



쉬어탭 공유 접합부를 갖는 비내진중심가새골조의 내진거동

염희진¹ · 정은비¹ · 유정한^{2*}

¹석사과정, 서울과학기술대학교, 건축학부, ²조교수, 서울과학기술대학교, 건축학부

Seismic Behavior of Non-Seismic Concentrically Braced Frames with Shared Shear tab

Yeom, Hee Jin¹, Jung, Eun Bi¹, Yoo, Jung Han^{2*}

¹Master's Course, School of Architecture, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 139-743, Korea

²Assistant Professor, School of Architecture, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 139-743, Korea

Abstract - Special concentrically braced frames(SCBFs) have distinctive advantages in considerable seismic performance, which make engineers widely use SCBFs as lateral-load resisting systems in buildings and have researchers to develop SCBFs design methods. Compared to the extensive research of SCBF, comparatively little information is currently available on the performance of SCBFs designed and constructed before the early 1990's. Prior to 1988, concentrically braced frames(CBFs) design requirements were substantially less restrictive. As a result, many existing structures designed to these requirements may not ensure ductility and pose a significant concern in current buildings. In this study, these older frames are referred as non-seismic braced frames(NCBFs). In order to investigate the seismic behavior of NCBFs, finite-element(FE) models of SCBF and NCBF were suggested and verified using case investigation of NCBF conducted on the University of Washington. Using these models, the seismic behavior of NCBF with shared welding shear tab, which is the representative of the types of connections, was established and compared with the seismic performance of SCBF.

Keywords - Non-Seismic concentrically braced frames, Special concentrically braced frames, Finite element analysis, Seismic behavior

1. 서론

중심가새골조 (Concentrically Braced Frames, CBFs)는 횡하중에 저항하는 수직트러스시스템을 형성하기 위하여 모든 부재의 중심선이 한 점에서 교차하도록 설계된 가새골조를 말한다. 일반적으로 가새 형태에 따라 대각 가새골조, X-형·V-형·역V-형 가새골조 등으로 나뉘는데, 이러한 기하학적인 형태로 인해 가새가 축력을 받는 트러스작용을 한다.

특수중심가새골조(Special Concentrically Braced Frames, SCBFs)는 지진력을 받을 때, 가새의 압축좌굴·인장항복이 반복적으로 발생하면서 지진에너지를 소산하게 된다. 비교적 경제적이고, 작은 단면으로도 우수한 내진 성능을 보이기 때문에 강구조물의 내진설계에 대하여 특수중심가새골조를 횡하중 저항 시스템으로써 다양한 구조물에 적용하고 있다. 특히, 특수중심가새골조의 접합부가 적절하게 설계된다면 골조는 상당히 큰 비탄성 변형 능력을 발휘할 수 있다^{[1],[2],[3]}.

이러한 이점 때문에, 국내·외 건축구조 연구진들은 지난 수십 년간 특수중심가새골조의 내진 성능과 거동에 대해 실험적·해석적 연구가 진행되었고, 이로 인해 설계법과 설계기준이 비약적으로 발달했다^{[4],[5],[6]}. 설계기준의 발전으로 특수중심가새골조가 우수한 내진 성능을 갖추도록 설계하는 것이 가능해진 반면에, 과거에 설계된 중심가새골조의 내진 성능에 대한 연구는 미약하다^{[7],[8]}. 특히, 1988년 이전에 설

Note.-Discussion open until December 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 28, 2014; revised April 28, 2015; approved on May 20, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-970-9015 Fax. +82-2-974-1480

E-mail. happyjh@seoultech.ac.kr

계된 가새골조는 현행 기준에서 특수중심가새골조를 설계할 때 요구하는 폭두께비, 세장비, 접합부 형상 등의 제한사항을 갖추지 않고 있기 때문에 이러한 가새골조에 대한 평가가 시급한 실정이다. 본 연구에서는 1988년 이전에 설계된 중심가새골조를 비내진중심가새골조(Non-Seismic Concentrically Braced Frames, NCBFs)라 칭한다^{[7],[8]}.

Johnson^[2]과 Yoo *et al.*^[3]은 특수중심가새골조의 내진 성능을 평가하고, 타원형 간극거리를 이용한 거셋 플레이트 설계를 제안하기 위하여 실험·해석 연구를 실시하였다. 연구 결과, Roeder *et al.*^[1]은 현행 기준에서 요구하는 직선형 간극거리보다 타원형 휨선을 기반으로 산정한 타원형 간극거리로 거셋 플레이트를 설계하는 균형설계절차(Balanced Design Procedure, BDP)를 제안하였고, 이는 연성과 비탄성 변형 측면에서 우수한 결과를 보였다.

Sloat^{[7],[8]}은 최근 연구에서 1988년 이전에 설계된 비내진 중심가새골조에 대한 사례 조사를 실시하고, 이를 기반으로 실험체를 계획하여 반복가력 실험을 통해 내진 성능을 평가하였다. 실험 결과, 부재 접합을 위한 보 웹의 단면손실, 접합부 용접파괴, 세장단면을 갖는 가새 등의 결함으로 인해 가새의 조기파단이 발생하였고, 비내진중심가새골조는 지진 저항 시스템으로써 적합하지 않다고 평가되었다.

