

강재 슬릿과 회전 마찰형 감쇠 장치를 결합한 복합 감쇠 장치의 실험적 구조 성능 평가

Experimental Evaluation for Structural Performance of Hybrid Damper Combining Steel Slit and Rotational Friction Damper

김 유 성*
Kim, Yu-Seong

강 주 원**
Kang, Joo-Won

박 병 태***
Park, Byung-Tae

이 준 호****
Lee, Joon-Ho

Abstract

In order to develop the compatible damping device in various vibration source, a hybrid wall-type damper combining slit and friction damper in parallel was developed. Cyclic loading tests and two-story RC reinforced frame tests were performed for structural performance verification. As a result of the 5-cyclic loading test according to KBC-2016 and low displacement cyclic fatigue test, The hybrid wall type damper increased its strength and the ductility was the same as that of the slit damper. In addition, As a result of the two-layer frame test, the reinforced frame had about twice the strength of the unreinforced frame, and the story drift ratio was satisfied to Life Safety Level.

Keywords : Damping device, Cyclic loading test, Steel slit damper, Rotational friction damper, Hybrid damper

1. 서론

최근 일본이나 중국에서 발생한 큰 지진으로 수 많은 인명 피해와 경제적 피해가 발생한 바 있다. 우리나라의 경우 경주와 포항 지진으로 인하여 한 반도 또한 지진 안전지대가 아니라는 인식이 확산되고 있다. 국내에서는 1988년 내진 설계 기준이 제정되었으나 2005년 이전까지는 6층 이상의 건축물에만 적용되었다¹⁾. 따라서 1988년 및 2005년 이전에 지어진 6층 미만의 건축물은 내진 설계가 적용되지 않아 지진에 대한 대비가 필요하며 구조물의 성능 평가에 의한 내진 보강이 요구되고 있다.

이에 따라 감쇠 장치를 적용하여 구조의 국부 보강만으로 지진 하중을 저감시키는 제진 공법이 시

공되고 있으며²⁾ 금속항복형 감쇠 장치, 마찰형 감쇠 장치, 점성 감쇠 장치, 점탄성 감쇠 장치 등 다양한 재료의 형태로 감쇠 장치가 개발되고 있다. 이 중 금속항복형 감쇠 장치는 구조물이 변형될 때 강재에 발생하는 탄성 및 소성 거동을 이용하여 구조물에 가해진 에너지를 소산한다. 철판과 마찰 패드로 구성된 마찰형 감쇠 장치는 주 구조물이 항복하기 전 재료 간 마찰력을 이용하여 에너지를 소산시킨다. 하지만 금속항복형 감쇠 장치 및 마찰형 감쇠 장치와 같이 단일 재료로 개발된 기존 감쇠 장치는 강진에 맞춰 설계되는 경우 풍하중 또는 약진 발생 시 에너지 흡수력이 미미하여 강진과 약진에 동시 대응할 수 없는 단점을 가지고 있다³⁾. 특히 마찰형 감쇠 장치의 경우 여진에 의해 마찰부가 마모되면 성능을 발휘하기 힘들다. 그러므로 진동원의 종류에 따라 별도의 제진 장치를 설치하는 것이 일반적이며, 이에 따른 비용의 증가와 설치 위치 등이 문제점으로 지적되었다. 이러한 영향으로 최근 다양한 진동원에 대응 가능한 복합 감쇠 장치가 개발되고 있으며, 다양한 크기의 지진 하중 및 풍하중에 대해 감쇠 능력을 갖도록 항복 강도와 초기 강성을 선택

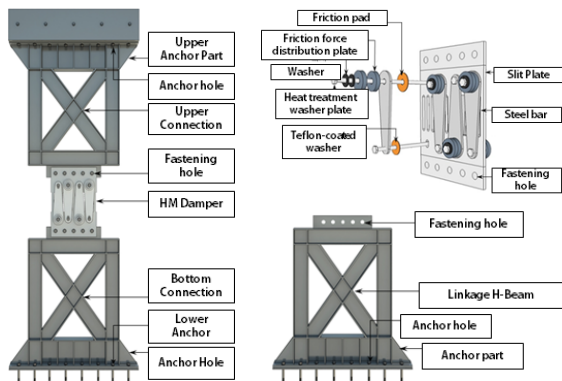
* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 박사과정
Department of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
*** 정회원, 메트로티앤씨(주) 연구소장, 공학박사
Metro T&C, Research Institute, CTO
**** 교신저자, 정회원, 서일대학교 건축공학과 조교수
School of Architecture, Seoil University
Tel: 02-490-7427 Fax: 02-490-7808
E-mail: 20190022@seoil.ac.kr

적으로 설계할 수 있는 감쇠 장치에 대한 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 강제 슬릿의 항복에 의하여 큰 진동 에너지를 소산하는 슬릿 댐퍼와 높은 초기 강성으로 작은 변위에도 에너지 소산이 발생하는 마찰 댐퍼를 병렬로 연결한 하이브리드 벽식 댐퍼를 제안하고자 한다. 이를 위해 반복 가력 실험 및 2층 프레임에 적용한 골조 실험을 통해 구조 성능 평가를 수행하였다.

