

고감쇠고무와 강재를 이용한 복합제진댐퍼의 구조성능평가

Evaluation on the Structural Performance of Hybrid Damper Using High-damping Rubber and Steel

김 지 영*
Kim, Ji-Young

정 인 용**
Jung, In-Yong

김 형 근***
Kim, Hyung-Geun

김 도 현****
Kim, Do-Hyun

Abstract

The proposed hybrid damper installs at a coupling beam and consists of a high-damping rubber (HDR) and steel pin. The proposed hybrid damper adopted a pin-lock system acts as a viscoelastic damper under wind load (small displacement) while it behaves as a hysteretic damper under earthquake load (large displacement).

In this paper, the pin-lock mechanism and structural performance of the proposed hybrid damper is evaluated through experiment. Experiments were carried out with the variables which displacement, loading frequency and steel pin quantities were used. Test results showed that the pin-lock mechanism and the performance of the hybrid damper under a large displacement were verified. Also equivalent damping ratios of HDR were increasing at a small displacement as displacement amplitudes were increasing. However HDR did not depend on frequency.

Keywords: Coupled beam, Steel damper, Viscoelastic damper, Hybrid damper, Cyclic loading test

1. 서론

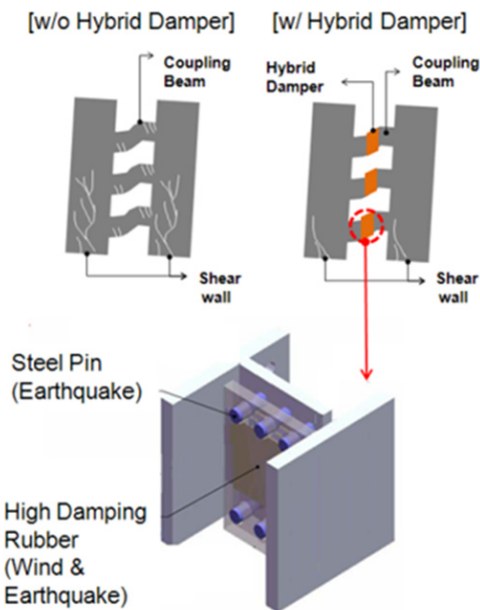
국내 지진 발생 빈도가 최근 증가함에 따라 건축물 내진성능에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 건축물의 내진성능 향상과 함께 자유로운 건축계획이 가능한 연결보형 제진댐퍼에 대한 다양한 연구가 국내에서 진행되어 왔다. 또한 고층 건축물의 경우 풍진동에 의한 사용성 저하가 발생할 수 있기 때문에 바람과 지진에 대비하여 동시에 작동할 수 있

는 연결보형 복합제진댐퍼에 대한 연구도 진행되고 있다.

국내에서 개발된 연결보형 제진댐퍼는 지진용 제진댐퍼와 바람 및 지진용 복합제진댐퍼로 구분할 수 있다. 대표적인 연결보형 지진용 제진댐퍼로는 마찰댐퍼와 이력댐퍼가 있다. 마찰댐퍼에 대한 연구로 Kim(2009)¹⁾은 철근콘크리트 전단벽 사이의 연결보를 철골보로 제작하고, 연결보 양단부의 회전부에 단위유닛 형태의 마찰패드를 설치한 회전형 마찰댐퍼를 설치하여 지진 발생 시 댐퍼 작동의 안정성을 실험적으로 검증하였다. 이력댐퍼에 대한 연구로 Park(2011)²⁾은 철근콘크리트 연결보 중앙에 전단항복에 의한 소성힌지가 발생되도록 여러 장의 아령모양의 강판으로 구성된 적층형 이력댐퍼의 장치 실험 및 실대형 진동대 실험을 수행하여 지진 시 댐퍼 성능을 검증하였다. 또한 Ahn(2012)³⁾은 철근콘크리트 연결보 중앙에 적층형 철판으로 구성된 강재이력댐퍼를 설치하여 지진에 대한 구조성능을 실험적으로 검증하였다.

