,349
6.5T-2	349.01	461.36	0.756	0.1645	212,164
6.5T average	344.18	462.19	0.745	0.1661	207,257
9.0T-1	330.51	457.49	0.722	0.1646	200,796
9.0T-2	360.71	468.72	0.770	0.1704	211,684
9.0T average	345.61	463.11	0.746	0.1661	206,240

**Table 5** Failure shape of the test specimen

Name	Step	Crack	Local Buckling
CB00-N0	4	Flage End	
	5	Web End	
	8		Base Plate
CB15-N1	3	Web Opening	
	4		Web Opening
	7	Flage Opening	Flage Opening
CB15-V1	5	Web Opening	
	6		Web Opening
	8	Flage Opening	Flage End
CB15-V0	5	Web Opening	
	6		Web Opening
	8	Flage Opening	Flage End
CB15-H1	4	Web Opening	
	6	Flage Opening	Flage End
	8		Web Opening
CB15-H0	4	Web Opening	
	6	Flage Opening	Flage End
	8		Web Opening

상은 Table 5에 정리하여 나타냈으며, 실험후 각 실험체의 형상은 Photo 2와 같다.

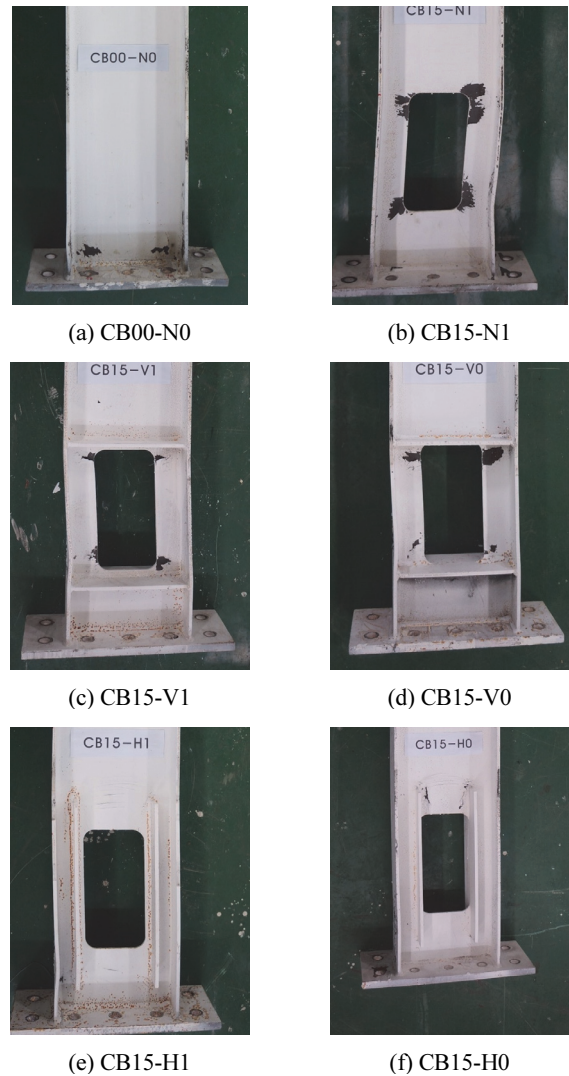
무공 강재보인 CB00-N0 실험체는 step 5에서 지지점 주변 플랜지에서 도장 균열이 발생하였으며, step 6에서는 지지점 주변 웹에서 도장 균열이 발생되었다. 이후 step 7에서 베이스플레이트의 국부좌굴이 발생되었다.

유공 강재보인 CB15-N1 실험체에서는 step 2에서 개구부 주변 웹에서 도장 균열이 발생된 후, step 3에서는 개구부 주변 웹의 국부좌굴이 발생되었다. 그리고 step 6에서 개구부 주변 플랜지에서 도장 균열과 국부좌굴이 발생되었다. 이는 응력이 개구부 주변 웹에 먼저 집중된 이후 플랜지에 집중되는 것을 보이고 있다.

수직 강판보강 유공 강재보 실험체(CB15-V1, CB15-V0)는 step 4에서 개구부 주변 웹에서 도장 균열이 발생된 후, step 5에서는 개구부 주변 웹의 국부좌굴이 발생되었다. 이후 step 7에서 개구부 주변 웹의 도장 균열과 지지점 주변의 플랜지의 국부좌굴이 발생되었다.

