

하이브리드 비좌굴가새의 진동제어능력에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Vibration Control Capacity of Hybrid Buckling-Restrained Braces

김도현¹⁾† · 주영규²⁾ · 김명한³⁾ · 성우기⁴⁾ · 김상대⁵⁾

Kim, Do Hyun · Ju, Young Kyu · Kim, Myung Han · Sung, Woo Gi · Kim, Sang Dae

요약 : 비좌굴가새는 우수한 내진성능을 보이는 시스템이다. 그러나 비좌굴가새는 약진이나 바람과 같은 하중에 대하여 에너지를 소산시키지 못한다. 기존의 비좌굴가새의 풍저항 성능을 개선한 하이브리드 비좌굴가새(H-BRB)는 비좌굴가새와 점탄성댐퍼로 구성된 복합댐퍼시스템의 일종이다. 본 논문에서는 탄성영역에서 H-BRB의 구조성능을 확인하기 위하여 심재가 다른 두 개의 실험체에 대한 실험이 수행되었다. H-BRB 시스템에 대한 탄성영역에서의 거동메카니즘 검증에 위하여 주저항요소와 2차 저항요소의 축변형량과 에너지소산 능력을 비교하였다. 실험결과 댐퍼부에서 이면전단을 사용한 H-BRB는 우수한 구조성능을 보이며, 고층건물의 사용성 수준을 향상시키기 위하여 적용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT : Buckling Restrained Braces (BRBs) show good seismic behavior. They do not dissipate energy, however, when they are subjected to minor earthquakes or wind. Hybrid Buckling Restrained Braces (H-BRBs), which can improve the wind performance of the BRB system, are a kind of hybrid damper system composed of a viscoelastic damper and BRBs.

In this paper, two H-BRB specimens with different cores were experimentally investigated to ensure the structural behavior of the H-BRB system in an elastic range. The axial deformation of the primary resisting system was compared with that of the secondary resisting system, and the equivalent damping ratio of the H-BRBs was estimated. It was concluded that H-BRBs with double shear dampers show good structural behavior and are applicable to tall buildings, to improve the building performance at a comfortable level.

핵심용어 : 비좌굴가새, 에너지 소산, 점탄성댐퍼, 이력댐퍼

KEYWORD : buckling-restrained brace(BRB), energy dissipation, viscoelastic damper, hysteretic damper

1. 서론

철골 모멘트 골조 건물에서 가새는 가새는 상대적으로 높은 강성과 강도를 가지고 있기 때문에 지진이나 바람과 같은 수평하중에 저항하는 횡력저항요소로서 이용된다. 가새시스템은 우수한 횡력저항 시스템으로 과도한 수평변위로 인해 발생하는 손상을 조절하는 데 도움을 준다. 그러나 설계지진하중 이상의 지진과 같은 극한 하중이 작용할 경우 가새의 좌굴로 인하여 강성과 강도가 급격하게 저하되고 불안정한 거동을 보이며 에너지 소산량도 같이 작아진다(이강민, 2003).

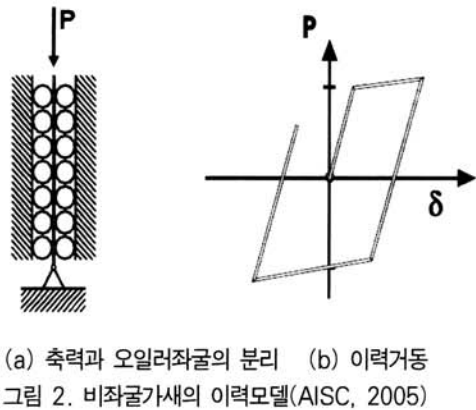
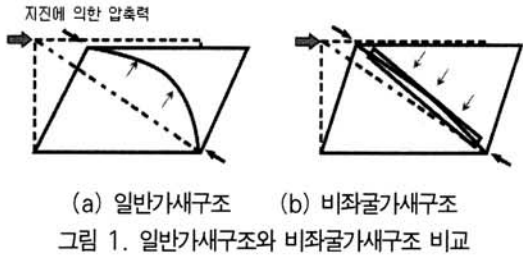
이러한 가새시스템 좌굴에 의한 내력저하 성능을 개선하기

위하여 비좌굴가새(Buckling-Restrained Braces)시스템은 1990년 일본에서 처음 개발되어, 이후 미국과 일본을 중심으로 다양한 형상이 개발되었다(Aiken 등, 2002). 그림 1과 같이 큰 지진하중을 받을 때 중심부 철골부재가 전체 혹은 국부적인 좌굴이 발생하지 않고 큰 비탄성 변형이 발생하도록 중심부의 철골부재 주위를 강관을 이용하여 좌굴을 구속하여, 안정적인 이력거동에 의하여 많은 에너지를 소산할 수 있게 한다. 비좌굴가새는 큰 하중하에서 그림 2와 같이 높은 누적 소성률을 가짐으로써 FEMA 450(2004)에 처음으로 지진력저항시스템으로 도입되었다. 이후 미국에서는 일반적인 하중기준인 ASCE 7-05과 강구조 내진설계기준인 AISC Seismic

1) 교신저자. (주)동양구조안전기술 구조공학시스템연구소, 실장
(Tel. 02-549-3744, Fax. 02-549-3745, E-mai : dhkim@dysec.co.kr)
2) 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수, 공학박사(tallsite@korea.ac.kr)
3) 대진대학교 건축공학과 조교수, 공학박사(mhk314@dajin.ac.kr)
4) CS구조엔지니어링 사원(saintrs@nate.com)
5) 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사(sdk@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Provision(2005)에 반응수정계수가 높은 지진력저항시스템 ($R=8$)으로 사용되고 있으며, 일본에서는 이력댐퍼로 이용되고 있다. 특히 비좌굴가새는 보와 기둥의 접합부를 전단접합으로 처리하면 보나 기둥에 소성힌지가 발생하지 않으며 모든 손상은 비좌굴가새에 집중하게 된다. 중력하중을 분담하지 않는 가새는 쉽게 교체가 가능하므로 지진 이후 구조물의 관리 및 보수보강에 큰 장점이 있다.