2. 하이브리드 벽식 댐퍼

2.1 하이브리드 벽식 댐퍼의 구성

하이브리드 벽식 댐퍼는 <Fig. 1>과 같이 크게 복합 감쇠 장치와 연결 장치로 구성되어 있다. 복합 감쇠 장치의 주요 구성 요소는 강제 이력형 감쇠 장치인 슬릿 플레이트와 회전형 마찰 패드이다. 강제 플레이트에 스틸바를 이용하여 비석면 마찰 패드, 테프론 코팅와셔를 정착시킨 후 마찰 분산 와셔를 고장력 볼트로 체결하였다.



<Fig. 1> Shape of hybrid damper

슬릿 플레이트는 항복이 발생하기 전에는 일반적인 부재와 마찬가지로 구조물의 강성 및 내력을 증가시키는 효과를 가지고 있다. 항복이 발생하면 에너지 소산 현상이 발생하여 주 구조체가 부담하는 지진 하중을 저감시키는 작용을 한다. 이에 따라 감쇠 장치의 강성을 확보하기 위해 슬릿을 면내 방향으로 배치하였다. 스틸바와 슬릿 플레이트 사이의 마찰 패드는 <Fig. 2>와 같이 비석면 유기체

(Non-asbestos organic material)를 이용한 브레이크 라이닝 패드를 사용하였다. 이러한 마찰 감쇠 장치는 지진 에너지를 소산시키며, 무한 강성을 지니고 있어 하중이 슬립 하중에 도달하기 전까지 거동하지 않는다. 또한 강제 이력형 감쇠 장치에 비해 초기 탄성 강성이 크기 때문에 동일 변위의 지진력이 저항 시스템에 대해 더 많은 지진 에너지를 소산할 수 있고, 하중의 크기, 온도, 진동수 및 주기에 큰 영향을 받지 않는다. 복합 감쇠 장치와 바닥면 및 천정면을 연결하기 위한 연결 장치는 연결부(H형강)와 앵커부(판재)로 구성되어 구조물의 하중을 지지하도록 하였다.



<Fig. 2> Brake lining pad

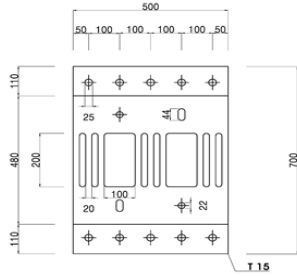
<Table 1> Data of brake pad

Contents	Standard
Textile	ARAMID FIBER +Filler
Shape	Circle
Friction force	1.60 ± 0.20%
Longitude	HR M 80~90
Thickness	4 ± 0.2mm
Full diameter	φ 100 ~ ± 0.5mm
Hole diameter	φ 21.5 ~ 22.5mm

2.2 복합 감쇠 장치의 설계

복합 감쇠 장치에 사용된 강제 이력형 슬릿 감쇠 장치는 <Fig. 3>과 같이 총 9개의 스트립(Strips)으로 구성되어 있다. 슬릿 하나의 단면 2차 모멘트는 $tb^3/12$ 과 같고, 이에 따라 단위 변위에 대한 슬릿 댐퍼의 강성은 식 (1)과 같다. 여기서 E 는 사용 강재의 탄성 계수, I 는 슬릿의 단면 2차 모멘트, l_0 는 슬릿의 길이, c 는 강제 슬릿의 양단 고정도 계수 ($c=1$ 로 가정), n 은 강제 슬릿의 스트립 개수, t 는 스트립의 두께, b 는 스트립의 폭이다.

$$k_d = cn \frac{12EI}{l_0^3} = cn \frac{Etb^3}{l_0^3} \quad (1)$$



<Fig. 3> Shape of slit plate and size

강재 슬릿이 횡력에 의한 항복 변위보다 큰 변형이 발생하여 스트립 양 끝단이 항복하고 전단면이 항복할 경우 식 (2)와 같은 소성 모멘트 M_p 가 발생한다.

