

# 다중거동 복합형 감쇠장치를 적용한 철골골조의 내진성 능실험

## Seismic Performance Test of a Steel Frame with Multi-action Hybrid Dampers

노지은<sup>1)</sup> · 허석재<sup>1)</sup> · 이상현<sup>2)\*</sup>

Roh, Ji Eun<sup>1)</sup> · Heo, Seok Jae<sup>1)</sup> · Lee, Sang Hyun<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>단국대학교 리모델링연구소 박사후연구원, <sup>2)</sup>단국대학교 건축공학과 교수

<sup>1)</sup>Post-doc Researcher, Seismic Retrofit and Remodeling Research Center Dankook University, <sup>2)</sup>Professor Department of Architectural Engineering, Dankook University

### / A B S T R A C T /

In this study, the effectiveness of a multi-action hybrid damper (MHD) composed of lead rubber bearing (LRB) and friction pad was verified in terms of seismic performance improvement of a frame structure. The LRB and the friction elements are connected in series, so the LRB governs the initial small deformation and the friction determines large deformation behavior. Cyclic loading tests were conducted by using a half scale steel frame structure with the MHD, and the results indicated that the structure became to have the stable trilinear hysteresis with large initial stiffness and first yielding due to the LRB, and the second yielding due to the friction. The MHD could significantly increase the energy dissipation capacity of the structure and the hysteresis curves obtained by tests were almost identical to the analytically estimated ones.

**Key words:** Multi action hybrid damper, Seismic performance, Static loading test, Cyclic loading test

## 1. 서론

지난 2016년 9월 지진관측을 시작한 후에 한반도에서 발생한 역대 최대 규모의 지진인 리히터 규모 5.8의 경주지진이 발생하였다. 그로부터 약 1년 후인 2017년 11월 경주지진에 이어 두 번째로 큰 규모인 리히터 규모 5.4의 포항지진이 발생하였으며, 역대 가장 많은 피해가 발생한 것으로 보도되었다. 이렇게 규모가 큰 지진이 반복적으로 발생하면서 지진에 대한 경각심이 확산되고 있지만 국내 공공시설물 중 내진성능을 확보한 건축물은 절반에도 미치지 못해 내진보강에 대한 수요가 많아지고 있는 실정이다.

대부분의 수동형 감쇠장치는 점탄성고무, 금속, 납삽입고무(Lead Rubber Bearing, LRB), 마찰패드 등의 특정한 이력특성을 가지는 단일재료로 구성되어 있어 각각의 재료 특성으로부터 기인하는 한계점을 가지고 있다. 예

를 들어 금속합복형 감쇠기나 마찰감쇠기는 단일 항복강도 혹은 단일 미끄러짐 하중을 가지기 때문에 외부하중이 재료의 항복과 마찰을 발생시킬 정도로 크지 않은 경우에는 감쇠기에 의한 에너지소산 효과가 매우 작은 단점을 가지게 된다.

이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 재료를 조합한 복합형 감쇠장치 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 김도현은 점탄성 댐퍼와 비좌굴가새를 복합시켜 비좌굴가새의 풍진동 저항성능을 향상시키는 하이브리드 비좌굴가새 시스템을 개발하였으며 [1], 김지영 외는 고감쇠고무와 강재를 사용한 바람 및 지진용 복합제진댐퍼를 개발하여 성능실험을 수행하였다 [2]. Marshall and Charney는 고감쇠고무와 좌굴 브레이스로 구성된 Hybrid passive control damper(HPCD)를 제안하여 다단계 지진에너지에 대응하기 위한 감쇠장치를 개발하였으며, 감쇠장치 자체의 반복이력 성능실험을 수행하였다 [3]. 또한 Christopoulos and Montgomery는 점성재, 강판과 앵커로 구성된 Viscoelastic coupling damper(VCD)를 개발하여 고층 전단벽 구조물의 풍·지진응답을 제어할 수 있는 감쇠장치를 제안하였다 [4]. 노지은과 이상현은 마찰재와 LRB를 직렬 연결한 다중거동 복합형 감쇠장치(Multi-action Hybrid Damper, MHD)을 개발하였으며, 감쇠장치 자체

\*Corresponding author: Lee, Sang Hyun

E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

(Received March 27, 2018; Revised October 26, 2018; Accepted November 6, 2018)

의 반복이력 성능실험을 수행하였다 [5].

MHD는 LRB와 마찰요소가 직렬연결 되어 풍하중과 같은 작은 하중레벨에서는 LRB에 변형이 집중되어 진동제어효과를 발현하며, 지진하중과 같이 큰 하중레벨에서는 마찰패드에서의 미끄러짐 변형에 의해 많은 에너지가 소산되는 특성을 지녀 풍하중과 지진하중에 동시에 대응할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 MHD의 내진, 내풍 성능 중 구조물의 내진성능향상 효과를 검증하기 위해 실제 구조물의 1/2 스케일 축소모델을 제작하여 구조물 가력실험을 수행하였다. 동일한 모델의 수치해석을 통해 실험결과의 타당성을 검증하였으며, MHD의 특성인 LRB와 마찰요소의 직렬연결을 해석적으로 구현하였다.

## 2. MHD의 이력 특성

본 연구에서 적용된 MHD의 형태는 Fig. 2와 같으며, 강재, 마찰재, LRB의 3가지 요소가 직렬 연결되어 있다 [5].