이러한 비좌굴가새는 항복이후 대변형이 발생하면, 누적소성변형을 통하여 큰 에너지를 소산하는 이력댐퍼이다. 따라서 항복하중보다 작은 하중에서 비좌굴가새는 탄성거동을 하므로 에너지 소산량이 없기 때문에, 큰 지진하중이 아닌 약진 지진이거나 풍하중에서는 비좌굴가새는 효율적으로 거동할 수 없다.

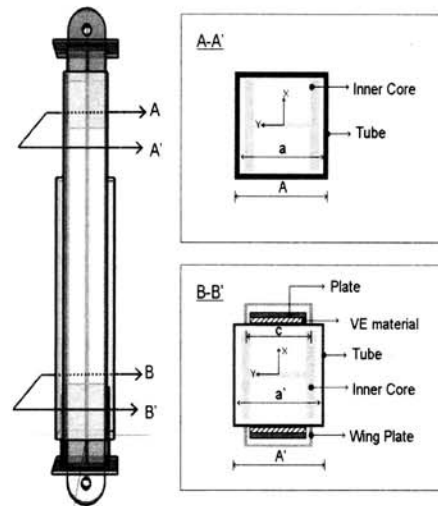
최근 들어 국내에 여러 초고층건물이 들어서면서 약 40층 전후로 지진하중이 아닌 풍하중이 건물의 지배 횡력이 되는 경우와 바람에 대한 사용성이 문제가 되는 경우가 자주 발생한다. 하지만 비좌굴가새는 지진하중이 지배하는 경우에는 우수한 성능을 발휘하지만, 약진이나 풍하중과 같이 비좌굴가새가 탄성영역에 머무르는 경우에는 에너지를 소산시키지 못하므로 댐퍼로서 거동하지 못한다. 따라서 고층건물 적용을 위하여 기존의 비좌굴가새의 지진하중에 대한 에너지 소산능력 이외에도 풍하중에 대하여도 진동제어능력을 가지는 하이브리드 비좌굴가새시스템(Hybrid Buckling-Restrained Brace System: 이하 H-BRB)의 개발이 필요하게 되었다.

2. 하이브리드 비좌굴가새시스템

본 논문에서 개발한 H-BRB는 지진에 효과적인 기존의 비좌굴가새시스템의 적용범위를 약진 및 풍하중에 의한 사용성 향상에 이르기까지 확대시킨 새로운 개념의 복합댐퍼시스템이다.

2.1 H-BRB System 구성요소

H-BRB는 그림 3과 같이 비좌굴가새 부분(A-A')과 튜브 외측에 부착된 점탄성 댐퍼부분(B-B')으로 구분된다. 점탄성 댐퍼부분은 바람과 약진 발생시 비좌굴가새 심재가 탄성범위 내에서 머무르기 때문에 댐퍼부가 에너지를 소산시키고, 기존 비좌굴가새 부분은 대지진시 비좌굴가새 심재는 비탄성범위에서 에너지를 소산시키는 개념이다. 즉 H-BRB는 탄성영역에서는 H-BRB의 심재(Inner Core)의 변위를 통한 점탄성 댐퍼(Viscoelastic Damper)와 같이 거동하며, 지진과 같이 심재가 비탄성영역에서 거동하는 경우 댐퍼부는 탈락되어 기존의 비좌굴가새와 같은 이력댐퍼(Hysteresis Damper)로 거동한다.



2.2 H-BRB System 거동 메커니즘

기존의 비좌굴가새의 경우 그림 4와 같이 비좌굴가새의 심재만 거동하고, 탄성영역에서는 선형거동을 하기 때문에 에너지를 소산시킬 수 없다.

H-BRB 시스템은 크게 기존의 비좌굴가새와 댐퍼부로 구분된다. H-BRB 시스템은 지진과 같은 비탄성영역에서 기존 비좌굴가새와 같은 이력댐퍼로 거동하고, 풍하중과 같은 탄성

영역에서는 댐퍼부에 의한 점탄성댐퍼로 거동하여야 한다.

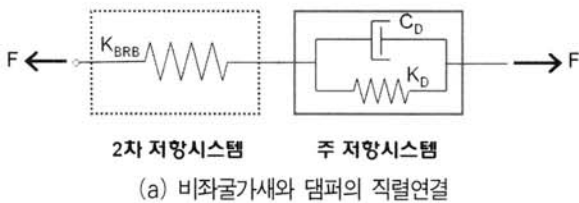
비좌굴가새와 댐퍼부의 연결방법으로 그림 5와 같이 직렬 연결과 병렬연결이 가능하다. H-BRB 시스템의 거동 메커니즘을 구현하기 위한 연결방법을 검토하였다.