$$M_p = \sigma_y \frac{tb^2}{4} \quad (2)$$

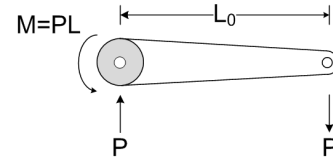
여기서 σ_y 는 강재의 항복 강도이며, 횡력(P)과 변위(δ)를 완전 탄소성으로 가정하면 에너지 보존법칙에 의해 식 (3)이 성립하고, 미소 변형에 대해 소성 변위량(δ_p)은 $l_0\theta_p$ 로 가정할 수 있으므로 슬릿 감쇠 장치의 항복 하중 P_y 은 식 (4)와 같다. 또한 식 (1)과 (4)의 관계에서 슬릿 감쇠 장치의 항복 변형은 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$\frac{1}{2} P_y \delta_p = n M_p \theta_p \quad (3)$$

$$P_y = \frac{2nM_p}{l_0} = \frac{n\sigma_y tb^2}{2l_0} \quad (4)$$

$$\delta_y = 0.5\epsilon_y l_0^2 / b \quad (5)$$

회전형 마찰 감쇠 장치는 <Fig. 4>와 같이 횡력에 의해 마찰 감쇠 장치에 작용하는 힘(F)과 마찰 패드의 회전 모멘트(M)가 평형을 이루며 식 (6)과 같은 상관 관계가 있다. 마찰 패드에 의한 순수 모멘트는 식 (7)과 같다.



<Fig. 4> Moment of rotary friction damper

$$M = PL_0 \quad (6)$$

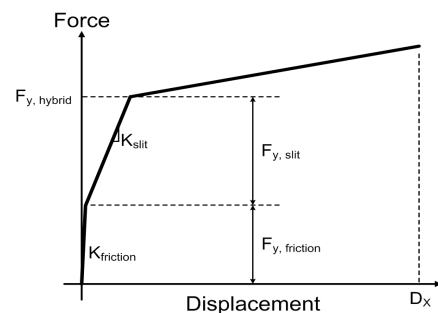
$$M = \mu N Q R_m = \mu N Q \left[0.5 \times (R_1^2 + R_2^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

여기서 μ 는 마찰 계수, N 은 마찰 면수, Q 는 볼트의 장력, R_m 은 마찰면의 유효 모멘트 팔 길이다. 마찰면의 유효 면적은 단면 2차 반지름 방정식을 적용하였으며, R_1 은 마찰재의 내경 반지름, R_2 는 마찰재의 외경 반지름이다. 위 관계식을 정리하면 식 (8)과 마찰 감쇠 장치의 항복 강도를 결정할 수 있다.

$$P = \mu N Q \frac{R_m}{L} \quad (8)$$

이론식에 의한 슬릿 감쇠 장치와 마찰 감쇠 장치의 항복 강도를 병렬 연결할 경우 식 (4)의 슬릿의 항복 강도(F_{slit})와 마찰 감쇠 장치의 항복 강도($F_{friction}$)의 단순 합산으로 식 (9)와 같다. 복합 감쇠 장치의 항복 강도와 강성 최대 변위는 <Fig. 5>와 같이 도식화 할 수 있다.

$$F_{hybrid} = F_{slit} + F_{friction} = \left(\frac{n\sigma_y tb^2}{2l_0} \right) + \left(\frac{\mu N Q R_m}{L} \right) \quad (9)$$

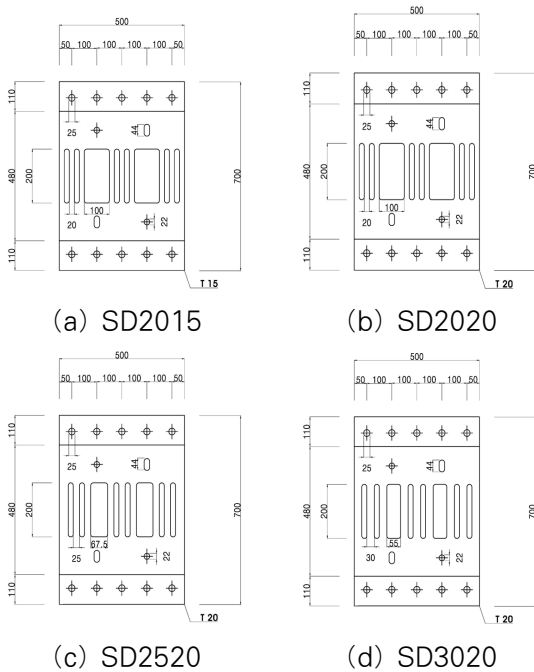


<Fig. 5> Yield strength of hybrid slit friction damper

3. 복합 감쇠 장치 성능 실험

3.1 슬릿 감쇠 장치(SD)의 성능 실험

<Fig. 6>은 실험에 사용된 강제 이력형 슬릿 감쇠 장치로 SS400($f_y = 235N/mm^2$) 강재로 제작하였으며 길이 200mm의 강제 슬릿 9개로 구성되어 있다. 각 실험체 슬릿의 간격과 감쇠 장치의 두께는 <Table 2>와 같다.



