

고무코어패드와 강재이력감쇠장치를 결합한 복합감쇠장치의 이력특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Hybrid Damping Device Combining Rubber Core Pad and Hysteretic Steel Slit

박 병 태*
Park, Byung-Tae

이 준 호**
Lee, Joon-Ho

Abstract

This study proposes an RCS composite damping device that can achieve seismic reinforcement of existing buildings by dissipating energy by inelastic deformation. A series of experiments assessing the performances of the rubber core pad, hysteretic steel slit damping device, and hybrid RCS damping device were conducted. The results showed that the ratios of the deviations to the mean values satisfied the domestic damping-device conformity condition for the load at maximum device displacement in each direction, at the maximum force and minimum force at zero displacement, as well as the hysteresis curve area. In addition, three analysis models based on load-displacement characteristics were proposed for application to seismic reinforcement design. In addition, the validity of the three proposed models was confirmed, as they simulated the experimental results well. Meanwhile, as the shear deformation of the rubber-core pad increased, the hysteretic behavior of super-elasticity greatly increased the horizontal force of the damping device. Therefore, limiting the allowable displacement during design is deemed to be necessary.

Keywords : RCS Damping device, seismic reinforcement, Rubber core pad, Steel slit damping device, Analysis model

1. 서론

국내에서는 지진으로 인한 국민의 생명과 재산을 보호함과 동시에 사회·경제적 피해를 최소화하기 위하여 2011년부터 내진설계가 되지 않은 기존 공공시설물 내진보강 기본계획을 5년마다 수립하고 있다¹⁾. 내진설계가 되지 않은 기존 공공시설물 중 건축물의 대부분은 저층 콘크리트 건축물이며, 지진에 의한 건축물의 내진성능향상 방법으로 시스템보강공법이 주로 적용되고 있다. 국내 내진보강에 적용되고 있는 시스템보강공법으로는 건축물의 강도 및 강성을 증가시키는 전단벽, 채움벽 또는 가새골조의 설치와 에너지소산능력을 증가시키는 감쇠장치^{2,3)}가 있으며, 이중 감쇠장치는 지진발생시 구조적 변형을 줄여 지진하중을 감소시키는 경제적이고 효과적인

방법으로 적용이 증가되고 있다. 이러한 감쇠장치는 충분한 상대변위가 발생할 수 있는 위치에 배치하여 지진하중을 저감시키는 역할을 한다. 감쇠장치의 변위는 개별 장치의 에너지소산능력과 비례하기 때문에 건물의 횡변위 증폭을 위해 다층형 또는 토글형시스템으로 설치하기도 한다. 한편, 감쇠장치는 항복메커니즘에 따라 축, 전단, 휨항복형으로 분류할 수 있다. 좌굴방지가새(Buckling Restrained Brace)는 가새에 발생하는 축력에 의해 항복⁴⁾하며, TADAS(Triangular-plate Added Damping and Stiffness), ADAS(Add Damping and Stiffness), 슬릿(Slit) 감쇠장치^{5,6)}는 휨항복유형에 속한다. 최근에는 수동형 에너지 소산장치를 다양하게 조합하여 에너지 소산능력을 극대화하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. 강재슬릿판과 회전마찰장치의 구성⁷⁾, 좌굴방지가새와 점탄성 또는 점성유체장치의 결합⁸⁾은 다양한 구조적 반응을 개선함을 보여주고 있다.

본 연구는 이러한 복합형 감쇠장치의 하나로 고무패드와 슬릿형 감쇠장치가 결합된 복합형 감쇠장치(Rubber Core Slit Damper, RCS감쇠장치)를 제안하고

* 정회원, 메트로티엔씨(주) 연구소장, 공학박사
Metro T&C, Research Institute, CTO

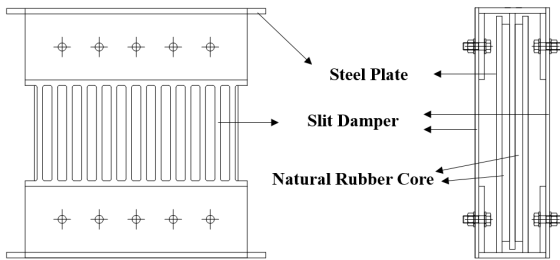
** 교신저자, 정회원, 서울대학교 건축학부 조교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul University
Tel: 02-490-7427 Fax: 02-490-7808
E-mail: 2019022@seoil.ac.kr

이력특성을 확인하여 적합성 및 해석모델의 유효성을 확인하는데 있다. 또한 감쇠장치가 정착된 건물의 내진 설계를 위해 탄성강성, 항복강도, 항복후 강성등을 기반으로 한 해석모델을 제안하여 실험결과와 비교·평가하였다.