* 정희원, (주)대우건설 기술개발팀 수석연구원, 공학박사
Technology Development Team, Daewoo Institute of Construction Technology, Daewoo E&C
** 정희원, DRB동일 면진제진사업팀 과장, 공학박사
Seismic Isolation & Vibration Control Business Team, DRB Holding Co., Ltd.
*** 정희원, 서울주택도시공사 도시연구원 연구위원, 공학박사
Urban Research Institute
Seoul Housing & Communities Corporation
**** 교신저자, 경기과학기술대학교 건축인테리어과 조교수, 공학박사
Dept. of Architecture & Interior Design
Gyeonggi College of Science and Technology
Tel: 031-496-4711, Fax: 031-431-9543
E-mail: dhkim14@gtec.ac.kr

한편 복합제진댐퍼에 대한 연구로는 다단계 슬립이 가능한 혼합형 복합마찰댐퍼와 회전형 마찰댐퍼가 있다. 혼합형 복합마찰댐퍼는 2개의 1절점 회전마찰요소와 1개의 슬롯형 마찰요소가 발생변위 크기에 따라 내력이 누적되어 작동되는 혼합형 마찰댐퍼의 변위 의존성 실험을 통하여 댐퍼성능을 검증하였다⁴⁾. 또한 회전형 복합마찰댐퍼는 단계별 내력이 누적되는 복수의 회전마찰요소로 구성된 회전형 복합마찰댐퍼에 대한 변위, 주파수 및 장기반복가력에 대한 의존성 평가를 수행하여 작동 메커니즘과 구조성능을 검증하였다⁵⁾.



〈Fig. 1〉 Concept of hybrid damper using high damping rubber and steel pin

본 논문에서는 〈Fig. 1〉과 같이 풍진동에 보다 효율적인 고감쇠고무(점탄성댐퍼)와 지진 시 안정적인

성능을 갖는 강재(이력댐퍼)를 사용한 복합제진댐퍼의 작동메커니즘을 검증하고, 단계별 구조성능을 평가하기 위하여 장치수준에서 다양한 가력 프로토콜을 이용하여 실험을 수행하였다.

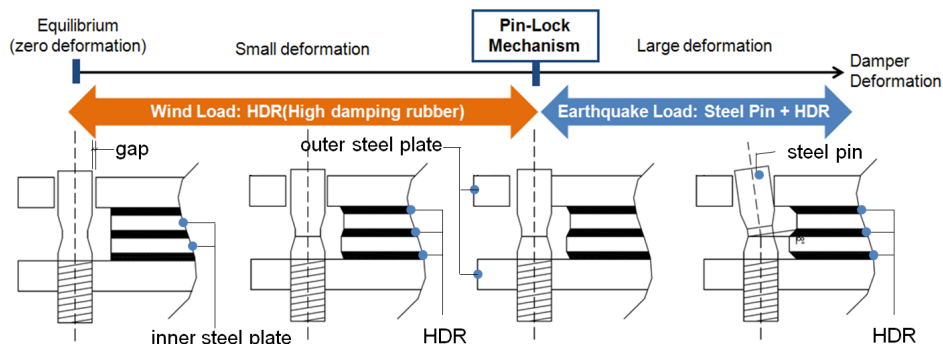
2. 핀-락 메커니즘

고감쇠고무와 강재를 이용한 복합제진댐퍼(이하 복합제진댐퍼)는 고감쇠고무를 이용한 점탄성댐퍼와 강재편을 이용한 이력댐퍼의 조합으로 구성된다. 〈Fig. 2〉와 같이 고감쇠고무는 내부 강판 사이에 배치되어, 연결보 부재축과 직각방향 거동에 대하여 전단변형이 발생하여 에너지를 소산시킨다. 또한 강재편은 고감쇠고무 상하부에 설치되어, 강재편과 외부 강판 구멍(Hole) 사이의 갭(Gap)을 초과하는 변위에서 작동하기 시작한다. 복합제진댐퍼로 거동할 수 있는 핵심 메커니즘은 〈Fig. 2〉의 핀-락(Pin-lock) 거동이다.