감쇠장치에서 변형이 발생하는 부위는 강판과 마찰패드를 고정력볼트로 체결한 마찰부와 이선형 이력거동 특성을 가지는 LRB 총 2부분이다. 풍하중과 같이 작은 하중이 가해지는 경우엔 마찰부위보다 강성이 훨씬 작은 LRB에 변형이 집중되며, 마찰패드에서의 변형은 고정볼트가 체결되어 있기 때문에 발생하지 않는다. 이후 구조물에 가해지는 하중이 증가하면 마찰패드가 슬립하중에 도달하며 마찰패드와 강판 사이에 미끄러짐이 발생하면서 큰 변형으로 에너지를 소산하게 된다. 따라서 MHD는 Fig. 1과 같이 작은 하중레벨에선 (a)와 같은 이선형 거동, 큰 하중레벨에선 (b)와 같은 삼선형 거동을 하며 하중레벨에 따라 거동 특성이 단계적으로 변함으로써 소변형부터 대변형까지의 다양한 하중레벨에 동시 대응할 수 있는 특성을 가진다. 본 논문에서는 MHD가 적용된 구조물의 내진성능을 평가하

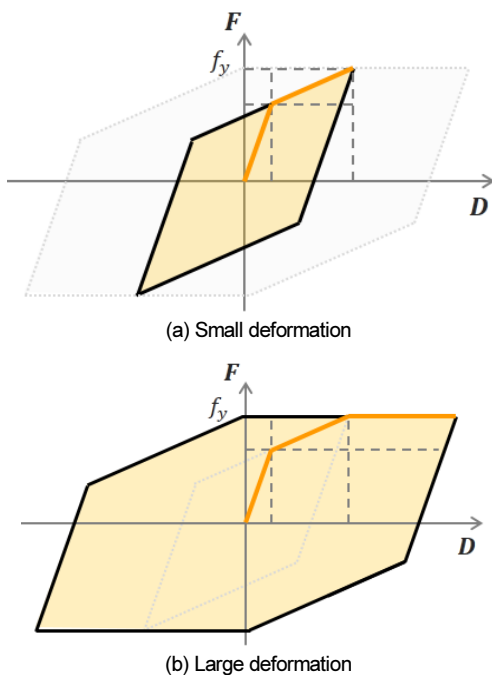


Fig. 1. Hysteresis of the MHD

기 위하여 감쇠장치에 대변형이 발생하도록 변위를 증가시켜 실험을 수행하였다.

## 3. MHD 설치 철골 구조물 성능실험

### 3.1 실험계획

본 연구에서 제안하는 MHD의 구조물에 대한 내진보강성능을 검증하기 위해 Fig. 3의 평면을 가지는 주요 구조부를 대상으로 1/2 스케일의 철골 구조물을 제작하여 보강 전·후 구조물에 대한 정적가력실험 및 반복이력실험을 수행하였다. 주요 구조부의 층고는 6 m, 경간은 9 m, 폭은 11.3 m이고, 기둥은 H 388×402×15×15, 보는 H 482×300×11×15의 부재로 구성되어 있다. 주요 구조부는 SRC 합성구조이나 가력장치의 용량한계가 500 kN임을 고려하여 내부의 철골만을 대상으로 축소실험체를 설계하였다.

1/2 스케일 철골골조의 형상과 사용한 부재는 Fig. 4와 같다. 2층 바닥 다이어프램을 구성하는 보의 양쪽 단부를 힌지로 구성하여 가력에 의한

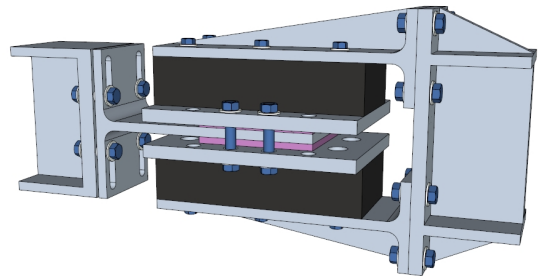


Fig. 2. Composition of MHD

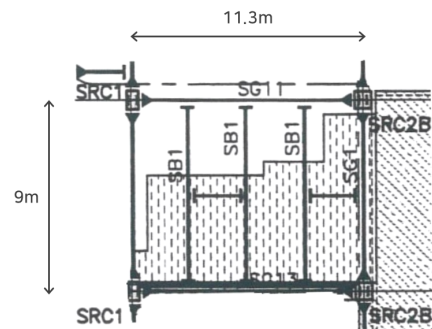


Fig. 3. Floor plan of major structural part

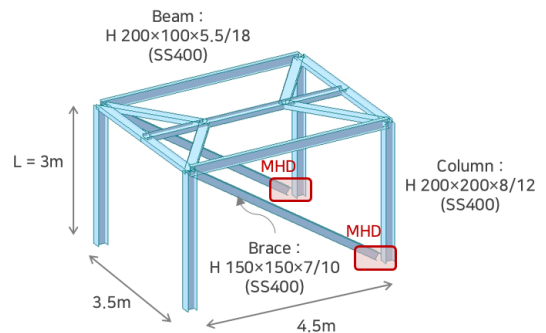


Fig. 4. Half scale steel frame

힘이 양쪽 프레임에 균등하게 전달되도록 하였다. 실험대상인 주요 구조부의 가력방향 폭은 11.3 m이나 구조물 성능에 대한 폭의 영향은 작을 것으로 예상되어 폭을 3.5 m로 축소시켜 제작하였다. 철골구조물의 설치 형상은 Fig. 5와 같다. 가력실험에 사용한 액츄에이터(Actuator)는 스트로크 0.6 m, 500 kN의 용량을 가지며, 구조물 최상부의 중심점을 1점 가력 할 수 있도록 배치하였다. MHD를 설치하기 위해선 부가적인 요소로 대각방향의 가새가 필요하므로 H 150×150×7/10의 대각가새의 하단부에 프레임 양쪽으로 1개씩 총 2개의 감쇠장치를 설치하였다.

