

# 하이브리드 비좌굴가새의 내진성능에 대한 해석적 평가

## Analytical Estimation on the Seismic Performance of Hybrid Buckling-Restrained Braces

김도현\*  
Kim, Do-Hyun

김영식\*\*  
Kim, Young-Sik

### Abstract

In order to improve the wind performance of buckling-restrained braces (BRBs), Hybrid buckling-restrained braces (H-BRBs) have been studied in Korea. The seismic performance of H-BRBs is different according to the action of VE damper. In this study, the nonlinear time history analyses have been performed on the parameters such as brace types and input earthquakes. The results of the study suggest that H-BRBs meet the BRB's requirement of ANSI/AISC 341-10 only if VE damper is not working during an earthquake.

*Keywords : Buckling-Restrained Brace(BRB), Seismic Performance, Viscoelastic Damper, Nonlinear Time History analysis*

## 1. 서론

지진에 의한 반복하중 작용시 철골가새 좌굴에 의한 내력저하를 개선하기 위하여 비좌굴가새(Buckling-Restrained Braces: 이하 BRB)시스템이 일본에서 처음 개발된 이후 미국, 대만, 한국 등 여러 나라에서 많은 연구가 진행되었다.<sup>1),2)</sup> BRB시스템은 내부 철골부재 주위를 강관을 이용하여 좌굴을 구속하기 때문에 지진 발생시에도 안정적인 이력거동이 가능하여 많은 에너지를 소산할 수 있다. BRB시스템은 건축구조설계기준(2009)에서 지진력저항시스템으로 사용되고 있다.<sup>3)</sup>

반면 풍하중시 비좌굴가새는 심재만 탄성거동하기 때문에 기존 철골가새 보다 강성이 감소된다는 단점이 있다. 따라서 BRB시스템의 우수한 내진성능과 함께 풍하중에 대한 강성 및 감쇠성능을 향상시킬 수 있는 하이브리드 비좌굴가새시스템(Hybrid

Buckling-Restrained Brace System: 이하 H-BRB)이 개발되었다.

Kim 등의 연구<sup>4)</sup>에서는 H-BRB의 풍하중시 작동 메커니즘을 실험적으로 검증하였다. 실험결과에 기초하여 다양한 가새가 설치된 40층 철골가새골조 건물에 대한 시간이력해석을 수행하여, 다른 가새시스템 보다 H-BRB가 우수한 내풍성능을 보유하고 있음을 해석적으로 평가하였다.<sup>5)</sup> 또한 풍하중에 대한 H-BRB의 최적설치위치에 대한 해석연구도 수행하였다.<sup>6)</sup>

H-BRB는 BRB의 내풍성능을 개선한 시스템이지만 기본적으로 BRB의 우수한 내진성능은 확보되어야 한다. H-BRB의 내진성능검증을 위한 실험에서 층간변위각 1.2%이후 점탄성 댐퍼부가 탈락하면서 하이브리드 비좌굴가새가 아닌 심재만으로 거동하는 비좌굴가새와 같은 거동을 보였다.<sup>7)</sup>

본 논문에서는 내진성능평가 실험결과를 토대로 심재항복 후 점탄성 댐퍼부 거동에 따라 H-BRB시스템을 두 가지 해석모델로 제안하였고, 철골가새시스템과 함께 지진에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하여 해석모델을 평가하였다. 해석결과는 최상층 변위 및 가속도, 누적소산에너지량, 가새종류별

\* 정회원, 경기과학기술대학교 조교수, 공학박사  
Dept. of Architecture & Interior Design  
Gyeonggi College of Science and Technology

\*\* 교신저자, (주)영구조엔지니어링 대표이사, 건축구조기술사  
Young Structural Engineering Co, Ltd.  
Tel: 02-6406-8353 Fax: 02-6406-8356  
E-mail: yskim@ysse.kr

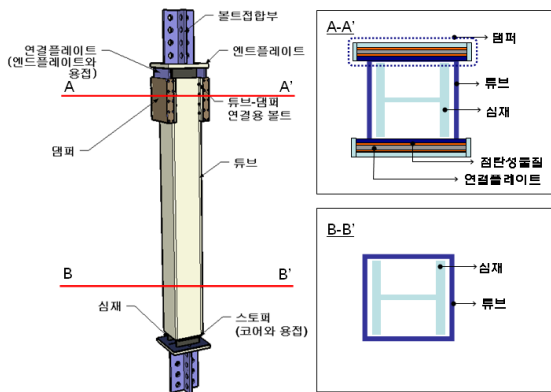
구조성능을 비교분석하였다. 또한 ANSI/AISC 341-10<sup>8)</sup>에 제시된 BRB시스템 평가기준에 따라 H-BRB가 적용된 건물의 내진성능을 평가하였다.

