

조립형 무용접 좌굴방지재로 보강된 역V형 가새의 변형성능

김선희¹ · 문지영² · 최성모^{3*}

¹공학박사, 서울시립대학교, 건축공학부, ²공학석사, ㈜다스구조엔지니어링, ³교수, 서울시립대학교, 건축학부

Deformation Capacity of Inverted V-Type Brace Strengthened by Built-up Non-welded Buckling Restraint Element

Kim, Sun Hee¹, Moon, Ji Young², Choi, Sung Mo^{3*}

¹Ph.D., Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

²Master, Das Structural Engineering, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Abstract - Steel concentrically braced frame is an efficient system that can acquire resistance against the lateral force of buildings with the least amount of quantity. In this study is intended to proceed on the research of schemes for reinforcement by supplementing previously installed H-formed brace with non-welded cold-formed plastic stiffening materials restricting the flexure and buckling and acquire a consistent strength on the tensile and compressive force. As for the measures of supplementing previously-installed inverted V-formed braced frame, stiffening materials in the previous studies were converted to weak-axial supplementing materials to suggest a specific scheme evaluating the structural function through an experiment of members, interpretation of members, and frame-focused experiment. Reinforced brace satisfied the requirement to be prevent AISC brace from being ruptured due to imbalanced strength in the beam.

Keywords - Inverted V-type brace, Buckling-restrained brace, Non-welded, Cycle loading, Seismic performance

1. 서론

강구조 횡력 저항시스템 중 가새골조(Braced Frames)는 모멘트 저항 골조(Moment Resisting Frames)와 함께 가장 많이 사용되고 있는 시스템이다. 가새골조는 크게 중심 가새골조(Concentric Braced Frames, 이하 CBF)와 편심 가새골조(Eccentric Braced Frames, 이하 EBF)로 구분된다. 이런 가새골조는 횡력에 대해 가새의 축 강성과 강도로 저항하기 때문에 건물의 수평하중에 대한 저항력을 최소의 철골물량으로 그 안정성을 확보할 수 있는 매우 효과적인 시스

템이다. 또한, 대부분의 보-기둥 접합부에 전단접합(Shear-Connection)을 사용함으로써 접합부 제작비용을 절감할 수 있으며 구조해석 및 설계도 용이하다. 그러나 가새 골조는 본래 탄성거동을 전제로 풍하중에 대한 저항력 증진을 위한 시스템으로서 비탄성거동을 수반하는 지진하중 시 특정 층의 가새에 최초 좌굴이 발생하면, 최초 좌굴층의 소성변형이 집중되어 연약층(soft story) 거동으로 인해 Fig. 1과 같이 건물의 붕괴로 이어질 가능성이 매우 높다. 이와 같은 CBF의 취약성을 보완하기 위해 압축 가새의 휨-좌굴을 억제하여 인장력과 압축력에 대해 동일한 강도를 확보함으로써 보

Note.-Discussion open until December 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 13, 2014; revised January 9, 2015; approved on January 19, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-2749

E-mail. smc@uos.ac.kr

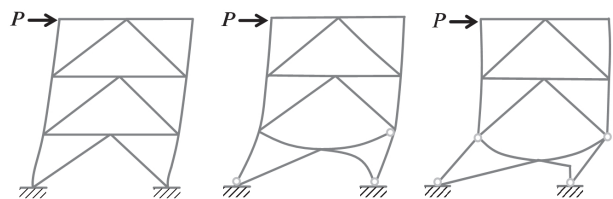


Fig. 1. Behavior of braced steel frame

다 효율적으로 구조물의 안정성을 높이는 방안이 모색될 필요가 있다^{[1],[2],[3]}. 따라서, 본 논문에서는 기 설치된 H형 가새에 무용접 냉간성형 보강재를 도입하여 휨-좌굴을 억제하고 인장력과 압축력이 동등한 강도를 갖도록 계획하였다. 즉, 제안한 보강재가 골조상태에서 반복하중 작용시 안정적인 거동을 유도할지에 대해 검토하고자 한다. 역V형 가새 골조 실험을 수행하였으며 변수(보강율, 보강길이, 보강재 분절여부)에 따른 가새의 변형성능과 보의 불균형력을 방지하는 압축강도조정계수(β), 구조물의 내진 특성인 에너지 소산능력을 통해 골조 내 보강 가새의 거동에 대해 평가하였다.

2 현행규준 및 선행연구

2.1 현행 규준 비교

앞서 언급된(1장 서론) CBF의 취약성을 방지하기 위해 ASCE 7-10(Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures)^[4]에서는 CBF를 특수(Special), 보통(Ordinary)로 나뉘어 Table 1과 같이 내진설계범주 별 높이를 제한하고 있다. 또한 뉴질랜드 내진기준(Standards New Zealand, SNZ)^[5] 역시 CBF로 설계될 경우 최대 높이는 8층 이하로 제한하고 있다.

국내 규준인 KBC(Korea Building Code)^[6]2009의 경우 좌골방지 보강재를 제외하고 가새골조의 연성거동을 보장하기 위한 별도의 규정이 제시되어 있지 않다. 가새부재에 대한 현 기준 제한사항은 단면, 세장비, 압축강도이다. 단면의 경우 압축요소에 따른 폭두께비를 만족하여야 하며, 세장비는 강재 압축부재의 세장비를 기초로 하여 가급적 200을 초과하지 않는 것을 권장하고 식 (1)을 만족하여야 한다^[7]. 가새부재에 작용하는 인장력은 식 (2)와 같고 압축력은 식(3)

에 정리 하였다.

$$\frac{KL}{r} \leq 4\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{1}$$

$$R_y F_y A_g \tag{2}$$

$$0.3 F_{cr} A_s, (P_n = F_{cr} A_s) \tag{3}$$

2.2 선행연구

Inoue *et al.* (2001)^[8]에 의해 제안된 강도-강성식은 초기변형과 보강범위를 반영하고 있으며 평가식을 통하여 보강범위를 추정할수 있다. 식 (4), (5)에 따르면, 심재 중앙부의 항복모멘트가 좌굴에 의한 최대모멘트보다 커질 경우 정확한 비선형 거동을 평가할 수 없는 것으로 분석된다. 무보강 구간이 있는 가새의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 축력 N_y 를 받아 처짐이 발생한 모습을 개략적으로 나타내고 있다. 심재가 좌굴이 발생하지 않고 항복이 발생하는 축력 값에 도달하기 위해서는 $M_C^B < M_y^B$ 같이 심재 중앙부의 최대모멘트가 항복모멘트 보다 작아야만 한다.