본 연구에서는 최근 워싱턴대학교에서 실시된 1988년 이전에 설계된 중심가새골조에 대한 사례 조사^{[7],[8]}을 바탕으로 이에 대한 내진 성능을 평가하였다. 비내진중심가새골조의 사전조사로써 Sloat의 사례조사와 실험^{[7],[8]}이 적용되었고, 현행 기준으로 설계된 특수중심가새골조와의 거동 차이 비교를 위해 Johnson의 실험^[2]과 Yoo *et al.*의 유한요소모델^[3]을 이용하였다. 최종적으로, 비내진중심가새골조의 지진력 재하시 거동을 정확히 시뮬레이션하기 위한 유한요소 모델을 제안·검증하고, 이 모델을 이용하여 특수중심가새골조와 대비되는 비내진중심가새골조의 연성 능력, 강도, 비탄성 변형 능력에 대해 규명하여 내진 성능을 평가하였다.

2. 설계기준 및 사례조사

2.1 현행기준

현행 강구조설계기준^[6]에서 규정하는 특수중심가새골조 설계 시 요구사항은 아래와 같다.

2.1.1 가새부재 세장비 제한

$$KL/r \leq 4\sqrt{E/F_y} \quad (1)$$

$4\sqrt{E/F_y} < KL/r \leq 200$ 인 가새부재는 기둥의 설계강도가 가새부재의 공칭강도에 R_y 를 곱하여 산정한 기둥으로 전달되는 최대하중 이상인 경우에만 허용한다. 기둥의 강도는 비선형해석 또는 시스템으로부터 전달되는 최대요구강도를 초과할 필요는 없다.

2.1.2 기둥 및 가새부재 폭두께비 제한

자유돌출판, 기둥 및 가새 플랜지의 폭두께비: $b/t \leq \lambda_{ps}$

$$\lambda_{ps} = 0.30\sqrt{E/F_y} \quad (2)$$

양연지지판, 기둥 및 가새 웹의 폭두께비: $h/t_w \leq \lambda_{ps}$

$$C_a \leq 0.125 \text{인 경우,} \\ \lambda_{ps} = 3.14\sqrt{E/F_y}(1 - 1.54C_a) \quad (3)$$

$$C_a > 0.125 \text{인 경우,} \\ \lambda_{ps} = 1.12\sqrt{E/F_y}(2.33 - C_a) \geq 1.49\sqrt{E/F_y} \quad (4)$$

여기서, $C_a = \frac{P_u}{\phi_b P_y}$ ($\phi_b = 0.90$)

2.1.3 거셋 플레이트 간극거리

거셋 플레이트 간극거리는 거셋 플레이트 두께의 2배 정도를 권장하며, 가새부재의 좌굴발생 이전에 거셋 플레이트에 좌굴이 먼저 생길만큼 길어서는 안 된다. 간극거리는 가새부재 끝에서 면외회전에 구속된 가새단부(거셋 플레이트)와 가장 가까운 점으로부터 가새 중심선과 직각으로 측정된 길이이다.

2.2 설계기준 비교

Table 1은 1988년 이전의 중심가새골조와 현행 기준^{[4],[5],[6]}의 특수중심가새골조에 대한 고려사항을 간략히 비교한 것이다. 현행 기준에서는 역량설계법을 근거로 지진에너지를 소산하는 부재인 가새의 예상내력(The Expected Brace

Table 1. Comparison of modern and older braced frame design^[8]

Component	Non-Seismic Concentrically Braced Frames	Special Concentrically Braced Frames
Brace Slenderness	No limit	$KL/r \leq 4\sqrt{E/F_y}$
Brace Compactness	No limit	Seismically Compact
Framing Member Compactness	No limit	Seismically Compact
Brace End Rotation Clearance	No limit	2tp linear clearance
Brace Connection Design	Design for Seismic Loads	Design for Expected Brace Capacity
Framing Member Design	Design for Seismic Loads	Design for Expected Brace Capacity

Capacity)으로 부재를 설계하도록 규정한다. 1988년 이전에는 반응수정계수로 설계지진력을 감소시킨 지진하중(The Reduced Seismic Loads)에 대해 설계하고 있기 때문에 실제 지진 내습 시 골조의 거동이 불분명하며, 설계자가 의도하지 않은 항복 메커니즘과 파괴 모드가 일어날 수 있다^{[7],[8]}.

이밖에 비내진중심가새골조는 부재의 폭두께비, 가새 세장비, 거셋 플레이트 간극거리 등에 대한 제한값이 없기 때문에 골조의 안정성이 저하될 수 있는 여지가 다분하다.

2.3 비내진중심가새골조 사례조사

최근 워싱턴대학교 연구진은 비내진중심가새골조의 내진 성능 평가를 위하여 미국 서부 해안 강진지역의 12개 건물에 존재하는 중심가새골조에 대해 분석하였다^{[7],[8]}. 이들 모두 1988년 이전에 설계되었기 때문에 비내진중심가새골조로 분류하였으며 사례건물은 Table 2와 같다.

Table 2의 조사된 건물을 보면, 건물의 높이는 1~9층으로 다양하지만 대부분의 건물은 4층 이하로, 이는 당시에 중심가새골조가 주로 저층건물에 대한 횡저항 시스템으로 사용된 것을 방증한다. 사례 건물들이 사무소, 의료시설, 상업시설, 연구시설, 학교시설 등 다양한 용도로 이용되었고 당시에도 폭넓게 이용된 것으로 볼 수 있다. 가새 단면은 H형강, 각형강관, 원형강관, ㄱ형강 등 다양한 가새가 이용되었지만, 대부분의 건물에서 각형강관 가새가 이용되었고, 대각 가새골조와 V-형 가새골조가 가장 많은 골조형태이다.