## 2. 하이브리드 비좌굴가새 시스템

### 2.1 H-BRB시스템 구성요소

H-BRB는 <Fig. 1>과 같이 점탄성댐퍼 부분과 기존 비좌굴가새 부분으로 구성된다. 튜브 외측에 부착된 점탄성댐퍼 부분(A-A')은 탄성변형 내에서 바람과 약진에 의한 에너지를 소산하고, 기존 BRB 부분(B-B')은 지진과 같은 대변형시 에너지를 소산한다. 즉 H-BRB는 탄성영역에서는 H-BRB의 심재(Steel Core)의 상대변위를 이용하여 점탄성댐퍼(Viscoelastic Damper)와 같이 거동하며, 비탄성영역에서는 기존 BRB와 같은 이력댐퍼(Hysteresis Damper)로 거동한다.

심재와 점탄성 댐퍼는 병렬로 연결되어, 점탄성 댐퍼 부분과 H-BRB 심재변위는 같다. 따라서 하중에 주로 저항하는 요소는 H-BRB의 심재가 되며, 이 때 발생하는 변위에 의하여 점탄성댐퍼 부분의 에너지가 소산된다.

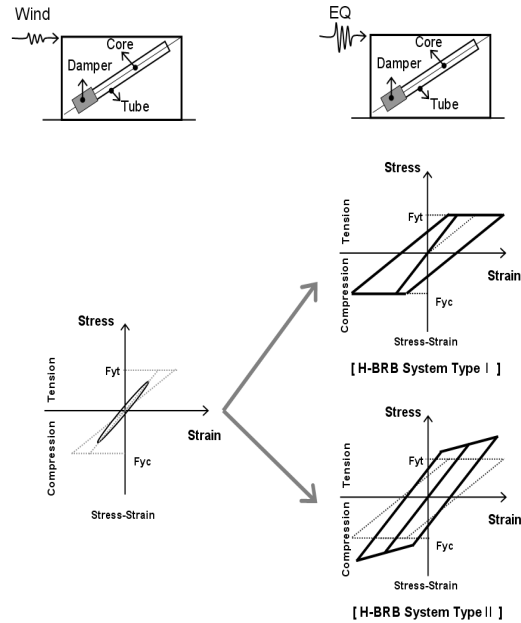


<Fig. 1> Schematic concept of H-BRB

### 2.2 H-BRB시스템 거동 메커니즘

H-BRB시스템은 심재항복 후 점탄성댐퍼 부분 탈락유무에 따라 <Fig. 2>와 같이 2가지 유형으로 구분할 수 있다. 즉 H-BRB는 심재항복이후 점탄성 댐퍼 부분이 분리되어 BRB와 같이 심재만으로 거동

하는 H-BRB 타입1(이하 HB-1)과 심재항복이후에도 점탄성댐퍼 부분이 심재와 함께 거동하는 H-BRB 타입2(이하 HB-2)로 구분된다.



<Fig. 2> H-BRB type after core yielding

## 3. 해석계획

### 3.1 해석모델 및 입력지진파

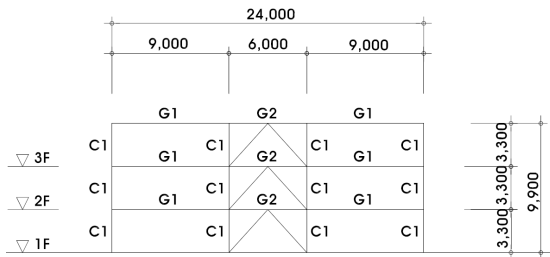
해석모델은 <Fig. 3>과 같이 층고가 3.3m인 3층 철골건물로, 모든 구조부재는 SS400( $F_y=235\text{MPa}$ )강재를 사용하였다.

심재항복이후 점탄성댐퍼 거동유무에 따라 H-BRB의 거동을 달라진다. H-BRB가 적용된 건물의 내진성능을 평가하기 위하여 <Fig. 3>의 철골가새(SB)를 유사한 압축력을 갖는 HB-1, HB-2로 교체한 3가지 해석모델에 대하여 해석을 수행하였다(<Table 1>).

해석모델은 건축구조설계기준(2009)에 따라 설계되었다. 지진수준에 따른 시스템 내진성능을 평가하기 위하여 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration) 크기에 따라 세 가지 지진데이터(Taft 지진, El Centro지진, Northridge지진)를 해석에 사용하였다(<Table 2>).

H-BRB 설계는 Kim의 실험연구<sup>7)</sup>에서 사용된 실험체 댐퍼의 등가감쇠율과 댐퍼와 심재, 튜브의 강

성비를 이용하였다.