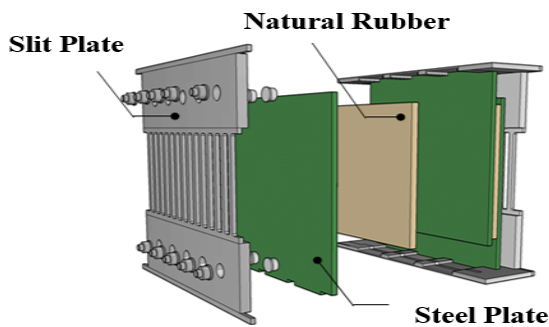
2. RCS감쇠장치 구조성능실험

2.1 RCS감쇠장치 개요

RCS감쇠장치 <Fig. 1>와 같이 강재이력형 감쇠장치인 슬릿 플레이트와 고무삽재가 결합된 형태로 제작된다. 천연고무의 점성감쇠는 <Fig. 2>와 같이 일반적으로 2~3%로 낮지만, 점성강성으로 저변위에서도 에너지소산의 가능하고 원점회복능력의 장점이있으며, 강재 이력 감쇠장치는 제조비용이 저렴하고 슬릿형태에 따라 이력 특성의 조정이 간편하다는 장점이 있다.

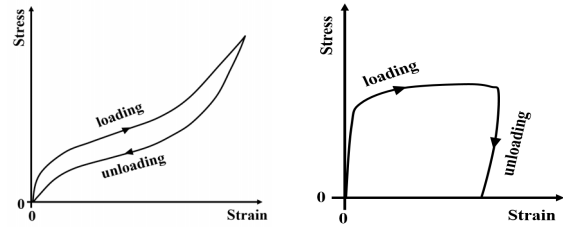


(a) Shape of Slit Plate



(b) RCS damping device

<Fig. 1> RCS damping device combining and steel hysteresis damping device



(a) Natural rubber (b) Slit damper

<Fig. 2> Material Hysteresis Characteristics

2.2 RCS감쇠장치 설계

RCS 감쇠장치중 15개의 슬릿(Slit)으로 구성된 슬릿 감쇠장치의 슬릿 하나의 단면 2차 모멘트는 $tb^3/12$ 과 같고 슬릿감쇠장치의 강성(k_s)은 식(1)과 같다.

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

여기서, E 는 사용강재의 탄성계수, I 는 슬릿의 단면 2차 모멘트, l_0 는 슬릿의 길이, c 는 강재 슬릿의 양단 고정도 계수로 1로 가정, n 은 강재 슬릿의 스트립 개수, t 는 스트립의 두께, b 는 스트립의 폭을 의미한다.

강재 슬릿의 스트립 양단부가 항복하고 전단면이 항복할 경우 식(2)와 같은 소성모멘트 M_p 가 발생하며, 이때 σ_y 는 강재의 항복강도이다.

$$M_p = \sigma_y tb^2/4 \quad (2)$$

휨력(P)과 변위(δ)를 완전 탄소성으로 가정하면 에너지 보존 법칙에 의해 식(3)가 성립하고, 미소변형에 대해 소성 변위량(δ_p)은 변위량에 대한 회전각도(θ_p)에 따라 $l_0\theta_p$ 로 가정할 수 있으므로 슬릿 감쇠장치의 항복하중 P_y 은 식(4)와 같다. 또한 식(1)과 식(4)의 관계에서 슬릿 감쇠장치의 항복변형은 식(5)와 같이 산정할 수 있다.

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

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

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

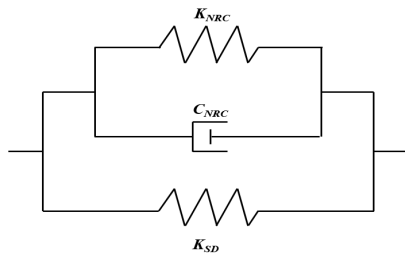
고무코어패드와 같은 점탄성재료는 일반적으로 강성 (K)과 감쇠(C)의 관계로 나타난 Kelvin모델로 설계된다. 고무패드코어의 강성과 감쇠는 전단탄성계수 G' 와 손실 계수 G'' 를 사용하여 식(6), (7)과 같이 나타낼 수 있으며⁹⁾, 주요 제원은 <Table 1>과 같다.