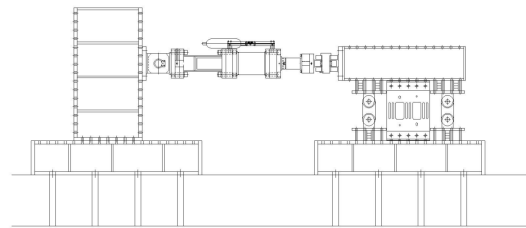
<Fig. 6> Specimen of slit damper

<Table 2> Specimen of hybrid damper

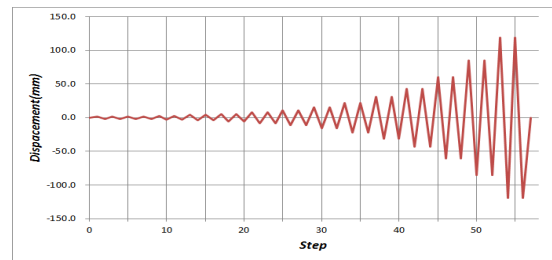
Specimen	Slit gap (mm)	Thickness (mm)
SD2015	20	15
SD2020	20	20
SD2520	25	20
SD3020	30	20

실험 방법은 <Fig. 7>과 같이 500kN 유압 서브 액츄에이터를 사용하여 변위 제어를 실시하였다. 가력 이력은 ‘FEMA-461, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components’의 ‘Protocol 1 for Quasi-Static Cyclic testing’⁴⁾을 기초로 하여 <Fig. 8>과 같이 각 사이클

마다 1.4배씩 변위를 증폭하였다. 최소 변형량(Δ_0)은 강재가 항복되기 전인 1.5mm로 가정하였으며, 목표 변위 제어량(Δ_m)은 일반적인 구조물의 층고인 3m에 대한 허용 층간 변형률⁵⁾ 2%에 해당하는 60.7mm로 설정하였다.

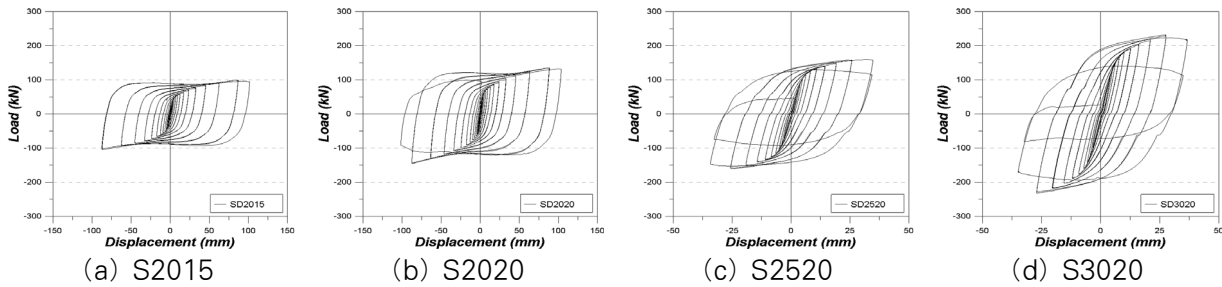


<Fig. 7> Cyclic loading test setup



<Fig. 8> Load protocol for testing

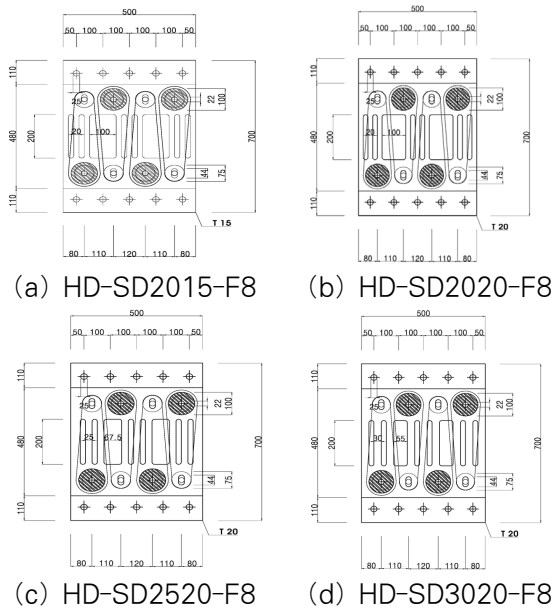
<Fig. 9>는 슬릿 감쇠 장치 실험체인 S2015, S2020, S2520, S3020의 실험 결과에 대한 하중-변위 곡선을 나타내었다. 두 실험체 모두 충분한 소성 변형을 한 뒤 파단할 때 까지 항복 후 강성비로 인하여 내력이 상승하면서 안정적인 이력 거동을 하였다. 각 실험체의 최종 파단은 S2015, S2020의 경우 26번째 사이클에서 하부 슬릿에 균열이 발생하며 27번째 사이클(119.1mm)에서 하중-변위 곡선의 강도가 하락하기 시작하여 마지막 27번째 사이클에서 슬릿이 파단되었다. S2520, S3020은 18번째 사이클에서 하부 슬릿에 균열이 발생하였으며 19번째 사이클(60.7mm)에서 하중-변위 곡선의 강도가 하락하기 시작하여 마지막 20번째 사이클(85mm)에서 슬릿이 파단되는 것을 확인하였다. S2020과 비교해본 결과, 강제 슬릿의 폭을 증가시킬 경우 감쇠 장치의 강도는 증가하지만 연성도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 요구 목표 성능이 특등급이거나 층간 변위가 작은 경우 강제 슬릿의 폭을 변화시켜 적용이 가능할 것으로 판단된다.