수평 강판보강 유공 강재보 실험체(CB15-H1, CB15-H0)는 step 3에서 개구부 주변 웹에서 도장 균열이 발생되었으며, 이후, step 5에서는 개구부 주변 플랜지에서 도장 균열과 지지점 주변의 국부좌굴이 발생되었다. 이후 step 7에서는 개구부 주변 웹에서 국부좌굴이 발생되었다.

수직 강판보강 유공 강재보 실험체(CB15-V1, CB15-V0)는



**Photo 2** Failure shape of the test specimen

국부좌굴이 개구부 주변 웹에서 발생된 이후 지지점 주변의 플랜지에서 발생되었으나, 수평 강판보강 유공 강재보 실험체(CB15-H1, CB15-H0)에서는 국부좌굴이 지지점 주변의 플랜지에서 발생된 후에 개구부 주변 웹에서 발생되었다. 이는 강판보강의 위치에 따라 응력집중 부분이 변경되는 것으로 판단된다.

### 3.3 실험체의 실험결과

#### 3.3.1 기본 모델

본 연구의 각 실험체에 대한 실험결과는 반복이력과 단조이력에 대한 하중-변위 곡선으로 나타내었다. 본 연구에서는 별도의 단조가력 실험을 수행하지 않았으므로 단조이력에 대한 하중-변위 곡선은 반복이력 결과에서 정방향(+)을 기준으로 각 step의 결과에서 최대 하중점을 연결하여 포락선을 만드는 방법을 사용하였다. 항복하중점은 초기강성의 직선과 초

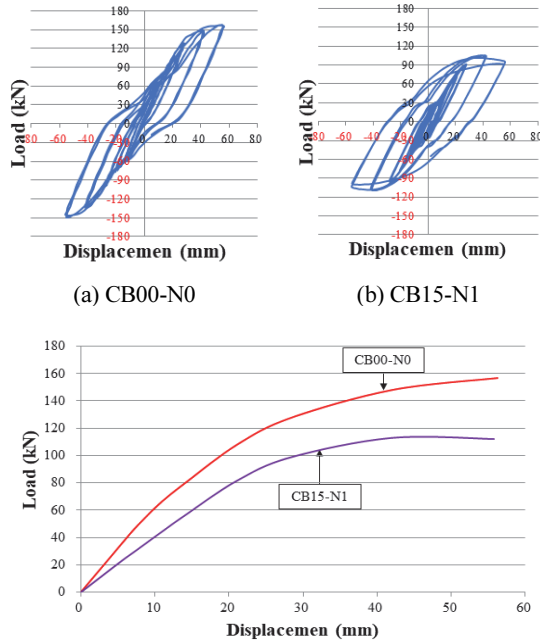


Fig. 6 Load-Displacement Relationship - 1

Table 6 CB00-N0, CB15-N1 Load and Displacement

Name	Yield load point		Target displacement	
			step 5 : 20.93 mm	step 7 : 41.85 mm
	$\delta_y$ [mm]	$P_y$ [kN]	Load [kN]	Load [kN]
CB00-N0	21.659 (0.905)	139.326 (1.383)	108.437 (1.367)	148.308 (1.356)
CB15-N1	23.927 (1.000)	100.777 (1.000)	79.318 (1.000)	109.383 (1.000)

※ ( ) : ratio to result of CB15-N1

기강성구배의 1/3되는 직선을 평행이동 시킨 후 교차점을 구하고 이를 항복점으로 하였다.

무공 강재보인 CB00-N0 실험체와 유공 강재보인 CB15-N1 실험체에 대한 실험결과는 Fig. 6와 Table 6에 나타났다.

유공 강재보인 CB15-N1 실험체의 항복하중은 Step 5에서 79.318 kN, 최대하중은 Step 7에서 109.383 kN으로 측정되었다. CB15-N1 실험체에 비하여 CB00-N0 실험체의 하중비는 Step 5에서 1.367이며, Step 7에서는 1.356으로 평가되었다.