직렬연결의 경우 비좌굴가새 심재와 댐퍼부에 작용하는 하중이 같다. 이 경우 댐퍼부에 비하여 상대적으로 강성이 큰 비좌굴가새의 심재는 변형이 발생하지 않고, 기존의 오일댐퍼와 같이 점성댐퍼에 하중을 전달하는 강체와 같은 철골가새의 역할을 하게 된다. 따라서 직렬연결시에는 큰 지진하중에서도 변위가 댐퍼부에 집중되므로, 댐퍼부가 주저항시스템이 되고, 비좌굴가새는 2차 저항요소가 되므로, H-BRB 시스템의 거동을 기대할 수 없다.

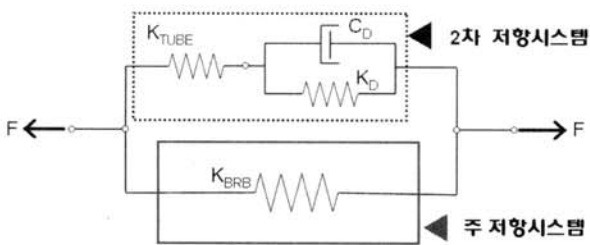
병렬연결의 경우 댐퍼부와 비좌굴가새 보강재의 변위 합이 비좌굴가새 심재의 변형량과 같다. 따라서 하중에 주로 저항하는 요소는 비좌굴가새가 되며, 이때 발생하는 변형량에 의하여 댐퍼부에서 에너지가 소산된다. 댐퍼부는 비좌굴가새 심재에 발생하는 변형량에 의존하기 때문에 탄성영역에서는 감쇠율 기여가 크지만 비좌굴가새가 항복한 이후에는 에너지 소산에 대한 기여가 작다.



그림 4 비좌굴가새와 메커니즘



(a) 비좌굴가새와 댐퍼의 직렬연결



(b) 비좌굴가새와 댐퍼의 병렬연결(H-BRB)

그림 5. 댐퍼연결방법에 따른 거동메커니즘

3. 실험계획

3.1 실험체 설계

본 연구에서는 탄성영역에서의 H-BRB의 거동메커니즘 확보와 댐퍼부의 연결방법에 따른 감쇠성능을 검증하기 위하여 인장-압축 반복가력실험을 수행하였다. H-BRB 실험체의 심재는 박만우 등(2007)이 실험하여 우수한 거동을 보인 비좌굴가새 실험체의 심재인 H-150×150×7×10(SS400)에 H-125×125×6.5×9(SS400)를 추가로 사용하였다(표 1, 그림 6). 그리고 접합부를 부재의 전체 길이는 2,540mm, 양단부는 '+자형 볼트접합부'로 설계하였다. 심재의 축력을 접합부로 전달하기 위하여 엔드플레이트는 30mm 철판을 사용하였다. 비좌굴가새 심재의 탄성영역에서 단부에 설치된 댐퍼는 그림 9와 같은 연결방법에 따라 그림 5(b)의 H-BRB 거동메커니즘에서 각 부분의 강성과 댐퍼부의 강성과 감쇠율을 사용하여 표 2의 등가감쇠율을 산정하였다. 또한 목표 등가감쇠율은 국내 제작과 실험을 고려하여 일반적인 철골구조물의 감쇠율(1%)을 최대 1.9배 가까이 증가시킬 수 있도록 설정하였다.

표 1 실험체 제원

실험체		H-BRB-150	H-BRB-125
심재	강종	SS400	
	단면	H-150×150×7×10	H-125×125×6.5×9
		4,014mm ²	3,031mm ²
	길이	2,000mm	
Py	943.3kN	712.4kN	
보강재	강종	SM490	
	단면	□-177×177×11	□-152×152×11
		길이	1,900mm
	Pe	1,861.2kN	1,579.2kN
Pe/Py	1.97	2.22	

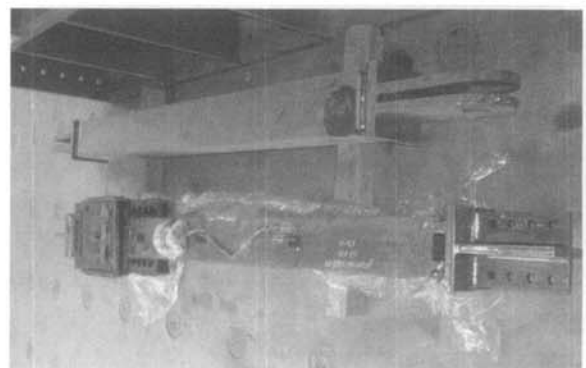


그림 6. 실험체 전경(상 : BRB, 하 : H-BRB)

표 2. H-BRB 실험체 예상 등가감쇠율(ζ_{eq})

	H-BRB-125	H-BRB-150
일면전단	1.217%	0.937%
이면전단	1.900%	1.712%

3.2 실험체 제작

실험체는 시공순서를 고려하여 심재제작, 심재의 단부보강, 보강재의 제작, 심재와 보강재의 결합, 보강재의 단부보강, 댐퍼의 단부설치 순으로 제작하였다(그림 7,8). 기존의 비좌굴가새의 심재와 보강재의 비부착으로 인한 이탈방지를 위하여 보강재 결합 전에 심재의 상하부 플랜지에 스톱퍼(Stopper)를 설치한다. H-BRB는 주저항시스템인 심재와 2차 저항시스템인 댐퍼부를 그림 5(b)와 같이 병렬 연결하기 위하여 댐퍼부가 설치되지 않은 보강재의 한쪽 단부를 스톱퍼에 용접하였다.