Table 2. A survey of existing structures containing CBFs designed prior to 1988^{[7],[8]}

No.	Date	Floors	Braces	Configurations	Connection Types
1	Oct-83	3	HSS,W	Single Diagonal, Chevron	Bolted Shear Tab
2	Nov-82	3,5	HSS,Pipe	Single Diagonal, Chevron	Shared Gusset
3	Jan-88	2,3	HSS,Pipe	Single Diagonal, Chevron	Shared Gusset
4	Sep-80	4	HSS,W	Single Diagonal, Chevron	Beam Only
5	Jun-80	8	Angles	Single Diagonal, X-bracing	Fully Welded,Bolted Shear Tab,Bolted End Plate
6	Apr-86	3	HSS	Single Diagonal, Chevron	Welded Shear Tab
7	Oct-88	1	Angles	X-bracing	Bolted End Plate
8	May-83	2	HSS	Chevron	Fully Welded
9	Jul-74	6	W	Single Diagonal, X-bracing	Double Gusset Plate
10	Jun-82	9	W	Single Diagonal, Multi-Story X	Double Gusset Plate
11	Feb-92	2,3	HSS	Chevron	Welded Shear Tab
12	Aug-86	4	HSS	Chevron	Bolted Double Angle

비내진중심가새골조에서는 다양한 접합부 형태가 있지만, 대각 가새골조의 경우에는 거셋 플레이트와 쉬어탭을 이용하여 보·기둥·가새를 연결하는 접합부의 형태를 가장 많이 취하고 있다. Fig. 1은 쉬어탭과 거셋 플레이트를 이용한 비내진중심가새골조의 대표적인 접합부 상세 도면을 나타낸다. 그림에서 보듯이, 거셋 플레이트는 보의 플랜지에 용접되어있다. 쉬어탭이 보의 웹브와 거셋 플레이트에 걸쳐 길게 배치되었고, 이 연결을 위해 보의 플랜지 일부의 단면 손실이 있다. 쉬어탭의 한쪽 면은 보 웹브·거셋 플레이트와 용접 접합(Fig. 1(a)) 혹은 볼트접합(Fig. 1(b))되어있고, 다른 한쪽 면은 기둥과 용접으로 접합되는 형태를 취하고 있다.

본 연구에서는 Table 2와 같이 다양한 형태의 접합부 중

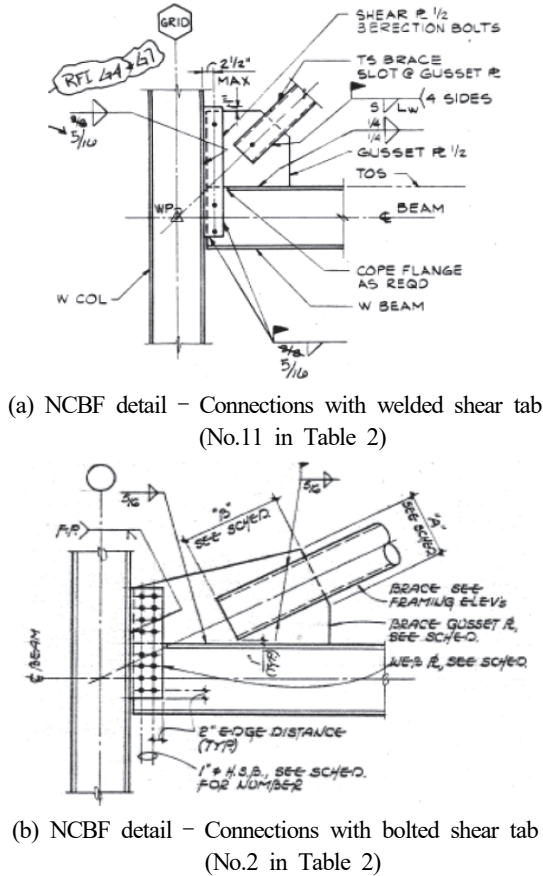


Fig. 1. Samples of existing connections from survey^[7]

에서, Fig. 1(a)에 해당하는 용접접합을 이용한 쉬어탭 공유 접합부를 갖춘 비내진중심가새골조에 대해서 평가한다.

3. 실험결과 및 해석결과

3.1 비내진중심가새골조 실험체 NCBF3

비내진중심가새골조의 실험연구를 위해 사례조사를 기반으로 실험체가 제작되었다^{[7],[8]}. 조사건물 중, 1992년도 2월에 준공된 사례의 건물을 반영하였으며, 워싱턴대학교의 실험조건에 따른 실험체 셋업은 Fig. 2와 같다. 실험체는 단층-단경간 대각 가새골조로 제작되었고 층고와 중심경간은 3.66m로 동일하다. 실험체의 골조부재는 H형 단면을 갖는 보(W16×45)와 기둥(W12×72)으로 구성되었다.

워싱턴대학교에서 반복가력으로 실험한 비내진중심가새골조 실험체^{[7],[8]}은 NCBF1, 2, 3이 있으며, 세 실험체는 각각 다른 가새 단면과 용접 종류를 갖고 있다. 1992년 2월 준