G1, G2: H 400×200×8×13, C1: H 350×350×12×19  
 <Fig. 3> Analytical modeling

<Table 1> Details of braces

	Section	Area(mm <sup>2</sup> )	Force(kN)
SB	H 150×150×7×10	4,014	520
HB-1	H 100×100×6×8	2,190	515
	□ 121×121×9T	4,032	948
HB-2	H 100×100×6×8	2,190	515
	□ 121×121×9T	4,032	948

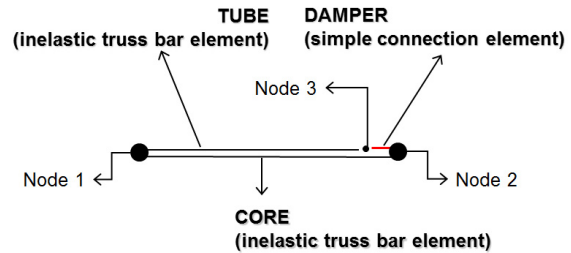
<Table 2> Earthquake data

	Taft EQ (1952)	El Centro EQ(1940)	Northridge EQ(1994)
PGA(g)	0.179	0.348	0.843
Direction	EW	NS	NS

### 3.2 비선형해석

BRB의 지진시 거동 분석을 위한 해석모델로 평판을 심재로 사용하는 비좌굴가새의 등방성경화를 고려할 수 있는 해석모델이 개발되었다<sup>9)</sup>. 하지만 본 연구에 사용된 심재는 H형강이므로, 일반적으로 비좌굴가새를 모델링하는 이선형 모델을 사용하였고, 해석프로그램으로 대표적인 비선형해석프로그램 DRAIN-2DX를 사용하였다<sup>10)</sup>. 모든 해석모델의 보와 기둥은 DRAIN-2DX 요소타입 2번인 소성힌지보-기둥요소(Plastic Hinge Beam-Column Element)를 사용하였다. 해석모델 SB계열의 철골가새는 요소타입 1번인 비선형 트러스요소(Inelastic Truss Bar Element)의 압축좌굴이력모델을 사용하였다. 해석모델 HB-1계열의 H-BRB는 요소번호 1번인 비선형 트러스요소의 압축좌굴없는 이선형이력모델을 사용하였다. 해석모델 HB-2계열의 H-BRB는 요소타입 1번인 비선형 트러스요소(Inelastic Truss Bar

Element)와 요소번호 4번인 단순연결요소(Simple Connection Element)를 사용하여 <Fig. 4>와 같이 구성하였다.



<Fig. 4> Analytical element of HB-2 series

### 3.3 구조물 동적특성

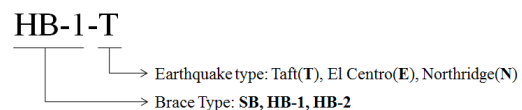
해석모델별 동특성 분석을 위하여, 해석모델별로 고유치 해석을 진행한 후, 1차 고유주기에 대한 입력지진파별 반응스펙트럼 값을 <Table 3>과 같이 정리하였다.

<Table 3> Summary of dynamic properties (unit: Disp(mm), Acc(m/sec<sup>2</sup>))

	T1 (sec)	Taft EQ		El Centro EQ		Northridge EQ	
		Disp	Acc	Disp	Acc	Disp	Acc
SB	0.383	11.5	3.16	23.3	6.38	39.9	1.10
HB-1	0.484	21.7	3.73	44.0	7.58	41.3	7.13
HB-2	0.458	20.8	4.81	44.5	8.35	35.1	6.51

## 4. 해석결과분석

지진과 가새종류에 따라 총 9가지 비선형 시간이력해석을 수행하였고, 해석모델명은 <Fig. 5>와 같다. 가새종류 및 지진수준에 따른 해석결과를 소성힌지분포, 최상층변위, 최상층가속도, 가새 구조성능에 대하여 분석하여 시스템별 내진성능을 평가하였다.

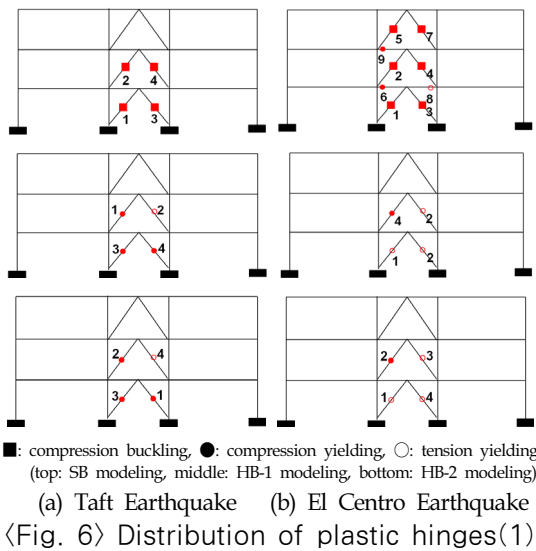


<Fig. 5> Analytical modeling name

### 4.1 구조물 비탄성거동

해석모델의 비탄성거동을 지진별 가새항복과 소성힌지 발생패턴을 통하여 분석하였다.

