

# 고연성-저항복강을 사용한 복합강재 제진시스템의 이력특성 연구

김건호<sup>1</sup> · 유홍식<sup>2</sup> · 김동건<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>석사과정, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과, <sup>2</sup>전문연구원, POSCO 기술연구원, 구조연구그룹,

<sup>3</sup>부교수, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과

## A Study on the Hysteretic Characteristics of Hybrid Steel Damper System Using the High Ductile Low-Yield-Point Steel

Kim, Geon Ho<sup>1</sup>, Ryu, Hong Sik<sup>2</sup>, Kim, Dong Keon<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student (Master Course), Dept. of ICT Integrated Safe Ocean Smart Cities Engineering, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

<sup>2</sup>Principal Researcher, Structure Research Group, POSCO Steel Solution Research Lab, Incheon, 21985, Korea

<sup>3</sup>Associate Professor, Dept. of ICT Integrated Safe Ocean Smart Cities Engineering, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

**Abstract** - In this study, the composite steel damper system using low-yield-point steel(HSA80) was proposed to obtain more effective energy dissipation capacity than a general steel damper. The composite steel damper system using the low-yield-point steel has the advantage of ensuring high stiffness and seismic performance by exhibiting excellent energy dissipation capabilities and performing sequential yield characteristics. The experiments of the composite steel damper system were conducted to investigate the hysteretic characteristics. Two types of steels carbon steel(SS275) and low-yield-point steel, were used to develop the steel damper LSD(low-yield-point steel damper), CSD(carbon steel damper), and HSD(hybrid steel damper). In addition, the behavior of HSD was analyzed through the nonlinear kinematic hardening model and the analytical were good matches with the experimental results. In conclusion, HSD showed excellent energy dissipation capabilities to ensure stable seismic performance based on the two types of loading protocols.

**Keywords** - Low-yield-point steel, Steel slit damper, Composite damper system, Multi-phased response, Hysteretic characteristics

### 1. 서론

최근 뉴질랜드 동부해역에서 규모 8.1 정도의 강진이 발생하였으며, 국내에서도 지난 2020년 전남 해남 지역에서 5.0회 이상의 지진이 발생하였다. 또한, 2016년 경주시에서 발생한 규모 5.8의 지진과 2017년 포항시에서 발생한 규모 5.4의 지진 등 국내에서도 규모 5.0 이상 지진의 발생 가능성이 증대되고 있다<sup>[1]</sup>. 국내에선 1988년 처음으로 6층 이상의 건축물 또는 연면적 1,000 m<sup>2</sup> 이상인 건축물을 대상으로 내

진설계기준이 제정되었고, 현재는 2층 이상, 연면적 500 m<sup>2</sup> 이상으로 적용대상이 확대되었다<sup>[2]</sup>. 따라서, 내진설계에 대한 기준정립 이전에 건설된 건축물은 부족한 내진성능과 노후화로 인하여 지진에 의해 발생하는 피해가 상당할 것으로 판단되며, 내진설계 대상에서 제외된 구조물에 대하여 내진 성능 평가 및 보강이 필요한 실정이다<sup>[2]</sup>.

구조물의 내진보강 방법 중 구조물에 제진장치를 적용하여 지진에 의한 진동을 제어함으로써 지진과 같은 수평하중으로부터 구조물을 보다 안전하게 하는 내진설계 방법인 제진구조시스템<sup>[3][5]</sup>에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 제진장치 중에서 다양한 유형의 강재이력댐퍼가 개발되고 있으며, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 강재이력댐퍼의 경우에는 주요 구조 부재보다 먼저 항복한 후 소성거동을 해야 하며, 이를 위해 본 구조물이 저항하는 지진하중에 대응하여 제작 및 설계하여야 한다<sup>[6]</sup>. 또한, 지진 발생 시 탄소강으로 설계된 강재댐퍼는 설계하중에 도달하지

Note.-Discussion open until February 28, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 24, 2021; revised on May 10, 2021; approved on May 10, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-51-200-7692 Fax. +82-51-200-7616

E-mail. dkkzone@dau.ac.kr

않더라도, 반복적인 소성거동에 의해 저주기 피로파괴(low cycle fatigue failure)가 발생할 수 있다<sup>[7]</sup>. 저항복강의 경우엔 패널댐퍼에 관한 연구가 많이 수행되었으며<sup>[8],[9]</sup> 이는 일반적으로 폭두께 비율이 크기 때문에 면외좌굴이 발생하기 쉽다.