$$K = G' A / t \quad (6)$$

$$C = G'' A / \omega t \quad (7)$$

<Table 1> Property of NRC

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



<Fig. 3> Analytical model for the RCS

따라서, RCS감쇠장치의 강성은 슬릿감쇠장치의 강성과 고무코어패드의 강성의 합에 의해 계산되며 식(8)과 같이 나타내며, 해석적모델은 <Fig. 3>과 같다.

$$K_{RCS} = K_{NRC} + K_{SD} = \frac{G' A}{t} + n \frac{E t b^3}{l_0^3} \quad (8)$$

2.3 실험체 개요

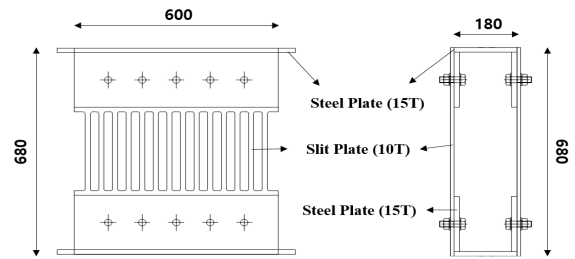
<Fig. 4> 및 <Table 2>에 실험체의 형상과 실험체 일람을 나타냈다. 실험은 강재슬릿감쇠장치와 고무코어패드에 대한 실험을 개별로 진행하여 각각의 이력특성을 확인하였으며, 복합적 거동에 따른 RCS감쇠장치의 거동을 확인하였다.

강재슬릿감쇠장치(SD) 시험체는 SS275($F_y=275\text{MPa}$)의 슬릿플레이트에 15개의 슬릿홀(Slit hole)을 두어 실험체를 제작하여 증분가력 실험을 수행하였으며, RCS감쇠장치

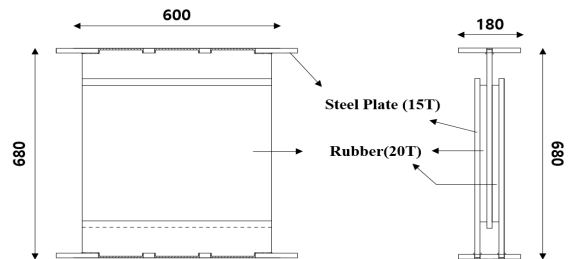
의 중앙에 설치되는 코어코어(NRC)를 기준으로 2개를 설치하여 편심이 발생하지 않도록 하였다. 고무코어패드 실험체는 두께 20mm, 2면전단으로 설치하였으며, 2개의 플레이트판 사이에 설치하여 병렬결합이 되도록 제작하였다.

<Table 2> Experimental conditions

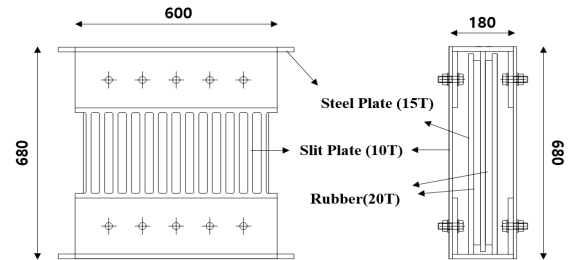
Specimens	SD	NRC	RCS
width (mm)	15	550	
length (mm)	250	440	
thickness (mm)	15	20	SD+NRC
layer	2	2	