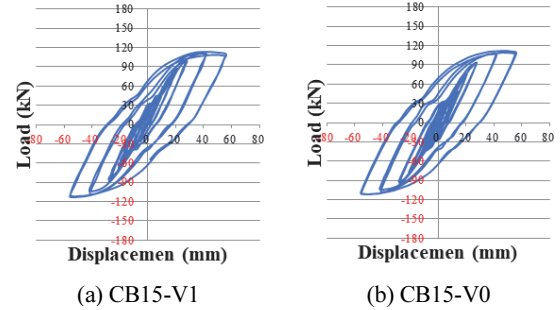
유공 강재보인 CB15-N1 실험체의 Step 5와 Step 7 결과와 다른 실험체들의 Step 5와 Step 7 결과를 비교하였다.

무공 강재보인 CB00-N0 실험체와 유공 강재보인 CB15-N1 실험체에 대하여 이론에 의한 단면의 최대모멘트내력과 실험결과를 이용한 항복점에서의 모멘트 내력을 비교한 것을 Table 7에 나타냈다. 내력비가 이론에서는 약 7% 차이가 나지

Table 7 CB00-N0, CB15-N1 Comparison of theory and test results

Name	$M$ : theory [kN·m]	$M$ : test [kN·m]
CB00-N0	127.4 (1.072)	128.9 (1.383)
CB15-N1	118.8 (1.000)	93.2 (1.000)

※ ( ) : ratio to result of CB15-N1



(c) Load-Displacement Relationship

Fig. 7 Load-Displacement Relationship - 2

Table 8 CB15-N1, CB15-V1, CB15-V0 Load and Displacement

Name	Yield load point		Target displacement	
			step 5 : 20.93 mm	step 7 : 41.85 mm
	$\delta_y$ [mm]	$P_y$ [kN]	Load [kN]	Load [kN]
CB15-N1	23.927 (1.000)	100.777 (1.000)	79.318 (1.000)	109.383 (1.000)
CB15-V1	16.536 (0.691)	97.938 (0.972)	87.669 (1.105)	110.741 (1.012)
CB15-V0	23.003 (0.961)	100.285 (0.995)	79.201 (0.999)	108.299 (0.990)

※ ( ) : ratio to result of CB15-N1

만 실험에서는 약 38%로 내력감소가 컸다.

### 3.3.2 수직 강판보강 모델의 실험결과

수직 강판보강 강재보인 CB15-V1 실험체와 CB15-V0 실험체에 대한 실험결과는 Fig. 7 및 Table 8에 나타냈다.

CB15-N1 실험체에 비하여 CB15-V1 실험체와 CB15-V0 실험체의 하중비가 Step 5에서 1.105와 0.999이며, Step 7에서는 1.012와 0.990으로 평가되었다. 그러므로 하중 측면에서는 수직 강판보강은 보강효과가 미비한 것으로 평가되었다.

### 3.3.3 수평보강 모델의 실험결과

수평 강판보강 강재보인 CB15-H1 실험체와 CB15-H0 실험체에 대한 실험결과는 Fig. 8 및 Table 9에 나타났다.

CB15-N1 실험체에 비하여 CB15-H1 실험체와 CB15-H0 실험체의 하중비가 Step 5에서 1.246와 1.219이며, Step 7에서

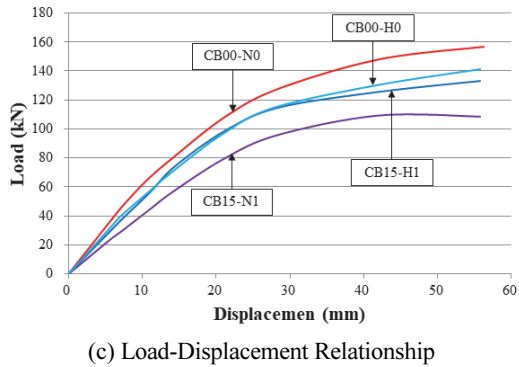
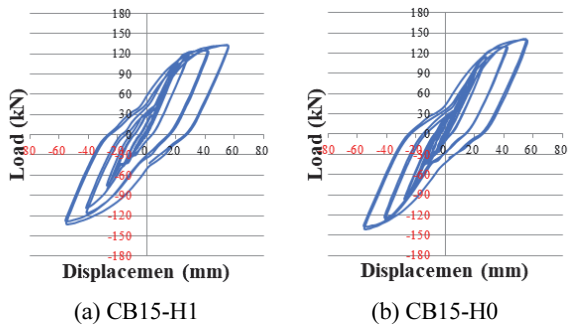