$$n_E^B = N_E^B / N_y \tag{4}$$

$$m_y^B = M_y^B / N_y L \tag{5}$$

- 여기서, N_E^B : 오일러 좌굴하중(kN)
- M_C^B : 중앙부의 최대모멘트(kN·m)
- N_y : 작용축력($A_s F_y$) (kN)
- M_y^B : 항복모멘트(kN·m)
- l : 가새의 전체길이(mm)
- a : 초기결함
- r : L에 대한 12의 비

Table 1. Seismic design requirement (ASCE 7-10)

Type	Structural system limitation including structural height, h_n (unit: ft)				
	A or B	C	D ^d	E ^d	F ^c
S-CBF	NL	NL	160 (48.8m)	160 (48.8m)	100 (30.5m)
O-CBF	NL	NL	35 (10.7m)	35 (10.7m)	NP

NL : Not Limited, NP : Not Permitted,
 h_n : Structural height

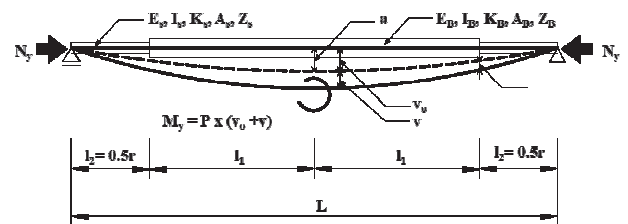


Fig. 2. Bracing behavior concept^[8]

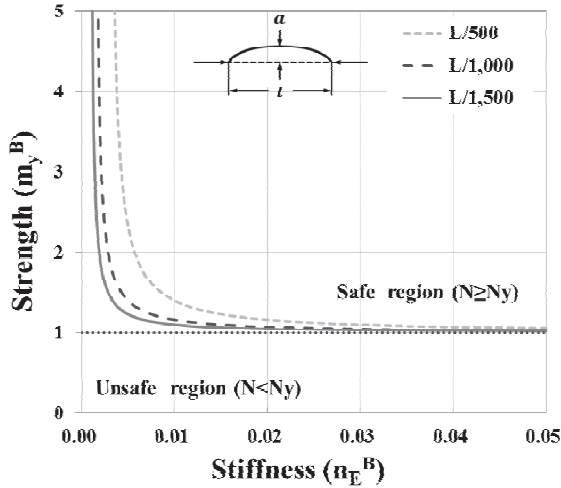


Fig. 3. Reinforcement range

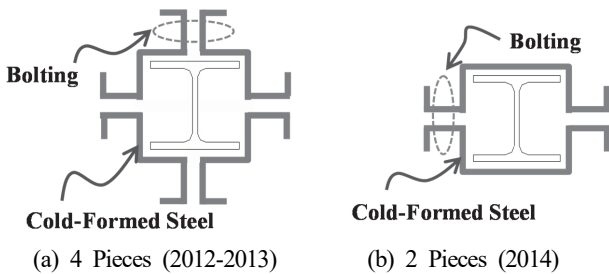


Fig. 4. Non welded buckling restraint element

가새의 탄성좌굴 강도에 의해 유도된 평가식 (4), (5)을 도식화 하면 Fig. 3과 같이 초기변형에 따른 좌굴 안정성을 유도할 수 있다. 각 축은 심재의 강성과 강도를 무차원화 하여 나타냈다. 작용 축력(N_y)이 좌굴하중(N)보다 클 때는 불안전 구역에 해당된다. 무보강 가새의 경우 길이가 증가 할수록 큰 강도와 강성을 가진 보강재를 사용해야 한다. 즉 강도-강성식을 이용해서 단면과 보강길이를 설정할 수 있다. 또한 초기변형을 고려한 보강재의 적정 단면을 찾을 수 있다.

Kim *et al.* (2012-2013)^{[9],[10]}는 H형 가새에 건식공법으로 내진보강이 가능한 보강재를 중점으로 실험 연구를 진행하였다. 보강재는 얇은 판(2.3~3mm) 요소를 갖는 냉간성형 절곡하여 제작되고 그 형상은 Fig. 4와 같이 시공성 확보를 위해 개선된 단면형태를 제안하였다.

가새부재 실험 전에 각 보강재와 심재(H형강)와의 예비실험이 선행되었다. 예비실험을 통하여 심재와 보강재 사이 Filler(페인트, 그리스, 시트)에 관계없이 유사한 내력과 파괴거동을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 보강 유·무, 보강재의 단면크기에 따른 단조가력 실험을 진행하였고 실험결과

과 모든 실험체는 좌굴하중(P_c) 이상 월등한 내력을 발휘하였다. 보강되지 않은 실험체의 경우 압축 재하 시 탄성거동을 보이는 반면 보강된 실험체의 경우 최대내력 이후 후 완만한 내력감소를 보이며 연성적 거동을 보였다. 이를 통해 세장한 H형 가새의 횡구속력을 보강재는 충분히 억제하는 것을 확인하였다. 이후 제안한 4 Piece 조립 보강재(Fig. 2(a))는 시공성 및 현장 적용성을 고려하여 Fig. 2(b)와같이 신 형상을 제안하였다. 2 Piece로 조립되는 보강재의 구조실험은 보강길이, 보강재 분절(이음) 유무, 보강재와 심재(H형강)의 단면2차 모멘트 비에 따른 거동을 분석하였다. 실험결과 전체 가새 길이(3.4m)에 70%에서 90% 확대하여 보강했을 때, 축 내력이 약 10% 증가되었다. 또한 보강량(단면2차모멘트 비)을 1.3배 증가했을 때, 최대내력 이후 거동이 매우 연성적으로 거동하는 등 보강길이 보다 효과적인 내력과 거동을 기대할 수 있다고 분석되었다. 선행 연구에서는 보강재의 형상과 보강 길이의 최적범위를 제시하였다. 그리고 단일 부재(가새)에 한해 단조, 반복 재하실험을 통해 축 내력과 거동을 분석하였다. 실제 현장 경계조건을 감안한 골조실험을 통해 정량적인 분석이 추가된다면, 현장적용에 합리적인 보강근거자료가 될 것으로 판단된다.