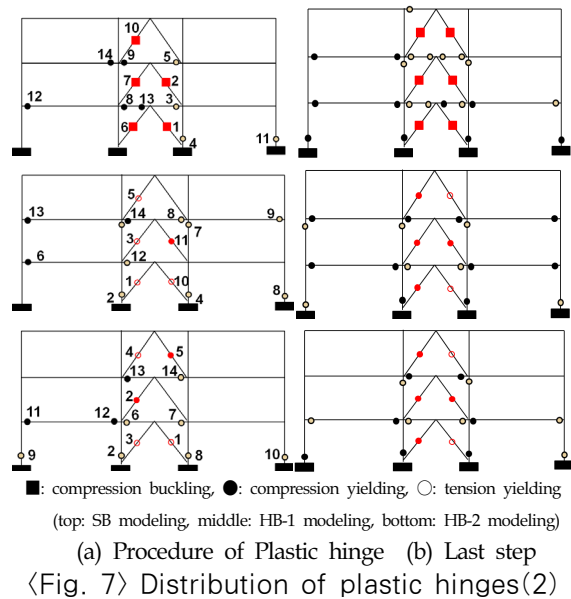
Taft지진시 해석모델별 가새 항복 및 보, 기둥의 소성힌지 분포는 <Fig. 6(a)>와 같다. SB-T의 경우 1, 2층 가새 전체가 한 방향에서 인장항복이 발생한 이후 압축시 좌굴이 발생하였고, 철골모멘트골조에는 소성힌지가 발생하지 않았다. 또한 HB-1-T, HB-2-T의 경우 1, 2층 가새에 인장항복과 압축항복이 발생하였지만 철골모멘트골조에는 소성힌지가 발생하지 않았다.



El Centro지진시 비탄성 거동은 <Fig. 6(b)>와 같다. SB-E의 경우 SB-T와 같이 모든 1, 2층 가새에 순차적으로 압축좌굴이 발생한 이후 3층 가새에 압축좌굴이 발생하였다. 이후 가새와 연결된 2층과 3층 보 일부에 소성힌지가 발생하며 비탄성거동을 보인다. 반면 HB-1-E, HB-2-E의 경우에는 Taft지진과 같이 1, 2층 가새에 인장항복과 압축항복이 발생하며, 철골모멘트골조에는 소성힌지가 발생하지 않았다.

Northridge지진의 경우 다른 지진과 달리 철골모멘트골조에 많은 소성힌지가 발생하기 때문에 해석모델별 초기 좌굴 및 항복 순서를 나타낸 <Fig. 7(a)>와 최종 좌굴 및 항복상태를 나타낸 <Fig. 7(b)>로 구분하였다. SB-N의 경우 지진입력 이후 3.44초에서 1층 가새에 인장항복이 발생한 후에 3.88초에서 <Fig. 7(a)>와 같은 분포가 되었다. 가새

의 좌굴이후 소성힌지의 급격한 형성으로 4.14초에 4.20초까지 1층 모든 기둥하부에 소성힌지가 발생한 후에 7.5초에서 구조물이 붕괴되었다. 반면 HB-1N의 경우 지진입력 이후 3.48초에 1층 HB-1에서 처음 항복이 발생한 이후 4.36초에서 <Fig. 7(a)>와 같이 분포되었다. H-BRB의 심재 항복이후 1층 기둥과 2층, 3층 보 단부 순서로 항복이 발생되었다. 해석종료까지 구조물 붕괴없이 안정적인 소성메커니즘이 형성되었다. HB-2-N의 경우에는 지진입력 이후 3.50초에 1층 HB-2에서 처음 항복이 발생한 이후 4.04초에서 <Fig. 7(a)>의 분포가 되었다. 항복순서는 HB-1-N과 유사하였다. HB-1-N과의 차이는 초기에 모든 1층 기둥 하단에서 소성힌지가 발생한 점과 골조에 소성힌지가 적게 발생한 점이다.



### 4.2 최상층변위

각 해석모델에 대한 최상층변위는 <Table 4>와 같으며, 지진별 해석모델에 따른 최상층변위 시간이력은 <Fig. 8>과 같다. SB-T 최상층 최대변위가 가장 작고, 이 값은 HB-1-T 최상층 최대변위 30.65mm의 47%인 14.42mm이다. 또한 HB-2-T의 최상층 최대변위는 HB-1-T 최상층 최대변위의 88%인 27.10mm이다. Taft지진의 경우 해석모델의 가새를 제외한 골조가 탄성으로 거동하기 때문에 <Table 3>의 최대변위응답(SB/HB-1=0.531, HB-2/HB-1=

0.961)과 유사한 경향을 보인다.

<Table 4> Maximum roof displacement(mm)

	Taft EQ	EL Centro EQ	Northridge EQ
SB	14.42	36.72	109.81
HB-1	30.65	35.63	149.23
HB-2	27.10	29.08	120.82

El Centro지진에서는 SB-E에서 가새의 압축좌굴 이후 보에서 소성힌지가 발생하면서 HB-1-E의 최대 변위 35.63mm보다 더 큰 36.72mm가 발생하였다. 반면 HB-2-E의 최상층 최대변위는 HB-1-E 최대변위의 82%인 29.08mm이다.