Fig. 8 Load-Displacement Relationship - 1

Table 9 CB15-N1, CB15-H1, CB15-H0 Load and Displacement

Name	Yield load point		Target displacement	
			step 5 : 20.93 mm	step 7 : 41.85 mm
	$\delta_y$ [mm]	$P_y$ [kN]	Load [kN]	Load [kN]
CB15-N1	23.927	100.777	79.318	109.383
	(1.000)	(1.000)	(1.000)	(1.000)
CB15-H1	22.253	116.244	98.812	125.374
	(0.930)	(1.153)	(1.246)	(1.146)
CB15-H0	21.986	124.243	96.703	130.608
	(0.919)	(1.233)	(1.219)	(1.194)

※ ( ) : ratio to result of CB15-N1

는 1.146와 1.194으로 평가되었다. 이는 하중 측면에서 무공 강재보인 CB15-N1 실험체보다는 부족하지만 보강효과는 있는 것으로 평가되었다.

Step 5 이후 CB15-H0 실험체가 CB15-H1 실험체보다 하중이 증가되고 있는데, 이는 보강강판과 개구부 가장자리의 간격 없이 강판보강한 효과로 판단된다.

### 3.3.4 에너지 흡수능력과 잔류변형의 비교

각 실험체의 실험결과에서 반복하중에 대한 하중-변위의 그래프 내의 면적을 산정하여 에너지 흡수능력을 평가하였다. 그리고 에너지 흡수능력과 함께 하중이 Zero일 때의 변위인 잔류변형과 비교하여 Fig. 9 및 Table 10에 나타내었다.

유공 강재보인 CB15-N1 실험체에 대한 Step 8의 결과와 비교한 에너지 흡수능력비는 수직 강판보강 강재보인 CB15-V1, CB15-V0 실험체가 1.004, 1.038로 약간이지만 증가되었으며, 수평 강판보강 강재보인 CB15-H1, CB15-H0 실험체는 0.969, 0.876으로 에너지 흡수능력 비율이 감소되는 것으로 평가되었다. 잔류변형비는 유공 강재보인 CB15-N1 실험체보다 다른 실험체들이 작게 평가되었다. 무공 강재보인 CB00-N0 실험체에서는 에너지 흡수능력비보다 잔류변형비가 크게 평가되지만 강판보강 실험체는 잔류변형비가 에너지 흡수능력비보다 작게 평가되었다.

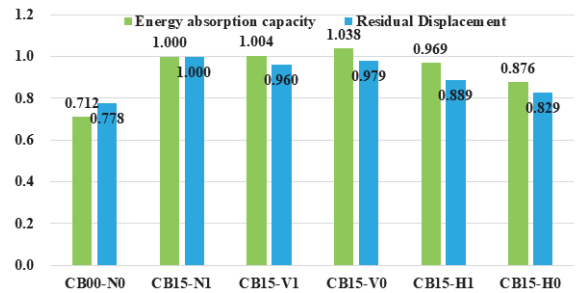


Fig. 9 Energy absorption capacity and residual displacement at step 8

Table 10 Energy absorption capacity and residual displacement at step 8

Name	Energy absorption capacity [kN·m]	Residual Displacement - Displacement with zero load - [mm]		
		-	+	Total
CB00-N0	6.962 (0.712)	-24.909	22.112	47.021 (0.778)
CB15-N1	9.780 (1.000)	-29.639	30.815	60.454 (1.000)
CB15-V1	9.815 (1.004)	-29.458	28.588	58.046 (0.960)
CB15-V0	10.151 (1.038)	-29.912	29.243	59.155 (0.979)
CB15-H1	9.480 (0.969)	-26.676	27.065	53.741 (0.889)
CB15-H0	8.568 (0.876)	-25.271	24.868	50.139 (0.829)