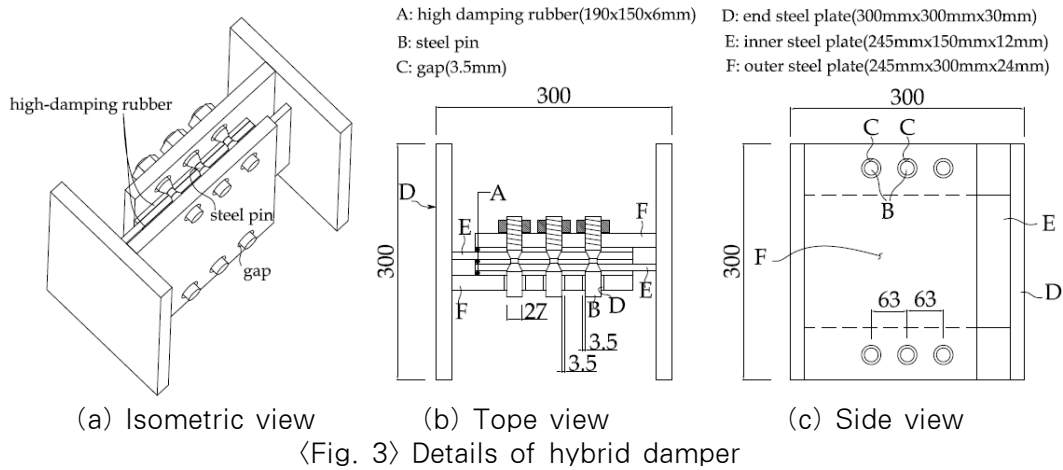
따라서 사용성 풍하중 영역에서는 강재편과 외부 강판 구멍(Hole) 사이의 갭보다 작은 변위가 발생하는 경우에는 고감쇠고무만 거동한다. 한편 지진 발생 시 큰 변위가 발생하여 강재편과 외부 강판 구멍 사이의 갭을 크게 초과하는 경우에는 강재편이 외부 강판에 닿는 순간부터 강재편에 변형이 발생하기 시작하며 고감쇠고무와 함께 강재편이 거동한다.

3. 실험계획

복합제진댐퍼는 다른 변위영역에서 작동하는 두 가지 제진댐퍼를 하나의 장치로 구성하여 다양한



〈Fig. 2〉 Pin-lock mechanism of hybrid damper



변위영역에서 작동할 수 있는 제진시스템이다. 이를 구현하기 위해서는 핀-락 메커니즘 검증과 복합제진댐퍼 내에서 각각의 댐퍼성능이 확보되어야 한다. 이를 위하여 핀-락 메커니즘 작동 전 변위(풍하중 영역)에서는 고감쇠고무의 변위 및 주파수 의존성 실험을 수행하였고, 핀-락 메커니즘 작동 이후 변위(지진하중 영역)에서는 강재핀 파괴까지 변위를 증가하여 실험을 수행하도록 계획하였다.

3.1 실험체 설계 및 제작계획

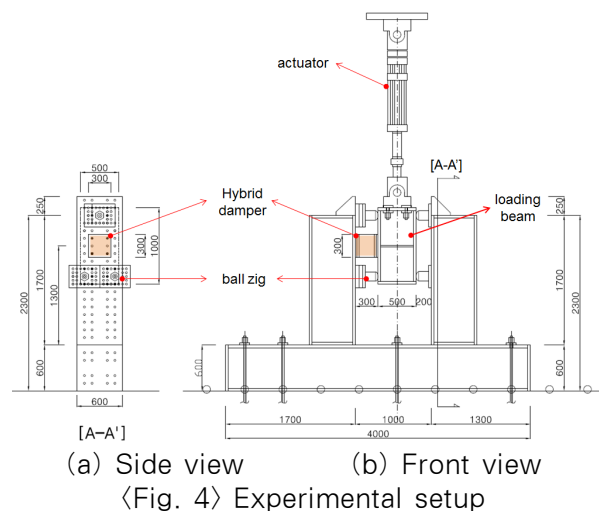
30층 규모 건축물 연결보에 삽입 가능한 복합제진댐퍼의 구조성능 평가를 위하여 <Fig. 3>과 같은 300mm×300mm×300mm 크기의 댐퍼 실험체를 제작하였다. 실험체는 고감쇠고무와 강재핀으로 구성된다. 고감쇠고무 두께는 층간변위각 1.5%에 대한 연결보 발생변위에 저항가능한 단일 두께 6mm로 결정하였다. 고감쇠고무판(190mm×150mm) 3장을 사용하였고, 고감쇠고무판과 내부 강판을 교대로 겹쳐서 제작하였다. 강재핀은 외경 27mm인 원형 막대형에 한쪽은 외부 강판에 볼트접합이 가능하도록 나사산을 가공하였다. 또한 핀-락 메커니즘 발생 기준 변위인 갭은 강재핀의 외경(27mm)과 외부 강판 구멍(Hole)의 직경(34mm)의 차의 1/2인 3.5mm로 설정하였다.