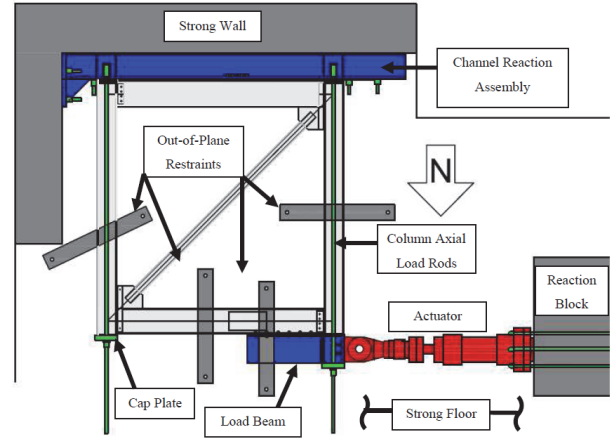


Fig. 2. Test setup schematic^{[2],[8]}

공 사례 건물의 가새단면과 용접접합을 이용한 쉬어탭 공유 접합부를 그대로 실험체에 적용하여 제작된 실험체는 NCBF1이다. 그러나 NCBF1의 가새 폭두께비는 27(HSS7×7×1/4)로 항복강도 345MPa(A500 Grade B 강재)급 강재의 내진 조밀 한계폭두께비인 15.4보다 상당히 세장한 단면을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 쉬어탭을 공유한 형태의 접합부 내진성능을 평가하고, 이 접합부를 현행 기준으로 설계된 특수중심가새골조 접합부와 비교하기 위해 NCBF1에서 가새 폭두께비 12.3 (HSS5×5×3/8, SPSR125×125×9에 가까움)의 가새로 교체한 NCBF3 실험을 이용하였다^{[7],[8]}.

3.2 특수중심가새골조 실험체 HSS1, HSS5

NCBF3과 비교할 특수중심가새골조의 실험 데이터는 Johnson과 Yoo *et al.* 연구의 HSS1과 HSS5 실험체를 이용하였다^{[2],[3]}. HSS1은 현행 설계 기준^{[4],[5],[6]}으로 제작된 실험체이며, HSS5는 Roeder 등이 제안한 균형설계절차(Balanced Design Procedure, BDP)^[1]로 설계된 실험체이다. Fig. 3에서는 세 개의 실험체간의 차이를 보여준다. 거셋 플레이트 접합부 설계시 NCBF3은 쉬어탭 공유 용접접합, HSS1은 현행 기준인 직선형 간극거리(2t linear clearance), HSS5는 BDP를 이용한 타원형 간극거리(8t elliptical clearance)로 설계했다는 것이 가장 큰 차이이다. 즉, 비내진중심가새골조 실험체는 NCBF3, 현행 기준의 특수중심가새골조 실험체는 HSS1, 개선된 설계방법 BDP로 설계된 HSS5를 이용하여 실험적·해석적으로 비교하였다. 그 밖에 3개의 실험체는 가새와 골조부재의 크기는 모두 동일하게 하여 접합부만을 변수로 두어 객관적인 접합부의 성능 비교가 되도록 하였다.

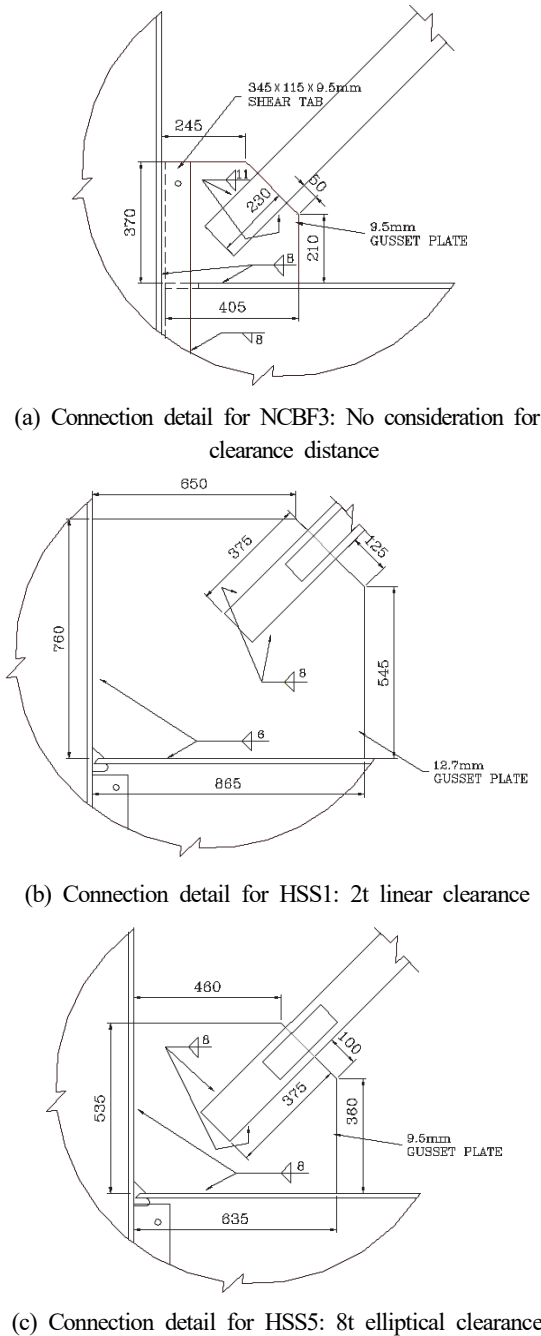


Fig. 3. Connection details for specimens

모든 실험체에서는 기둥 하단부의 치올림(Uplift)을 방지하고, 실제와 비슷한 조건으로 바닥하중을 시뮬레이션하기 위하여 약 2,000kN의 수직하중이 각 기둥에 적용되었다. 지진력을 적용하기 위해 횡 가력기를 통해서 적용된 반복하중은 Fig. 4와 같으며 ATC 24^[9]와 SAC 강제실험프로토콜^[10]을 기반으로 산정되었다. 각 기둥 하단부에는 이동단, 하단 보 중앙부의 플랜지에는 고정단을 적용하였다. 가새의 면외

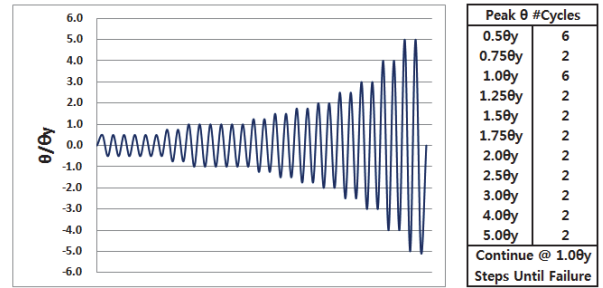


Fig. 4. Loading history^{[9],[10]}

좌굴을 유도하기 위하여 가새에 면외 방향으로 편심을 주었고, 보-기둥에 면외구속 장치를 설치하였다.