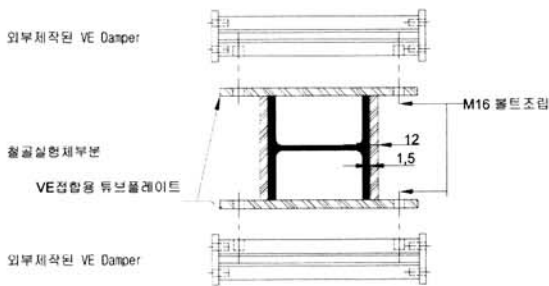


그림 7. 댐퍼와 비좌굴가새 보강재의 접합

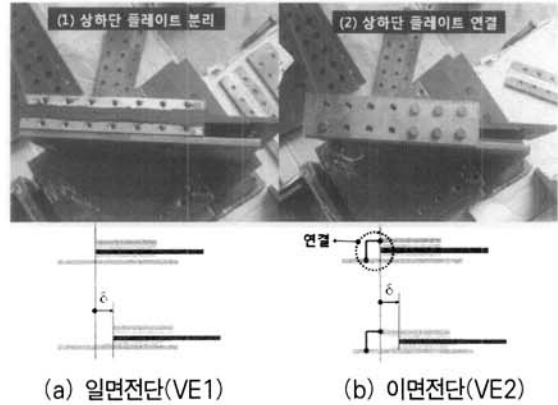


그림 8. H-BRB의 댐퍼조립전경

3.3 댐퍼

본 실험체에 적용된 댐퍼부에 국내에서 제작된 천연고무(Natural Rubber)를 사용하였다. 실험시 온도는 10.1°C였고, 저경도 고무계의 경우 온도가 증가시 등가감쇠율이 증가하는 경향이 있다(정길영 등, 2002). 댐퍼부는 천연고무의 가황 작업 이후 BRB 보강재에 볼트로 접합하였다(그림 7). 댐퍼는

비좌굴가새 심재에 병렬로 연결되어, 심재의 변형량에 의존하여 에너지를 소산한다. 실험체에 사용된 댐퍼는 측면연결플레이트 유무에 따라 그림 9와 같이 댐퍼부의 거동이 달라진다.



(a) 일면전단(VE1) (b) 이면전단(VE2)
그림 9. 연결방법에 따른 댐퍼의 거동

측면 연결플레이트가 없는 경우 그림 9(a)의 하단 플레이트만 작동되는 일면전단 조건(VE1)이며, 측면 플레이트가 있는 경우 그림 9(b)의 상하단 플레이트가 동시에 작동하는 이면전단 조건(VE2)이 형성된다. 따라서 댐퍼작동방법에 따른 댐퍼부 감쇠성능을 비교하기 위하여 그림 9와 같이 측면 연결플레이트 유무에 따른 실험을 수행하였다. 그림 9(b)의 이면전단 조건에서 댐퍼부에 대한 재료실험결과 전단강성은 61.07kN/mm이며, 댐퍼부의 등가감쇠는 10%이다.

3.4 실험체 설치와 가력계획

실험체 가력도는 가력골조 높이는 2,300mm이고, 길이는 2,800mm인 부분골조에 실험체를 설치하여 가력하였다(그림 10). 가력액추에이터의 최대하중은 2,000kN이며, 가력장치와 반력블럭을 핀으로 연결하여 단부조건을 힌지로 구현하였다. 가새접합부는 볼트접합부를 사용하였다. 또한 기둥 상부에 볼지그를 설치하여 골조의 면외변형을 방지하였다(그림 11).



그림 10. 실험체 세팅 전경

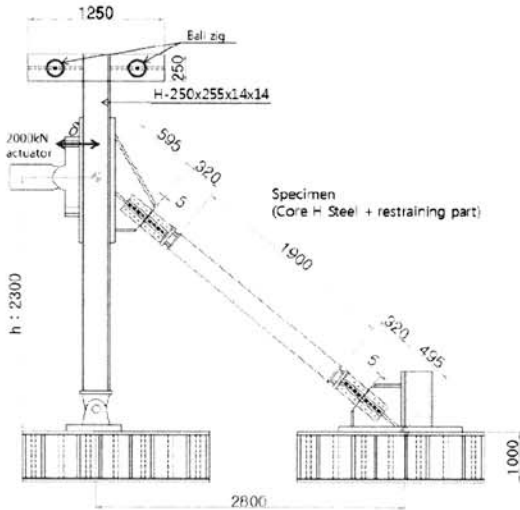


그림 11. 실험체 가력도

그림 12와 같이 변위계를 사용하여 골조의 층간변위, 가새의 축방향 변형, 접합부 슬립, 댐퍼부 변위를 측정하였다. 스트레인 게이지를 보강재 결합 전에 심재 양단부와 중앙부 웨브와 플랜지의 변형률을 측정하였다(그림 13). 보강재 결합 후에는 튜브와 댐퍼 연결플레이트에 스트레이저를 부착하여 변형률을 측정하였다(그림 14).