동일한 고감쇠고무 조건으로 강재핀 수량에 대한 내력을 비교하기 위하여 실험체 HDRS-2(강재핀=2개), HDRS-4(강재핀=4개), HDRS-6(강재핀=6개)을

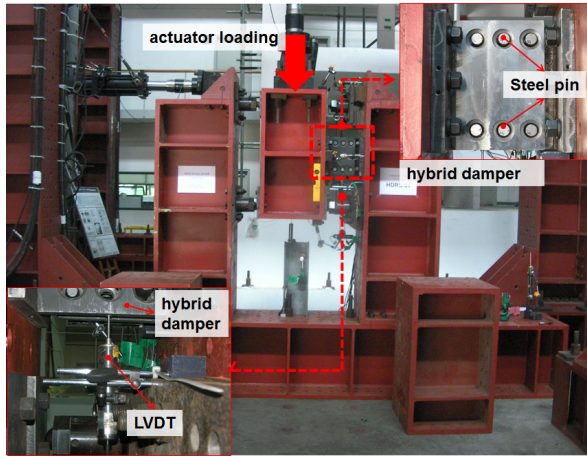
3개를 제작하였다. 또한 핀-락 메커니즘 작동 전에는 강재핀의 영향이 없기 때문에 같은 실험체를 이용하여 고감쇠고무 성능을 분석하였다.

3.2 실험체 세팅 및 가력계획

실제 구조물에서 좌우 반복하중을 받을 때 연결보 내에 설치된 댐퍼는 연결보 직각방향으로 거동되기 때문에 실험체를 복합제진댐퍼 직각방향으로 가력할 수 있도록 실험체 세팅을 설계하였다. 실험체 세팅은 <Fig. 4>와 같이 다양한 가력주파수를 사용할 수 있는 500kN 용량의 동적액추에이터를 가력철골보와 연결하였고, 가력철골보의 직선운동을 확보하기 위하여 가력철골보 좌우에 6개의 볼지그(Ball zig)를 설치하였다.



<Fig. 4> Experimental setup



<Fig. 5> Photo of test setting and measurement setting

댐퍼의 성능을 분석하기 위해서는 댐퍼 좌우 외부 강판에서 발생하는 상대변위가 필요하다. 이를 위하여 <Fig. 5>와 같이 댐퍼 상하부에서 50mm LVDT 2개를 설치하여 상대변위를 직접 계측하였고, 연결보 중앙부 변위를 계측하여 실험을 진행하였다.

실험체 가력계획은 고감쇠고무를 고려하여 기본적으로 정현파 반복가력을 수행하였고, 진폭 및 가력횟수는 핀-락 메커니즘 작동 전후(핀-락 한계값 = 3.5mm)로 구분하였다. 핀-락 메커니즘 작동 전에는 고감쇠고무만 작동하기 때문에 고감쇠고무의 감쇠성능을 평가하기 위하여 <Table 1>과 같이 동일 진폭(고무두께 10%~50%)에 대하여 가력주파수 (0.167Hz~1.0Hz)를 변화시켜 각 10회 정현파로 반복가력하였다. 또한 핀-락 메커니즘 작동 이후에는 복합제진댐퍼의 비탄성거동을 분석하기 위하여 진폭은 고감쇠고무판 두께의 1/2인 3mm씩 증가시켜서 6mm~12mm는 가력주파수 0.02Hz, 15mm~24mm는 0.01Hz로 가력하였다.

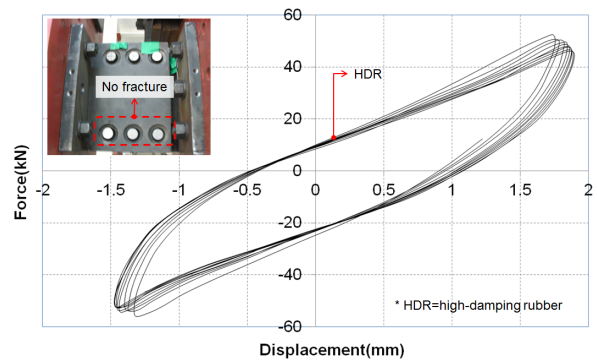
<Table 1> Loading protocol(before pin-lock mechanism activate)

	Displacement amplitude(mm)				
	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0
0.167Hz (6.0sec)	○	○	○	○	○
0.250Hz (4.0sec)	○	○	○	○	○
0.330Hz (3.0sec)	○	○	○	○	○
0.500Hz (2.0sec)	○	○	○	○	○
1.000Hz (1.0sec)	○	○	○	○	○