Fig. 6과 같이 골조 상부에 발생하는 변형을 측정하기 위해 골조 외부에



Fig. 5. Test Specimen

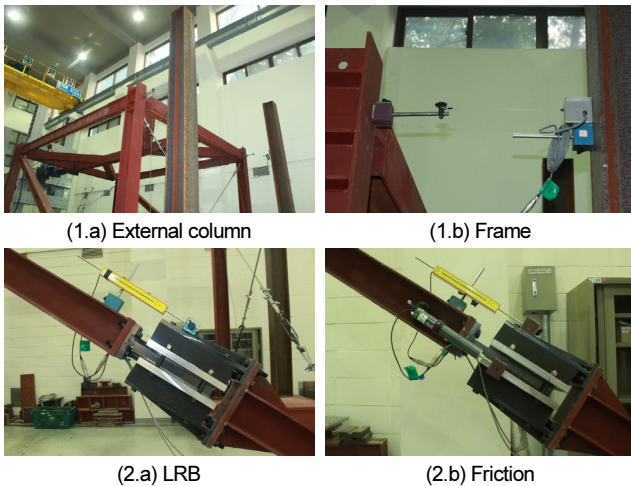


Fig. 6. Configuration of displacement meter installation

2개의 철골 기둥을 세우고 외부기둥과 골조 사이에 변위계를 설치하였으며, 각각 감쇠장치 2개에 변위계를 설치하여 LRB의 변형과 마찰패드에서 발생하는 미끄러짐 변형을 계측하였다.

볼트와 너트를 이용하여 마찰부위를 접합하는 경우, 볼트 축방향의 인장력을 발생시켜야 하며 이러한 인장력을 얻기 위해서는 볼트나 너트머리에 조임력을 가해야한다. 때문에 마찰요소의 슬립하중(Slip Load)은 볼트의 조임력(Torque)과 개수에 따라서 변화한다. 실험체에는 F10T( $f_y = 900 \text{ N/mm}^2$ ), M16의 고장력볼트를 사용하여 마찰부위를 접합하였으며, 마찰 패드는 브레이크 라이닝에 사용되는 재료인 알루미늄, 세메프, 바륨 등의 물질로 구성되어 있다.

슬립하중(R)과 볼트장력(F)의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$R = \mu \times h_{sc} \times F \times N \tag{1}$$

여기서,  $\mu$ 는 미끄럼계수로 이는 감쇠장치의 자체 실험 시 도출된 마찰패드의 마찰계수가 0.55이었으므로 산정식 또한 0.55를 적용하였다.  $h_{sc}$ 는 구멍의 형태에 따른 계수로 실험체의 볼트 구멍이 표준형태이므로 1.0을 사용하였다.  $N$ 은 전단면의 개수로 2를 적용하였으며,  $F$ 는 볼트장력으로 산정식은 식 (2)와 같다.

$$F = T \times \frac{1}{0.161p + 0.583d_m \times k_1 + 0.5D_k \times k_2} \tag{2}$$

여기서,  $F$ 는 볼트장력(N),  $T$ 는 조임력(N·m),  $p$ 는 나사피치(mm),  $d_m$ 은 나사평균지름(mm),  $D_k$ 는 볼트머리와 너트접촉부의 평균지름(mm),  $k_1$ 은 볼트, 너트의 나사산 마찰계수,  $k_2$ 는 볼트머리와 너트접촉부위의 마찰계수이다.

### 3.2 정적가력실험

MHD의 슬립하중에 따른 구조물 이력 변화를 검토하기 위해 Table 1과 같이 체결하는 고장력볼트의 개수와 조임력을 변수로 두어 정적가력실험을 수행하였으며, 식 (1~2)를 적용하여 산정한 슬립하중과 실험결과를 비교하였다.

우선 체결하는 볼트를 4개로 고정시킨 후 볼트의 조임력을 변화시켜 구

Table 1. Slip Load and yield strength of structure according to the number of bolts and tightening torque

The number of High-tensile Bolt	Tightening Torque per Bolt (N · m)	Tension per Bolt, (kN)	Slip Load per Bolt (kN)	Slip Load (kN)			Slip Deformation of Structure (mm)	Yield Strength of Structure (kN)		
				Calculated	Experiment	Error Rate (%)		Calculated	Experiment	Error Rate (%)
4	40	13.9	15.3	61.3	63.1	2.95	8.2	142.8	139.0	2.65
4	60	20.9	23.0	91.9	88.1	4.18	10.8	207.1	197.8	4.50
4	80	27.9	30.6	122.6	120.1	2.03	14.0	273.8	260.3	4.95
6	40	13.9	15.3	91.9	95.8	4.20	12.7	215.6	221.7	2.82
8	40	13.9	15.3	122.6	128	4.41	17.4	290.8	290.5	0.12

조물을 가력하였다. Fig. 7은 감쇠장치 설치 전·후 구조물의 하중-변위 이력 곡선을 나타내며, 체결하는 볼트의 조임력을 증가시킬수록 감쇠장치의 슬립하중이 증가하기 때문에 감쇠장치 설치 구조물의 항복강도가 증가하는 경향을 확인하였다.

원 구조물의 강성은 5.0 kN/mm으로 단순하게 힘과 변위가 비례하는 거동을 보이며, 이는 캔틸레버 기둥의 강성계산식인  $3EI/L^3$ 를 사용하여 산정한 4.3 kN/mm보다 약간 큰 수치이다. 감쇠장치를 설치한 구조물은 강한 초기강성을 가지다 일정 변형 이후 강성이 단계적으로 감소하는 삼선형 거동을 보인다. 이러한 비선형 특성은 감쇠장치에 의한 것으로 구조물이 탄성 거동을 하는 변형 내에서도 감쇠장치를 설치함에 따라 구조물의 에너지 소산능력 혹은 감쇠비가 크게 증가함을 알 수 있다.

감쇠장치가 설치된 구조물의 초기 강성은 24.8 kN/mm로 원 구조물 강성인 5.0 kN/mm에서 크게 증가한다. 조임력이 40 N·m일 때의 구조물 곡선(Fig. 7의 파선)을 예로 들면 구조물 상부의 변위가 1.0 mm에 도달할 때 1차 항복하여 14.0 kN/mm의 강성으로 거동하다가 구조물 변위가 8.2 mm 이상 발생하는 경우 원 구조물의 강성과 동일한 수치인 5.0 kN/mm로 감소하는 삼선형 거동을 보인다. 이로부터 구조물 변형이 1.0 mm에 도달하게 되면 LRB 내부의 납이 항복하면서 납과 고무의 변형으로 강성과 강도가 증가하다가 구조물 변형이 8.2 mm 이상 발생하는 경우, 감쇠장치의 마찰패드가 미끄러지는 현상이 일어나 감쇠장치가 더 이상의 강성증가효과 없이 미끄러짐에 의한 수평내력만을 증가시킬 수 확인할 수 있다. 그리고 20 mm의 변형에서 구조물 내력은 감쇠장치 설치 전 100.0 kN이지만, 설치 후 204.2 kN으로 증가하면서 감쇠장치의 설치에 의해 구조물 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