3. 역 V형가새 골조실험

3.1 실험 계획

골조 실험은 실제 건물을 대상으로 하여 가새 형상 및 스펙길이 강종 등을 그대로 모사 하여 제작하였다. 실험체 일람은 Table 2와 같이 보강길이와 보강단면, 그리고 분절유무 3가지의 변수로 총 4개의 역 V형 가새를 제작하였다. 가

Table 2. Specimen list

Specimens	I_{sy}/I_{by}	A_s/A_b	L_b (mm)	Segment	Expected Load (kN)	
					P_c	P_y
Y0000N	-	-	-	-	230	-
Y3670X	3.6	0.6	2,000	X	-	386
Y5090X	5.0	1.1	2,500	X		515
Y5090O	5.0	1.1	2,500	O		

Y36 70 O
 Segment : (Yes ,O) (No, X)
 Reinforced length : 00, 70, 90 (%)
 I_{sy}/I_{by} : 00, 3.6, 5.0

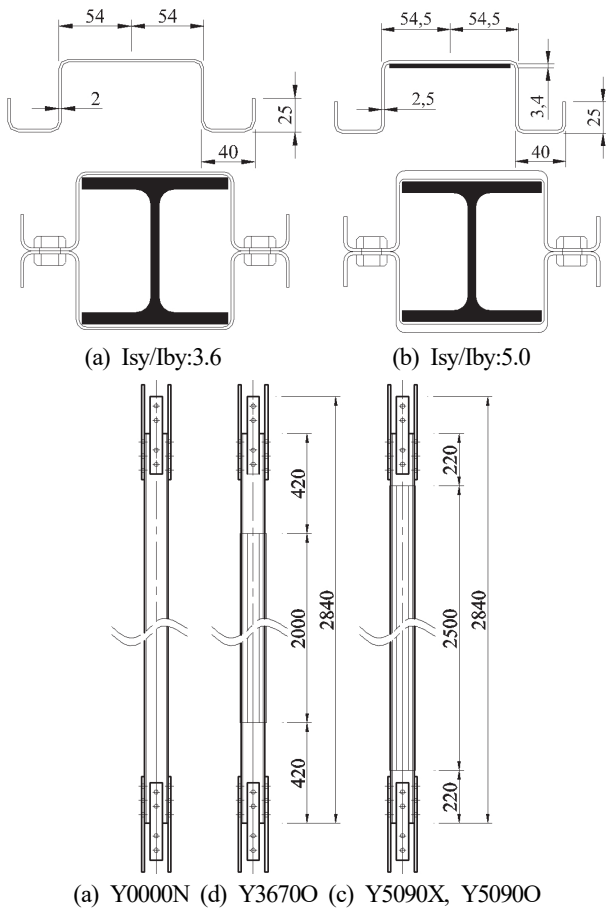


Fig. 5. Specimen detail

새 세장비는 140으로 단면(H-100×100×6×8)과 기둥, 보의 단면 형상(H- 400×400×13×21)은 모두 동일하여 사용하였다. 골조 내의 가새의 거동을 파악하기 위한 실험으로 기둥, 보에 최대한 응력이 전달되지 않도록 Base Plate는 볼트(Pin)접합 하였다. 내력에 영향을 미치지 않고 오로지 심재와 보강재의 밀실한 체결을 위해서 얇은 플레이트를 500mm마다 용접(spot)하였다. 플레이트 크기는 정사각형으로 폭이 70mm, 두께가 2mm이다. 모든 실험체는 SS400 강종을 사용하였다. 실험체 형상을 Fig. 5에 나타냈으며, 제작된 가새의 총 길이는 2,840mm이다. 그에 따라 70% 보강재의 경우 2,000mm, 90% 보강재의 경우 2,500mm로 제작하였다.

NEHRP(2013)^[11]에 의하면 거셋 플레이트와 가새가 직각 방향으로 접합될 경우 Fig. 6(a)와 같이 좌굴 취약부(hinge zone)가 발생될 것을 고려하여 Fig. 6(b)와 같이 제작, Fig. 7과 같이 조립되었다. 거셋플레이트의 두께 결정은 Lin *et al.*(2005)^[12]이 제안한 식 (6),(7)과 같이 BRB 압축, 인장력

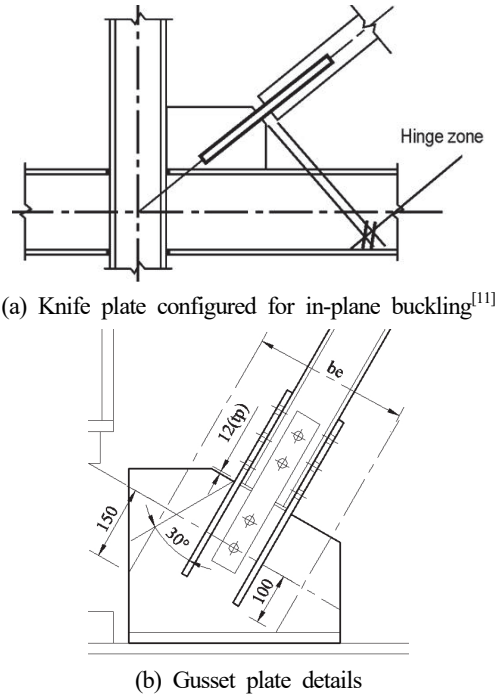


Fig. 6. Design of gusset plate connections.

관계식에 의해 설계되었다. 모든 접합요소는 볼트 접합되며, 베이스 플레이트 및 거셋 플레이트의 상세도를 Fig. 5에 나열하였다.