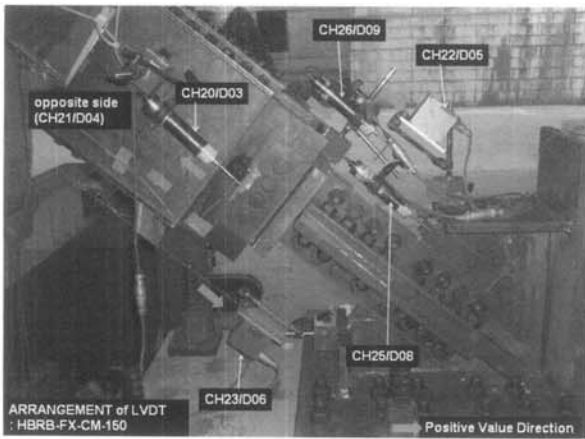


그림 12. 접합부 LVDT설치

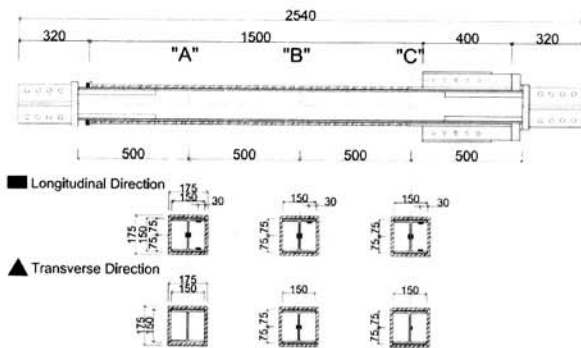


그림 13. 실험체 게이지 위치(심재)

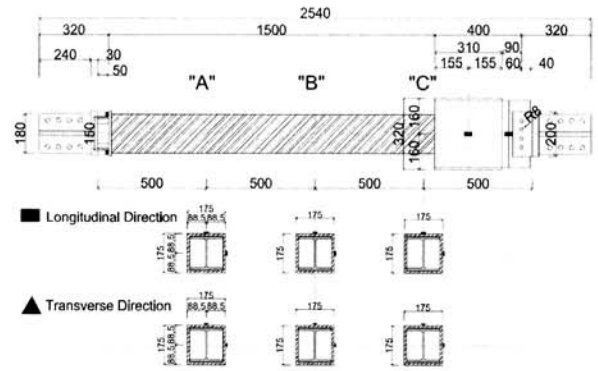


그림 14. 실험체 게이지 위치(보강재 및 댐퍼)

H-BRB의 탄성영역에서의 이력거동을 분석하기 위하여 사용된 실험변수는 댐퍼작동방식의 심재 축방향변형량이다. 따라서 댐퍼작동방식에 따라 일면전단(VE1), 이면전단(VE2) 조건을 구현하였고, 목표변위는 풍하중시의 변위로 심재항복 변위의 20%(0.2 Δ_{yb}), 30%(0.3 Δ_{yb}), 40%(0.4 Δ_{yb})을 상정하였다. 이때 사용된 가력계획은 표3과 같다. 또한 실험체는 풍하중조건에 맞는 1Hz보다 작은 가진주파수(0.06Hz~0.6Hz)가 발생하도록 다양한 속도(0.096mm/sec~1.530 mm/sec)로 각 2회씩 가력하였다.

표 3. 가력속도(mm/sec)

댐퍼작동 방식	가력 Cycle	H-BRB 125		H-BRB 150	
		0.2 Δ_y	0.3 Δ_y	0.3 Δ_y	0.4 Δ_y
일면 전단 VE1	2회	0.765	/	/	1.530
	2회	0.383			0.765
	2회	0.191			0.383
	2회	0.096			0.191
이면 전단 VE2	2회	0.765	1.530	1.530	/
	2회	0.383	0.765	0.765	
	2회	0.191	0.383	0.383	
	2회	0.096	0.191	0.191	

4. 실험결과 및 분석

실험결과는 댐퍼작동방식인 일면전단(VE1)과 이면전단(VE2)으로 구분하여 정리하였다. 본 실험결과를 토대로 탄성영역에서 하이브리드 비좌굴가새의 주저항요소(비좌굴가새 심재)와 2차 저항요소(댐퍼부+비좌굴가새 보강재) 간의 이력거동과 H-BRB 시스템의 감쇠성능을 평가하였다.

4.1 등가감쇠 산정

H-BRB의 탄성영역에서의 등가감쇠율(ζ_{eq})은 식(1)에 따라 산정할 수 있다(Chopra, 2001). 그림 15의 탄성에너지(E_{So})와 한 사이클을 통해 소산되는 에너지(E_D)를 산정하면, 등가감쇠율(ζ_{eq})은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{So}} \quad (1)$$

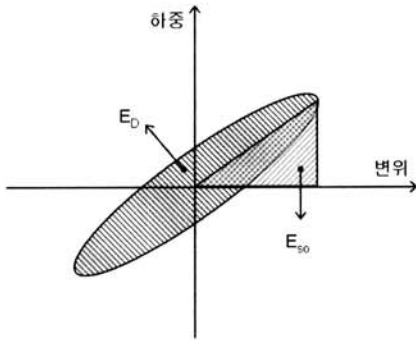


그림 15. 등가감쇠율(ζ_{eq})산정

4.2 댐퍼부 일면전단거동(VE1) 실험

4.2.1 축방향 변형량 비교

H-BRB 시스템의 메커니즘에 따르면 주저항요소인 심재와 보강튜브와 댐퍼로 이루어진 2차 저항요소가 병렬로 연결되어 있으므로 발생하는 변형이 같다. 따라서 H-BRB의 거동 메커니즘을 검증하기 위하여 주저항요소와 2차 저항요소의 변위 크기를 비교하였다.