3.3 해석 개요

비내진중심가새골조에서 쉬어탭을 공유한 용접접합부의 내진성능을 평가하기 위해 ANSYS^[11]를 이용한 유한요소모델로 비선형 해석이 수행되었다. 유한요소모델은 4절점 사각형 쉘 요소(SHELL181)로 구성되었고, 각 노드는 6개의 자유도를 포함하고 있다. 해석에서 사용된 물성치는 실험에서 얻어진 재료시험결과를 기초로 이선형 이동경화형 모델(Bilinear Kinematic Hardening Model)을 이용하였다.

Table 3. Material properties

Component	Beam	Column	Shear Tab	Gusset Plate	Brace
Material	A992 Grade 50	A992 Grade 50	A572 Grade 50	A572 Grade 50	A500 Grade B
Thickness [mm]	8.5 (web)	12 (web)	9.5	N/A	9.5
Yield Strength [MPa]	395	409	447	447	505
Tensile Strength [MPa]	501	522	602	602	549

Fig. 2의 실험체에서 좌측 상단과 우측 하단의 보-기둥 쉬어탭 접합부의 경우, 볼트 신장(Bolt Elongation) 효과를 해석 모델에서 고려하기 위하여 Liu and Astaneh-Asl의 실험 데이터^[12]를 이용한 비선형 스프링 요소(COMBIN39)를 볼트접합 8개소에 적용하였고, 그 밖에 모든 경계조건은 실험과 동일하게 구성하였다. 격자 생성과 경계조건은 Fig. 5와 같으며, 각 기둥 상부에 면외 방향 변위를 제어하기 위해

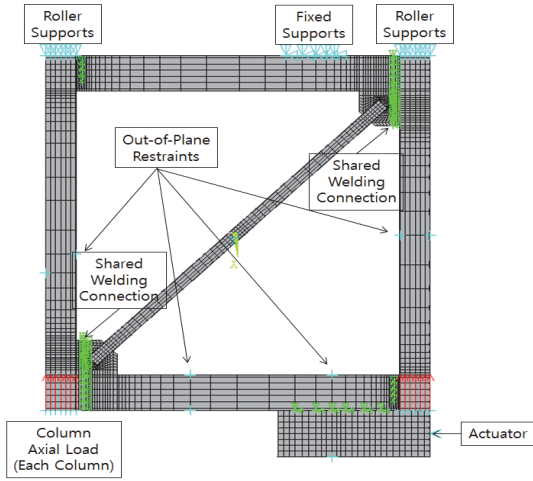


Fig. 5. FE model for NCBF3

추가적으로 면의 구속을 적용하였다. 격자의 크기와 조밀도는 Yoo *et al.*의 해석 모델^[3]을 참조하고 해석 결과의 정확성과 시간적 효율성을 고려하여 접합부와 가새 중앙부에 조밀한 격자가 생성되도록 하였다. 그밖에 탄성 거동이 예상되는 기둥과 보의 경우 비교적 큰 격자로 모델링을 실시하였다.

비내진중심가새골조 모델 NCBF3과 특수중심가새골조 모델 HSS1, HSS5는 접합부를 제외한 모든 구성요소의 단면, 사용재료 등은 동일하여 접합부를 제외한 다른 변수가 골조 내진 거동에 영향을 주지 않게 모델링하였다. Fig. 3에서 비교했듯이 접합부 형태를 비교해보면, 비내진중심가새골조(NCBF3)는 특수중심가새골조(HSS1, HSS5)보다 현저히 작은 크기의 거셋 플레이트를 갖추고 있고, 비내진중심가새골조가 용접된 쉬어택을 공유하여 보-기둥-가새-거셋가 모두 접합되어있는 것에 반해 특수중심가새골조는 쉬어택 없이 거셋 플레이트가 보와 기둥에 직접적으로 용접된 형태를 갖추고 있다.

3.4 실험·해석결과

Fig. 6는 비내진중심가새골조 NCBF3, 특수중심가새골조 HSS1, BDP로 설계된 HSS5의 실험·해석 결과로 얻어진 하중-횡 변형률 곡선 결과를 각각 비교한 것이다. 세 실험체 유한요소모델(Finite Element Model, FEM)은 강성, 강도, 전체적인 거동의 측면에서 상당히 잘 시뮬레이션했다고 할 수 있다.

