

고감쇠고무와 강재슬릿이 결합된 하이브리드 댐퍼의 실험적 구조성능평가

Experimental Structural Performance Evaluation of Hybrid Damper Combining with High Damping Rubber and Steel Slit

이 준 호*
Lee, Joon-Ho

박 병 태**
Park, Byung-Tae

김 유 성***
Kim, Yu-Seong

Abstract

It is effective to apply hybrid damping device that combine separate damping device to cope with various seismic load. In this study, HRS hybrid damper(hybrid rubber slit damper) in which high damping rubber and steel slit plate are combined in parallel was proposed and structural performance tests were performed to review the suitability for seismic performance. Cyclic Loading tests were performed in accordance with criteria presented in KDS 41 17 00 and MOE 2019. As a result of the test, the criteria of KDS 41 17 00 and MOE2019 was satisfied, and the amount of energy dissipation increased due to the shear deformation of the high-damping rubber at low displacement. Result of performing the RC frame test, the allowable story drift ratio was satisfied, and the amount of energy dissipation increased in the reinforced specimen compared to the non-reinforced specimen.

Keywords : Hybrid damping device, Steel Hysteretic damping device, High damping rubber, Cyclic loading test

1. 서론

내진보강대책 중 구조물에 국부보강만으로 지진하중을 저감시키는 제진공법이 시공되어지고 있으며 감쇠장치가 설치된 구조물은 구조체가 부담하는 하중이 저감되어 구조부재의 손상을 방지 할 수 있다. 감쇠장치는 이력특성에 따라 속도의존형, 변위의존형 감쇠장치로 구분되며, 에너지 소산 메커니즘에 따라 점성감쇠장치(Viscous-elastic damping device), 점탄성감쇠장치(Viscous damping device), 마찰감쇠장치(Friction damping device), 강재이력감쇠장치(Metalic damping device)로 분류¹⁾된다.

하지만, 단일 재료 형태로 개발된 감쇠장치는 다양한

진동원에 동시에 대응할 수 없는 단점이 발생²⁾한다. 특히, 강재이력감쇠장치 중 강재슬릿댐퍼의 경우 구조물의 변형시 강재 스트럿의 변형에 의해 발생하는 소성거동을 통하여 구조물에 가해진 에너지를 소산하게 되는데 강진에 맞춰 설계 되는 경우 풍하중 및 약진 발생시 에너지 소산량이 미미하여 동시에 대응할 수 없는 단점³⁾을 가질수 있다. 따라서 다양한 진동원에 대응할 수 있도록 별도의 감쇠장치를 결합하여 적용하는 것이 효율적이며, 최근 다양한 복합감쇠장치가 개발되고 있다.

본 연구에서는 고감쇠고무와 강재슬릿이 병렬결합된 HRS 하이브리드 댐퍼(Hybrid Rubber Slit Damper, SR Damper)를 제안하였다. 고감쇠고무(High Damping Rubber)는 감쇠성능을 가지는 천연고무로 전단변형을 통해 저항력을 발휘하여 지진에너지를 흡수할 수 있고 미소한 변형에서부터 큰 변형까지 감쇠효과를 가질 수 있다. 이러한 복합감쇠장치를 적용하기 위해서는 구조성능실험과 해석적 방법을 통해 내진성능에 대한 적합성을 검토하여야 하며 구조성능실험의 경우 감쇠장치의 특성에 따라 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00) 및 학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼(MOE 2019)에서

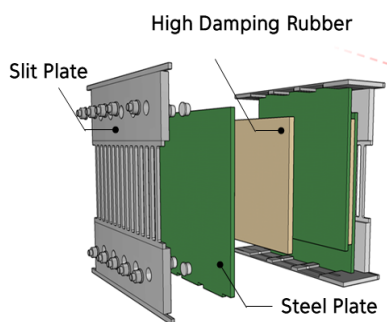
* 주저자, 교신저자, 정회원 서울대학교 건축학부 조교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul University
Tel: 02-490-7427 Fax: 02-490-7808
E-mail: 2019022@seoil.ac.kr
** 정회원, 메트로티앤씨(주), 연구소장, 공학박사
Metro T&C Research Institute, CTO
*** (주)플러스구조 과장, 박사수료
Plus Structural Engineers & Associates Manager

제시한 실험기준에 따라 표준 요구성능을 만족하는지에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 구조성능 실험과 2층 실물골조실험을 수행하여 실험결과를 분석하였다.