댐퍼부 일면전단조건의 실험결과를 정리하면 표4와 같다. 실험체 H-BRB 125에 심재항복변형의 20%까지 가력한 경우 표4의 심재평균변형은 0.27mm이고, 2차 저항요소의 댐퍼부와 보강재의 변형의 합은 0.10mm로 심재의 축방향 변형량과 큰 차이를 보인다(그림 16). 또한 H-BRB 150에 심재항복변형의 40%까지 가력한 경우에도 심재평균변형은 0.636mm인 반면, 2차 저항요소의 댐퍼부와 보강재의 변형의 합은 0.223mm로 H-BRB 125와 같이 심재의 축방향 변형량과 큰 차이를 보인다(그림 17). 따라서 댐퍼부의 일면전단(VE1)조건에서는 H-BRB의 하중전달 메커니즘이 확보되지 않음을 알 수 있다.

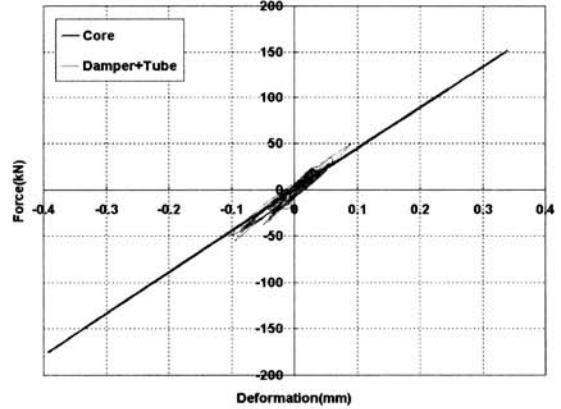


그림 16. H-BRB125 구성요소의 이력거동

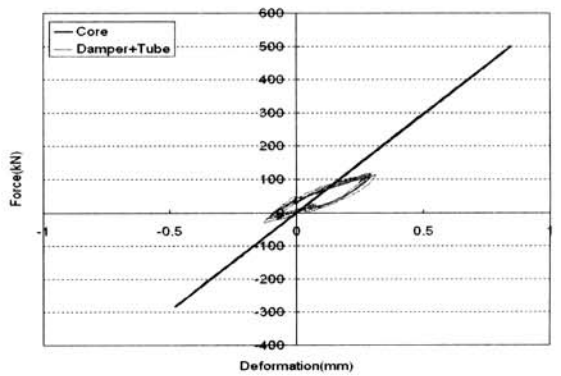


그림 17. H-BRB150 구성요소의 이력거동

4.2.2 등가감쇠율

실험체 H-BRB 125에 심재항복변형의 20%까지 가력한 경우, 각 사이클별 H-BRB 시스템 등가감쇠율(ζ_{eq})의 평균은 0.203%로 표 2의 예상 등가감쇠율 1.217%에 크게 미치지 못하였다. 또한 H-BRB 150에 심재항복변형의 40%까지 가력한 경우에도 각 사이클별 H-BRB 시스템 등가감쇠율(ζ_{eq})의 평균은 0.408%로 표 2의 예상 등가감쇠율 0.937%에 미치지 못하였다.

표 4. VE1 실험조건서 결과정리

cycle	실험체 H-BRB 125 (심재항복변형의 20%까지가력)		실험체 H-BRB 150 (심재항복변형의 40%까지가력)	
	ζ_{eq} (%)	심재변형량 ¹⁾ (mm)	ζ_{eq} (%)	심재변형량 (mm)
1	0.177	0.252	0.413	0.629
2	0.212	0.243	0.409	0.625
3	0.217	0.247	0.405	0.632
4	0.208	0.319	0.469	0.643
5	0.203	0.262	0.396	0.654
6	0.206	0.270	0.409	0.623
7	0.199	0.274	0.404	0.604
8	0.202	0.293	0.361	0.679
평균	0.203	0.270	0.408	0.636

1) 각 사이클별 최대인장 및 압축시 발생하는 심재변형량의 평균값

4.3 댐퍼부 이면전단거동(VE2) 실험

4.3.1 축방향 변형량 비교

댐퍼부 이면전단조건의 실험결과를 정리하면 표5와 같다. 실험체 H-BRB 125에 심재항복변형의 20%까지 가력한 경우(그림 18)의 심재평균변형은 0.272mm, 심재항복변형의 30%까지 가력한 경우(그림 19)의 심재평균변형은 0.434mm이며, 2차 저항요소의 댐퍼부와 보강재의 변형의 합은 각각 0.263mm, 0.424mm로 주저항요소와 2차 저항요소의 축변형량이 유사하다. 또한 H-BRB 150에 심재항복변형의 30%까지 가력한 경우에도 심재평균변형은 0.505mm인 반면, 2차 저항요소의 댐퍼부와 보강재의 변형의 합은 0.495mm로 주저항요소와 2차 저항요소의 축변형량이 유사하다(그림 20). 따라서 댐퍼부의 이면전단(VE2) 조건에서는 H-BRB의 하중전달 메커니즘이 확보됨을 알 수 있다.