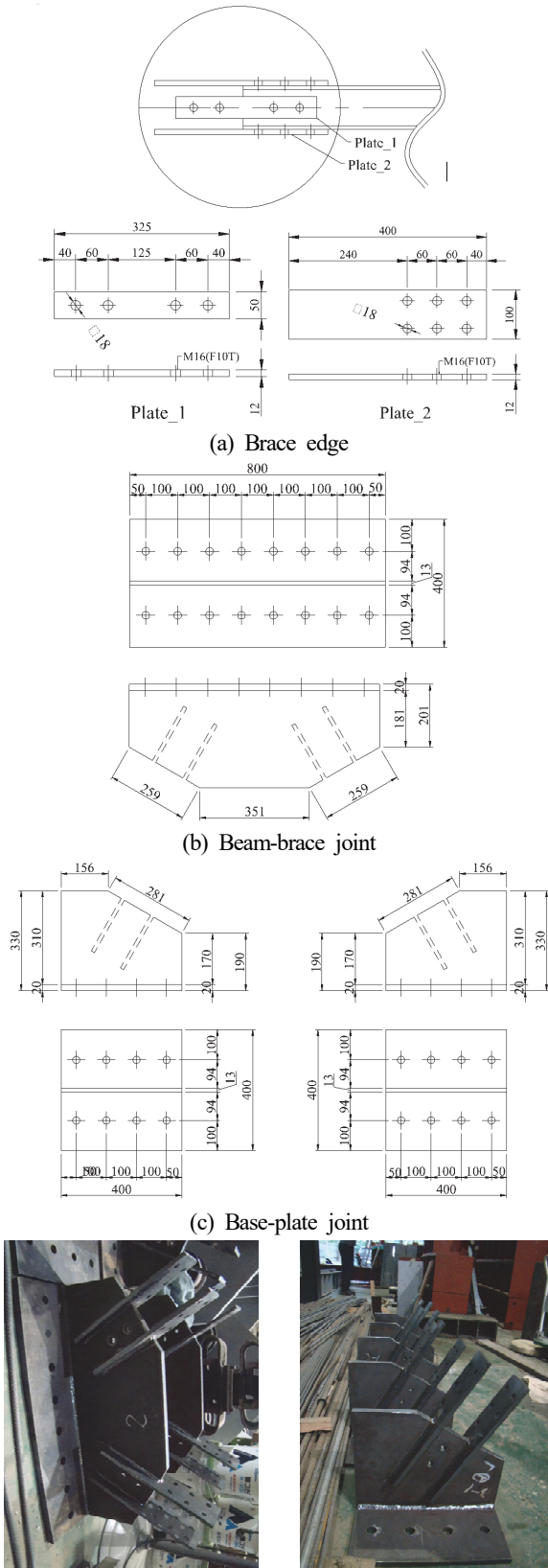
$$P_{tension.gusset} = F_y b_e t_p \geq Eq(2) \tag{6}$$

$$P_{comp.gusset} = \pi^2 E / (KL_e / r)^2 b_e t_p \geq Eq(3) \tag{7}$$

가력장치는 1,000kN Actuator를 이용하였으며 실험 경계조건은 Fig. 8에 도식화 하였다. 실험체 모두 세장한 요소로 이뤄져 있어 횡 좌굴을 방지하고자 기둥위치에 횡 지지대를 4곳 설치하였다. 횡지지대와 기둥사이 발생될 마찰을 최소화하기 위하여 테프론(Teflon) 플레이트를 부착하여 제작하였다.

3.2 재료시험

사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801 5호의 금속재료 인장시험 규정에 따라 실험에 사용되는 H형강과 보강재의 인장시험 시험을 수행하였다^{[13],[14]}. 각 항복강도(F_y), 인장강도(F_u), 항복비를 Table 3에 정리 하였다. 시험결과 항복강도는 평균 282MPa, 인장강도는 403MPa로 평가 되었다.



(d) Assembly completion
Fig. 7. Detail of connecting element

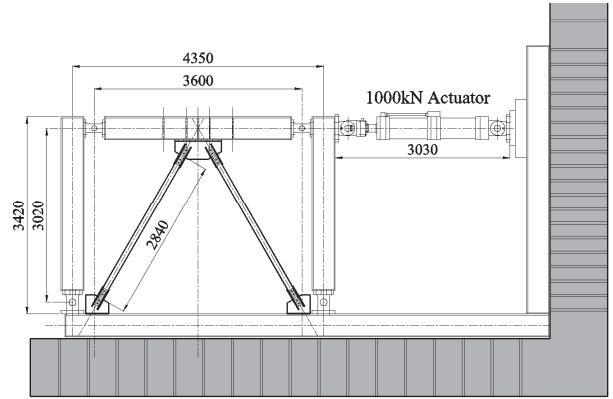


Fig. 8. Test setting

Table 3. Material properties (SS400)

No.	Think.(mm)	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Fy/Fu (%)
1	2.0	258.1	350.6	74
2	2.5	257.3	401.8	64
3	3.4	291.8	405.7	72
4	6.0	309.9	437.3	71
5	8.0	293.3	420.7	70
Average		282.1	403.2	70

3.3 가력방법 및 평가방법

가력방법은 AISC Seismic Provision(2010)^[15]에 제시된 BRB (Buckling Restrained Brace)의 골조실험 가력 프로그램을 사용하였으며 변위제어 하였다. 표준 하중재하방법은 1Step-1Cycle, 1Step-2Cycle까지는 심재의 항복변위(D_{by})를 기준으로 하며, 2Step-1Cycle 이상부터 목표 층간 변위(D_{bm})를 기준으로 0.5 배순으로 증가시킨 하중 패턴을 권고하고 있다.

3.3.1 심재의 항복변위(D_{by}) 산정

- 심재 : H-100×100×6/8
 (A_s=2,190mm² / 전체길이 : 3,450mm)
- $D_{by} = \frac{PL}{AE} = \frac{F_y A_g L}{A_y E} = \frac{235 MPa \times 3,450 mm}{205,000 MPa} = 3.96 mm$

3.3.2 목표 층간변위(D_{bm}) 산정

규준에서는 설계 층간변위(D_{bm})는 층 높이의 0.01(1%)보다 작아서는 안되며, 5D_{by}보다 작아야 한다고 제한하고 있다. 실험체를 놓고 산정해 보면 목표 층간변위를 층높이의

조립형 무용접 좌굴방지재로 보강된 역V형 가새의 변형성능

1.0%로 할 경우 D_{bm} 은 34.2mm로 $5D_{by}$ (=19.80mm)보다 크게 되어 D_{bm} 은 19.80mm로 결정하였다.