따라서, 지진하중에 효율적으로 대응하고 저주기 피로파괴에 대한 강재댐퍼의 손상발생을 감소시키기 위하여 우수한 피로특성을 가진 저항복강의 사용을 고려하였다<sup>[10]</sup>.

본 연구에서 제안하는 복합강재 제진시스템은 일반적인 강재이력댐퍼보다 효율적인 내진성능을 얻기 위해 고연성-저항복강(HSA80)과 탄소강(SS275)을 동시에 사용하며, 강재 스트럿의 항복변위를 주요 변수로 하였다.

본 연구에서는 복합강재 제진시스템이 다양한 크기의 수평하중으로부터 우수한 에너지소산능력을 발휘하는지 알아보기 위해 항복변위가 상이한 두 가지 강재를 병렬식으로 복합하여 정적가력시험을 진행하였다. 또한, 제진장치의 비선형 거동을 예측하기 위해 등방경화(isotropic hardening)<sup>[11]</sup>와 이동경화(kinematic hardening)<sup>[12]</sup>를 동시에 고려한 비선형형이동경화모델(nonlinear kinematic hardening model)<sup>[13]</sup>을 이용하여 해석을 수행하였다. 최종적으로 항복변위가 상이한 복합강재 제진시스템을 제안하여 항복변위가 상대적으로 낮은 강재가 먼저 항복하고, 항복변위가 상대적으로 높은 강재가 순차적으로 항복하여 일반적인 강재댐퍼에 비해 우수한 내진성능을 확보하는지 알아보고자 한다.

## 2. 고연성-저항복강을 사용한 복합강재 제진시스템

### 2.1 저항복강(HSA80)의 재료적 특성

본 연구에 사용된 실험체인 복합강재 제진시스템은 HSD (hybrid steel damper)로서 고연성-저항복강으로 설계된 LSD (low-yield-point steel damper)와 탄소강으로 설계된 CSD (carbon steel damper)를 병렬식으로 복합하였다. 실험체 제작에 사용된 강재의 재료적 특성을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 ASTM E8/E8M-16a<sup>[14]</sup>의 금속재료 인장 시험편 규정에 따라 각 판 두께별 3개의 시험편을 절취하여 인장강도 시험을 수행하였다. Fig. 2와 Table 1에 나타난 시험편의 인장시험결과는 각 인장시험결과의 평균치이다.

저항복강의 인장시험 결과 Table 1과 같이 항복강도( $f_y$ )는 77 MPa, 인장강도( $f_u$ )는 274 MPa, 연신률은 66%로 나타났다. Fig. 2에 나타난 저항복강과 일반 탄소강의 응력-변형

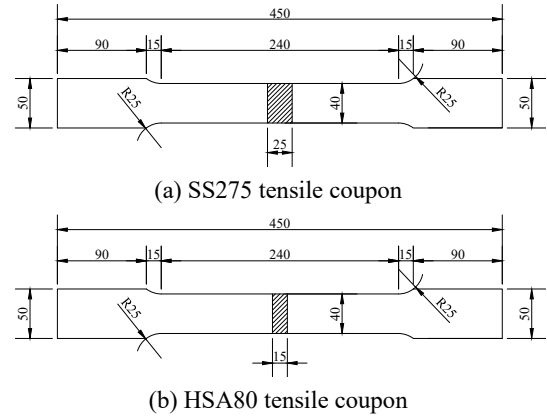


Fig. 1. Tensile coupon tests (Unit: mm)

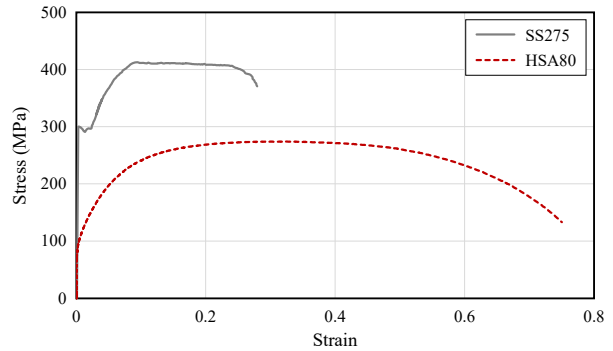


Fig. 2. Comparison of stress-strain relationship between HSA80 and SS275

Table 1. Average results of three tensile coupon tests

Specimen	$E$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\sigma_y/\sigma_u$	Elongation (%)
SS275	210,169	287	431	0.665	27
HSA80	187,651	77	274	0.279	66