Northridge지진에서는 SB-N은 지진입력 7.5초가 경과한 시점에서 <Fig. 7(b)>와 같은 소성힌지발생에 따른 붕괴되었기 때문에 20초 이상을 거동한 다른 해석모델과 비교하지 않았다. HB-2-N의 최상층 최대변위는 HB-1-N 최대변위의 81%인 120.82mm이다. El Centro지진과 Northridge지진시 H-BRB 타입2가 H-BRB 타입1보다 최상층 변위제어에 유리하다.

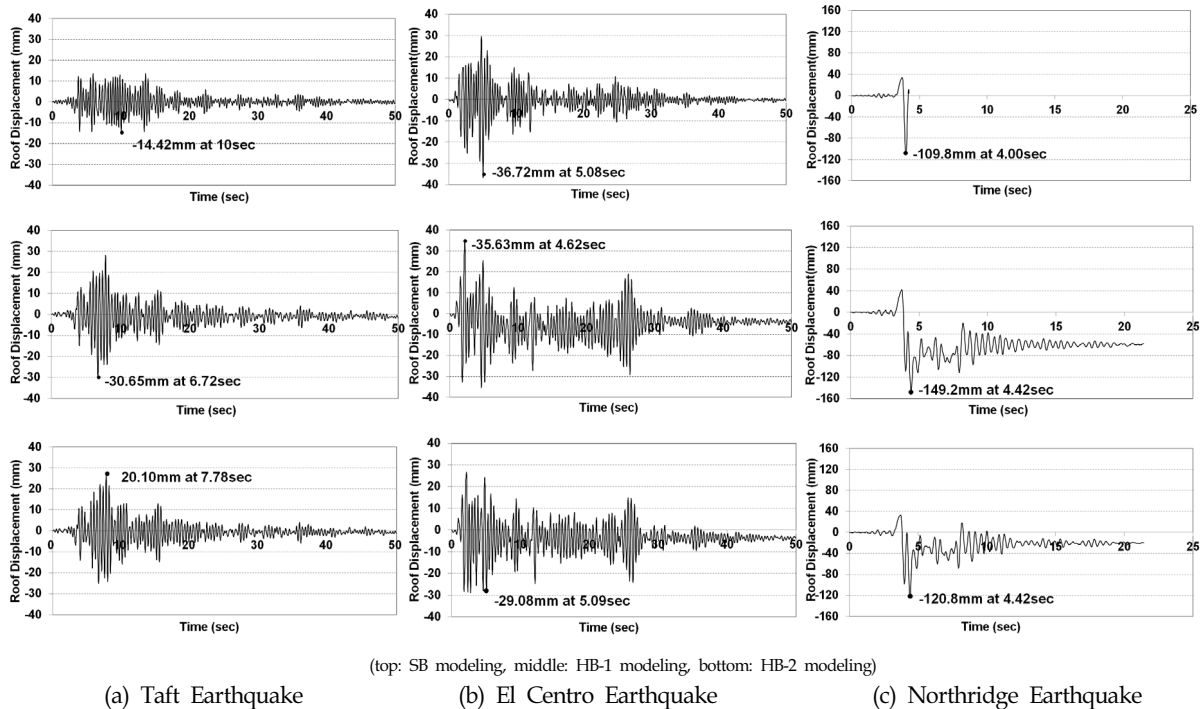
### 4.3 최상층가속도

지진에 대한 가새종류별 해석모델에 대한 최상층 가속도는 <Table 5>, <Fig. 9>와 같다. SB-T의 최상층가속도는 HB-1-T의 최상층가속도에 대한 0.94로 전체적인 거동은 <Table 3>의 최대가속도응답과 유사하다. HB-2-T의 경우 HB-1-T의 1.25로 <Table 5>의 최대가속도응답과 유사한 경향을 보인다. El Centro지진에서는 모든 시스템에서 가속도가 유사하게 발생하였다.