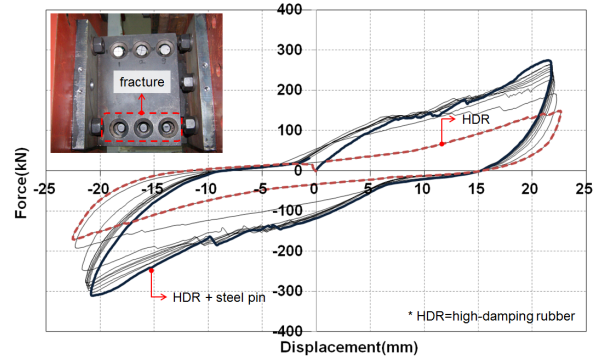
4. 실험결과 및 분석

4.1 전체거동

<Fig. 6 (a)>는 실험체 HDRS-6의 핀-락 메커니즘 발생 전 최대 변위인 3mm 가력에 대한 하중-변위 곡선이다. 하중-변위 곡선으로부터 고감쇠고무만 작동하였고, 강재핀은 작동하지 않았음을 확인할 수 있다. <Fig. 6 (b)>는 실험체 HDRS-6의 최종가력에 대한 하중-변위 곡선이다. 최대내력 도달 이후 강재핀이 순차적으로 파단되면서 강재핀 없이 고감쇠고무만 작동하고 있다. 다른 실험체도 유사한 거동을 보였다. 실험 결과 핀-락 메커니즘 작동에 따른 다양한 변위영역에 대하여 복합제진댐퍼로 거동하는 것을 <Fig. 6>과 같이 확인하였다.



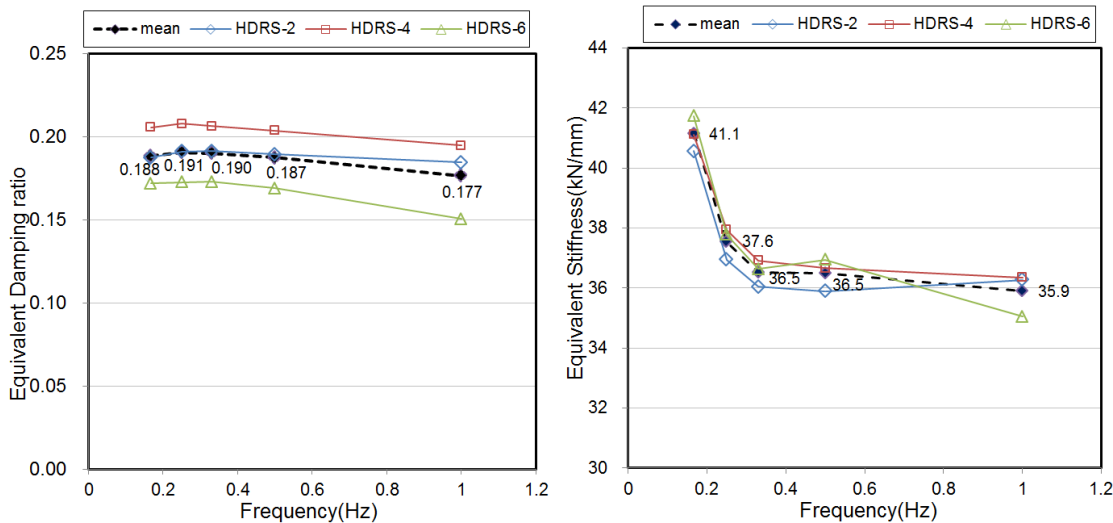
(a) Before the pin-lock mechanism activate



(b) After the pin-lock mechanism activate
<Fig. 6> Load-displacement loop of HDRS-6

4.2 핀-락 메커니즘 작동 전 거동

핀-락 메커니즘 작동 전 고감쇠고무의 구조성능을 평가하기 위하여 진폭의존성과 주파수 의존성을 등가강성(K_{eq})과 등가감쇠율(ζ_{eq})에 대하여 분석하였다.



(a) Equivalent damping ratio (b) Equivalent stiffness
 <Fig. 7> Displacement amplitude dependency tests

4.2.1 진폭의존성

가력주파수 0.250Hz에 대하여 등가강성과 등가감쇠율을 비교하였다<Table 2>. 등가감쇠율(ζ_{eq})은 탄성에너지(E_{So})와 한 사이클을 통해 소산되는 에너지(E_D)를 이용하여 식 (1)과 같이 산정하였다⁶⁾.

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

핀-라 메커니즘 작동 전에는 비탄성영역에서 작용하는 강재핀은 거동하지 않는다. 따라서 강재핀 수량과 무관하게 실험체는 유사한 실험결과를 보여야 한다. 실험결과 강재핀은 거동하지 않았으며, 고감쇠고무만 작동되었다.