률 곡선을 통해 탄소강과 비교 시 저항복강의 항복강도는 약 1/4 정도였다. 또한, 항복점으로부터 인장강도까지의 변형경화구간이 상대적으로 더 크게 나타나 연신률은 약 2-3 배 정도 큰 것으로 보이며, 이에 따라 강재댐퍼의 이력거동 시 일반 탄소강 댐퍼보다 에너지소산능력이 뛰어날 것으로 판단된다.

### 2.2 고연성-저항복강을 사용한 복합강재 제진시스템의 거동

HSD는 Fig. 3와 같이 상대적으로 항복변위가 낮은 LSD가 먼저 항복한 이후, 상대적으로 항복변위가 높은 CSD가 순차적으로 항복하여 다양한 수평하중에 효과적으로 대응하고 높은 강성을 확보할 수 있는 시스템이다.

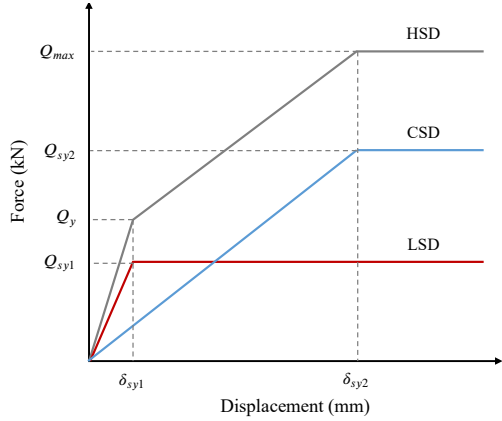


Fig. 3. Hybrid steel damper system using the low-yield-point steel

제진장치와 횡력저항시스템의 항복내력의 합을 넘어서는 지진력이 가해질 경우 구조체는 완전히 항복하게 되어 추가적으로 발생하는 지진력에 저항할 수 없게 된다. 이러한 상황을 방지하기 위해 구조물이 항복하기 전 제진장치의 소성변형을 통한 에너지소산량을 극대화하는 것을 목표로 제진시스템의 최적설계가 필요하다. 따라서, HSD의 이력거동을 3개의 구간으로 구분하여 다음과 같이 나타냈다.

- (1) CSD와 LSD가 탄성거동하는 구간( $Zone\ 1 < \delta_{sy1}$ )
- (2) LSD는 항복 이후 소성거동을 하지만 CSD는 탄성거동을 하는 구간( $\delta_{sy1} < Zone\ 2 < \delta_{sy2}$ )
- (3) CSD와 LSD가 항복 이후 소성거동하는 구간( $\delta_{sy2} < Zone\ 3$ )

이처럼 상대적으로 약한 횡력이 가해질 시 Zone 2에서 거동하며, 상대적으로 강한 횡력이 가해질 시 Zone 3에서 거동하여 순차적인 항복을 통한 이력거동을 나타낼 수 있도록 설계하였다.

### 3. 실험개요

#### 3.1 실험체 설계

본 연구에 사용된 슬릿형 강재댐퍼의 항복내력은 제진구조설계지침<sup>[15]</sup>에서 제시하는 설계식을 사용하여 산정하였다. Fig. 4와 같이 슬릿형 강재댐퍼의 스트럿 1개에 대한 항복내력은 식 (1)에 나타난 휨( $dQ_{b,y}$ )과 식 (2)에 나타난 전단( $dQ_{s,y}$ )에 의한 항복내력 중에서 작은 값을 사용하며, 이는 식 (3)에 나타냈다.