<Fig. 9> Load-Displacement curve of slit damper

3.2 복합 감쇠 장치의 성능 실험

앞서 실험한 슬릿 감쇠 장치와 마찰 감쇠 장치를 병렬 연결하여 결합한 복합 감쇠 장치에 대한 성능 실험을 하였다. 실험체는 <Fig. 10>과 같이 슬릿 감쇠 장치에 4mm 두께를 가지는 8개의 마찰 패드를 정착시켰으며, 마찰면을 구성하는 내측과 외측 강판에 1mm 깊이의 음각을 두어 반복 이력 실험 중 마찰면을 이탈하지 않도록 고정하였다. 또한 장력을 고르게 마찰면에 분포시키기 위해 분배 플레이트를 2개씩 배치하였고 고정력 볼트의 장력은 150N·mm로 조립하였다.



<Fig. 10 > Specimen of hybrid damper

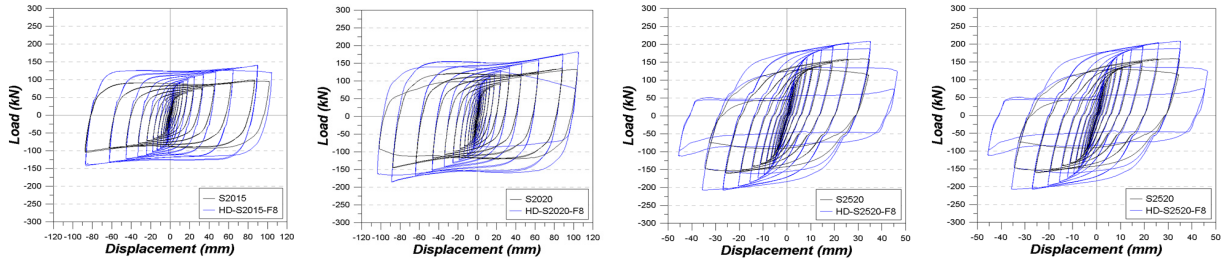
<Table 3> Specimen of hybrid damper

Specimen	Slit gap (mm)	Thickness (mm)
HD-SD2015-F8	20	15
HD-SD2020-F8	20	20
HD-SD2520-F8	25	20
HD-SD3020-F8	30	20

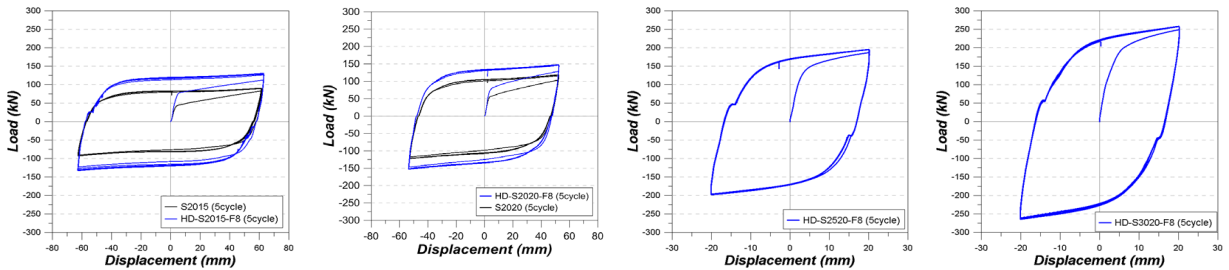
실험 방법은 <Fig. 7>과 같이 슬릿 감쇠 장치의 성능 실험과 동일한 형상의 실험을 진행하였으며, 가력 이력도 마찬가지로 사이클마다 1.4배씩 변위를 증폭하였다.