(a) SD specimen



(b) NRC specimen

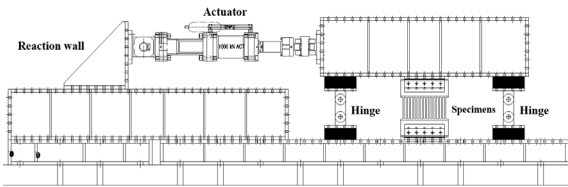


(c) RCS specimens

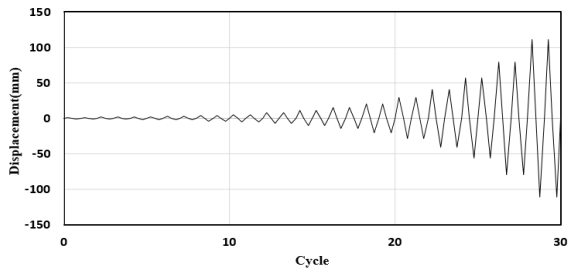
<Fig. 4> Section of model

2.3 실험체 가력

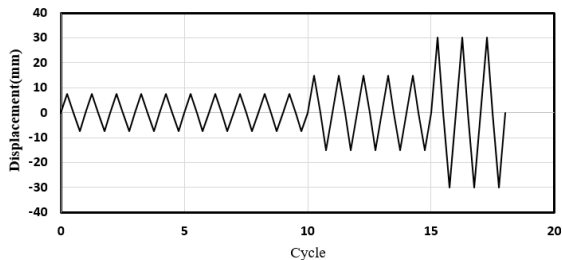
RCS감쇠장치의 가력방법은 <Fig. 5>와 같이 변위제어 방식 중 증분가력 및 반복이력가력으로 진행하였다. 증분가력실험의 경우 FEMA-461을 기준¹⁰⁾에 의해 최소 변형량에서 1.4배씩 변위를 증폭하였다. 이때 변위증폭 시 1사이클을 2회씩 가력을 주어 목표변위에 도달할 수 있도록 설정하였으며, 목표변위는 하중-변위곡선의 그래프를 보고 판단하였다. RCS감쇠장치의 반복가력은 증분가력실험결과를 고려하여 최대변위를 30mm로 하여 7.5mm 10회, 15mm 5회, 30mm 3회 반복가력과 9.9mm 10회, 20.1mm 5회, 30mm 3회의 반복가력실험으로 진행하였다. 해당 실험방법은 국내 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00) 및 학교시설물 내진성능평가 및 보강매뉴얼(MOE 2021)에 의한 기준¹¹⁾이다.



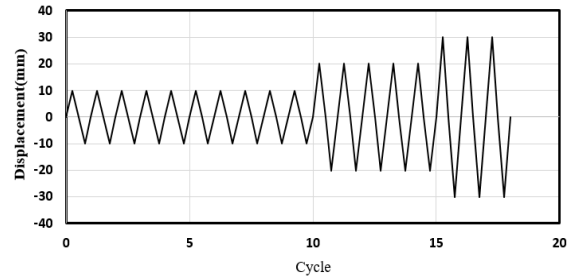
(a) Cyclic loading test setup



(b) Incremental cyclic loading pattern



(c) Cyclic loading pattern in MOE 2021



(d) Cyclic loading pattern in KDS 41 17 00

<Fig. 5> Loading test of specimens

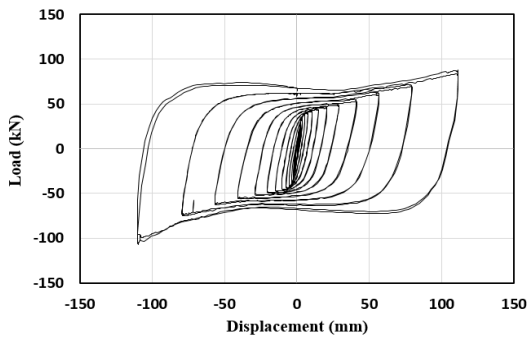
3. RCS감쇠장치 구조성능실험결과

3.1 실험결과

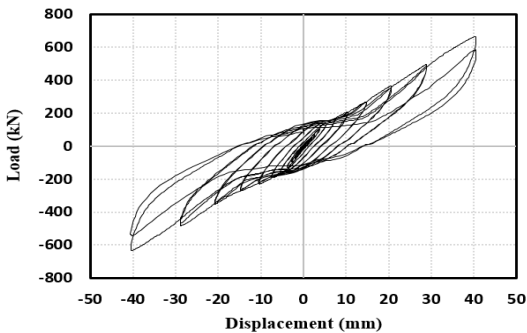
<Fig. 6(a)~(b)>는 RCS감쇠장치의 개별요소에 해당하는 강제슬릿감쇠장치와 고무코어패드실험에 대한 하중-변위 관계이며, <Fig 6(c)~(e)> RCS감쇠장치의 반복하중실험을 수행한 결과 얻어진 이력곡선이다. RCS 감쇠장치의 반복재하시 각 방향별 최대 장치변위에서의 하중, 변위원점에서의 최대·최소하중, 이력곡선 면적에 대해 <Table 3>에 정리하였다. 그래프의 X축은 횡방향 변위, Y축은 횡방향 하중을 나타내며, 실험이 진행되는 동안 하중감소없이 안정적으로 거동하는 것으로 확인되었다.