2. HRS 감쇠장치 특성

2.1 HRS 감쇠장치의 구성

HRS 댐퍼의 형상은 <Fig. 1>과 같으며 슬릿플레이트에 고감쇠고무를 병렬결합하여 횡하중이 발생될 때 에너지를 소산하는 복합감쇠장치이다. 고감쇠고무는 강관에 가황접착하였으며 상·하부 플레이트면을 통해 슬릿플레이트와 결합된다. 고감쇠고무와 슬릿플레이트가 병렬로 결합되어 있기 때문에 강재슬릿의 소성변형에 의한 에너지소산작용과 강재의 소성변형 이후 고감쇠고무의 전단변형에 의한 감쇠효과를 통해 다양한 진동원에 대해 복합적인 감쇠효과를 가질 수 있도록 하였다.

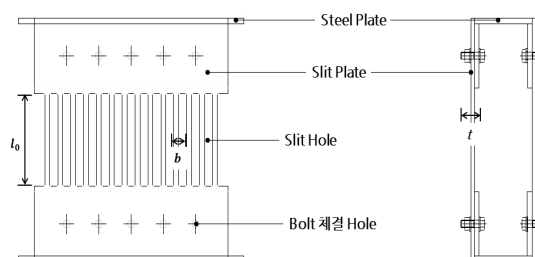


<Fig. 1> Shape of HRS Damper

2.2 슬릿플레이트 감쇠장치

슬릿플레이트는 강재 이력형 감쇠장치로서 슬릿 홀을 면내방향으로 배치하며, 다수의 강재 스트립으로 구성되어 면내방향 항복 변형을 통해 감쇠효과를 가질 수 있다. 항복이 발생하기 전에는 에너지소산에 의한 감쇠효과 보다 일반적인 부재와 마찬가지로 구조물의 강성 및 내력을 증진시킨다. 이러한 슬릿플레이트 감쇠장치는 제조비용이 저렴하고 강관의 두께나 스트립의 수량을 통해 주요 설계변수인 강성 및 강도를 손쉽게 조절이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

HRS 감쇠장치에 사용된 슬릿플레이트 형상은 <Fig. 2>과 같으며, 슬릿 하나의 단면 2차모멘트는 $tb^3/12$ 과 같고 이에 따라 단위 변위에 대한 슬릿댐퍼의 강성은 식 (1)과 같다. 여기서, E 는 사용강재의 탄성계수, I 는 슬릿의 단면 2차 모멘트, l_0 는 슬릿의 길이, c 는 강재 슬릿의 양단 고정도 계수 ($c=1$ 로 가정), n 은 강재 슬릿의 스트립 개수, t 는 스트립의 두께, b 는 스트립의 폭이다.



<Fig. 2> Shape of Slit Plate and Size

$$k_d = cn \frac{12EI}{l_0^3} = cn \frac{Etb^3}{l_0^3} \tag{1}$$

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

$$M_p = \sigma_y \frac{tb^2}{4} \tag{2}$$

여기서, σ_y 는 강재의 항복강도이며, 횡력(P)과 변위(δ)를 완전 탄소성으로 가정하면 에너지 보존법칙에 의해 식 (3)이 성립하고, 미소변형에 대해 소성 변위량(δ_p)은 $l_0\theta_p$ 로 가정할 수 있으므로 슬릿 감쇠장치의 항복하중 P_y 은 식 (4)와 같다. 또한 식 (1)과 (4)의 관계에서 슬릿 감쇠장치의 항복변형은 다음 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

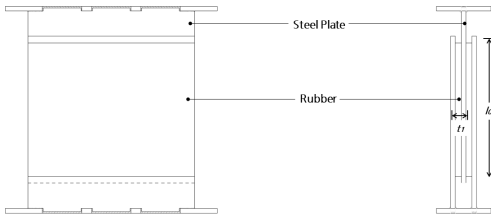
$$\frac{1}{2} P_y \delta_p = n M_p \theta_p \tag{3}$$

$$P_y = \frac{2n M_p}{l_0} = \frac{n \sigma_y t b^2}{2l_0} \tag{4}$$

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

2.3 고감쇠고무

HRS 감쇠장치의 고감쇠고무(High Damping Rubber)는 감쇠성능을 가지는 천연고무계 점탄성체로 점탄성 재료의 강성과 점성을 이용하여 지진에너지를 소산시킨다. 고감쇠 고무의 전단탄성계수(G'), 고무의 두께(t), 고무의 길이(l_0), 설계변위(Δ)에 대한 전단변형률(γ)를 통해 전단항복강도를 산정하였으며 횡변형에 대한 식으로 정리하면 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.