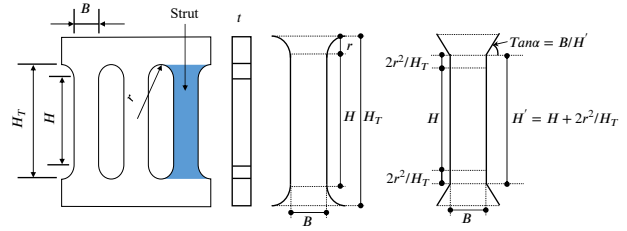


Fig. 4. Design configuration of the steel slit damper

$$dQ_{b,y} = \frac{tB^2\sigma_y}{2H'} \tag{1}$$

$$dQ_{s,y} = \frac{2tB\sigma_y}{3\sqrt{3}} \tag{2}$$

여기서,  $t$ : 댐퍼의 두께

$B$ : 스트럿의 폭

$H$ : 스트럿 직선부의 높이

$$H' = H + 2\frac{r^2}{H + 2r}$$

$$dQ_y = n \times \min(dQ_{b,y}, dQ_{s,y}) \tag{3}$$

여기서,  $n$ : 스트럿의 개수

$dQ_{b,y}$ : 휨에 의한 항복내력

$dQ_{s,y}$ : 전단에 의한 항복내력.

전단력을 받는 댐퍼에서는 전단변형과 휨변형이 동시에 발생하여 댐퍼의 항복변위( $d\delta_y$ )는 식 (4)와 같이 휨에 의한 항복변형( $d\delta_{b,y}$ ), 전단에 의한 항복변형( $d\delta_{s,y}$ )을 합하여 계산한다. 식 (4)에서  $d\delta_{b,y}$ ,  $d\delta_{s,y}$ 은 식 (5), 식 (6)에 나타냈다.

$$d\delta_y = d\delta_{b,y} + d\delta_{s,y} \tag{4}$$

$$d\delta_{b,y} = \frac{Q_y(H')^3}{nEtB^3} \left( 1 + 3 \ln \frac{H_T}{H'} \right) \tag{5}$$

$$d\delta_{s,y} = \frac{3Q_yH'}{2ntBG} \left( 1 + \ln \frac{H_T}{H'} \right) \tag{6}$$

Fig. 5(a), Fig. 5(b)와 같이 단면성능의 상대적인 차이를 주기 위하여 두 가지 유형의 슬릿형 강재댐퍼 스트럿에 폭 ( $B$ )과 길이( $H$ )를 주요 변수로 항복변위와 항복내력 및 초기 강성( $dK_i$ )을 각각 1.4 mm, 32.4 kN, 106.7 kN/mm의 차이를 주어 Table 2와 같이 설계하였다.

Fig. 5(c) HSD는 순차적인 이력거동을 모사하기 위하여 두 가지 유형의 슬릿형 강재댐퍼 LSD와 CSD를 T형지그를 사용하여 병렬식으로 복합하였다. 추가적으로 복합강재 제

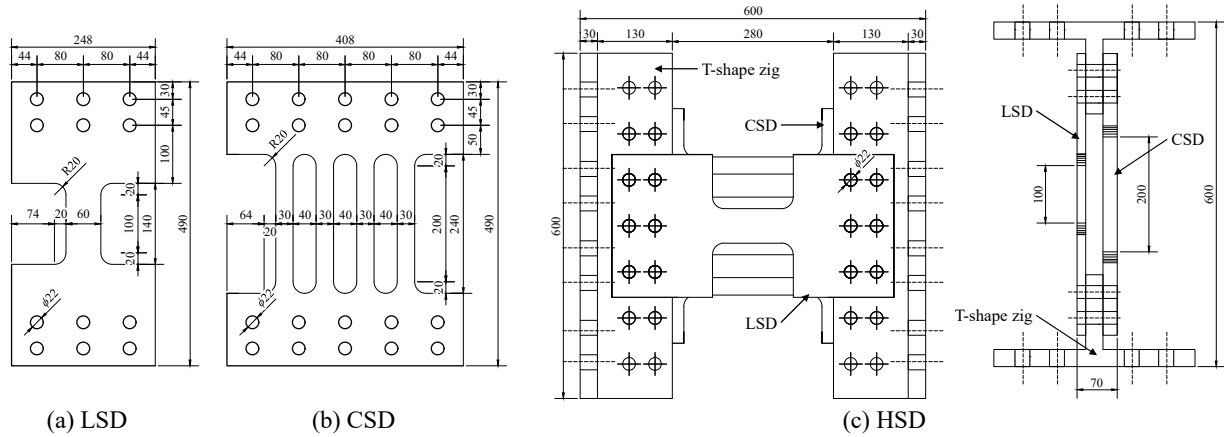


Fig. 5. Detail of test specimen (Unit: mm)