3.3.3 골조의 층간변위(D_s) 산정

골조의 경우 가새의 축 변형에 상응하는 수평변위를 산정할 필요가 있다. Table 4에 실험체의 축 변형에 상응하는 수평변위를 산정하여 나타내었다. 가력 프로토콜을 도식화 하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

Table 4. Displacement according to the story drift

Loading No.	1	2	3	4	5	6
ASIC(2010)	$1.0D_{by}$	$0.5D_{bm}$	$1.0D_{bm}$	$1.5D_{bm}$	$2.0D_{bm}$	$2.5D_{bm}$
Axial Deformation	3.9mm	9.8mm	19.5mm	29.3mm	39.0mm	48.8mm
Story Drift	3.4mm	8.4mm	16.9mm	25.3mm	33.8mm	42.2mm
Story Drift Ratio	0.1%	0.25%	0.49%	0.73%	0.98%	1.22%

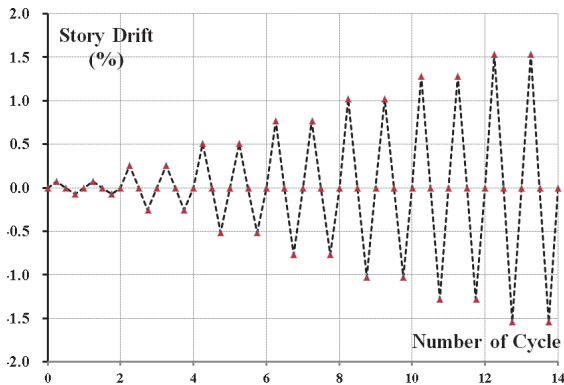
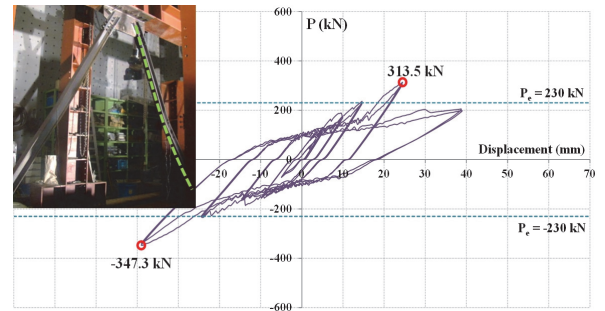


Fig. 9. Loading protocol

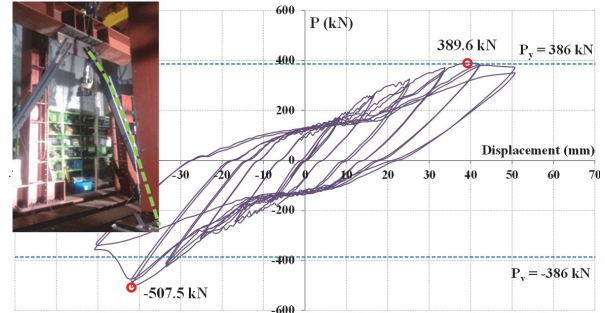
3.4 역 V형 가새의 이력거동

볼트접합에 의해 모든 실험체는 초기 볼트 접합부의 슬립 현상이 발생되었다. 이후 마찰력이 지압으로 변하면서 최대 내력 이후의 거동은 급격하게 저하되었다. 각 실험체별로 반복하중을 받는 하중-변위관계를 Fig. 10에 나타냈으며 각 층간변위 마다 발휘된 압축(C_{max}) 과 인장(T_{max})력을 Table 5에 정리 하였다.

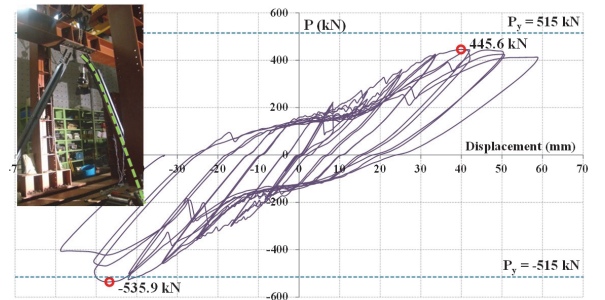
무보강 Y0000N의 경우 예상 좌굴하중(230kN)까지 발휘되었지만 4Step부터 5Step 도달할 때 까지 좌·우측 가새 모두 좌굴되었다. 세장요소로 구성되어 탄성적 거동 후 전체



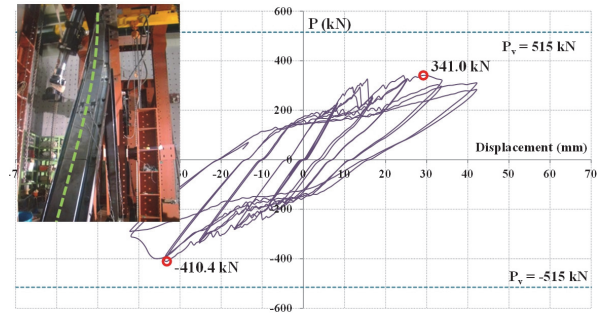
(a) Y0000N



(b) Y3670X



(c) Y5090X



(d) Y5090O

Fig. 10. Load-displacement relationship

좌굴현상이 발생 됨에 따라 급격하게 내력저하 되었다.

Y3670X 실험의 경우 예상하중(386kN) 보다 상회한 내력이 발휘되었지만, 압축력이 인장력에 비해 약 1.3배 크게 저항되었다. 횡 좌굴 방지대를 설치했음에도 변형량이 커짐에 따라 최대내력 시점에 편심된 것으로 판단된다. 양측 가새

Table 5. Compressive and tension each story drift

No.	AISC	Story Drift(%)	No. of Cycle	Y0000N		Y3670X		Y5090X		Y5090O	
				C _{max} (kN)	T _{max} (kN)	C _{max} (kN)	T _{max} (kN)	C _{max} (kN)	T _{max} (kN)	C _{max} (kN)	T _{max} (kN)
1	Dby	0.1	1	72	107	69	76	67	82	64	86
			2	71	109	70	77	67	82	63	88
2	0.5Dbm	0.25	1	156	188	169	169	186	223	180	229
			2	153	173	169	175	187	219	179	235
3	1.0Dbm	0.49	1	185	236	245	268	300	235	281	325
			2	165	227	245	267	297	271	281	292
4	1.5Dbm	0.73	1	234	313	313	325	360	360	336	339
			2	230	304	308	303	352	343	326	325
5	2.0Dbm	0.98	1	347	205	424	370	457	425	410	340
			2	338	197	412	360	454	421	393	303
6	2.5Dbm	1.22	1	-	-	507	389	525	445	399	309
			2	-	-	485	381	502	441	289	283
7	3.0Dbm	1.47	1	-	-	473	380	535	443	-	-
			2	-	-	339	349	468	424	-	-

모두 Fig. 11과 같이 횡 방향으로 국부 좌굴함으로써 최대내력 이후에는 골조전체가 횡 방향으로 기울어짐이 발생하였다. 그럼에도 무보강 실험체(Y0000N)에 대비 내력향상과 좌굴 이후 거동에 있어 안정적으로 개선된 것으로 보인다. 단부 심재에서 국부좌굴을 일으키며 파괴되었다. 보강 실험체로 좌굴발생 이후에도 비교적 안정적으로 거동하였다.