본 연구에서 이용한 비선형 해석 모델은 골조 부재의 항복, 좌굴, 비탄성 변형을 예견할 수 있지만, 용접 크랙, 연성

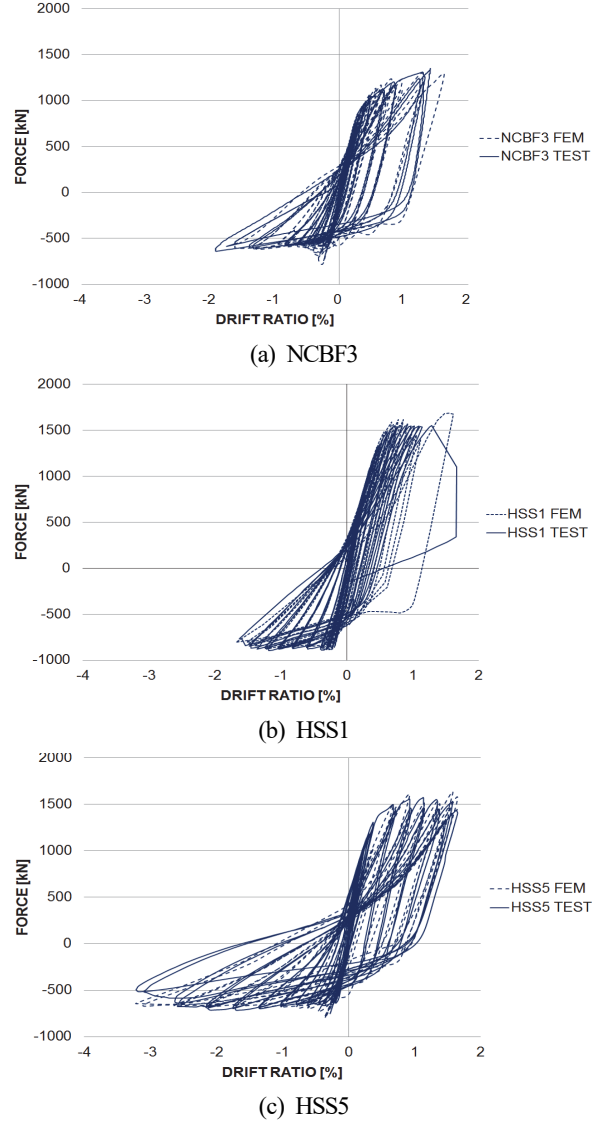


Fig. 6. Measured and simulated lateral load-drift reponses

파괴 시점과 파괴 이후의 거동을 시뮬레이션 할 수 없다. Yoo *et al.*^[3] 및 Yoo^[13]의 해석연구에서는 가새골조의 비선형 해석을 이용해 얻어진 가새 중앙부의 등가소성변형률 ϵ_{eqv} 을 이용하여 가새 파단 시점을 비교적 정확하게 파악하였다. ϵ_{eqv} 는 아래의 식 (5)와 같이 von Mises의 공식을 이용한 소성변형요소들로부터 계산된다.

$$\epsilon_{eqv} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu')} [(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + \frac{2}{3}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

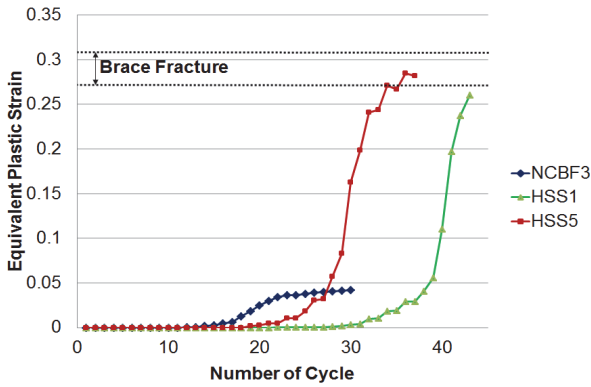
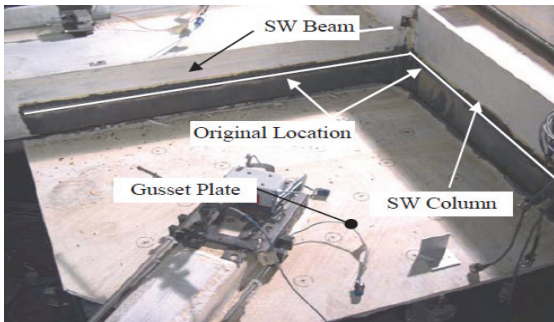


Fig. 7. Equivalent plastic strain at the middle of the brace



(a) NCBF3: Weld fracture of gusset-to-shear tab (24Cycle, -1.63 Drift)



(b) HSS1: Weld fracture of gusset-to-frame elements (44Cycle, -1.54% Drift)



(c) HSS5: Brace fracture (37Cycle, -3.26% Drift)

Fig. 8. Failure modes of specimens^{[2],[8]}

변위비의 함수로써 해석 모델에서의 가새 중앙부 ϵ_{eqv} 가 선형 해석연구로부터 얻어진 가새파단 ϵ_{eqv} 의 한계치를 초과하는 시점에서 가새 파단이 발생할 것임을 예측할 수 있다. 이는 동일한 격자 크기와 같은 요소 모델의 사용을 요구하며, 실험체의 ϵ_{eqv} 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 등가소성변형률 해석 결과를 보면, NCBF3과 HSS1 실험체는 횡 반복하중 가력시 가새 중앙부의 파단이 발생하지 않았다는 것을 예측할 수 있다. 특히, NCBF3 실험체의 경우에는 가새 파단 구간에 크게 못 미치는 결과를 보였고, 이는 가새가 충분한 에너지 소산을 하지 못 하였다는 것을 방증한다.

Fig. 8은 실험체들의 지진력에 대한 파괴모드를 나타낸다. NCBF3과 HSS1 실험체의 실험에서는 가새 파단이 발생하지 않은 상태에서 접합부의 용접파괴로 인해 골조가 횡력에 대해 더 이상 저항하지 못한 상태로 실험이 종료되었고, 이는 등가소성변형률 분석과 일치하는 결과를 보인다. HSS5의 경우 Fig. 7에서 보듯이 36~37Cycle 사이에서 가새 파단이 발생할 것이라 예측할 수 있다. 이는 실제 실험에서의 가새 파단 시점(37Cycle)과 동일하기 때문에 해석 모델이 실험체의 가새 파단 시점을 잘 예측하였다고 할 수 있다.