〈Fig. 3〉 Shape of Slit Plate and Size

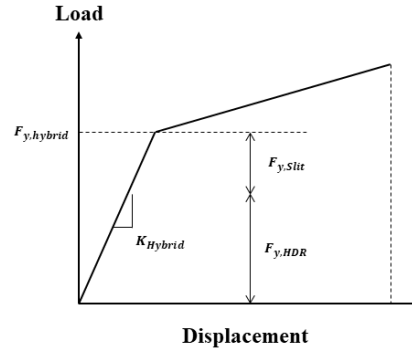
$$V = 2G't_1\Delta \quad (6)$$

〈Table 1〉 Property of High Damping Rubber

Contents	Range
Size	B x L-15t x 2layers (t=15mm, B,L=400~600)
Critical Shear Strain	300%
Design Shear Strain	200%

이론식에 의한 복합감쇠장치의 이력특성은 이선형곡선으로(Bilinear Curve)로 항복강도, 강성, 최대변위를 〈Fig. 5〉과 같이 도식화 할 수 있다.

$$F_{y, hybrid} = \left(\frac{n\sigma_y t b^2}{2l_0} \right) + (2G't_1\Delta) \quad (7)$$



〈Fig. 4〉 Bilinear Curve of HRS Damper

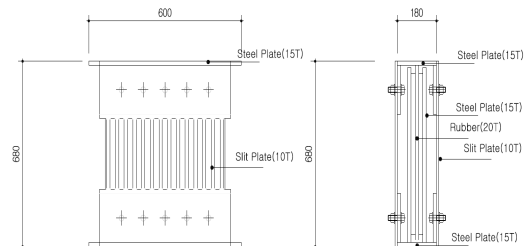
3. 구조성능실험

3.1 실험체 계획 및 표준요구성능

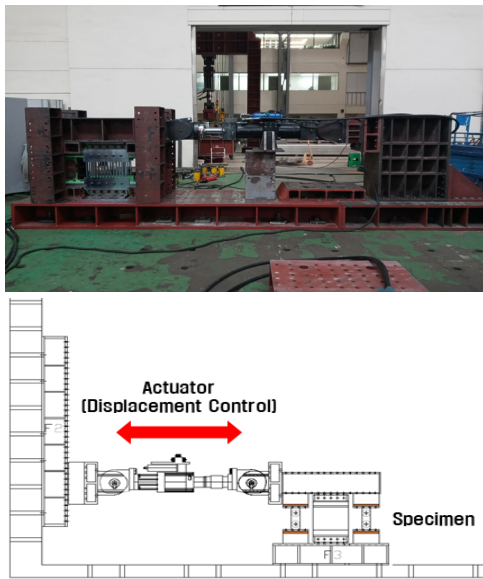
HRS 감쇠장치의 구조성능실험은 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)⁴⁾ 및 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼(MOE 2021)⁵⁾에 따른 반복재하실험을 수행하여 표준요구성능을 분석하였다.

3.1.1 실험체 계획

HRS 댐퍼 실험체는 SS275($F_y = 275 Mpa$)의 슬릿 플레이트에 고감쇠고무를 가황접착하여 제작하였으며 실험체도면을 〈Fig. 6〉과 같이 나타내었다. 가력기는 1000kN 유압 서브 액츄에이터를 사용하여 수평방향으로 반복가력하였으며, 실험체의 변위를 측정하기 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 설치하여 변위를 확인하였다. 실험체 전경사진 및 셋팅도면은 〈Fig. 7〉과 같다.



〈Fig. 5〉 Shape of Slit Plate and Size



〈Fig. 6〉 Cyclic Loading Test Setup

3.1.2 하중프로토콜 및 표준요구성능

건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00) 및 학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼(MOE 2021)에서는 표준 가력 프로토콜을 제시하여 반복가력실험 후 표준요구성능을 만족여부에 대해 분석하도록 명시되어있다.