<Fig. 7>과 같이 모든 실험체에서 등가강성은 진폭이 증가할수록 83.9kN/mm에서 37.5kN/mm까지 저감되는 경향을 보였다. 반면 등가감쇠율은 진폭이 증가할수록 0.147에서 0.191까지 증가하고 있다. 고감쇠고무의 댐퍼적절성 평가에 실험값이 평균

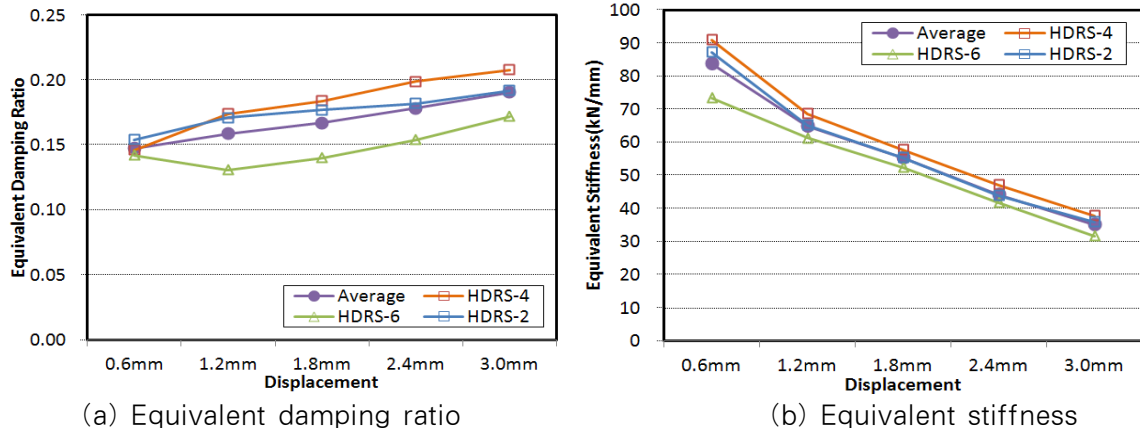
의 15% 이내이어야 하는 ASCE 7(2010)을 사용하였다⁷⁾. 등가감쇠율의 경우 실험체 HDRS-6의 가력변위 1.2mm, 1.8mm에서만 실험체 평균의 15%보다 큰 17.6%, 16.2%가 나타났고, 이는 초기 가력 시 작은 변위에서 고감쇠고무가 충분히 작동하지 않은 것으로 판단된다. 하지만 이를 제외한 가력변위와 다른 실험체는 모두 ASCE 7(2010)을 만족하였다. 또한 등가강성의 경우에는 모든 실험결과가 ASCE 7(2010)을 만족하였다.

4.2.2 주파수 의존성

고감쇠고무의 주파수 의존성을 분석하기 위하여 핀-라 메커니즘 작동 전 가장 큰 가력진폭인 3mm에 대하여 등가강성과 등가감쇠율을 비교하였다<Table 3>. 반복가력 시 등가강성은 가력주파수 1.0Hz 대비 0.167Hz에서 최대 17% 작게 나타났으나, 모든 실험체에서 0.167Hz 이후 안정된 등가강성을 보이고 있다. 등가강성 및 등가감쇠율은 모든 실험결과에서 ASCE 7(2010)에서 제시하는 평균값의

<Table 2> Summary on displacement amplitude dependency tests

	ζ_{eq}				K_{eq} (kN/mm)			
	HDRS-2	HDRS-4	HDRS-6	Mean	HDRS-2	HDRS-4	HDRS-6	Mean
0.6mm	0.154	0.146	0.142	0.147	87.1	91.0	73.5	83.9
1.2mm	0.171	0.174	0.131	0.159	65.1	68.5	61.3	65.0
1.8mm	0.177	0.184	0.140	0.167	55.4	57.8	52.5	55.2
2.4mm	0.182	0.199	0.154	0.178	44.0	47.1	41.7	44.3
3.0mm	0.191	0.208	0.173	0.191	36.9	37.9	37.8	37.5



<Fig. 8> Frequency dependency tests

<Table 3> Summary on frequency dependency tests

	ξ_{eq}			K_{eq} (kN/mm)		
	HDRS-2	HDRS-4	HDRS-6	HDRS-2	HDRS-4	HDRS-6
0.167Hz	0.187	0.206	0.172	40.6	41.1	41.7
0.250Hz	0.191	0.208	0.173	36.9	37.9	37.8
0.333Hz	0.192	0.206	0.173	36.0	36.9	36.6
0.500Hz	0.189	0.204	0.169	35.9	36.7	36.9
1.000Hz	0.185	0.195	0.151	36.3	36.4	35.0
Average	0.189	0.204	0.168	37.1	37.8	37.6