<Fig. 11>은 복합 감쇠 장치 성능 실험에 사용된 실험체와 마찰 감쇠 장치를 연결하지 않은 슬릿 감쇠 장치의 하중-변위 곡선을 비교한 그래프이다. HD-S2015-F8, HD-S2020-F8, HD-S2520-F8, HD-S3020-F8 실험체 모두 슬릿 감쇠 장치에 비해 복합 감쇠 장치가 동일 변위에 대해 강도가 약 45%, 32%, 31%, 14% 증가하였으며, 충분한 소성 변형을 한 뒤 슬릿 감쇠 장치와 동일한 연성도를 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 각 복합 감쇠 장치의 최종 파단은 HD-S2015-F8, HD-S2020-F8의 경우 17번째 사이클에서 하부 슬릿에 균열이 발생하였으며 27번째 사이클(119.1mm)에서 하중-변위 곡선의 강도가 하락하기 시작하여 27번째 사이클에서 슬릿 감쇠 장치가 파단되었다. HD-S2520-F8와 HD-3020-F8은 18번째 사이클에서 하부 슬릿에 균열이 발생하였으며 27번째 사이클에서 슬릿 감쇠 장치가 파단되었다.

<Fig. 12>는 KBC 2016 기준에 따라 반복 가력 실험 결과에 따른 한계 변위 상태에서 5사이클 반복 실험을 하여 나타낸 하중-변위 곡선이다. 기준에 따르면 변위 이력형 감쇠 장치의 한계 변위에서 5사이클 반복 실험 결과 안정적인 이력 거동으로 내력이 일정하게 유지되어야 한다. 모든 실험체의 한계 변위에서 안정적인 이력 거동을 나타내었으며 HD-S2015-F8과 HD-S2020-F8 실험체가 강제 이력형 감쇠 장치인 S2015, S2020에 비해 초기 강성이 각각 약 30.1%, 23.6% 증가하는 것을 확인하였다.



(a) HD-SD2015-F8 (b) HD-SD2020-F8 (c) HD-SD2520-F8 (d) HD-SD3020-F8
 <Fig. 11> Load-Displacement curve of cyclic loading test



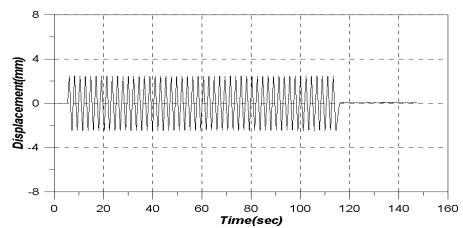
(a) HD-SD2015-F8 (b) HD-SD2020-F8 (c) HD-SD2520-F8 (d) HD-SD3020-F8
 <Fig. 12> Load-Displacement curve of 5 cyclic loading test

3.3 복합 감쇠 장치의 저변위 반복 실험

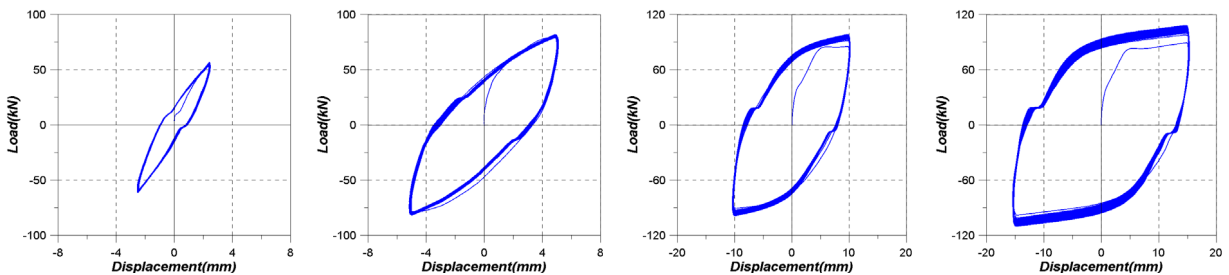
KBC 2016에 따른 저변위 반복 실험은 여진을 고려하여 저변위에서 복합 감쇠 장치가 안정적인 거동을 하는지 확인하기 위한 목적⁹⁾을 가지고 있다. 0.25Hz로 강제 변위를 50회 반복 가력하였을 때 실험체는 충분한 내력으로 안정적인 이력 거동을 할 수 있어야 한다. 실험체는 앞선 반복 가력 시험 결과 강도가 가장 증가된 HD-S2015-F8로 선정하였으며 두께 15t, 슬릿 간격 20mm의 슬릿 감쇠 장치와 150N·mm의 고장력 볼트 장력이 도입된 8개의 마찰 감쇠 장치를 조립하였다. 실험 방법은 500kN의 유압 서브 액추에이터를 사용하여 <Fig. 13>에 나타난 강제 변위 2.5mm (Dyn 2.5)의 하중 이력과 마찬가지로 5mm, 10mm, 15mm의 강제 변위로 반복

가력 실험을 하였으며, 실제 지진과 가진 효과를 구현하기 위해 진동수는 0.25Hz로 가력하였다.