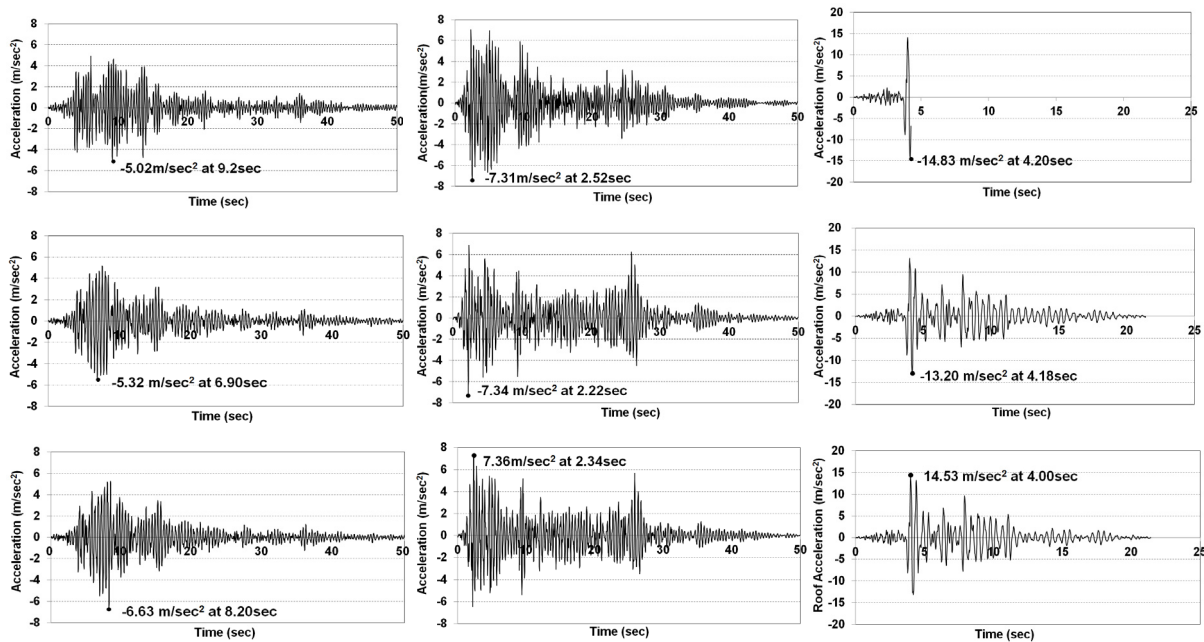
<Table 5> Maximum roof acceleration(m/sec<sup>2</sup>)

	Taft EQ	EL Centro EQ	Northridge EQ
SB	5.02	7.31	14.83
HB-1	5.32	7.34	13.20
HB-2	6.63	7.36	14.53

HB-2-N은 HB-1-N에 비하여 가속도가 10% 더 크게 증가하였다. HB-2가 HB-1보다 더 큰 가속도가 발생하는 이유는 <Table 3>과 같이 각 지진에 대한 HB-2 해석모델의 1차주기에 대한 최대응답이 <Table 3>의 HB-1의 최대응답보다 모두 크기 때문으로 판단된다.



<Fig. 8> Time history of roof displacement(mm)



(top: SB modeling, middle: HB-1 modeling, bottom: HB-2 modeling)

(a) Taft Earthquake (b) El Centro Earthquake (c) Northridge Earthquake

〈Fig. 9〉 Time history of roof acceleration(unit:m/sec<sup>2</sup>)

#### 4.4 가새의 구조성능

##### 4.4.1 누적소산에너지량

해석모델의 1층 가새의 시간에 따른 누적소산에너지량은 <Fig. 10>과 같다. 시간에 따른 지진별 누적소산에너지량은 매시간 변화하므로 해석모델별로 최대누적에너지소산량, 종료시 누적소산에너지량, 누적소산에너지 평균값 항목으로 <Table 6>과 같이 분석하였다.

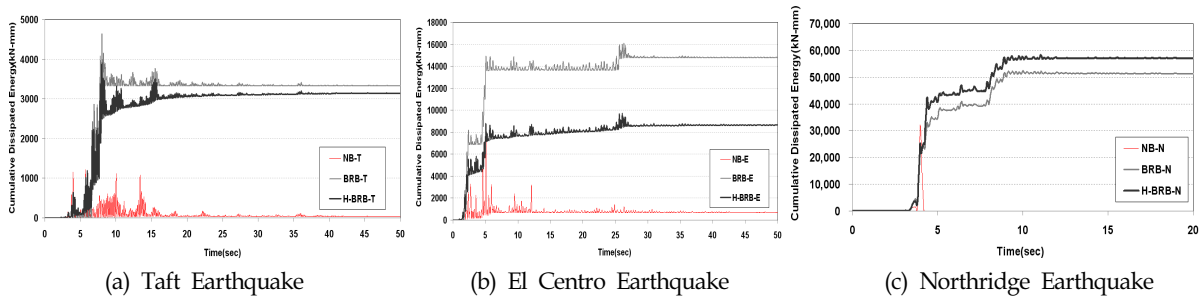
해석결과 SB모델은 최대값과 해석종료시 에너지소산량이 큰 차이를 보이므로, 에너지가 가새 이외

〈Table 6〉 Dissipated Energy(kN·mm)

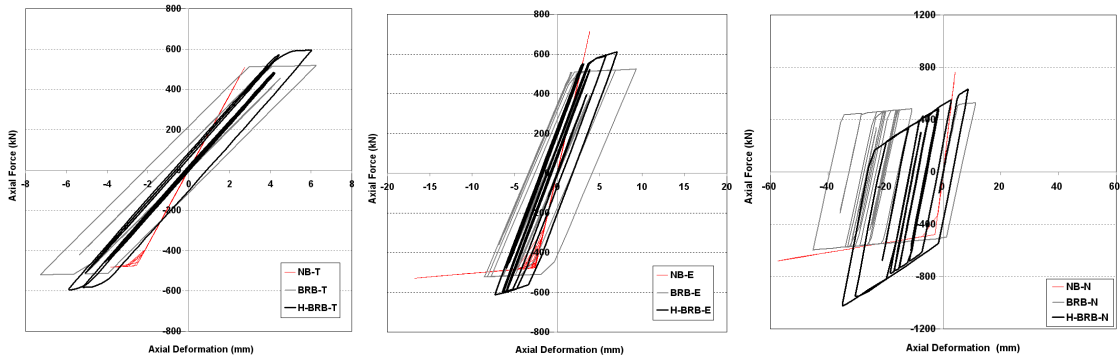
	Taft EQ			EL Centro EQ			Northridge EQ		
	Max	Last step	Average	Max	Last step	Average	Max	Last step	Average
SB	1,216	36	80	8,085	677	772	32,228	304	1,548
HB-1	4,638	3,325	2,897	16,103	14,794	13,388	52,431	51,382	39,062
HB-2	3,902	3,137	2,651	9,694	8,677	7,795	58,364	56,706	43,585