15% 이내를 만족하고 있다. <Fig. 8>을 보면 주파수가 커질수록 등가강성과 등가감쇠율은 전체적으로 저감하지만, 주파수 의존성은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

4.3 핀-락 메커니즘 작동 후 거동

핀-락 메커니즘 작동 후 거동을 분석하기 위하여 각 실험체별 최대하중 도달 시 이력거동을 분석하였다. 실험체 HDRS-6은 <Fig. 9 (a)>와 같이 최대하중 -310.7kN에 도달한 이후 6개의 강재핀이 순차적으로 파단되면서 104.7kN까지 단계적으로 저감하였다. 실험체 HDRS-4와 HDRS-2도 <Fig. 9 (b)>, <Fig. 9 (c)>와 같은 유사한 거동을 보였다. 강재핀이 모두 파단된 이후에는 추가적인 내력저하 없이 고감쇠고무만으로 안정적인 거동이 나타났다.

강재핀 수량에 따른 실험체별 최대하중과 이 때 변위는 <Table 4>와 같다. 실험체 HDRS-4와 HDRS-6의 최대내력이 발생한 평균변위는 12.8mm, 13.0mm로 유사한 반면 실험체 HDRS-2의 최대내력이 발생한 평균변위는 실험체 HDRS-6 대비 1.1배

더 큰 14.4mm로 나타났다.

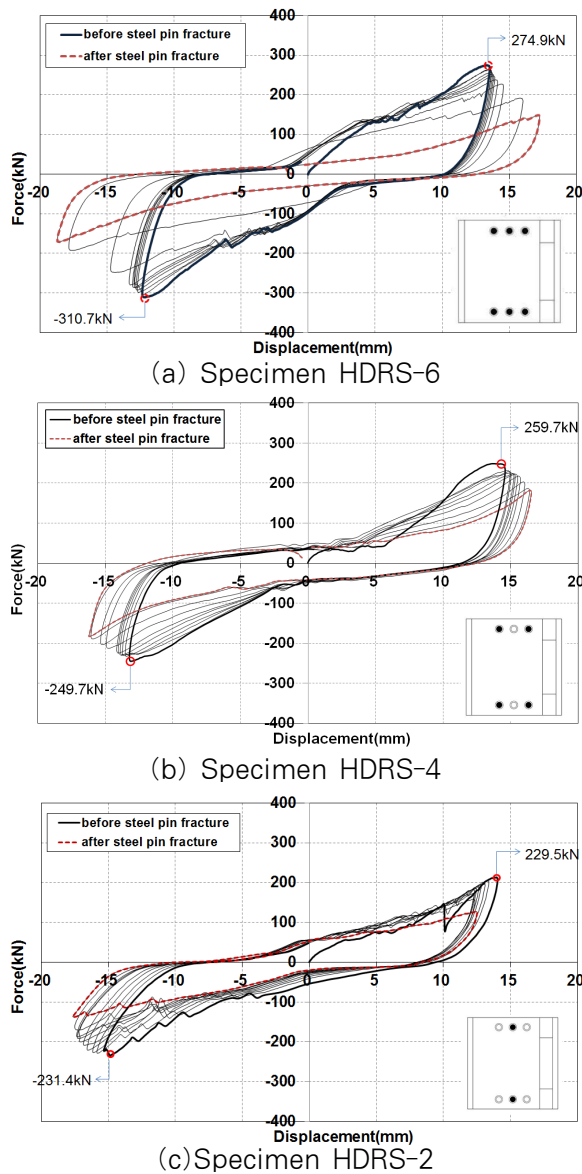
각 실험체별 최대내력과 이 때 변위에서 모든 강재핀이 파단된 후 발생한 고감쇠고무의 내력을 산정하여 강재핀만의 내력을 산정하였다<Table 5>. 실험체별 강재핀의 내력을 분석하기 위하여 강재핀 1개당 내력을 비교하였다. 실험체 HDRS-4, HDRS-6의 강재핀 1개당 내력은 34.4kN, 31.4kN으로 실험체 HDRS-2의 46.5kN보다 작게 나타났다.