Y5090X 실험체의 경우 실험비교 대상 중 가장 우수한 결과를 갖고 있다. 보강길이와 보강단면이 확대되면서 내력과 최대내력 이후 거동은 매우 안정적으로 평가되고 있다. 하지만 실험 도중 발생된 아쉬운 점으로 인해 평가된 실험결과는 매우 보수적으로 평가된 것으로 판단된다. Base Plate에 변형이 발생되어 좌측 가새(인장)의 경우 예상하중(515kN)에 대비 도달하지 못한 것으로 나타났다. 한편, 우측 가새(압축)의 경우 535.9kN을 발휘하며 예상하중 이상을 발휘하였다. 또한 보강 실험체중 좌굴 발생이후에도 안정적인 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

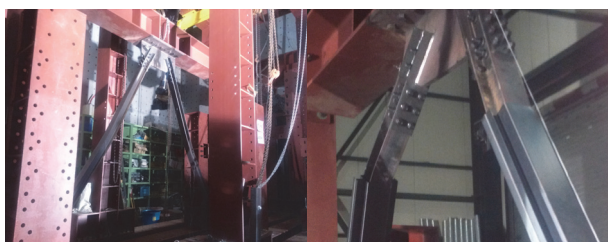


Fig. 11. Failure mode (Y3670X)

Y5090O 실험체의 경우 Y5090X 실험체와 동일한 형상, 보강길이를 갖고 있지만, 보강재를 시공성 확보하기 위해 보강재의 길이를 1/3씩 마다 분절한 것이다. 실험결과를 보면 양측 가새 모두 예상하중(515kN)에 도달하지 못했다. 이런 원인은 분절된 보강재는 불연속적으로 횡력을 저항하고 있으므로 반복적인 하중이 가해지면서 보강재와 보강재 분절 구간부터 좌굴형상이 발생되었고 이런 변형은 보강재의 구속력을 저하시킨 것으로 보여진다. 또한 실험도중 Y5090X 실험체와 같이 횡 지지대를 연결한 Base Plate에 변형이 발생됨에 따라 원활한 내력발휘가 어려운 것으로 판단된다. 결과적으로 실제 현장에 적용된 Base Plate는 보강재가 없는 가새(H형강)를 고려하여 설계되었지만, 보강재가 추가된 가새를 설계 할 경우에는 Base Plate에 대한 보강 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 분석 및 고찰

4.1 골조 내 가새 변형성능 평가

현행규준 AISC^[15]에 따르면 내진설계에 가새를 적용하기 위해서는 좌굴 후 변위(δ_{max})가 항복변위(δ_y)의 10~20배를 만족해야 하며, FEMA-356^[16]에서는 압축 가새의 경우 연성도(δ_{max}/δ_y)가 5이상 일 때 LS(Life Safety), 7 이상

Table 6. Deformation capacity each specimen

Specimens	K _i (kN/mm)	P _{max}	δ _y	δ _{max}	δ _{max} /δ _y
		(kN)	(mm)	(mm)	
Y0000N	21.3	313.5	8.01	24.1	3.02
	21.5	347.3	8.20	39.6	4.83
Y3670X	21.4	389.6	7.50	50.7	6.76
	21.6	507.5	6.20	45.0	7.26
Y5090X	25.5	445.6	7.50	57.6	7.73
	21.2	535.9	9.50	49.5	5.21
Y5090O	27.0	341.0	6.98	41.4	5.93
	22.0	410.4	6.50	40.0	6.15

부터 CP(Collapse Prevention)를 만족한다고 제한하고 있다. 보강방안에 대한 가새의 변형성능을 평가하기 위해 각 실험결과와 항복변위와 좌굴 후 변위를 Table 6에 정렬 하였다.

좌·우측 가새의 초기강성(K_i), 최대내력(P_{max}), 연성도(δ_{max}/δ_y)를 비교 정리한 결과 AISC에서 제안한 변형성능(10~20배)에는 못 미치는 수준으로 분석된다. 실험의 경계 조건(Base Plate)이나 보강량을 향상시켜 반복이력을 재 평가 한다면 AISC에서 제시하고 있는 변형성능에 근접한 결과를 얻을 수 있을거라 예상된다. 한편, 보강된 실험체 모두 5 이상의 연성도를 보여 LS(Life Safety)수준을 만족하는 것으로 분석되었다. 보강된 가새의 비교 대상 중 Y3670X 실험체의 경우 최소 보강량(Isy/Iby:3.6)과 최소 보강길이로 구성되었음에도 상당한 변형성능이 발휘된 것으로 평가된다.