각 재하실험별 하중프로토콜은 〈Fig. 8〉과 같이 나타내었다. 반복재하실험(KDS 41 17 00)의 하중프로토콜은 목표변위(Δ_m) 30mm의 0.33배를 10회, 0.67배를 5회, 1.0배를 3회로 설정하여 실험을 수행하였으며 반복재하실험(MOE 2021)의 하중프로토콜은 목표변위(Δ_m) 30mm의 0.25배를 10회, 0.5배를 5회, 1.0배를 3회로 설정하였다.

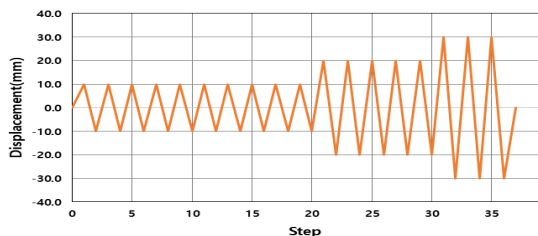
건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00) 및 학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼(MOE 2021)의 하중프로토콜에 따라 반복재하실험을 수행하여 다음과 같이 제시하는 표준요구성능을 만족하여야 한다.

(1) KDS 41 17 00

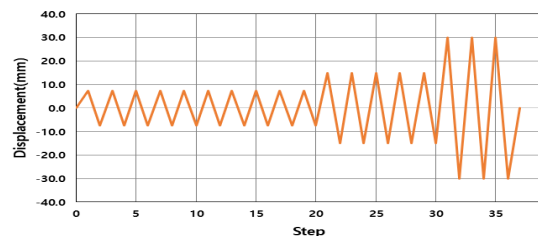
- 최대고려지진시 예상되는 장치변위의 0.33배를 10회, 0.67배를 5회, 1.0배를 3회씩 반복재하
- 임의 회차의 반복재하 시 변위 원점에서의 최대·최소하중이 모든 반복재하로부터 산정된 평균치의 15% 이내
- 임의 회차의 반복재하 시 방향별 최대 장치변위에서의 하중이 모든 반복재하로부터 산정된 각각 평균치의 15% 이내
- 임의 회차의 반복재하 시 감쇠장치의 이력곡선 면적이 모든 반복재하로부터 산정된 평균치의 15% 이내

(2) MOE 2021

- 평가기준지진 작용시 장치변위의 0.25배를 10회, 0.5배를 5회, 1.0배를 3회 반복사이클
- 임의의 한 사이클에 대한 시제품 장치의 유효강성 k_{eff} 이 실험의 모든 사이클로부터 계산되는 평균 유효강성과 $\pm 15\%$ 이내
- 임의의 한 사이클 내 영 변위 시 시제품 장치의 최대하중과 최소하중이 실험의 모든 사이클로부터 계산되는 평균최대 및 최소하중과 $\pm 15\%$ 이내
- 임의의 한 사이클 내 시제품 장치의 이력곡선의 면적이 실험의 모든 사이클로부터 계산되는 이력곡선의 평균면적과 $\pm 15\%$ 이내



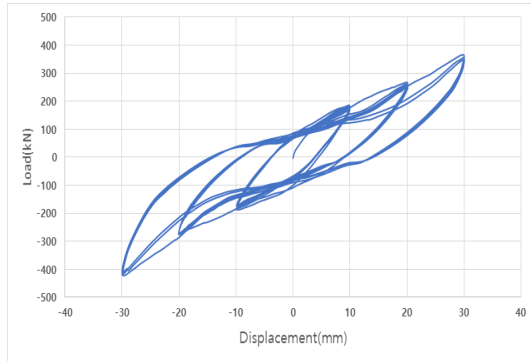
(a) KDS 41 17 00



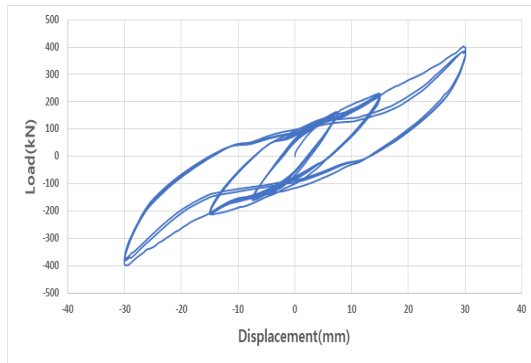
(b) MOE 2021

〈Fig. 7〉 Load Protocol for Cyclic Loading Test

3.2 실험결과



(a) KDS 41 17 00



(b) MOE 2021

〈Fig. 8〉 Load-Displacement Curve

〈Fig. 9〉은 반복재하실험(KDS 41 17 00, MOE 2021)결과에 따른 하중-변위 곡선을 나타낸 그래프이다. 실험체의 최대강도는 반복재하실험(KDS 41 17 00)