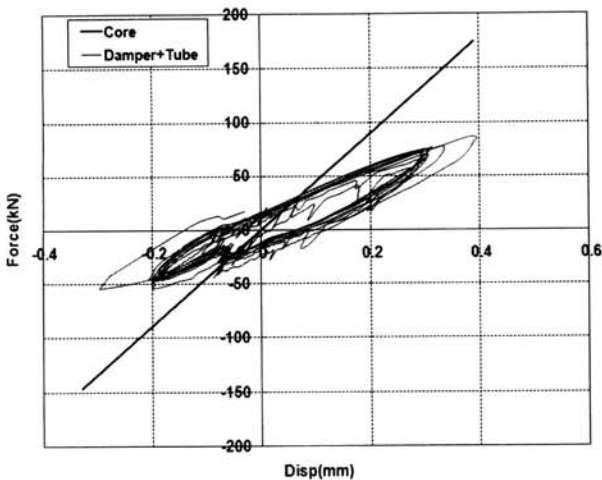


그림 18. H-BRB125 구성요소의 이력거동(1)

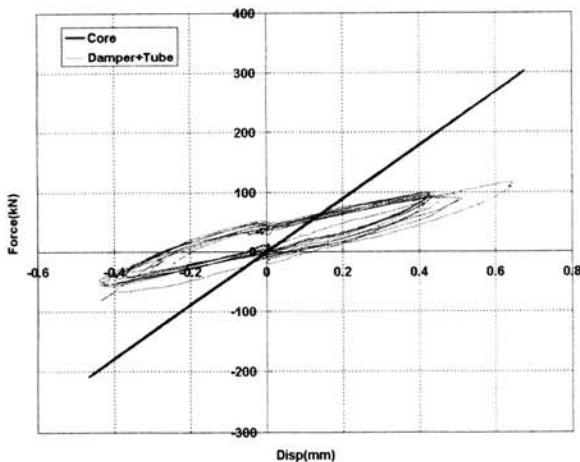


그림 19. H-BRB125 구성요소의 이력거동(2)

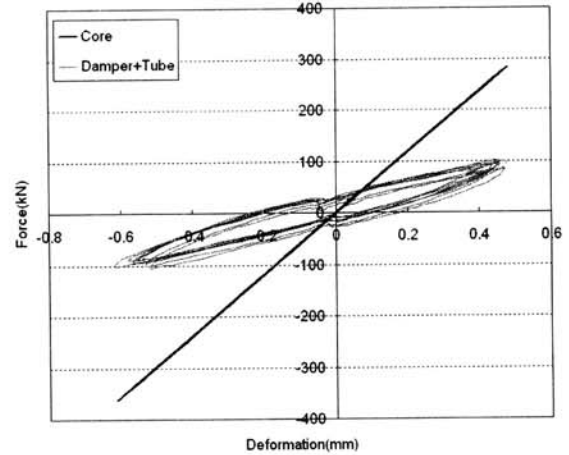


그림 20. H-BRB150 구성요소의 이력거동

4.3.2 등가감쇠율

실험체 H-BRB 125에 심재항복변형의 20%와 30%까지 가력한 경우, 각 사이클별 H-BRB 시스템 등가감쇠율(ζ_{eq})의 평균은 각각 1.799%, 1.984%이다. 다양한 가력속도에 따른 감쇠율 분포는 평균값의 -8.6%에서 8.4%로, 감쇠율이 평균값의 $\pm 9\%$ 내에서 차이를 보이므로 등가감쇠율에는 가력속도가 큰 영향을 미치지 않는다. 이 내용을 논문에 반영하였 습니다. 이 두 값의 평균인 1.873%는 표 2의 예상 등가감쇠 율 1.90%의 0.985(= 1.900/1.873)이다. 또한 H-BRB 150에 심재항복변형의 30%까지 가력한 경우에도 각 사이클 별 H-BRB 시스템 등가감쇠율(ζ_{eq})의 평균은 1.409%로 표 2의 예상 등가감쇠율 1.712%의 0.820(1.409% / 1.712%) 로 약간 작은 값을 보인다.

표 5. VE2 실험조건서 결과정리

cycle	H-BRB 125				H-BRB 150	
	심재항복변형의 20%까지가력		심재항복변형의 30%까지가력		심재항복변형의 30%까지가력	
	ζ_{eq} (%)	심재 변형량 (mm)	ζ_{eq} (%)	심재 변형량 (mm)	ζ_{eq} (%)	심재 변형량 (mm)
1	1.943	0.246	1.807	0.448	1.453	0.496
2	1.710	0.271	2.021	0.469	1.473	0.483
3	1.641	0.311	2.047	0.406	1.454	0.502
4	1.716	0.289	2.045	0.416	1.402	0.478
5	1.798	0.256	2.015	0.413	1.434	0.519
6	1.864	0.260	2.011	0.433	1.354	0.515
7	1.771	0.317	1.964	0.429	1.385	0.536
8	1.951	0.227	1.962	0.458	1.316	0.510
평균	1.799	0.272	1.984	0.434	1.409	0.505

5. 사용성 평가

캐나다 기준(National Building Code of Canada, 1990)에서 바람에 의한 진동에 대하여 풍향방향 가속도(a_D)와 풍직각 방향 가속도(a_W)를 식(2)와 식(3)과 같이 제안하고 있다.

$$a_D = g_p \sqrt{\frac{K_s F}{C_e \beta_D}} \left(\frac{3.0}{2 + \alpha} \right) \left(\frac{C_e q}{D \rho_B} \right) \quad (2)$$

$$a_W = n_w^2 g_p \sqrt{WD} \left(\frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \right) \quad (3)$$

만약 식(2), 식(3)의 모든 계수가 동일하다면, 가속도(a_D, a_W)는 감쇠율(β_D, β_w)의 제곱근에 반비례한다.