4.2 압축강도 조정계수(β)

압축강도 조정계수(β)는 최대 압축력(C_{max})과 최대 인장력(T_{max})의 비를 나타내는 것으로 AISC에서는 β값이 1.3을

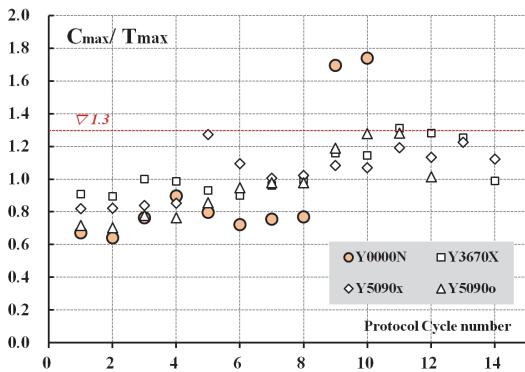


Fig. 12. Compressive strength of adjustment factor (β)

초과하지 않을 것을 권고하고 있다. 즉, 골조에 역 V형 가새가 설치된 경우 인장과 압축 강도의 편차가 클수록 인장 가새의 항복 이후 불균형력이 수직 방향으로 작용하여 연결된 보가 파괴될 우려가 있기 때문이다. 앞서 정리된 Table 8에서 β를 평가 하여 Fig. 12에 도식화 하였다. 모든 실험 결과에서는 압축력이 인장력보다 상회한 결과를 갖고 있다. 이는 심재에 압축력 작용 시 좌굴을 방지하기 위한 보강재가 횡구속력을 제공함으로써 심재는 보다 높은 내력발현이 가능하다. 매 Step(Cycle)에 따른 압축강도 조정계수를 평가해 보면 무보강 실험체는 0.65~1.72사이에 존재 하고 있어, 규준에 만족되지 못했다. 보강된 실험체의 경우 전체 반복하중에서 0.72 ~1.3 범위의 압축강도 조정계수의 분포에 있어 제한범위 내 만족하는 것으로 평가되었다. 분석된 결과를 통해 약측 보강형 보강재를 가새에 적용할 경우 가새의 불균형력으로 인한 보의 파괴는 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 에너지 소산능력 평가

AISC(2010)에 의하면 비좌굴 가새의 누적 연성도(Cumulative Plastic Ductility)는 누적소성변형(δ_p)에 대한 항복변형(D_{by})의 비로 정의된다. Fig. 13과 같이 매우 유사한

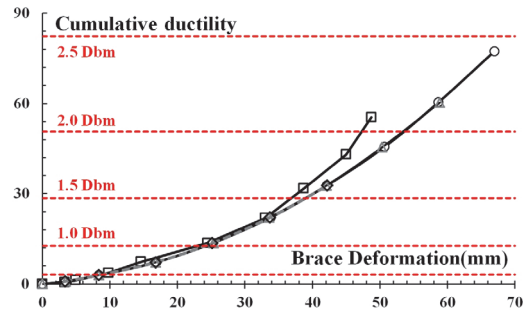


Fig. 13. Cumulative plastic ductility

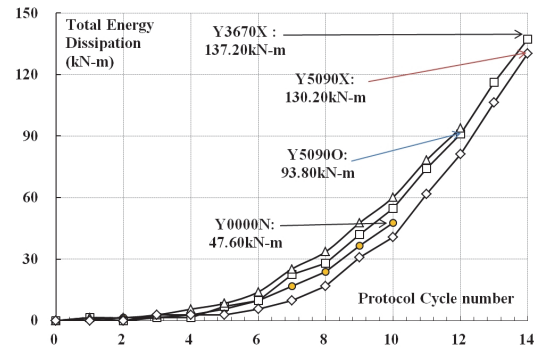


Fig. 14. Energy dissipation

연성도를 갖고 있으며, 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다. 한편, 에너지 소산능력은 구조물의 중요한 내진 특성 중 하나로 주기별 내력과 변위에 의한 면적의 합으로 산정하였다. 각 실험체별 누적 소산에너지를 Fig. 14에 나타내었다. 전체적으로 5Cycle반복하중까지는 매우 유사하게 나타나며 6Cycle이후부터 조금씩 격차가 발생되고 있다.

무보강(Y0000N)에 비해 보강된 경우(Y3670X, Y5090X)는 약 2.7배 연성이 확대된 것을 알 수 있다. 한편 보강은 되었지만, 분절된 경우 무보강 대비 약 1.9배 증가되어 평가되었다. 종합적으로 평가해 보면 가새에 보강재가 추가됨에 따라 약 2배 가까운 변형성능을 갖게 되어 내진보강에 매우 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

5. 현장적용(Mock-up)

대상으로 하고 있는 무용접 용접조립 보강재를 실제 현장에 적용하였다. 적용 건물은 154kV ○○발전소 ○호기 1층에 기존 설치된 역 V형 가새에 적용되었다. 앞서 평가된 실험내용을 바탕으로 Y5090X 타입 보강재가 Fig. 15와 같이



(a) Before



(b) After

Fig. 15. Field application

설치되었다. 본 연구의 목적은 기존에 설치되어있는 가새에 불균형력 보 파괴를 방지 하기 위해 압축과 인장력이 동등하도록 내진보강 하는 것이다. 발전소라는 현장여건을 고려하여 진식공법이 가능하며, 실제 보강재를 설치함에 있어 빠른 시공이 가능했다. 추후 최적화된 내진설계를 위해 보강이 필요한 위치와 요구량을 분석하여 효과적인 설계안을 제안하고자 한다.

6. 결론

무용접 조립재로 구성된 보강재를 역 V형 가새에 적용하여 반복하중에 따른 내진성능과 거동을 분석하였다. 또한 분골조실험은 실제 건물에 적용하기 위한 목적에 개발되어 실험 크기로 실험이 수행되었으며 목표로 한 현장에 적용하였다.

- (1) 골조실험은 AISC(2010)에 제시된 BRB의 가력프로그램을 이용하여 총 7주기의 반복하중으로 계획하였다. 실 건물과 동일한 조건을 유지하기 위하여 가새를 볼트로 접합하였고, 이로 인해 약간의 슬립 발생이 진행되었지만 기대이상 내력이 발휘하였으며, 보강된 실험체의 경우 무보강 실험체에 비해 최대내력 발휘 이후에도 안정적인 거동을 보였다.
- (2) 무보강 실험체의 경우 전체 좌굴에 의해 파괴되었지만 보강된 실험체의 경우 보강재가 끝나는 지점의 국부좌굴이 발생하는 다른 양상을 보였다. 또한 비교 대상 중 보강길이를 확대하는 것보다 보강량을 확대 할 경우 보다 효과적인 내력과 거동을 기대할 수 있었다.
- (3) 실험도중 발생된 Base Plate 변형은 실제 실험체 결과보다 보수적으로 평가됐을 가능성이 크다고 판단되며, 기존 가새에 보강재를 추가 보완할 경우 전체 골조에 대한 검토가 함께 이뤄질 것으로 보인다.
- (4) 내진설계 적용을 위하여 변형성능을 평가한 결과 보강 가새의 경우 약 5.21~7.23의 연성도를 갖는 것으로 분석되었다. 즉 5이상의 연성도를 나타냈으므로 LS(Life Safety)기준을 만족는 것으로 평가되었다.
- (5) 골조 내에 설치된 가새의 불균형력에 의한 보의 파괴를 방지하기 위하여 AISC에서는 최대 압축력과 최대 인장력의 비가 1.3배를 초과하지 않을 것을 권고하고 있으며, 보강 후 가새의 경우 0.72~1.3범위에 분포함으로써 기준을 만족하였다. 또한 구조물의 중요한 내진특성중

하나인 누적 소산 에너지평가 시 무보강 실험체 대비 보강된 가새의 경우 약 1.9~2.7배 이상 발휘하여 나타났다.