Table 2. Test specimen

Specimen	Strut				$dQ_y$ (kN)	$d\delta_y$ (mm)	$dK_i$ (kN/mm)
	$t$ (mm)	$B$ (mm)	$H$ (mm)	Number of struts			
LSD	15	60	100	1	24.45	0.17	142.75
CSD	25	30	200	4	56.84	1.58	36.05
HSD	LSD	15	60	1	81.29	0.17	178.80
	CSD	25	30	4		1.58	

진시스템의 피로손상에 대한 성능을 평가하기 위해 앞서 언급한 설계식을 통하여 LSD는 전단지배형, CSD는 휨지배형으로서 LSD는 상대적으로 항복내력이 작기 때문에 피로한계에 대하여 불리한 스트럿, CSD는 상대적으로 항복내력이 크기 때문에 피로한계에 대하여 유리한 스트럿으로 설계하여 피로한계성능을 상이하게 설계하였다<sup>[15]</sup>.

### 3.2 실험방법 및 측정계획

슬릿형 강재댐퍼의 에너지 소산능력을 평가하기 위해 1,000 kN 용량의 만능시험기(UTM) 및 변위측정기(LVDT)를 사용하여 유사정적가력 실험을 수행하였다. 실험 수행을 위하여 별도의 ‘L’ 타입 지그를 두 개 설치하였으며, Fig. 6와 같이 두 지그 사이에 댐퍼를 결합하여 시험기의 축방향 변위가 댐퍼의 전단변형 거동으로 가려되도록 고려하였다. 또한, 스트럿 단부에서 응력이 집중되므로 스트럿 단부에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다.

정적가력방법은 LP-1, LP-2 총 2가지로 Fig. 7(a) LP-1의 경우 KDS 41 17 00: 2019 건축물 내진설계기준(17.6.2 장치원형 시험)<sup>[16]</sup>에 제시된 가력방식을 사용하였으며, 총 3 step 기준으로 Step 1은 8 mm의 크기로 10회, Step 2는 16 mm의

크기로 5회, Step 3는 24 mm의 크기로 3회로 총 18회 반복 시험을 수행하였다. Fig. 7(b) LP-2의 경우 복합강재 제진시스템의 순차적인 항복을 통한 이력거동을 확인하기 위해 HSD의 이력거동의 3개의 구간 중 CSD의 항복변위( $\delta_y$ )를 기준으로 Zone 1의 거동에서  $0.5\delta_y$ , Zone 2의 거동 이후 2배수로  $\delta_y$ ,  $2\delta_y$ ,  $4\delta_y$ ,  $8\delta_y$ ,  $16\delta_y$  등과 같이 변위를 점증(incremental) 가력하였다. Step별 가력변위는 6 step을 순차적으로 0.7 mm의 크기로 1회, 1.5 mm의 크기로 1회, 3 mm의 크기로 1회, 6 mm의 크기로 1회, 12 mm의 크기로 1회, 24 mm의 크기로 1회로 총 6 cycle의 반복가력을 수행하였다.

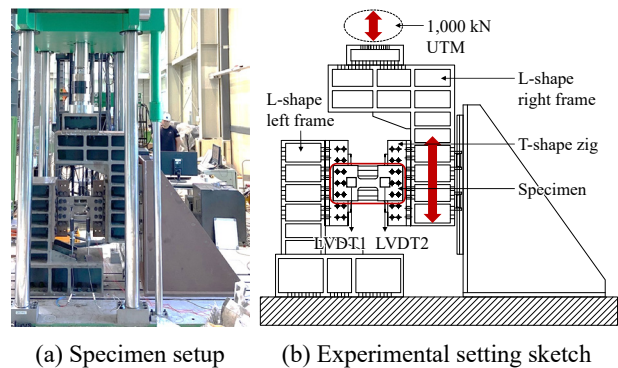
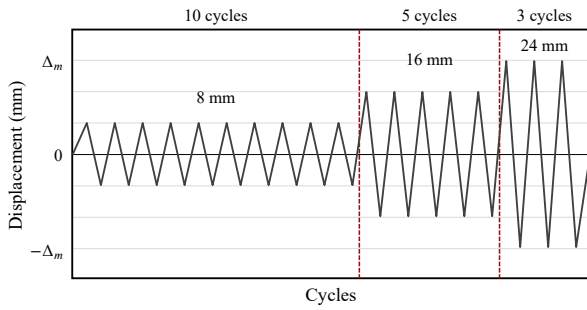
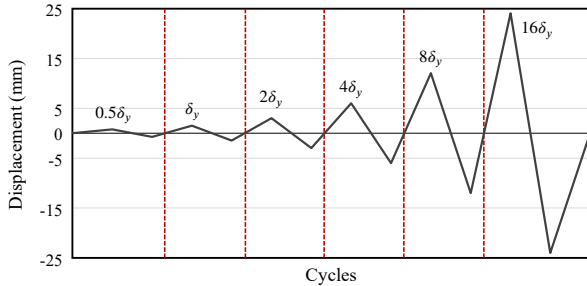