강제슬릿감쇠장치의 최대강도는 정가력에서 87.70kN 부가력에서 106.85kN으로 나타나 부가력이 정가력에 비해 약 18% 높게 나타났으며, 변위가 증가될수록 강재의 항복후 강성에 의해 내력이 증가되는 것으로 확인되었다. 증분가력에 따른 슬릿의 파단은 <Fig. 7(a)>와 같이 변위량 100mm초과시까지 관찰되지 않았다. 고무코어패드실험체의 최대강도는 정가력에서 666.8kN 부가력에서 633.8kN으로 나타나 정가력이 부가력에 비해 약 5% 높게 나타났으며, 고무의 전단변형 100%초과시 고무고유의 이력형태인 초탄성(Hyper elastic)거동이 나타났다. 특히 증분가력에 따른 고무코어패드는 <Fig. 7(b)>와 같이 락킹거동(Rocking behavior)현상이 변위가 증가될수록 관찰되었다. 이는 횡변형이 증가될수록 힌지부 유격이 상·하부에서 발생, 고무패드의 수평·수직 강성차이에 의한 것으로 판단된다. 또한 고무코어패드는 반복하중 가력시 초기 하중 가력단계에서 강성의 저

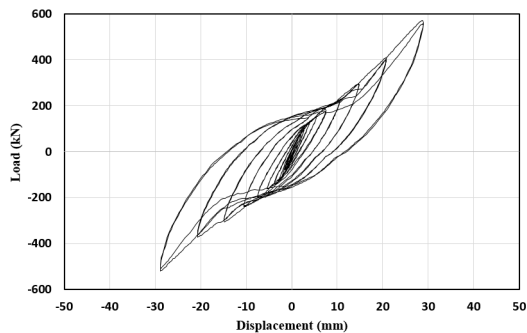
하현상이 나타나는 물린스 효과(Mullins effect)가 관찰되었으나, 비교적 안정적인 이력거동을 보였다. RCS실험체의 최대강도는 정가력에서 570.3kN 부가력에서 520.3kN으로 나타나 정가력이 부가력에 비해 약 9.6% 높게 나타났으며, 고무코어패드 실험체와 같이 전단변형 100%초과시 초탄성 거동 및 <Fig 7(c)>와 같이 락킹거동이 확인되었다. 이러한 초탄성거동은 감쇠장치의 내력을 과대평가할 우려가 높고, 내진보강설계에 적용시 기존골조에 초과하중으로 작용하여 안전성에 불리한 경향을 보일 수 있음에 따라 허용변위의 제한이 필요할 것으로 판단된다.



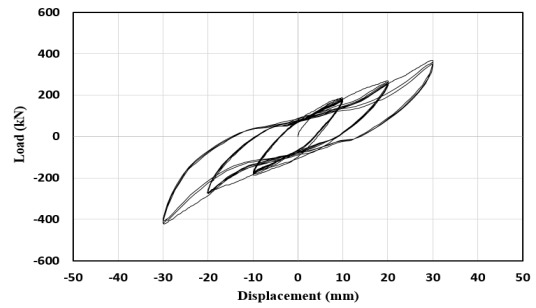
(a) SD specimen



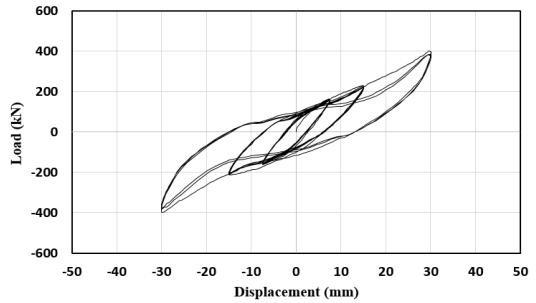
(b) NRC specimen



(c) RCS specimen (Incremental)

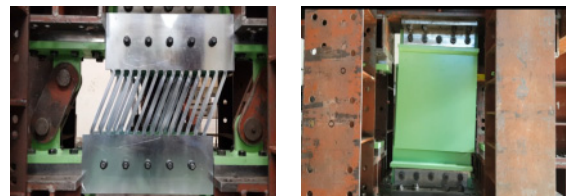


(d) RCS specimen (KDS 41 17 00)



(e) RCS specimen (MOE 2021)

<Fig. 6> Hysteresis curve of Specimens



(a) SD specimen

(b) NRC specimen



(c) RCS specimen

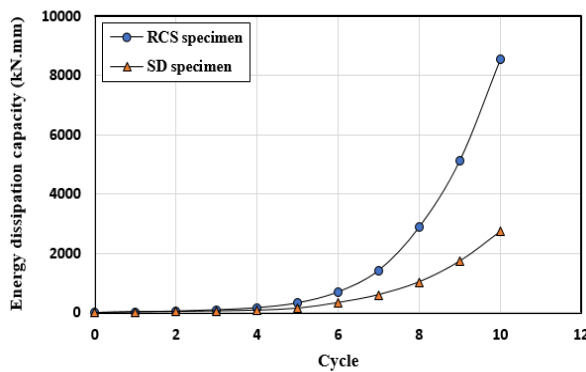
<Fig. 7> Deformation of the test specimen