3.5 결과 비교

비내진중심가새골조 실험체 NCBF3, 특수중심가새골조 실험체 HSS1, BDP로 설계된 실험체 HSS5의 유한요소해석 결과를 비교한 그래프는 Fig. 9에 나타내었고, 세 개의 실험체에 대한 유한요소해석 데이터를 정리한 것은 Table 4와 같다. 여기서 계산된 소산 에너지는 Fig. 9에서 변위의 증분 (0.2~1.0% Drift)을 이용한 아래의 약산식 (6)으로 산정하였다^[8].

$$E = \sum \left[\left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \times (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \right] \quad (6)$$

여기서, E = 총 소산에너지 [kN·mm]

P = 적용된 횡 하중 [kN]

Δ = 횡 변위 [mm]

i = 증분

역량설계법에 의하면 중심가새골조는 에너지 소산요소인 가새가 반복적인 압축좌굴·인장항복을 통해 지진에너지를

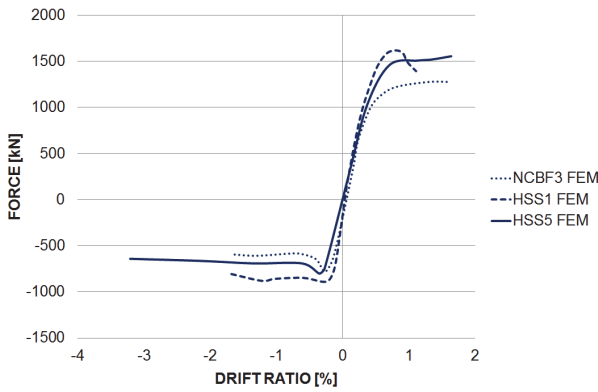


Fig. 9. Lateral force-drift plot for FE models

소산하도록 모든 부재 및 접합부가 설계되어야 한다. 그러나 비내진중심가새골조는 가새가 충분한 에너지 소산을 못하고 접합부의 파괴로 인해 비탄성 변형 능력이 현저히 떨어지는 결과를 나타냈다. Fig. 7의 해석 모델에서 보듯이 등가소성변형률은 가새 파단 영역에 크게 못 미친 상태에서 실험이 종료된 것을 볼 수 있다. 실제 실험 결과^{[7],[8]}의 파괴를 나타낸 Fig. 8(a)에서도 가새 파단이 발생하지 않았고, 쉬어탭을 공유한 용접접합부에서 용접파괴가 발생하여 시스템이 더 이상 지진력에 대해 저항할 수 없었다.

또한, Table 4의 유한요소해석 데이터에서도 일관된 결과를 확인할 수 있다. 비내진중심가새골조는 특수중심가새골조의 두 모델에 비해 압축강도, 에너지소산 능력, 비탄성 수용 능력 등 모든 면에서 내진 성능이 저조한 것을 알 수 있다. 특히, 비내진중심가새골조 모델 NCBF3을 타원형 간극거리를 이용한 특수중심가새골조 모델인 HSS5와 비교하면 이 차이는 더 두드러진다. NCBF3 모델은 HSS5 소산 에너지

의 약 66% 수준에 그치는 에너지 소산 능력을 보였으며, 가새 압축으로의 비탄성 변형은 50% 정도밖에 도달하지 못하였다. 결과적으로 접합부 결함에서 기인된 접합부 조기 파괴라는 골조 파괴모드가 골조의 전체적인 내진 성능을 저하시켰다는 것을 방증한다.

현행 설계법으로 제작된 HSS1의 모델은 비내진중심가새골조보다 압축강도, 에너지 소산 능력 측면에서 우수한 결과를 나타냈지만, 비탄성 변형 능력은 오히려 좋지 않은 결과를 나타냈다. 또한 HSS1은 NCBF3 실험체와 마찬가지로 가새 파단 이전의 거셋 플레이트 용접부 파괴라는 취성 파괴모드로 인해 골조의 적절한 파괴 모드인 가새 파단이 발생하지 않았다. 이는 직선형 간극거리를 이용하여 설계하는 현행 설계법이 개선되어야 한다는 선행 연구의 결과^[1]과 합치하는 결과이다.

반면, BDP를 이용하여 설계된 특수중심가새골조 HSS5 모델은 가새가 충분히 에너지 소산을 할 수 있도록 접합부가 설계되었으며, 가새 파단 이전에 보와 기둥의 항복은 발생하지 않았다. HSS1보다 작은 단면의 거셋 플레이트를 이용하였지만 오히려 골조 전체의 내진 성능은 우수하다는 해석 결과를 나타냈다. 실험에서도 파괴모드와 항복 메커니즘 모두 특수중심가새골조가 에너지 소산을 잘 할 수 있도록 가새에 순차적으로 발생하였다.