본 실험에 사용된 이면전단 댐퍼를 갖는 실험체 H-BRB 125를 심재항복변형 20%까지 가력한 경우 등가감쇠율은 1.799%이다. 또한 골조와 H-BRB시스템의 횡강성비가 각각 50%인 경우, H-BRB가 전체 시스템에서 횡강성비가 1/2이므로 감쇠율도 약 1/2인 0.90%이다.

캐나다 기준에서는 사용성 평가시 감쇠율로 철골조는 1%, 철근콘크리트조는 2%를 제안하고 있다. 따라서 BRB시스템이 적용된 철골조의 감쇠율을 1.0%로 본다면, 위의 H-BRB 125실험체가 적용된 철골조의 감쇠율은 1.9%가 된다. 가속도는 감쇠율의 제곱근에 반비례하므로 H-BRB 시스템이 적용된 경우 가속도는 BRB시스템이 적용된 철골조의 가속도의 약 73%로 저감시킬 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 H형강을 심재로 사용한 BRB부재 실험에서 안정적인 이력거동을 보인 실험체에 댐퍼부를 추가하여 개발한 하이브리드 비좌굴가새의 탄성영역에서의 하중전달 메커니즘과 H-BRB 시스템의 감쇠능력을 검증하기 위하여 수행된 실험에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 댐퍼부가 일면전단으로 구성된 경우(VE1) 2차 저항요소에 대한 주저항요소의 비는 0.35~0.37이다. 또한 실험의 등가감쇠율에 대한 이론값의 비는 0.167~0.435이다. 따라서 일면전단조건인 경우 H-BRB 시스템의 하중전달 메커니즘과 감쇠율 확보가 이루어지지 않는다.
- (2) 병렬연결의 경우 주저항요소의 변형량과 2차 저항요소

의 변형량은 같다. 댐퍼부가 이면전단으로 구성된 경우(VE2) 2차 저항요소에 대한 주저항요소의 비는 변형량의 비가 실험체 H-BRB 125는 0.967~0.977이다. 또한 실험체 H-BRB 150은 0.980이다. 따라서 댐퍼부가 이면전단조건을 갖는 경우, 병렬로 연결된 주저항요소와 2차 저항요소의 변형량이 매우 유사하므로 H-BRB 시스템의 하중전달 메커니즘이 확보됨을 확인하였다.

- (3) 댐퍼부가 이면전단으로 구성된 경우(VE2)의 등가감쇠율을 비교하면, H-BRB-125 실험체의 경우 이론값 1.900%의 0.985인 1.873%, H-BRB-150 실험체의 경우 이론값 1.712%의 0.820인 1.409%이다. 따라서 탄성영역에서 예상감쇠율이 확보되었다.
- (4) 캐나다 기준의 바람에 의한 가속도 산정식으로부터 가속도는 감쇠율의 제곱근에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이면전단으로 구성된 H-BRB시스템 고층건물 적용시 가속도 저감 효과가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구에 사용된 감쇠장치를 제공해주신 (주)동일DRB에 감사의 마음을 전합니다.

참고 문헌

박만우, 주영규, 김명한, 김도현, 김상대(2007), 콘크리트 비층 전형 비좌굴 가새의 구조적 거동평가, 한국강구조학회 2007년도 학술발표대회 논문집, pp. 207~212.

이강민(2003), 기존실험자료를 통한 압축 철골가새의 반복 이력 거동에 관한 고찰, 한국강구조학회 논문집, Vol. 15, No. 4, pp. 359~368.

정길영, 하동호, 박건록, 권형호(2002), 저경도 고무받침의 특성에 관한 실험적 연구, Vol. 6, No. 4, pp. 39~49.

Aiken, I.D., Mahin S.A. and Uriz,P.(2002), *Large-Scale Testing of Buckling-Restrained Braced Frames*, Japan Passive Control Symposium, Tokyo Institute of Technology, Japan.

ASCE(2005), *Minimum Load on Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, (ASCE /SEI 7-05), American Society of Civil Engineers.

AISC(2005), *Seismic provision for steel buildings*, Chicago.

Chopra A.K.(2001), *Dynamics of Structures*, Prentice Hall.

FEMA 450(2004). *2003 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures Part1: Provisions*, the Building Seismic Safety Council.

National Research Council of Canada (1995), *National Building Code of Canada: 1995 Part 4 Structural Design 4*, National Research Council of Canada.

부록. SYMBOLS

K, C_e : 노풍도 관련 계수
 n_w : 풍직각방향의 진동수(Hz)

β_D, β_w : 풍방향과 풍직각방향의 감쇠율
 s : 사이즈 감소계수
 F : 거스트 에너지 비
 g_p : peak 계수
 W, D : 건물의 폭과 깊이(m)
 ρ_B : 건물중량의 밀도(kg/m³)
 V_H : 최상층풍속(m/sec)
 $a_r : 78.5 \times 10^{-3} \left(\frac{V_H}{n_w \sqrt{WD}} \right)^{3.3}$

(접수일자 : 2008. 10. 15 / 심사일 2008. 10. 30 /
 게재확정일 2009. 1. 23)