MHD를 구성하는 LRB와 마찰요소의 하중-변위 이력곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 감쇠장치가 대각방향으로 설치되었기 때문에 감쇠장치에 발생하는 하중은 액추에이터로부터 수집된 하중을 대각·새방향과 길이방향의 비인  $\cos\theta$ 로 나누어 같은 변형에서의 원구조물의 하중을 제거한 값으로 산정하였다. 마찰부위는 약 400 kN/mm의 초기강성을 가지며 슬립하중에 도달할 때 미끄러짐이 발생하며, Table 1와 같이 예측한 슬립하중과 오차율 5%이내의 근사한 값을 갖는다. 마찰요소와 LRB가 직렬 연결되어 있기 때문에 MHD의 변형은 두 요소에서 발생한 변형의 합으로 표현된다.

Fig. 9에는 MHD를 구성하는 LRB와 마찰요소에 발생한 변위를 구조

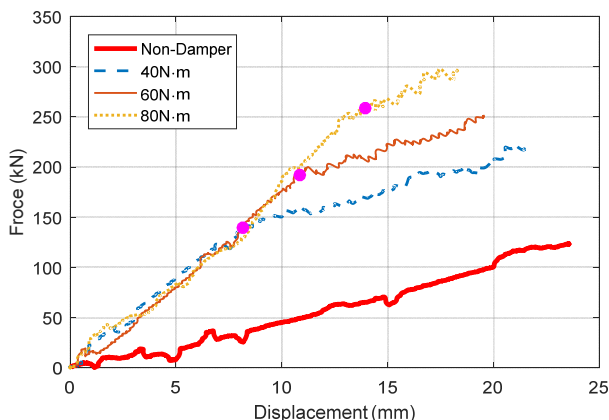


Fig. 7. Effect of tightening torque on Force-displacement curve of the structure

물 변위에 따라 나타내었다. 조임력이 40 N·m일 때의 구조물 곡선(Fig. 9의 파선)을 예로 들면 구조물 상부가 8.2 mm의 변형을 하기 전까진 LRB에 변형이 집중적으로 발생하지만 이후부터는 마찰패드가 미끄러져 큰 변형이 발생하고 LRB의 추가변형은 크지 않은 것을 볼 수 있다. 이를 통해 하중이 슬립하중에 도달하기 전까진 LRB에 변형이 집중적으로 발생하지만 이후 항복마찰력에 도달하면 마찰부위에 많은 변형이 집중되도록 설계한 대로 거동하였음을 확인하였다. 또한, 볼트의 조임력을 증가시켜 마찰요소의 슬립하중이 증가함에 따라 마찰부위에 미끄러짐이 발생하는 시점이 점점 늦춰지게 된다.

Fig. 10은 볼트의 조임력을 40 N·m로 고정했을 때 체결하는 볼트수를 변화시켜 실험한 구조물의 하중-변위 결과이며, 역시나 볼트수 증가에 따라

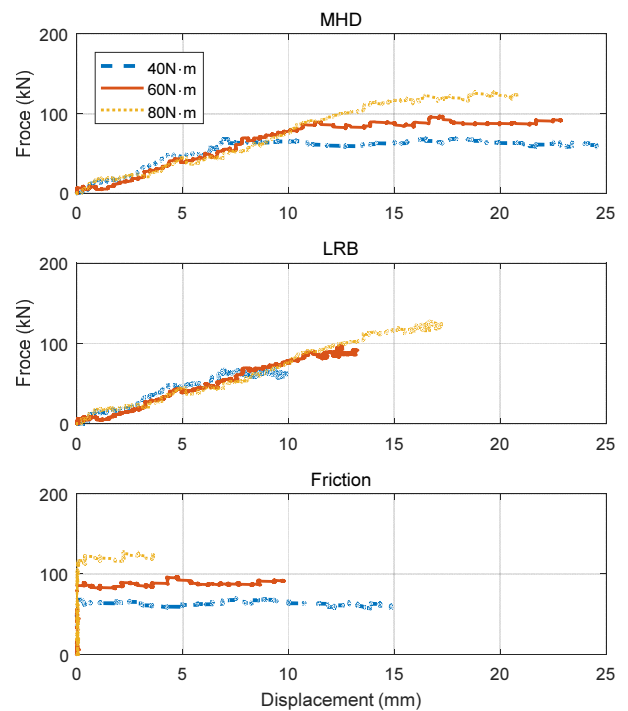


Fig. 8. Hysteretic behavior of MHD components

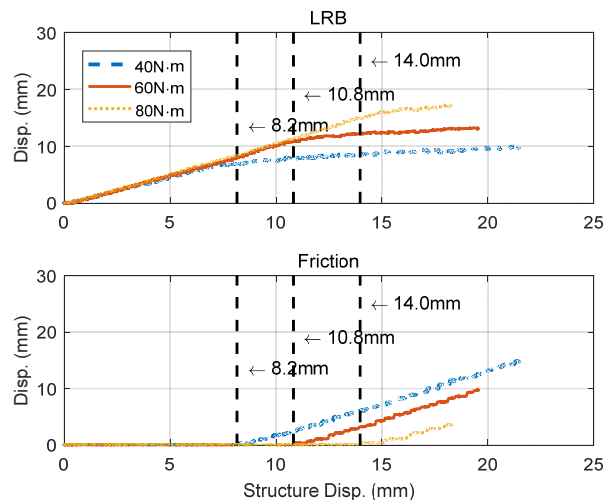


Fig. 9. Displacement of the MHD components corresponding to the deformation of the structure