실험체의 경우 정가력에서 366.99kN, 부가력에서 422.19kN으로 나타났으며, 반복재하실험(MOE 2021) 실험체는 정가력에서 402.97kN, 부가력에서 399.72kN으로 나타났다. 또한 각 사이클별로 내력 저하없이 안정적인 이력거동을 나타내었다.

각 사이클별 실험체의 변위원점에서의 최대 최소하중 및 감쇠장치의 이력곡선의 면적에 대해 〈Table 2〉에 정리하였다. 각 변위 사이클에서의 최대하중은 반복재하실험(KDS 41 17 00)의 경우 최대 평균치의 6.32%, 최소하중은 2.82% 이내로 나타났으며, 반복재하실험(MOE 2021)에 따른 각 사이클별 유효강성은 모든 구간에서 평균치의 15% 이내로 MOE 2021에 따른 표준요구성능을 만족하였다.

강재 스트럿의 항복변형 지점의 가력 단계(0.33 Δ_m , 0.25 Δ_m)에서는 강재 슬릿의 소성변형에 의한 이력특성과 같이 에너지소산면적이 횡방향으로 넓게 나타났고 이후의 가력단계부터 고감쇠 고무의 초탄성 거동의 영향과 전단변형이 증가하면서 에너지소산면적은 점차적으로 종방향으로 증가하여 나타난 것으로 보아 저변위에서는 강재슬릿의 이력특성이 지배적이며, 강재 슬릿의 항복변형이후 고감쇠고무의 이력특성이 지배적인 것으로 사료된다. 가력실험 종료 후에도 스트럿의 파단은 나타나지 않았으며, 각 사이클별 에너지소산량은 각 사이클별 평균치의 15% 이내로 나타나 표준요구성능을 만족하였다.

〈Table 2〉 Result of hybrid damping device test

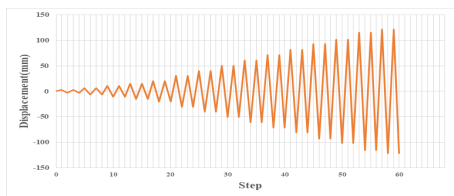
Specimens		Zero Disp Max. force(kN)	Max Disp. Max.(Min) forces	Min Disp. Max.(Min) forces	Eloop Max.(Min.) area(kN·mm)
HRS Damper (KDS 41 17 00)	0.33 times	91.55	186.54 (170.49)	187.03 (171.9)	1537.13 (1337.51)
	0.67 times	109.22	268.85 (251.09)	274.83 (271.28)	3722.69 (2964.67)
	1.00 times	92.79	366.99 (348.29)	422.19 (408.42)	5315.99 (4335.18)
Specimens		Zero Disp Max. force(kN)	Max Effective Stiffness(kN/mm)	Min Effective Stiffness(kN/mm)	Eloop Max.(Min.) area(kN·mm)
HRS Damper (MOE 2021)	0.25 times	67.00	21.95	21.07	928.57 (783.37)
	0.50 times	94.35	14.68	14.20	2793.65 (2283.17)
	1.00 times	112.6	13.50	12.68	6062.77 (5153.01)