<Fig. 14>는 저변위 피로 실험에 대한 하중-변위 곡선이다. 모든 실험체에서 내력의 감소 없이 안정적인 이력 거동을 하였다. 슬립이 발생하기 전까지 마찰 감쇠 장치의 큰 초기 강성으로 인해 약진 및 여진에 대하여 감쇠 장치 용량에 따라 대응할 수 있을 것으로 판단된다.



<Fig. 13> Load protocol (Dyn2.5)

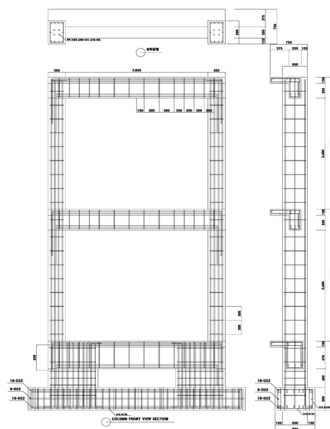


(a) HD-S2015-F8-Dyn2.5 (b) HD-S2015-F8-Dyn5.0 (c) HD-S2015-F8-Dyn10 (d) HD-S2015-F8-Dyn15
 <Fig. 14> Load-Displacement curve of cyclic loading test with low displacement

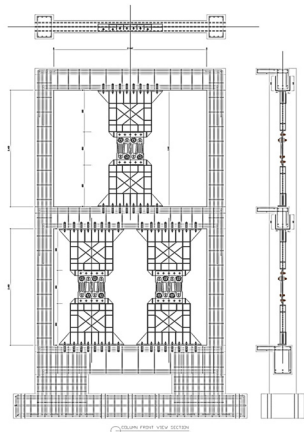
4. 2층 프레임 골조 실험

4.1 실험체 계획 및 실험 방법

하이브리드 벽식 댐퍼의 실물 골조 적용성 평가를 위해 <Fig. 15>와 같은 실물 2층 모멘트 골조를 제작하였다. 2개의 골조를 제작하여 무보강 실험과 하이브리드 벽식 댐퍼로 보강한 실험을 진행하였다. 골조에 설치될 복합 감쇠 장치의 종류는 앞선 실험을 통해 HD-S2015-F8를 1층 2개소, 2층 1개소 설치하여 실험하였다.



(a) RC frame specimen

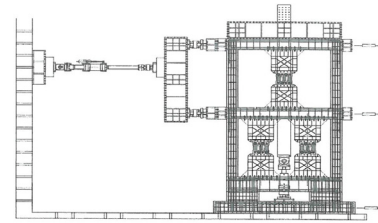


(b) RC frame specimen strengthened by hybrid damper

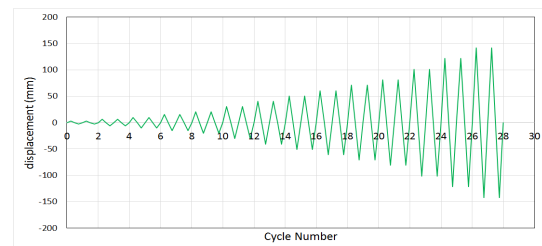
<Fig. 15> Two-story RC frame specimen

실험 방법은 2,000kN 유압 서브 액츄에이터를 사용하여 변위 제어를 실시하였다. 1개의 액츄에이터로 1층과 2층을 동시에 가력하기 위해 편으로 구성된 보를 사용하였고, 1층 보와 2층 보의 변위가 1:2가 되도록 <Fig. 16>과 같이 실험체를 구성하였다. <Fig. 17>은 가력 이력을 나타낸 그래프이며, 2층

보의 최소 횡 변형량(Δ_0)은 3.04mm로 가정하여 실험체의 내력이 감소할 때까지 증분 가력 실험을 수행하였다.



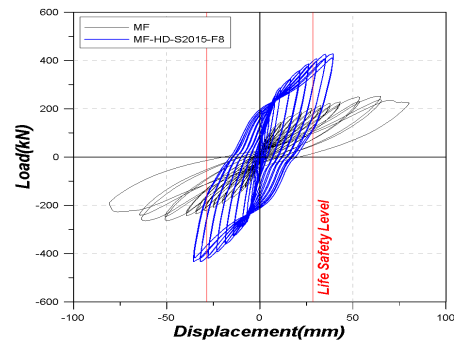
<Fig. 16> Cyclic loading test setup



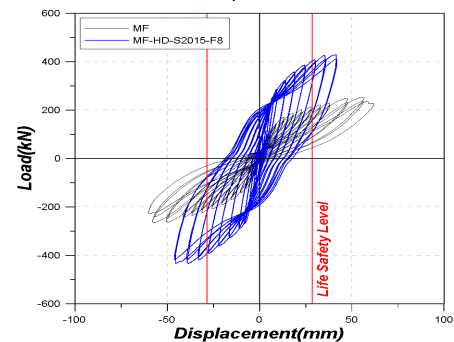
<Fig. 17> Load protocol for testing

4.2 실험 결과

<Fig. 18>은 2층 RC 프레임 골조 실험에 대한 1F, 2F의 하중-변위 곡선이다.