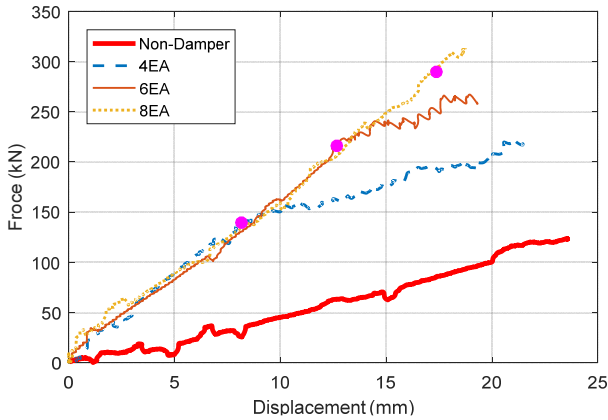


Fig. 10. Effect of the number of tightening bolts on Force-displacement curve of structure

구조물의 항복강도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 볼트의 개수와 조임력을 변수로 감쇠장치의 슬립하중을 조절하여 정적가력실험을 수행하였으며, 감쇠장치의 슬립하중은 예측하중과 5% 이내의 오차율을 가지며 안정적인 이력을 그리는 것을 확인하였다. 또한 MHD의 설치로 인해 구조물의 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

### 3.3 반복가력실험

MHD 설치 구조물의 반복가력실험을 수행하기 위해 Fig. 11과 같이 층고 3 m에 대한 층간변형률 0.1%에 해당하는 3 mm부터 층간변형률 1.0%에 해당하는 30 mm까지의 변위를 증폭시켜 각 사이클을 3회씩 반복하는 변위 제어를 실시하였다.

반복가력실험에선 볼트 4개, 조임력 40 N·m으로 체결할 때를 대조군으로 선정하여 볼트의 개수를 6개, 조임력을 80 N·m으로 각각 변화시켰을 때의 가력변위를 달리하여 실험을 수행하였다. Fig. 12는 가력변위에 따른 감쇠장치 설치 전·후 구조물의 하중-변위이력을 나타낸 그림이다.

감쇠장치를 설치하지 않은 구조물은 탄성 거동이 아닌 비탄성 거동을 하는데 이는 가력장치와 구조물 사이의 이격으로 인해 가력방향이 바뀔 때 초기 강성이 변화하여 발생하는 현상인 것으로 판단된다. 가력 방향이 바뀌는 초기 변형을 지나면 5.0 kN/mm의 강성을 지니며 거동하기 때문에 구조물을 이루는 부재 자체의 속성은 탄성인 것으로 판단하였다.

정적가력실험 결과와 같이 감쇠장치 설치 구조물은 삼선형 이력 거동을 보인다. 감쇠장치 설치 구조물은 원 구조물보다 큰 초기강성을 가지며, 감쇠장치 설치 시 볼트수와 조임력에 의해 결정되는 각각의 슬립하중에서 일정하게 미끄러짐이 발생한다. 감쇠장치의 마찰항복 이후 구조물의 강성은 원 구조물의 강성과 평행하게 거동하며, 구조물에 발생하는 변형이 커질수록 에너지 소산면적이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 원 구조물은 15 mm의 변형에서 88.1 kN의 내력을 가지지만, 볼트 4개, 조임력 40 N·m / 볼트 4개, 조임력 60 N·m / 볼트 6개, 조임력 40 N·m인 감쇠장치를 체결할 때의 구조물은 각각 163.3 kN, 229.1 kN, 267.6 kN으로 내력이 증가하게 된다.

Fig. 13은 각 변위 스텝에 따른 구조물의 하중-변위이력 및 MHD를 구성하는 LRB와 마찰요소의 하중-변위 이력곡선을 나타낸다. 층간변형률 0.3%(Step 3)의 변형이 발생할 때까지는 감쇠장치를 설치한 모든 실험체

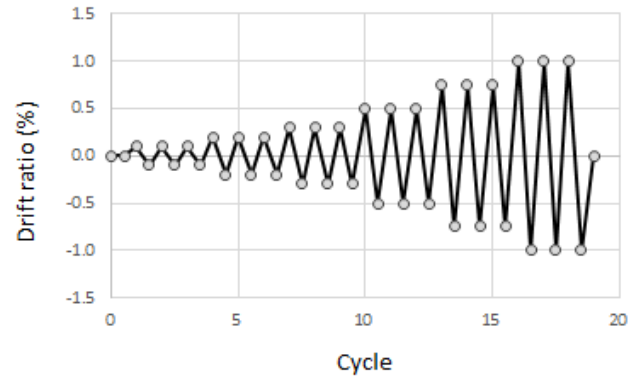


Fig. 11. Loading history

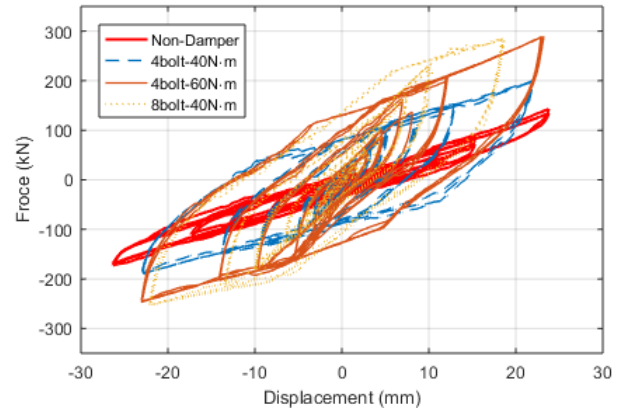


Fig. 12. Relationship between structural behavior and deformation step

가 마찰 항복력에 도달하지 못해 마찰 요소에서는 변형이 발생하지 않으며 구조물은 LRB만 설치한 것과 같은 이선형 거동을 보인다(Fig. 13.1(a-b)). 하지만 층간변형률 0.5%(Step 4)에선 슬립하중이 가장 작은 볼트 4개, 조임력 40 N·m으로 체결한 구조물의 마찰 부위에 미끄러짐이 발생하며(Fig. 13.2(a-b)), 층간변형률 0.75%(Step 5)에선 볼트 4개, 조임력 60 N·m으로 체결한 구조물의 마찰부가 미끄러지며 안정적인 구조물 이력이 나타난다(Fig. 13.3(a-b)). 또한 볼트 4개, 조임력 40 N·m의 경우(Fig. 13의 파선) Step 4에서 Step 5로 변형이 증가하여도 LRB의 최대 변형은 4.6 mm로 동일하지만 마찰 변형은 2.5 mm에서 8.2 mm로 5.7 mm가 증가한 것으로 보아 마찰부가 슬립하중에 도달하여 마찰부에 변형이 집중되며 에너지가 소산된다는 것을 확인할 수 있다. Table 2는 각 스텝에서 발생한 슬립하중의 크기와 예측값을 비교한 표이며, 최대 5.3%의 오차율을 보이며 예측값의 근사 범위내에서 미끄러짐이 발생한 것을 확인하였다.