Fig. 6. Test setup



(a) Loading protocol-1 (LP-1)



(b) Loading protocol-2 (LP-2)

Fig. 7. Loading protocol

## 4. 실험결과

### 4.1 하중-변위 이력곡선 결과

각 실험에서 항복변위가 상이한 두 가지 유형의 강재댐퍼 LSD, CSD와 복합강재 제진시스템 HSD의 LP-1, LP-2에 의한 하중-변위 이력곡선은 각각 Fig. 8, Fig. 9과 같다. 슬릿형 강재댐퍼인 실험체에서 기본적으로 항복점까지 선형적인 거동을 하며, 항복 이후부터 실험종료 시까지 안정적인 거동을 나타냈다. 또한, HSD의 하중-변위 이력곡선은 항복변위가 상이한 두 가지 유형의 강재댐퍼인 LSD와, CSD의 하중-변위 이력곡선을 더한 값과 동일하게 나타난다.

### 4.2 골격곡선 분석

Fig. 10은 골격곡선에서의 항복점을 산정하는 방법이며, 실험을 통해 얻은 하중-변위 이력곡선의 각 실험체에 대한 골격곡선의 상세는 Fig. 11과 같다. Fig. 10에서 원점을 지나며 탄성강성의 기울기를 가지는 직선과 탄성강성의 기울기 1/3의 직선이 골격곡선과 만나는 점에서의 접선이 만나는 점을 항복점으로 산정하였다. 골격곡선을 통해 도출된 Table 3는 각 실험체의 항복내력, 항복변위, 초기탄성, 극한내력을 나타낸다. 실험체의 설계값과 실험결과를 비교했을 때 항복