(a) 1F Load-Displacement curve



(b) 2F Load-Displacement curve

<Fig. 18> Load-Displacement of RC frame

실험 결과, 무보강 2층 RC 프레임은 층간 변위가 Life Safety Level의 목표 층간 변위 28.5mm를 만족하지만 1층 기둥 하부 피복이 탈락함과 동시에 내력이 급감하였으며, 최대 210kN의 강도를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 하이브리드 벽식 댐퍼로 보강된 실험체도 층간 변위비가 Life Safety Level를 만족하였으며, 정가력과 부가력 모두 최대 약 430kN의 강도를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 하이브리드 벽식 댐퍼로 보강된 실험체가 보강 전에 비해 약 2배의 강도가 증가되었으며, 보강된 골조의 강성 또한 증가된 것으로 보아 하이브리드 벽식 댐퍼를 통해 충분한 내력 확보가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 진동원에 대응할 수 있는 제진 장치로 강제 이력 감쇠 장치인 슬릿 댐퍼에 마찰 감쇠 장치를 결합하여 하이브리드 벽식 댐퍼를 제안하였으며, 구조 성능 실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 복합 감쇠 장치를 구성하는 강제 이력 감쇠 장치인 슬릿 댐퍼의 반복 가력 실험 결과, 일반적인 구조물 높이의 해당하는 목표 변위에서 충분한 내력을 보유하고 있으며, 슬릿의 폭을 증가시킬 경우 감쇠 장치의 강도는 증가하지만 연성도가 감소하였다. 이는 요구 목표 성능이 특등급이거나 층간 변위가 작은 경우 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2) 마찰 감쇠 장치를 정착하지 않은 슬릿 댐퍼와 복합 감쇠 장치의 반복 이력 실험 결과, 동일 변위에 대해 강도가 증가하였으며, 충분한 소성 변형을 한 뒤 슬릿 댐퍼와 동일한 연성도가 확보되었다. 또한 반복 가력 실험을 통해 나타난 한계 변위에서의 5사이클 반복 가력 실험 결과, 충분한 내력을 가졌으며 안정적인 이력 거동을 나타내었다.

3) 0.25Hz로 강제 변위를 각각 2.5mm, 5mm, 10mm, 15mm, 20mm로 50회 반복 이력 실험을 수행한 결과, 안정적인 이력 거동을 나타내었다. 슬립이 발생하기 전까지 마찰 감쇠 장치의 큰 초기 강성으로 약진 및 여진에 대해서도 충분한 내력을 받을

것으로 판단된다.

4) 하이브리드 벽식 댐퍼를 실물 크기의 2층 골조 프레임에 적용한 결과, 무보강 골조에 비해 약 2배의 강도를 보유하고 있으며, Life Safety Level에 따른 목표 층간 변위비도 만족하였다. 이를 통해 실제 무보강 골조에 적용되어 기존 슬릿 댐퍼보다 다양한 진동원에 대해 충분한 내력을 보유할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Moon, K. H., Jeon, Y. R., Lee, C. S., & Han, S. H., "Evaluation of Performance of Korean Existing School Buildings with Masonry Infilled Walls Against Earthquakes", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.16, No.6, pp.37~46, 2012
2. Lee, G. S., An, C. H., Han, H. H., Koo, H. W., & Park, R. H. (2011). Performance Evaluation of Seismic Response of a Building Structure using MR-Damper. Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Republic of Korea, Vol.2011, No.10, pp.600~601
3. Roh, J. E., & Lee, S. H., "Experimental Evaluation of a Multi-action Hybrid Damper under Cyclic Loading", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.32, No.11, pp.3~9, 2016
4. Applied Technology Council. (2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components (Report No. FEMA 461). Federal Emergency Management Agency (FEMA): USA.
5. Ministry of Education, "Seismic Performance Evaluation and Reinforcement Manual for

School Facilities”, pp.1~329, 2018

6. Architectural Institute of Korea, "Korean building code and commentary (KBC2016)", 2nd ed., Kimoondang, pp.1~1221, 2016.

- Received : August 24, 2019
- Revised : September 02, 2019
- Accepted : September 02, 2019