## 4. 비선형 정적해석

MHD 설치에 따른 구조물의 내진성능향상 효과를 수치해석을 통해 살펴 보았으며, 실험과 비교하여 실험 결과의 타당성을 검증하였다. 해석 프로그램은 Midas Gen을 사용하였다.

실험 결과와의 동등한 비교를 위해 실험에 의해 도출된 골조의 강성을 해석모델에 맞추어 해석을 진행하였다. 다중거동 복합형 감쇠장치를 구성

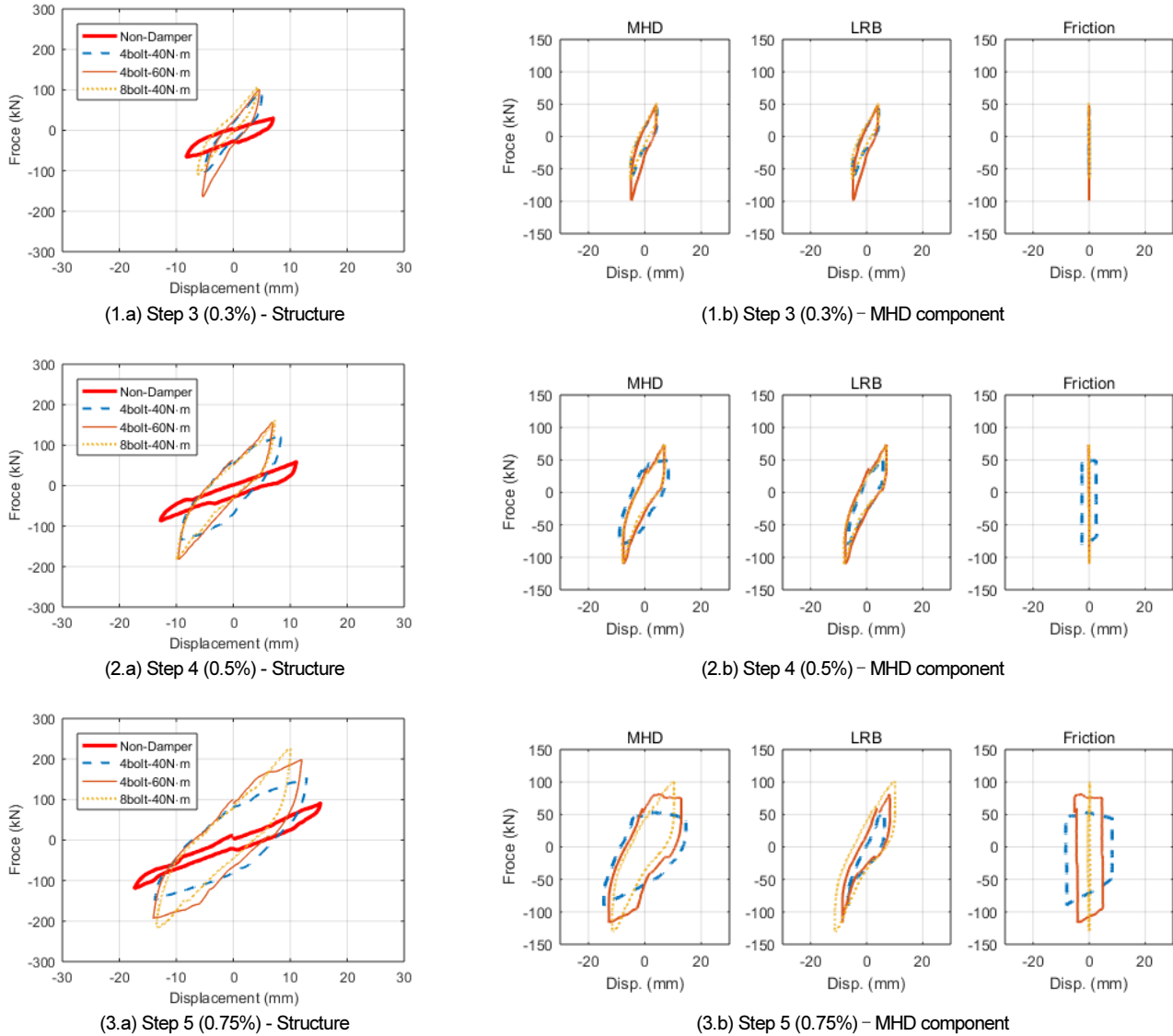


Fig. 13. Force-displacement curves according to the deformation step

Table 2. Comparison of calculated and experimental slip loads of the MHD

Step	The number of High-tensile Bolt	Tightening Torque per Bolt (N · m)	Slip Load (kN)		Error Rate (%)
			Calculated	Experiment	
4	4	40	61.3	59.8	2.5
	4	60	91.9	-	-
	8	40	122.6	-	-
5	4	40	61.3	61.8	0.9
	4	60	91.9	96.0	4.4
	8	40	122.6	-	-
6	4	40	61.3	58.6	4.5
	4	60	91.9	96.8	5.3
	8	40	122.6	119.7	2.4

하는 LRB와 마찰요소는 Gen에 탑재되어 있는 General link 요소 중 1축 소성 특성을 가지며 이력거동을 통해 에너지를 소산하는 장치에 대표적으로 사용되는 이력거동 시스템(Hysteretic system) 요소를 적용하였다. Fig. 14와 같이 대각가새, LRB 그리고 마찰요소를 직렬 연결하여 모델링하였

다. LRB의 속성은 실험결과를 토대로 초기강성 25 kN/mm, 항복강도 20 kN, 항복후강성비는 0.3으로 입력하였고, 마찰요소의 초기강성은 400 kN/mm, 항복강도는 볼트 4개, 조임력 40 kN·m로 체결할 때의 슬립하중인 61.3 kN으로 정의하여 해석을 진행하였다.