<Fig. 8>에 RCS실험체와 SD실험체의 증분가력에 따른 에너지소산량을 비교하였다. 초기변위에서는 고무의 탄성거동으로 RCS실험체와 SD실험체의 에너지소산량은 유사하였으나, NRC 실험체의 전단변형 25% 초과에 해

당하는 6 cycle 이후 고무의 에너지소산작용으로 인해 RCS실험체의 에너지소산능력이 크게 증가되기 시작하였다. NRC 실험체의 전단변형 100% 초과가 된 10 cycle에서 RCS실험체의 에너지소산량은 8,530.7kN·mm, SD실험체의 에너지소산량은 2,732.4kN·mm으로 나타나 RCS실험체에서 SD실험체의 에너지소산비율은 32%에 해당함에 따라 NRC실험체의 에너지소산역할이 큰 것으로 분석되었다.

<Table 3> Result of RCS test

Specimens		Zero Disp.	Max Disp.	Min Disp.	Eloop
		Max.(Min.) forces (kN)	Max.(Min.) forces (kN)	Max.(Min.) forces (kN)	Max.(Min.) area (kN·mm)
RCS (KDS 41 17 00)	0.33 times	77.4 (-91.6)	186.5 (170.5)	-187.0 (-171.9)	2,112.1 (1,736.1)
	0.67 times	109.2 (-88.6)	268.9 (251.1)	-274.8 (-271.3)	5,540.4 (4,444.1)
	1.00 times	86.1 (-92.8)	367.0 (348.3)	-422.2 (408.4)	9,691.9 (7,981.6)
RCS (MOE 2021)	0.25 times	67.0 (-65.6)	163.2 (156.9)	-160.4 (-159.1)	1,179.1 (980.9)
	0.50 times	91.0 (-94.4)	230.6 (220.2)	-212.7 (-204.9)	3,939.0 (3,365.6)
	1.00 times	100.6 (-112.6)	403.0 (383.82)	-399.7 (-374.9)	10,417.6 (8,201.9)



<Fig. 8> Normalized energy ratio

3.2 적합성 분석

건축물 내진설계기준에 의한 감쇠장치의 요구성능은 임의회차의 반복재하시 방향별 최대 장치변위에서의 하중이 모든 반복재하로부터 산정된 각각 평균치의 ±15% 이내, 변위 원점에서의 최대·최소하중이 모든 반복재하로부터 산정된 각각 평균치의 ±15%이내, 이력곡선 면

적이 모든 반복재하로부터 산정된 평균치의 ±15%이내 가 되도록 정의하고 있다. RCS 감쇠장치의 각 변위 구간에서의 최대하중은 평균치의 6.32%, 최소하중은 6.57%이내, 영변위에서의 최대·최소하중은 평균치의 14.79% 이내, 모든 구간에서의 이력곡선 면적은 평균치의 14.7%이내로 확인되어, 시험체의 적합성은 확보된 것으로 확인되었다.

3.3 RCS감쇠장치 해석모델 및 평가

RCS 감쇠장치를 적용하여 내진보강설계를 수행하기 위해서는 해석모델이 필요하다. 감쇠장치의 해석모델은 이론식에 의한 모델과 실험결과에 의한 모델로 구분할 수 있으며, 실무적용성을 위해서는 두 모델의 조합에 의해 해석모델이 유도되어야 한다. RCS 감쇠장치와 같이 복합형 감쇠장치의 해석모델은 2개의 개별요소를 반영하여 해석모델을 제시하는 것이 타당하나 국내실무에서 사용하는 프로그램의 제한적인 해석모델 및 복합요소 적용에 따른 수렴성의 문제로 Bi-linear모델, Tri-linear 모델, Ramberg-Osgood 모델의 단일모델을 이용하여 제안하였다. 제안된 모델 중 Ramberg-Osgood 모델의 곡선은 식(9)에 의해 제어된다¹²⁾.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} \left(1 + \left| \frac{\sigma}{\sigma_y} \right|^{\gamma-1} \right) \quad (9)$$

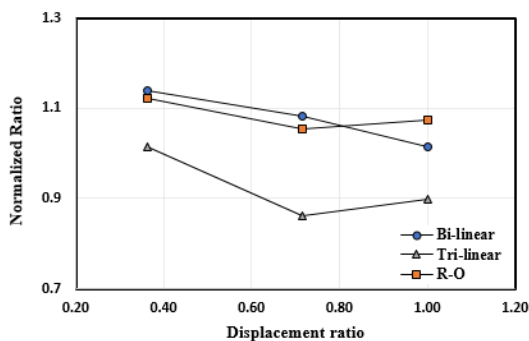
여기서, γ 는 이력곡선의 형상을 결정하는 변수이며, $\gamma = 1$ 은 탄성모델, $\gamma = \infty$ 일 경우 탄소성모델과 같다.