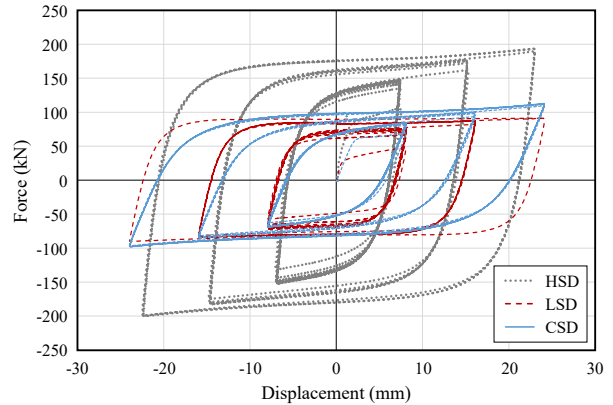


Fig. 8. Force-displacement response of LP-1

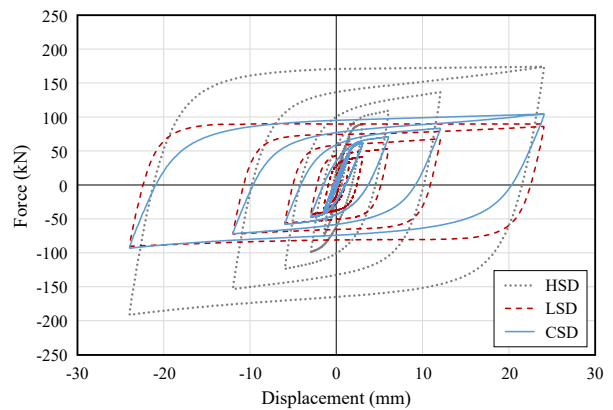


Fig. 9. Force-displacement response of LP-2

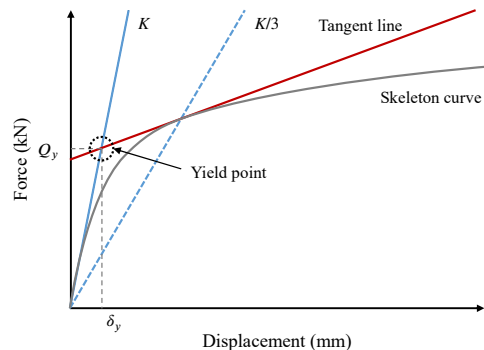


Fig. 10. Selection of yield point in skeleton curve

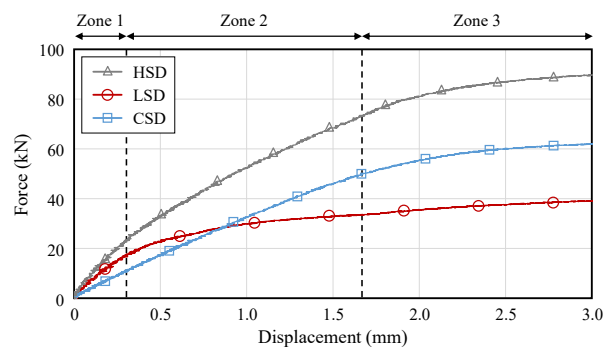


Fig. 11. Detail of skeleton curves



내력의 경우 유사한 결과를 도출하였으며, 항복변위 및 초기탄성의 경우 약 1% 정도의 오차를 나타냈다. 또한, HSD의 항복내력, 항복변위, 초기탄성, 극한내력은 항복변위가 상이한 두 가지 강재댐퍼인 LSD와 CSD의 각 실험결과값을 더한 값과 유사하게 나타났다.

**Table 3.** Summary of experimental results

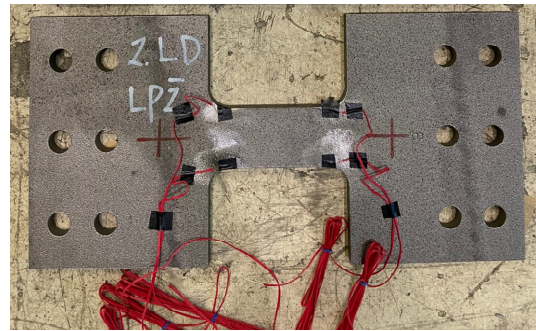
Specimen	$dQ_y$ (kN)	$d\delta_y$ (mm)	$dK_i$ (kN/mm)	$dQ_u$ (kN)
LSD	25.66	0.32	81.16	92.82
CSD	61.82	1.62	38.68	111.82
HSD	80.76	0.87	115.14	191.35

Fig. 11과 같이 각 실험체에 대한 골격곡선의 상세도는 본 연구에서 제안한 복합강재 제진시스템의 거동과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 HSD가 순차적인 항복을 통한 이력거동을 나타내는 것을 알 수 있다.

### 4.3 변형률 분석

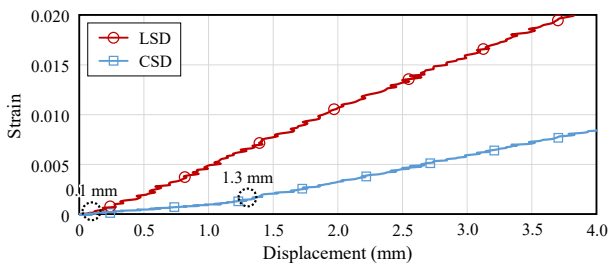
슬릿형 강재댐퍼의 특성은 스트럿 단부에 응력이 집중되며, 각 실험체에 Fig. 12와 같이 스트레인 게이지를 인장과 압축단에 각각 대칭으로 부착하여 변형률을 측정하였다. Fig. 13은 HSD의 순차적인 항복을 통한 이력거동을 분석하

기 위해 LP-1, LP-2에 의한 변형률 상세도이며, Fig. 14은 변형률에 대한 증가율을 나타냈다.