〈Table 7〉 Forces and deformations of braces

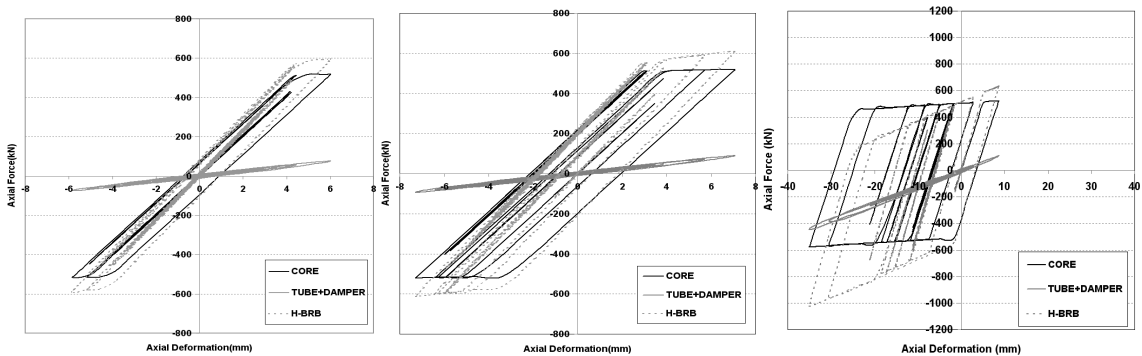
	Taft EQ				EL Centro EQ				Northridge EQ			
	Force(kN)		Deformation(mm)		Force(kN)		Deformation(mm)		Force(kN)		Deformation(mm)	
	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C
SB	510	-481	2.75	-3.81	727	-539	3.85	-16.75	764	-680	4.12	-57.38
HB-1	518	-520	6.24	-7.29	534	-533	9.31	-8.56	528	-597	11.20	-45.26
HB-2	595	-592	6.03	-5.87	609	-614	7.08	-7.26	633	-1023	8.67	-35.00



(a) Taft Earthquake (b) El Centro Earthquake (c) Northridge Earthquake  
 <Fig. 10> Cumulative Dissipated Energy



(a) Taft Earthquake (b) El Centro Earthquake (c) Northridge Earthquake  
 <Fig. 11> Hysteresis curve of brace of 1 story



(a) Taft Earthquake (b) El Centro Earthquake (c) Northridge Earthquake  
 <Fig. 12> Hysteresis curve of HB-2 Components

4.4.2 가새의 이력특성

각 해석모델별로 가장 큰 내력이 발생하는 1층 가새의 이력곡선은 <Fig. 11>과 같으며, 이력곡선의 최대하중과 최대변위는 <Table 7>과 같다. SB모델은 1층 가새의 압축력에 대한 인장력의 비가 0.74 (Taft=539kN/727kN)에서 0.94(El Centro=481kN/510kN)까지 편차를 보인다. 반면 HB-1모델의 경우 골조에 큰 잔류변형이 발생한 Northridge지진(597 kN/528kN=1.13)을 제외한 나머지 모델에서는 인장력과 압축력의 크기가 유사하였다. HB-2모델의 경우 HB-1모델과 유사한 경향을 보이지만, 잔류변형

이 크게 발생한 Northridge지진에서 큰 차이를 보인다(1,023kN/633kN=1.616). 이러한 결과는 심재에 발생한 큰 잔류변형에 의하여 댐퍼부에 비대칭 하중이 발생하였기 때문이다. 이 경우에도 <Fig. 12>와 같이 심재의 축력은 대칭적으로 발생된다. 반면 HB-2는 ANSI/AISC 341-10에서 BRB에 요구하는 압축강도 조정계수(최대압축력에 대한 최대인장력의 비)에 대한 제한값(1.0~1.3)을 크게 초과하여 기준을 충족시키지 못한다.