4. 2층 실물골조실험

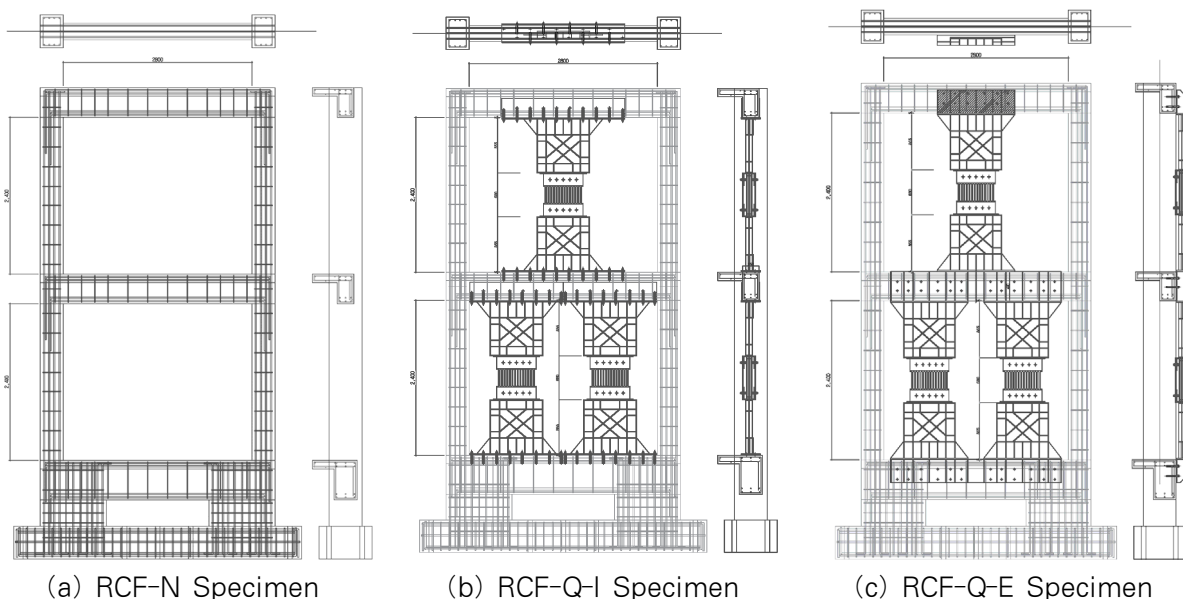
4.1 실험체 계획 및 실험방법

HRS 댐퍼로 보강된 골조의 내진 보강 전 후의 내진 성능을 비교하기 위해 무보강골조(RCF-N), 내부끼움형 보강골조(RCF-Q-I), 외부부착형 보강골조(RCF-Q-E)로 총 3개의 실험체를 제작하였다. 무보강골조는 실물과 유사한 크기의 2층 RC골조로 제작하였으며, 비내진설계된 콘크리트 건축물에 대한 선행자료를 근거로 기동전 단과괴형으로 설계하였다. 보강골조의 경우 기존 RC골조는 동일하며 HRS 댐퍼는 <Fig. 11>과 같이 연결프레임 상하부 플레이트에 부착하여 보강하였다.

실험조건은 'FEMA-461, Interim Testing Protocol for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components'⁶⁾을 기준으로 최소변형량(Δ_0)을 2층 보의 층간변위 3.04mm로 가정하였으며, 각 사이클마다 1.4배 씩 변위를 증폭(<Fig. 10>)하여 실험체의 내력이 충분히 감소될 때 까지 증분가력실험을 수행하였다.

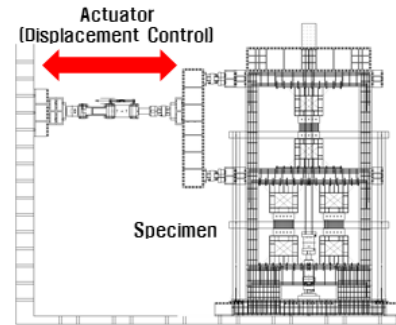


<Fig. 9> Load Protocol for Testing



<Fig. 10> RC Frame Specimen Strengthened by HRS Damper

실험은 2000kN 유압서브액츄에이터 1개를 이용하였으며 1층과 2층의 동시가력을 위해 핀으로 구성된 보를 사용하여 1층 보와 2층 보의 변위가 각각 1:2가 되도록 상단부에서 1/3지점을 가력하였다.