※ ( ) : ratio to result of CB15-N1

## 4. 결 론

본 연구는 지지점과 개구부의 이격이 강재보 높이보다 가까운 유공 강재보와 여기에 강판보강한 실험체에 대한 실험을 실시하고 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 무공, 유공 강재보 실험체의 실험결과의 동일 Step에서 하중비의 차이가 약 35%정도 유공 강재보가 작은 것으로 평가되었다. 또한 이론에 의한 단면의 최대모멘트내력과 실험결과의 항복점의 모멘트내력을 비교해보면, 내력비의 차이가 이론에서는 약 7%이지만, 실험에서는 약 38%로 내력감소가 컸다. 이는 개구부로 인한 웨브의 단면 손실로 인한 모멘트내력의 저하 정도가 개구부의 위치에 따라 상이한 것을 확인할 수 있다.
- 2) 개구부에 대한 수직 강판보강은 보강강판과 개구부 가장자리의 간격의 유무와 관계없이 내력에 대한 보강효과가 미비한 것으로 평가되었다. 그러나 수평 강판보강은 최대 24% 하중비가 증가되어 내력에 대한 보강효과가 있었고, 항복 이후에는 보강강판과 개구부 가장자리의 간격의 없는 것이 있는 것보다 하중비가 크므로, 수평 강판보강의 보강강판과 개구부 가장자리의 간격의 유무는 보강효과 증대의 변수임을 확인하였다.
- 4) 에너지 흡수능력은 수직 강판보강한 강재보가 유공 강재보보다 0.4~3.8%정도로 유사하였으며 잔류변형도 -2.1 ~ -4%정도로 유사하게 평가되었다. 내력에 대한 보강효과가 있는 수평 강판보강한 강재보는 유공 강재보보다 에너지 흡수능력이 -12.4 ~ -3.1%정도 작았으며, 잔류변형도 -17.1 ~ -11.1%정도로 작게 평가되었다.
- 5) 각 실험체의 반복이력에 대한 하중-변위 곡선에서 가력 하중 방향이 변경되는 구간에서 강성이 감소되었는데, 이는 베이스 플레이트의 좌굴과 고정 볼트의 슬립 등이 원인으로 사료된다. 이로 인하여 수평 강판보강 강재보가 무보강 유공 강재보보다 에너지 흡수량이 작았다.

지지점과 개구부 가장자리의 이격이 강재보 높이보다 가까운 위치일 경우의 유공 강재보는 내력보강과 에너지 흡수능력(소성변형 능력)을 고려한 추가적인 연구가 지속적으로 필요하다고 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2018R1D1A1B07049559)

## References

1. Bower, J. E. (1968), Ultimate Strength of Beams with Rectangular Holes, *ASCE Journal of the structural Division*, ASCE, 94(ST6), 1315-1337.
2. Redwood, R. G. (1978), Ultimate Strength of Beams with Rectangular Holes, *ASCE Journal of the structural Division*, ASCE, 94(ST6), 1315-1337.
3. Redwood, R. G. (1979), Critical Loads for Webs with Holes, *ASCE Journal of the structural Division*, ASCE, 105(ST10), 2053-2067.
4. Darwin (1990), Steel and Composite Beams with Web Openings, Report, *University of Kansas Center for Research*, University of Kansas Center.
5. AISC (2003), Steel and Composite Beams with Web Openings, *AISC Steel Design Guide Series 2*, AISC, Inc.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. AISC (2016), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, *AISC Seismic Design Manual*, AISC, Inc.
10. Han, D. H., and Yoon, S. K. (2020), An Experimental Study on the Structural Performance of Openings at End Steel Beams, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 24(6), 138-145.

Received : 03/11/2021

Revised : 03/24/2021

Accepted : 03/30/2021

**요 지** : 유공 강재보에 대한 기존연구는 개구부의 위치가 강재보의 지지점까지의 이격이 보 단면 높이 이상인 경우가 다수이다. 유공 강재보의 개구부를 사용하는 덕트 및 배관 등의 설비시설의 배치를 고려할 때, 개구부는 강재보 지지점까지 이격이 보 단면 높이보다 가까운 경우가 있으므로 이에 대한 연구의 필요성이 대두된다. 본 연구는 지지점에 근접하게 개구부가 설치된 유공 강재보에 반복하중 가력에 따른 구조성능을 파악하는 실험연구이다. 또한 유공 강재보에 수직·수평 강판을 이용한 개구부 보강에 대하여 실험을 통하여 보강성능을 파악하고자 한다.

**핵심용어** : 강재보, 반복하중, 유공보, 강판보강