비선형 정적해석을 수행한 결과, Fig. 15와 같이 수치해석에 의한 감쇠 장치의 거동이 정적가력실험 결과와 유사하였으며, 감쇠장치 구성요소의 직렬 연결 거동이 해석적으로 구현되는 것을 확인하였다.

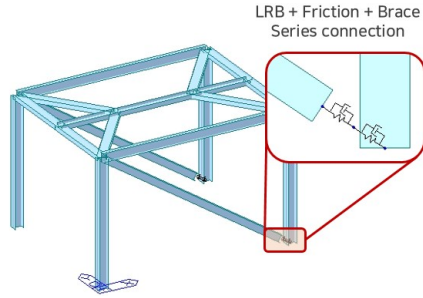


Fig. 14. Analytical model

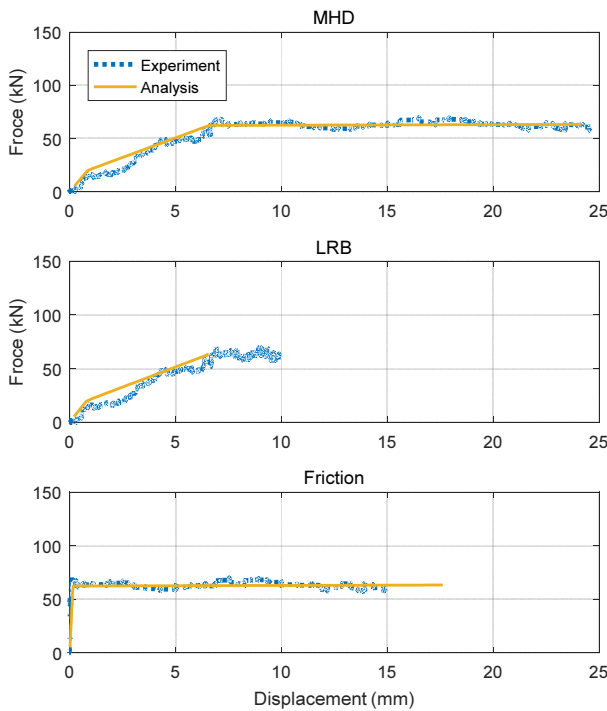


Fig. 15. Comparison of experimental and analytical results: Hysteretic behavior of MHD components

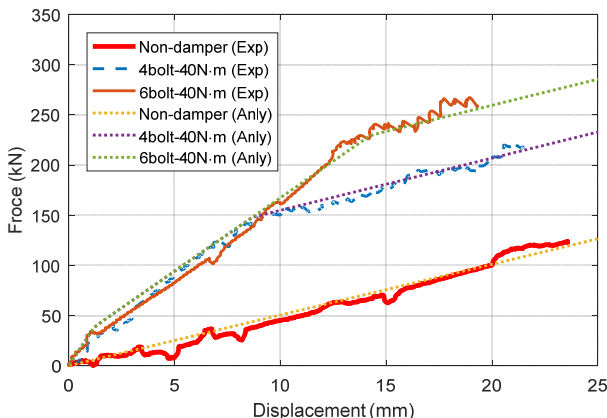


Fig. 16. Comparison of experimental and analytical results: Force-displacement curve of structure

Fig. 16을 통해 구조물의 하중-변위이력 또한 실험 결과와 근사한 것을 알 수 있다. 해석을 통해 추출된 감쇠장치 설치 구조물의 초기 강성은 31.0 kN/mm이며, 구조물 상부의 변위가 1.1 mm에 도달할 때 1차 항복하여 강성 14.4 kN/mm로 거동하다가 구조물 변위가 8.4 mm 이상 발생하는 경우 감쇠장치를 설치한 구조물의 강성이 원 구조물의 강성과 동일한 수치인 5.0 kN/mm로 감소하는 삼선형 거동을 보인다.

MHD가 설치된 구조물의 경우, Fig. 17과 같이 가새와 MHD가 직렬 연결된 시스템이 구조물의 강성과 병렬 연결된 것으로 표현될 수 있다. Fig. 17에서  $k_j$ ,  $k_b$ ,  $k_d$ ,  $f_d$ 는 구조물의 강성, 가새의 강성, MHD의 강성과 항복 하중을 나타낸다.

가새와 MHD가 결합된 시스템(이하 MHD 시스템)의 초기강성은 가새와 마찰요소, LRB의 1차강성이 직렬연결 되어 있으므로 식 (1)과 같이 산정하며, 항복후강성은 식 (2)와 같이 가새와 마찰요소, LRB의 2차강성이 직렬 연결된 식으로 산정한다.

$$k_{d1} = \frac{k_b \times k_{d,F} \times k_{d,L1}}{k_b \cdot k_{d,F} + k_b \cdot k_{d,L1} + k_{d,F} \cdot k_{d,L1}} \quad (3)$$

$$k_{d2} = \frac{k_b \times k_{d,F} \times k_{d,L2}}{k_b \cdot k_{d,F} + k_b \cdot k_{d,L2} + k_{d,F} \cdot k_{d,L2}} \quad (4)$$

여기서,  $k_{d1}$ ,  $k_{d2}$ 는 MHD 시스템의 초기강성 및 항복후강성을 나타낸다.  $k_b$ 는 가새,  $k_{d,F}$ 는 마찰요소의 강성이며,  $k_{d,L1}$ ,  $k_{d,L2}$ 는 각각 LRB의 1차, 2차 강성이다.