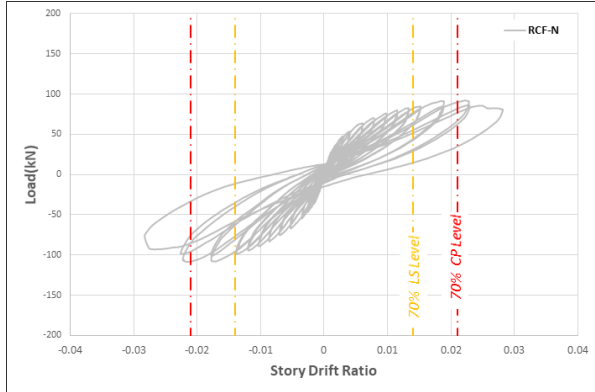
<Fig. 11> Loading Test Setup

4.2 실험결과

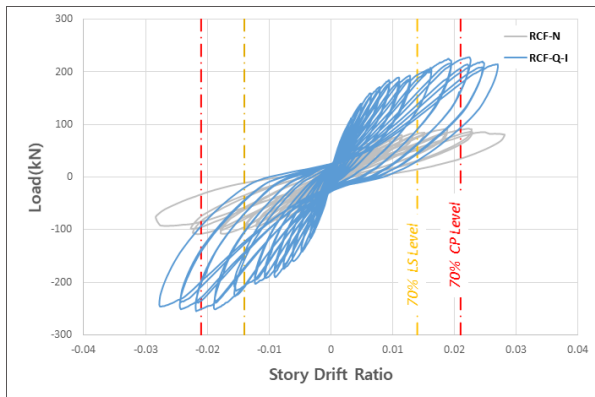
2층 실물골조실험 결과 하중-변위곡선을 <Fig. 13>과 같이 나타내었다. RCF-N 실험체의 경우 최대 내력은 층간변형률 2.15%의 부가력에서 108.54kN으로 나타났고 CP Level(2.1%)에 해당하는 13 Step까지 모두 내력 저하 없이 안정적인 이력거동이 나타났다. 최종과괴양상은 층간변위비 0.65%에서 1층 기동 하부와 보-기동 접합부에 사인장균열로 인한 전단파괴가 발생하였다.

RCF-Q-I 실험체의 경우 최대내력은 층간변형률

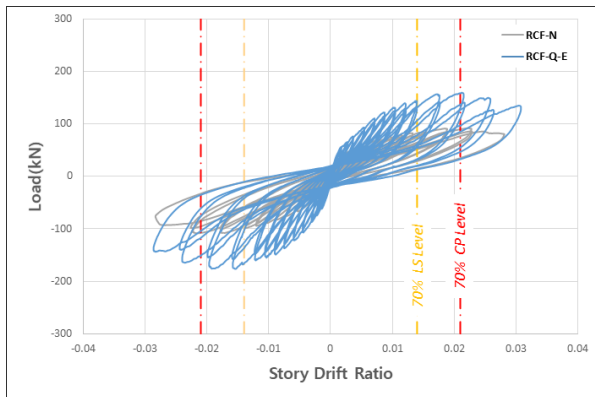
2.18%의 부가력에서 254.95kN으로 나타났으며 CP Level(2.1%)에 해당하는 13 Step 까지 모두 내력저하 없이 안정적인 이력거동이 나타났다. 최종파괴양상은 층



(a) RCF-N Specimen



(b) RCF-Q-I Specimen



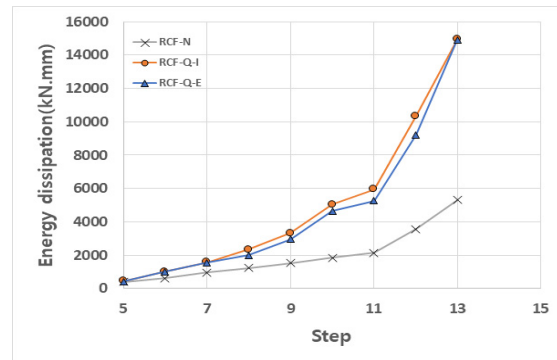
(b) RCF-Q-E Specimen

〈Fig. 12〉 Load-Displacement Curve

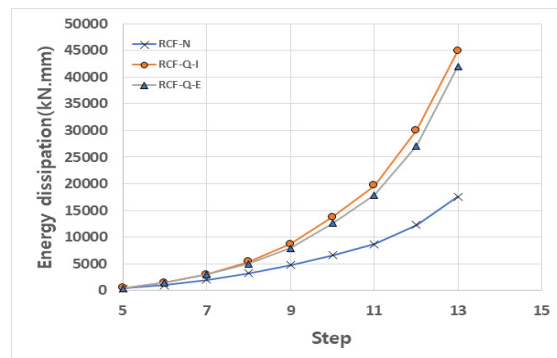
간변위비 0.25%에서 1층 기둥 하단부에 초기 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.8%에서 1층 기둥 하단부에 전단균열이 발생하기 시작하였지만, RCF-N 실험체와 대조적으로 균열은 크게 증가하지 않았다.