감사의 글

본 논문은 2013~2015년 한국에너지기술평가원 지식경제 기술혁신 에너지기술개발사업 “원전시설물 고강도볼트 체결 감시기술” (20131520202160)에 대한 지원으로 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌(References)

[1] 유정환(2013) 중앙부 거셋 플레이트의 다층 X-가새골조 거동에 미치는 영향, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제2호, pp.179-186.
Yoo, J.H. (2013) Effect of Mid-Span Gusset Plates on the Behavior of Multi-Story X-Braced Frames, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No. 2, pp.179-186 (in Korean).

[2] 이종혁, 주영규, 김영주, 김상대(2010) Diagrid BRB의 실험적 구조성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제3호, pp.261-269.
Lee, J.H., Ju, Y.K., Kim, Y.J., and Kim, S.D. (2010) Experimental Evaluation for Structural Performance of Diagrid BRB Structural System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.3, pp.261-269 (in Korean).

[3] 조준희, 김정재, 이철호(2010) 가새좌골을 고려한 역 V형 가새골조의 기동부재 내진설계법, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제1호, pp.1-12.
Cho, C.H., Kim, J.J., and Lee, C.H. (2010) Seismic Design of Columns in Inverted V-Braced Steel Frames Considering Brace Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.1, pp.1-12 (in Korean).

[4] American Society of Civil Engineers (2013) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-10), USA.

[5] Standards New Zealand (2009) *Seismic Performance of Engineering Systems in Buildings* (NZS 4219: 2009), New Zealand.

[6] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009), 대한건축학회.

Architectural Institute of Korea (2009) *Korean Building Code -Structural* (KBC 2009), AIK, Korea (in Korean).

[7] 한국강구조학회(2005) 강구조의 설계, 구미서관.
KSSC (2005) *Design of Steel Structures*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).

[8] Inoue, K., Sawaizumi, S., and Higashibata, Y. (2001) Stiffening Requirement for Unbonded Braces Encased in Concrete Panels, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.6, pp. 712-719.

[9] 김선희, 김도범, 최성모(2015) 무용접 냉간성형 조립재로 보강한 H형강 가새의 압축거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제2호, pp.169-180.
Kim, S.K., Kim, D.B., and Choi, S.M. (2015) Compressive Behavior of H-Section Brace Strengthened by Non-Welded Cold-Formed Element, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.169-180 (in Korean).

[10] 김선희, 문지영, 최성모(2015) 무용접 좌골방지재로 보강한 철골 가새의 구조거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제2호, pp.207-217.
Kim, S.H., Moon, J.Y., and Choi, S.M. (2015) Structural Behavior of Steel Brace Strengthened with Non-Welded Buckling Restraint Casing, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.207-217 (in Korean).

[11] Sabelli, R, Roeder, C.W., and Hajjar, J.F. (2013) *Seismic Design of Steel Special Concentrically Braced frame Systems (NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 8)*, NIST GCR 13-917-24, National Institute of Standards and Technology, USA.

[12] Lin, M.-L., Tsai, K.-C., Hsiao, P.-C., and Tsai, C.-Y. (2005) Compressive Behavior of Buckling-Restrained Braced Gusset Connections, *Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, Nagoya University & Aichi Institute of Technology, Japan, pp.151-158.

[13] 국가기술표준원(2007) 금속재료 인장시험편(KS B 0801: 2007).
Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).

[14] 국가기술표준원(2003) 금속 재료 인장 시험 방법(KS B 0802: 2003).
Korean Agency for Technology and Standards (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802:

2003), Korea (in Korean).
 [15] American Institute of Steel Construction (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-10), USA.
 [16] American Society of Civil Engineers (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA-356), Federal Emergency Management Agency, USA.

F_y : 강재의 공칭항복강도(MPa)
 I_s : 가새(심재)의 단면2차모멘트(mm⁴)
 I_b : 보강재의 단면2차모멘트(mm⁴)
 KL : 유효좌굴 길이 (mm)
 K_i : 초기강성
 l : 가새의 전체길이(mm)
 P_{max} : 실험체의 최대 압축력(kN)
 P_n : 공칭압축강도(kN)
 P_y : 항복하중(kN)
 R_y : 공칭항복강도(F_y)에 대한 예상항복응력 비
 δ_{max} : 최대변위(mm)
 λ : 세장비
 μ : 연성도 ($=\delta_{max}/\delta_y$)
 r : 단면 2차 반경

기 호(Symbols)

A_b : 보강재의 단면적(mm²)
 A_s : 심재의 단면적(mm²)
 A_g : 전 단면적(mm²)

요 약 : 철골 중심 가새 골조는 최소의 물량으로 건물의 횡력에 대한 저항력을 확보할 수 있는 매우 효과적인 시스템이다. 본 논문에서는 기 설치된 H형 가새를 무 용접 냉간 성형보강재로 보강하여 휨-좌굴을 억제하고 인장력과 압축력에 동일한 강도를 확보하는 보강안에 대한 연구를 진행하였다. 역 V형 가새 골조에 설치된 H형가 새의 보강방안으로 선행연구의 보강재를 약축 보강형으로 변경하여 보강방안을 제시 하고 부재실험, 부재변수해석, 골조실험을 통해 구조성능을 평가하였다. 보강된 가새는 AISC기준을 만족하였다. 이를 통해 보강으로 골조 내 가새의 불 균형력에 의한 보의 파괴가 방지될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 역 V형 ,좌굴방지, 무-용접, 반복하중, 내진성능