MHD 시스템은 Fig. 18과 같이 구조물 대각방향으로 설치되어 있기 때문에 구조물 강성과 합산하기 위해선 다음 식을 이용한다.

$$K = k_j + k_d \cdot \cos^2 \theta \quad (5)$$

식 (3~5)를 적용하여 산정한 MHD 시스템과 MHD 시스템을 설치한 구

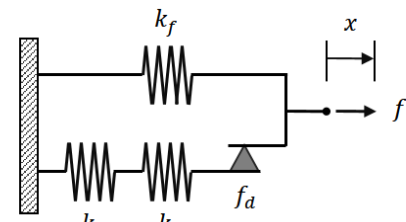


Fig. 17. Structure-Brace-MHD System

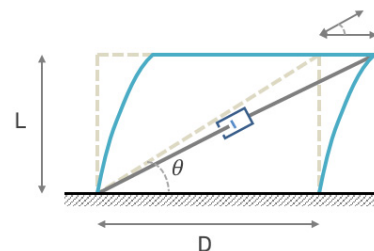


Fig. 18. Correlations of diagonal direction in stiffness

**Table 3.** Comparison of calculated and analytical stiffness of a structure

Unit : kN/mm		Initial Stiffness	Second Stiffness
Brace		161.1	161.1
LRB		25.0	6.25
Friction		400	400
MHD System		20.5	5.9
Structural Stiffness	Calculated	33.4	13.2
	Analysis	31.0	14.4

**Table 4.** Variation of strain energy due to the MHD

Deformation of Structure (mm)	Force (kN)			Strain energy (kN.m)		
	Original frame	MHD (4 bolt 40N.m)	MHD (6 bolt 40N.m)	Original frame	MHD (4 bolt 40N.m)	MHD (6 bolt 40N.m)
1.0	5.0	31.6	31.6	2.5	15.8	15.8
5.0	25.0	94.2	94.2	62.5	268.1	268.1
10.0	50.0	154.9	167.3	250	906.4	913.1
15.0	75.0	180.9	233.5	562.5	1745.7	1922.4
20.0	100.0	206.9	259.5	1000	2715.1	3151.1

조물의 강성은 Table 3과 같으며, 실험에 의해 도출된 강성과 비슷한 수치임을 확인할 수 있다. 이러한 강성을 토대로 구조물의 최대 탄성에너지치를 변위에 따라 산정한 결과 Table 4와 같이 원 구조물보다 MHD 설치 구조물이 20 mm 변형에서 최대 3.2배의 탄성에너지를 축적할 수 있는 것으로 확인되었다.

## 5. 결론

MHD를 설치한 철골 구조물의 1/2 스케일 축소모델을 대상으로 정적 및 반복가력실험을 수행하여 내진보강 효과를 검증하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) MHD를 적용한 1/2 스케일 철골 구조물의 정적가력 및 반복이력실험을 통해 감쇠장치에 의한 구조물의 내진성능향상 효과를 확인하였다. 원 구조물은 탄성거동을 하지만, MHD를 설치한 구조물은 예상한 강도의 5% 오차 이내에서 항복이 발생하는 삼선형 거동을 보인다. 감쇠장치의 설치로 구조물의 초기 강성은 원 구조물보다 6배 증가하였으며, 항복후강성은 3배 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한, 감쇠장치의 마찰요소를 체결하는 볼트수와 조임력을 증가시킬수록 감쇠장치의 슬립하중이 증가하기 때문에 감쇠장치 설치 구조물의 항복강도가 증가하는 경향을 확인하였으며, 변형크기에 따라 구조물의 강도는 2-3배의 향상한 것을 검증하였다.
- 2) 단자유도 수치해석을 통해 실험결과의 타당성을 검증하였으며, MHD를 구성하는 LRB와 마찰요소의 직렬연결로 인해 작은 변형에서 LRB에 변형이 집중되다가 항복 마찰력에 도달하면 마찰 부위

에 미끄러짐이 발생하게 되는 삼선형 거동이 해석적으로 구현됨을 확인하였다.

- 3) 가새와 MHD가 결합된 시스템의 초기강성과 항복후강성 산정식 및 MHD가 설치된 구조물의 강성 산정식이 수치해석을 통해 타당함을 확인하였으며, MHD 설치 시 구조물에 축적되는 탄성에너지는 최대 3.2배 증가함을 확인하였다.

## / 감사의 글 /

본 논문은 한국연구재단 도약연구 지원 사업(2015R1A2A1A10054506) 과 국토교통과학기술진흥원 도시건축연구사업(18AUDP-B106327-04)의 지원을 받아 수행되었음.

## / REFERENCES /

1. Kim DH, Experimental study on the seismic performance of hybrid buckling-restrained braces, Journal of KOSHAM, 2013 Aug;13(4): 23-29.
2. Kim JY, Jung IY, Kim HG, Kim DH, Evaluation on the structural performance of hybrid damper using high-damping rubber and steel, Journal of Korean Association for Spatial Structures, 2016 Sep;16(3): 99-106.
3. Marshall JD, Charney FA, A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis, Journal of Constructional Steel Research, 2010;66(10):1278-1286.
4. Christopoulos C, Montgomery M, Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013; 42(15):2217-2233.
5. Roh JE, Lee SH, Experimental Evaluation of a Multi-action Hybrid Damper under Cyclic Loading, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 2016;32(11):3-9.
6. Lee SH, Min KW, Park JH, Lee RJ, Optimal design of friction dampers based on the story shear force distribution of a building structure, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2005;9(6):21-30.
7. Ahn TS, Kim YJ, Park JH, Kim HG, Jang DW, Oh SH, Experimental study on a cantilever type metallic damper for seismic retrofit of building structures, Journal of Korean Society of Steel Construction, 2012;24(2):149-161.
8. Moon KH, Han SH, Jo HC, Lee KS, Seismic retrofit design procedure using a friction damper, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2011;15(6):45-53.
9. MIN KW, Kim JK, Lee SH, Vibration tests of 5-storey steel frame with viscoelastic dampers, Engineering Structures, 2004;26(6): 831-839.