<Table 4> Summary on maximum and minimum of test results

	Force(kN)			Displacement(mm)		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
HDRS-2	229.5	-231.4	230.5	13.7	-15.1	14.4
HDRS-4	259.7	-249.7	254.7	14.1	-11.4	12.8
HDRS-6	274.9	-310.7	292.8	13.6	-12.4	13.0

<Table 5> Analysis of steel pin's force (unit: kN)

	HDR+steel pins(A)	HDR(B)	Steel pins (C=A-B)	One steel pin(C/n)
HDRS-2	230.5	137.5	93.0	46.5
HDRS-4	254.7	117.2	137.5	34.4
HDRS-6	292.8	104.7	188.1	31.4



(a) Specimen HDRS-6
(b) Specimen HDRS-4
(c) Specimen HDRS-2
〈Fig. 9〉 Load-displacement loop at maximum force

〈Fig. 9〉를 보면 실험체 HDRS-2는 6개의 구멍 중 중앙 2개에 강재핀이 설치되었고, 실험체 HDRS-4는 6개의 구멍 중 외측 4개에 강재핀이 설치되었다. 또한 실험체 HDRS-6은 실험체 HDRS-2와 HDRS-4의 강재핀 위치를 조합하여 사용하였다. 실험체 중심에서 좌우로 63mm 떨어진 위치에 강재핀이 설치된 실험체 HDRS-04, HDRS-06은 실험체 중심에 강재핀이 설치된 실험체 HDRS-2보다 강재핀이 먼저 항복에 도달하기 때문에 강재핀 1개당 내력이 작은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 고감쇠고무와 강재핀을 사용한 복합제진댐퍼의 작동메커니즘과 단계별 구조성능을 평가하기 위하여 장치수준에서 다양한 가력 프로토콜을 이용하여 실험을 수행하였고, 실험결과를 통하여 다음 결론을 도출하였다.

1. 복합제진댐퍼의 핀-락(Pin-lock) 메커니즘은 강재핀과 외부 강판의 구멍 사이의 갭(3.5mm)에 의하여 발생하며, 모든 실험체에서 핀-락 메커니즘이 발생함을 확인하였다. 또한 핀-락 메커니즘 작동 전(풍하중 영역)에는 복합제진댐퍼가 고감쇠고무만으로 작동하였고, 핀-락 메커니즘 작동 후(지진하중 영역)에는 고감쇠고무와 강재핀이 함께 작동하는 복합제진댐퍼가 안정적으로 작동하였다.

2. 핀-락 메커니즘 작동 전 고감쇠고무에 대한 진폭 의존성 실험 분석결과, 모든 실험체는 진폭(0.6mm~3.0mm)이 증가할수록 등가강성은 감소하였고 등가감쇠율은 증가하는 경향을 보였다. 또한 주파수가 커질수록 등가감쇠 및 등가감쇠율은 전체적으로 약간 저감하는 경향을 보이지만 뚜렷한 의존성은 보이지 않았다. 고감쇠고무의 댐퍼적절성은 평균의 15%를 약간 상회하는 실험체 HDRS-6의 1.2mm, 1.8mm에 대한 진폭의존성을 제외하고 모두 ASCE 7(2010) 기준을 만족하였다.

3. 핀-락 메커니즘 작동 후 강재핀 수량이 증가함에 따라 최대내력도 증가하였다. 하지만 강재핀 1개당 내력을 비교하면 강재핀 위치로 인하여 외측에 강재핀이 배치된 실험체(HDRS-4, HDRS-6)가 중앙에 강재핀이 배치된 실험체(HDRS-2)보다 작게 나타났다. 따라서 강재핀 내력 산정시에는 실험결과 중 최소 내력(31.4kN)을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되어진다.

References

1. H.G. Kim and T.S. Ahn, "Stable Friction Damper of Lintel Type", Journal of Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control, Vol.10, pp. 9~23, 2009.

2. H.K. Park, T.S. Ahn and D.W. Jang, "Application technology & Case Study of Shear-yield Type Steel Damper (SS Damper) Included in Lintel Beam", Magazine and Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.22, No. 4, pp. 64~70, 2011.
3. T.S. Ahn, Y.J. Kim, J.H. Park, H.G. Kim, D.W. Jang and S.H. Oh, "Experimental study on a Cantilever Type Metallic Damper for Seismic Retrofit of Building Structures", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 24, No. 2, pp. 149~161, 2012.
4. D.H. Kim and J.Y. Kim, "Experimental Study on the Structural Performance of Hybrid Friction Damper", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 3, pp.103~110, 2015.
5. D.H. Kim, J.Y. Kim and M.H. Kim, "Experimental Study on the Structural Behaviour of Rotary Friction Damper", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 4, pp.67~74, 2015.
6. A.K. Chopra, "Dynamics of Structures", Prentice-Hall Inc., 2001.
7. ASCE, "Minimum Design Loads for Buildings And Other Structures(ASCE/SEI 7-10)", American Society of Civil Engineers, 2010.

- Received : August 31, 2016
- Revised : September 12, 2016
- Accepted : September 12, 2016