RCF-Q-E 실험체의 경우 최대내력은 층간변형률 1.53%의 부가력에서 176.59kN으로 나타났으며 CP Level(2.1%)에 해당하는 13Step 까지 모두 내력저하 없이 안정적인 이력거동이 나타났다. 최종파괴양상은 층간 변위비 0.2%에서 1층 기둥 하단부에 초기 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.8%에서 1층 기둥 하단부에 전단균열이 발생하기 시작하였지만, RCF-Q-I 실험체와 마찬가지로 RCF-N 실험체와 대조적으로 균열은 크게 증가하지 않았다.

〈Fig. 14〉은 각 실험체의 에너지소산량을 나타낸 그래프이다. 무보강 실험체(RCF-N)는 보-기둥 접합부에 최초 균열이 발생한 횡변위비 1.4%에서 에너지소산량이 급격히 증가하기 시작하였으며, 최종 가력스텝까지 17590.1kN·mm의 누적 에너지 소산량을 나타냈었다. HRS 댐퍼를 내부끼움형태로 보강한 실험체(RCF-Q-I)와 외부부착형태로 접합한 실험체(RCF-Q-E)는 최종 가력 스텝까지 각각 44922.04kN·mm, 41975.12kN·mm의 에너지를 소산하여 보강 전에 비해 에너지소산량이 증가하였으며, RCF-Q-I 실험체가 RCF-Q-E 실험체에 비해 누적에너지소산량은 1.07배 높게 나타났다.



(a) Energy dissipation Capacity



(b) Cumulative Energy dissipation Capacity

〈Fig. 13〉 Energy dissipation Capacity

5. 결론

본 연구에서는 고감쇠 고무와 슬릿 플레이트를 결합한 하이브리드 감쇠장치를 제안하였으며, 내진성능을 분석하기 위해 구조성능실험 및 2층 실물골조실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 반복재하실험(KDS 41 17 00) 결과 각 사이클별 최대 및 최소하중, 영변위에서의 최대 및 최소하중, 에너지소산량은 각 사이클별 평균치의 15% 이내로 표준요구성능을 만족하였다.

2) 반복재하실험(KDS 41 17 00) 결과 영변위에서의 최대 및 최소하중, 유효강성, 에너지소산량은 각 사이클별 평균치의 15% 이내로 표준요구성능을 만족하였으며, 저변위에서는 강재 슬릿의 소성변형에 의한 이력특성이 지배적이며, 강재의 항복변형 이후 고감쇠고무의 초탄성 거동과 전단변형에 의한 고감쇠고무의 이력특성이 지배적이었다.

3) 2층 실물골조실험결과 무보강실험체(RCF-N), 내부끼움형 보강실험체(RCF-Q-I), 외부부착형 보강실험체(RCF-Q-E) 모두 허용층간변형률을 만족하였다.

4) 보강전 실험체에 비해 보강실험체 모두 에너지소산량이 증가하였으며, 누적 에너지소산량은 무보강실험체에 비해 내부끼움형 보강실험체가 2.55배 증가하였다.

추후 연구에서는 HRS 댐퍼의 증분가력실험 수행한 결과에 따른 물리적 특성을 정의하여 이를 해석적으로 성능 평가를 하여 내진성능을 분석할 계획이며, 추가적인 연구를 통해 제안된 모델을 개선할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 신진연구자 지원 사업 과제(NRF-2020R1C1C1005779)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Park, B. T., Lee, J. H., "A Study on Hysteresis Characteristics and Analysis Model of Hybrid Damping Device", Journal

of the Architectural Institute of Korea, Vol.37, pp.263~270, 2021, doi: 10.5659/JAIK.2021.37.11.263
2. 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, pp.3~9, 2016, doi: 10.5659/JAIK_SC.2016.32.11.3
3. Kim, D. H., "Development of Hybrid Damper Systems for the Vibration Control of Wind and Earthquake", The Magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 11, pp.18~19, 2020.
4. Architectural Institute of Korea, "Seismic Building Design Code and Commentary : KDS 41 17 00", pp.136~139, 2019.
5. Ministry of Education, "Seismic Performance Evaluation and Reinforcement Manual for School Facilities", pp.97, 2021.
6. FEMA, "Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components(FEMA-461)", pp.21~23, 2007.

- Received : August 5, 2022
- Revised : September 16, 2022
- Accepted : October 11, 2022