4. 결론

본 연구에서는 내진설계기준이 확립되기 이전에 설계된

Table 4. Summary of finite element analysis

Analytical Results		NCBF3	HSS1	HSS5
Connection Types		Shared Welded Shear Tab	Single Gusset Plate	Single Gusset Plate
Connection Design		No Consideration	2t Linear Clearance	6t Elliptical Clearance
Brace-Gusset Welded Length[mm]		230	375	375
Gusset Plate Size[mm]		405 × 370 × 9.5	865 × 760 × 12.7	635 × 535 × 9.5
Inelastic Deformation Capacity[%]		-1.63 ~ 1.63 (Total 3.26%)	-1.68 ~ 1.11 (Total 2.79%)	-3.22 ~ 1.65 (Total 4.87%)
Energy Dissipation[kN·mm(J)]		105,349	140,065	160,564
Strength	Brace Compression[kN]	1,277.24	1,615.69	1,618.29
	Brace Tension[kN]	-780.04	-888.03	-801.11

1988년 이전의 비내진중심가새골조에 대해 내진 성능을 평가하였다. 비내진중심가새골조에서 대표적인 접합부 형태인 쉬어탭 공유 용접접합부를 평가하기 위해 워싱턴대학교의 실험연구^{[7], [8]}을 이용한 해석연구를 실시하였으며, 특수중심가새골조와의 비교를 통해 내진 성능을 평가하고 보수·보강의 필요성을 연구하였다. 이 연구에서 얻은 주요 결과를 요약해보면 다음과 같다.

- (1) 비내진중심가새골조는 특수중심가새골조에 비해 비탄성 변형 능력, 강도 등의 측면에서 지진에 대해 취약하다는 실험·해석 결과를 보였다.
- (2) 비내진중심가새골조의 쉬어탭 공유 용접 접합부는 용접부의 조기 파괴로 인해 가새가 충분히 에너지 소산을 하기 전에 시스템 파괴가 발생하여 에너지 소산 능력이 저하되는 결과를 나타냈다. 이는 비내진중심가새골조는 현행 설계법에 적합하지 않은 항복 메커니즘과 파괴모드를 갖는다는 것을 나타낸다.
- (3) 기존의 비내진중심가새골조를 평가할 수 있는 유한요소 모델을 제시하고 검증하였다. 해석 결과는 전체적인 거동과 파괴모드 및 항복 메커니즘이 실험과 비교적 정확하게 일치하는 결과를 나타냈다. 향후 연구에서 쉬어탭을 공유한 용접접합부 외에도 다른 형태의 비내진중심가새골조 접합부(쉬어탭을 공유한 볼트접합부)에 대한 내진 성능 평가가 필요하며, 본 연구에서 제시한 유한요소모델로 내진 거동에 대해 비교적 정확한 예측이 가능하다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. NRF-2012R1A1A1002843)

참고문헌(References)

[1] Roeder, C.W., Lumpkin, E.J., and Lehman, D.E. (2011) A Balanced Design Procedure for Special Concentrically Braced Frame Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.11, pp.1760-1772.

[2] Johnson, S.M. (2005) *Improved Seismic Performance of Special Concentrically Braced Frames*, Master's Thesis, University of Washington, Seattle, USA.

[3] Yoo, J.-H., Roeder, C.W., and Lehman, D.E. (2007) Analytical Performance Simulation of Special Concentrically Braced Frames, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.134, No.6, pp.881-889.

[4] American Institute of Steel Construction (2011) *Steel Construction Manual* (14th Ed.), AISC, USA.

[5] American Institute of Steel Construction (2006) *Seismic Design Manual*, AISC, USA.

[6] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korean Building Code (KBC 2009) and Commentary*, Kimundang, Korea (in Korean).

[7] Sloat, D., Roeder, C.W., Lehman, D.E., and Berman, J.W. (2013) Survey and Testing of Pre-1988 Braced Frame Structures from the West Coast of the United States, *Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan, pp.492-499.

[8] Sloat, D. (2014) *Evaluation and Retrofit of Non-Capacity Designed Braced Frames*, Master's Thesis, University of Washington, Seattle, USA.

[9] Krawinkler, H. (1992) *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*, ATC-24 Report, Applied Technology Council, USA.

[10] Clark, P., Frank, K., Krawinkler, H., and Shaw, R. (1997) *Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens*, SAC Steel Project Background Document, Report No. SAC/BD-97/02, SAC Joint Venture, USA.

[11] ANSYS (2013) *ANSYS Multiphysics, Ver. 14.5*, ANSYS, Inc., USA.

[12] Liu, J., and Astaneh-Asl, A. (2000) Cyclic Testing of Simple Connections Including Effects of Slab, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.126, No.1, pp.32-39.

[13] 유정한(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

요 약 : 특수중심가새골조(Special Concentrically Braced Frames)는 우수한 경제성, 비탄성 변형 능력, 연성 등의 이점 때문에 횡하중 저항 시스템으로써 다양한 구조물에 적용하고 있다. 이러한 이점으로 국내·외 연구진의 특수중심가새골조에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 설계법과 기준이 비약적으로 발전한 반면에, 과거에 설계된 중심가새골조의 내진 성능에 대한 연구는 미약하다. 특히, 1988년 이전에 설계된 중심가새골조는 현재 기준과 비교하여 상대적으로 적은 설계요구를 반영하였기 때문에 내진 거동에 대한 평가가 시급한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 중심가새골조를 비내진중심가새골조(Non-Seismic Concentrically Braced Frames)라 칭하고, 워싱턴대학교에서 실시된 사례 조사를 토대로 비내진중심가새골조의 대표적인 접합부인 쉬어텁 공유 용접접합부를 갖는 골조의 내진 거동에 대한 유한요소모델을 제시하고 검증하였다. 이 모델을 이용하여 특수중심가새골조와 대비되는 비내진중심가새골조의 연성 능력, 강도, 비탄성 변형 능력에 대해 규명하여 내진 성능을 평가하였다.

핵심용어 : 비내진중심가새골조, 특수중심가새골조, 유한요소해석, 내진거동