## 5. 결 론

심재항복이후 댐퍼부 거동유무에 따라 전혀 다른 메커니즘을 갖는 H-BRB의 내진성능평가를 위하여 3층 철골가새골조시스템에 다양한 가새(Steel Brace, H-BRB 타입1, H-BRB 타입2) 및 지진기록(Taft지진, El Centro지진, Northridge지진)을 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 철골가새골조의 경우 골조에 소성힌지가 발생하지 않은 Taft지진을 제외한 다른 지진에서는 골조항복이후 시스템 강성 급격한 저감되면서, 최상층변위와 최상층가속도 모두 증가하였다. 또한 Northridge지진에서는 철골가새의 급격한 좌굴로 보, 기둥에 소성힌지가 발생하여 7.5초에서 갑작스런 붕괴가 발생하였다.

(2) 하이브리드 비좌굴가새는 댐퍼작동과 상관없이 철골가새에 비하여 모든 지진에 대하여 보다 안정적인 거동을 보인다. H-BRB 타입2를 적용한 골조는 타입1을 적용한 경우에 비하여 최상층변위가 0.81(Northridge지진)에서 0.88(Taft지진)로 저감되는 효과가 있다. 반면 최상층가속도는 H-BRB 타입2를 적용한 골조가 H-BRB 타입1을 적용한 경우보다 더 큰 가속도를 나타낸다. 이는 Taft지진, El Centro지진에 대한 하이브리드 비좌굴가새를 사용한 해석 모델의 1차주기 최대응답이 비좌굴가새의 최대응답보다 모두 크기 때문으로 판단된다.

(3) 철골가새골조 해석모델에서 1층 가새의 압축력에 대한 인장력의 비가 0.74(Taft=539kN/727kN)에서 0.94(El Centro=481kN/510kN)까지 차이를 보인다. 반면 HB-1모델은 심재에 잔류변형이 발생하는 Northridge지진(597kN/528kN=1.13)을 제외한 다른 지진파에서는 인장력과 압축력이 대칭으로 발생하였다. HB-2모델의 경우 다른 지진에서는 비좌굴가새 모델과 유사한 경향을 보였지만, 잔류변형이 크게 발생한 Northridge지진에서는 인장력과 압축력 사이에 큰 차이가 발생하였다.

(4) 심재항복이후에도 점탄성 댐퍼가 탈락하지 않고 심재와 함께 거동하는 H-BRB 타입2는 El Centro지진에서와 같이 강성증대에 따른 최상층변위 감소효과가 있지만 감소된 변형에 따른 에너지 소산능력이 저감될 수 있다. 또한 Northridge지진 시에는 잔류변형에 따른 댐퍼부의 비대칭거동으로 ANSI/AISC 341-10에서 규정한 비좌굴가새 요구기준을 초과하고 있다. 따라서 H-BRB가 건물에서 내진성능을 확보하기 위하여는 심재 항복이후 댐퍼부가 작동하지 않는 H-BRB 타입1로 사용되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비지원(13AUDP-B066083-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. I.D. Aiken, S.A. Mahin, and P. Uriz, "Large-Scale Testing of Buckling-Restrained Braced Frames", Japan Passive Control Symposium, Tokyo Institute of Technology, Japan, 2002.
2. D.H. Kim, C.H. Lee, Y.K. Ju and S.D. Kim, "Subassembly test of buckling-restrained braces with H-shaped steel core", Struct. Design Tall Spec. Build. doi: 10.1002/tal.1164, 2014.
3. AIK, Korean Building Code of Structural, Architectural Institute of Korea, Korea, 2009
4. D.H. Kim, Y.K. Ju, M.H. Kim, W.G. Sung and S.D. Kim, "Experimental Study on the Vibration Control Capacity of Hybrid Buckling-Restrained Braces", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.21, No.1, pp.83~92, 2009.
5. D.H. Kim, Y.K. Ju, M.H. Kim and S.D. Kim, "Wind-induced vibration control of tall buildings using hybrid buckling-restrained braces", Struct. Design Tall Spec. Build.



- Vol.23, No.7, pp.549~562, 2014.
6. M.H. Kim, S.W. Yoon, Y.K. Ju and D.H. Kim, "Analytical Study on the Optimum Design of Hybrid Buckling-Restrained Braces", Journal of Korea Society of Hazard Mitigation, Vol.14, No.2, pp.35~41, 2014.
  7. D.H. Kim, "Experimental Study on the Seismic Performance of Hybrid Buckling-Restrained Braces", Journal of Korea Society of Hazard Mitigation, Vol.13, No.4, pp.23~30, 2013.
  8. AISC, Seismic Provision for Structural Steel Buildings(ANSI/AISC 341-10), American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, 2010.
  9. L.A. Fahnestock, R. Sause and J.M. Ricles, "Seismic Response and Performance of Buckling-Restrained Braced Frames," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 133, No 9, pp.1195~1204, 2007.
  10. V. Prakash, G.H. Powell and S. Campbell, DRAIN-2DX base program description and user guide-Version 1.10, Report No. UCB/SEMM-93/17 and Structural Engineering Mechanics and Materials, Dept. of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley, 1993.

(접 수 일 자 : 2014년 05월 30일)

(심사완료일자 : 2014년 06월 23일)

(게재확정일자 : 2014년 06월 30일)