제안된 해석모델에 대한 주요 변수값은 <Table 4>에 나타내었다. 유효성 평가는 Seismostruct(v2021)의 Static Time History Analysis로 수행하였으며, 각 요소는 링크(link)요소로 모델링하여 결과를 비교·분석하였다. RCS 감쇠장치의 제안된 해석모델과 실험결과와의 정규화에너지 비교는 <Fig. 9>에 나타냈으며, 실험결과와 해석결과의 이력거동의 차이는 <Fig. 10(a)~(c)>에 나타내었다. Bi-linear모델과 Ramber-Osgood모델은 초기변형에서는 실험결과의 에너지 소산면적이 크게 나타났으나, 장치변위가 증가될수록 실험결과의 일치성이 높아지는 경향을 나타냈다. Tri-linear모델은 초기변형에서는 실험결과의 일치성이 우수하였으나, 변위가 증가될수록 실험결과의 에너지소산능력을 과소평가하는 경

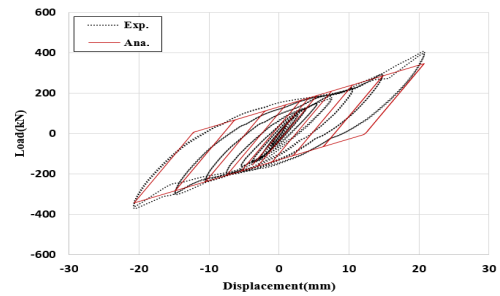
향을 나타냈다. 이는 실험결과와 해석결과의 영변위하중 차이에 의한 것으로 판단된다. Ramberg-Osgood모델은 영변위 하중, 변위구간에서의 최대·최소하중이 가장 일치하는 것으로 나타났으나, 장치변위 20.7mm에서는 에너지소산면적이 실험결과와 비교시 과대평가하는 것으로 나타났다. 이는 고무코어패드는 변형진폭이 커질수록 나비모양의 이력거동을 보이거나 Ramberg-Osgood모델은 상수에 의해 위로볼록한 형태의 이력거동을 나타내었기 때문인 것으로 판단된다. 제시된 모든 해석모델의 이력면적의 차이는 평균치의 $\pm 15\%$ 이내 이내로 확인됨에 따라 해석모델의 적용이 가능한 것으로 사료된다.

〈Table 4〉 Coefficient of RCS analysis model

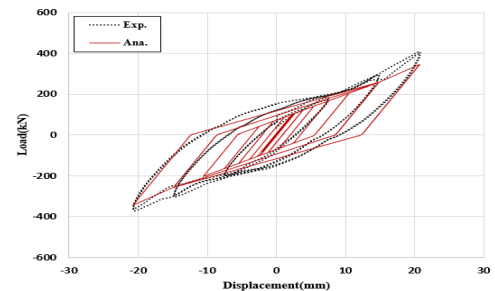
Contents	Curve Properties	Value
RCS	Yield force ($P_{y,h}$)	174.74kN
	Initial stiffness ($K_1 = P_y/\delta_y$)	41.26kN/mm
Bi-linear	Initial stiffness ($K_1 = P_y/\delta_y$)	41.26kN/mm
	Yield force ($P_{y,h}$)	175kN
	Post yield hardening ratio	0.25
Tri-linear	Initial stiffness ($K_f = P_{y,f}/\delta_{y,f}$)	41.26kN/mm
	Yield displacement (D_y)	2.5mm
	2nd stiffness ($K_{SE} = P_{y,h}/\delta_{y,h}$)	12.50kN/mm
	3rd stiffness ($K_{RD} = P_{max}/\delta_{max}$)	15.00kN/mm
Ramber-Osgood	Yield displacement (D_y)	2.5mm
	Yield force ($P_{y,h}$)	175kN
	R-O parameter (γ)	2.5



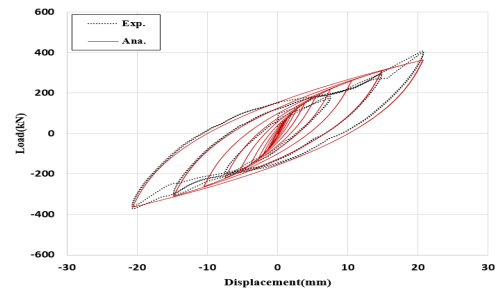
〈Fig. 9〉 Comparison of normalized energy dissipation of experimental and analysis results



(a) Bi-linear hysteresis curves



(b) Tri-linear hysteresis curves



(c) R-O hysteresis curves

〈Fig. 10〉 Comparison of experiment and analysis results

4. 결론

본 연구에서는 RCS 감쇠장치의 이력특성을 확인하고 구조물의 내진보강설계에 활용하기 위해 RCS 감쇠장치의 해석모델을 제안하였다. 제안된 해석모델은 초기강성, 항복강도, 항복변위는 이론모델을 적용하였으며, 항복후 강성 및 Ramberg-Osgood 모델의 고유 매개변수는 실험그래프를 반영하여 추정하였다.

감쇠장치의 이력특성에 대한 실험결과, 반복재하에 따른 원점에서의 최대·최소하중 및 이력곡선 면적은 KDS 41 17 00에 의해 평가시, 평균치의 최대 14.7% 이내로 확인되었으며, 방향별 최대 장치변위에서의 하중은

6.57%로 확인되어 적합성을 확보한 것으로 확인되었다.

제안된 해석모델의 유효성을 검증하기 위해 실험결과에 의한 이력특성과 수치해석에 의한 이력특성을 비교하였다. 초기강성 및 항복강도, 항복 후 강성비의 매개변수로 정의가 가능한 Bi-linear, Ramberg-Osgood모델을 적용한 RCS 감쇠장치의 해석모델은 실험결과의 이력특성을 비교적 정확히 모사됨에 따라 내진보강을 위한 해석 및 평가모델로 적용이 가능함을 확인 하였다. 2차 및 3차강성을 적용한 Tri-linear모델은 저변위에서의 에너지소산면적은 실험결과와 일치하였으나, 변위가 증가될 수록 과소평가하는 것으로 확인되었다. 다만, 고무 코어패드적용으로 인해 고무의 전단변형 100% 초과시 강성이 급격히 증가되는 초탄성의 이력거동이 관찰됨에 따라 감쇠장치 설계시 최대변위의 제한과 같은 주의가 필요할 것으로 분석되었다.

감사의 글

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

References

1. Ministry of the Interior and Safety, "Phase 3 Basic Plan for Seismic Reinforcement of Existing Public Facilities(2021~2025)", 2020.
2. Ministry of Education, "Seismic Performance Evaluation and Reinforcement Manual for School Facilities", 2021.
3. Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, "Tips for improving seismic performance of existing facilities (buildings)", 2022.
4. Park, B. T., Lee, S. J. & Lee, J. H., "A Study on the Hysteresis Characteristics of Stiffener-Integrated Buckling Restrained Brace", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.34, No.3, pp.161~172, 2022, doi: 10.7781/kjoss.2022.34.3.161
5. Whittaker A. S., Bertero V.V., Thompson C.L. & Alonso L.J., "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices", Earthquake Spectra, Vol.7, No.4, pp.563~604, 1991, doi: 10.1193/1.1585644
6. Tsai K. C., Chen H. W., Hong C.P. & Su Y.F., "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", Earthquake Spectra, Vol.9 No.3, pp.505~528, 1993, doi: 10.1193/1.1585727
7. Park, B. T., & Lee, J. H., "A Study on Hysteresis Characteristics and Analysis Model of Hybrid Damping Device-Hybrid Damping Device Consisting of Steel Slit and Rotational Friction Damping Device", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.37, No.11, pp.263-270, 2021, doi: 10.5659/JAIK.2021.37.11.263
8. Marshall, J. D., & F. A. Charney. "Seismic response of steel frame structures with hybrid passive control systems", Earthquake Eng. Struct. Dyn. Vol.41 No.4, pp.715~733, 2012, doi: 10.1002/eqe.1153
9. Xu Z., Xu F. & Chen X., "Study on intelligent vibration isolation and mitigation of the platform by using MR and VE devices", Journal of Aerospace Engineering. ASCE. Vol.29, No.4, pp.1~10, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000604
10. FEMA, "Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components (FEMA-461)", pp.21~23, 2007.
11. Architectural Institute of Korea, "Seismic Building Design Code and Commentary : KDS 41 17 00", pp.136~139, 2019.
12. Ana M., Tudor S., Marius G., & Ovidiu S., "A comparative study of the dynamic behavior of Ramberg-Osgood and Bouc-Wen hysteresis models with application to seismic protection devices", Journal of Engineering Mechanics, Engineering Structures, Vol.76, pp.255~269, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.07.002

■ Received : January 10, 2023

■ Revised : February 24, 2023

■ Accepted : March, 02, 2023