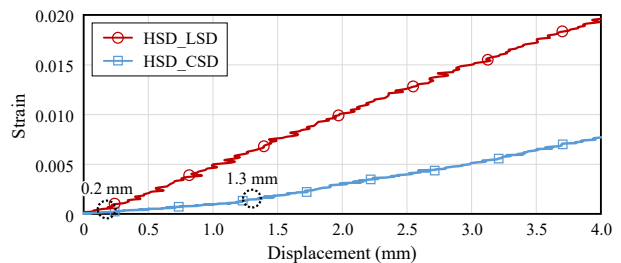


**Fig. 12.** Strain gauge attachment

Fig. 13(a)는 독립적으로 실험한 LSD, CSD의 결과이고, Fig. 13(b)는 각 실험체를 병렬식으로 복합한 HSD에서의 HSD\_LSD, HSD\_CSD의 결과이다. Fig. 14(a), Fig. 14(b)는 각 변형률에 대한 증가율을 나타낸 그래프로 항복변위를 보다 상세히 나타낸다. 기울기가 급격하게 증가하는 부분을 항복변위로 산정하였으며, 상대적으로 항복변위가 낮은 LSD는 0.1 mm 가력구간에서 항복거동을 나타냈고, 상대적으로 항복변위가 높은 CSD는 1.3 mm 가력구간에서 항복거동을 나타낸다. 또한, HSD에서 HSD\_LSD는 0.2mm, HSD\_CSD는 1.3 mm 가력구간에서 항복거동을 하며 순차적인 이력거동을 나타냈다.

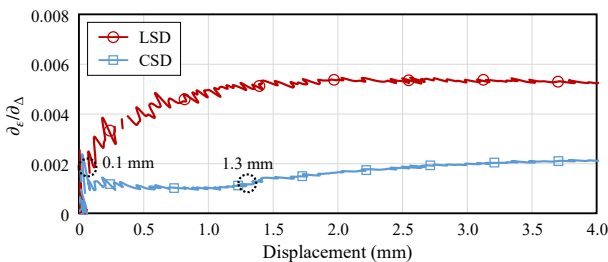


(a) LSD and CSD

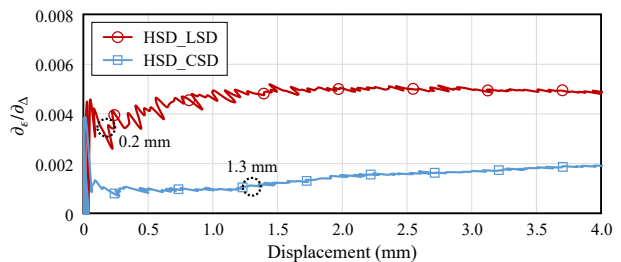


(b) HSD

**Fig. 13.** Strain gauge results



(a) LSD and CSD



(b) HSD

**Fig. 14.**  $d\epsilon/d\Delta$  displacement results

4.4 에너지소산량 비교

본 연구에서 강재댐퍼의 성능을 평가하기 위하여 하중-변위관계, 에너지소산량, 누적소성변형배율을 사용하였다. Fig. 15과 같이 반복하중에 의한 이력곡선은 골격곡선부, 바우싱거부, 연화부, 탄성 제하부로 이루어져 있다. 강재댐퍼의 에너지소산량( $W_D$ )은 식 (7)과 같이 골격곡선부의 에너지소산량( $W_S$ )과 바우싱거부의 에너지소산량( $W_B$ )의 합으로 계산된다.

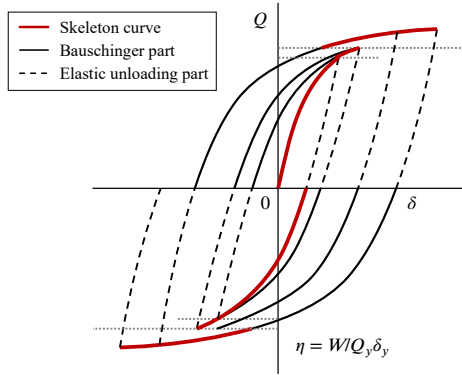
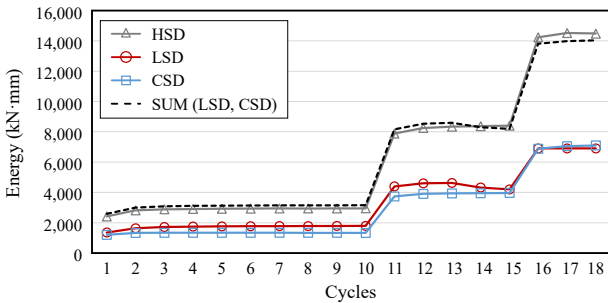
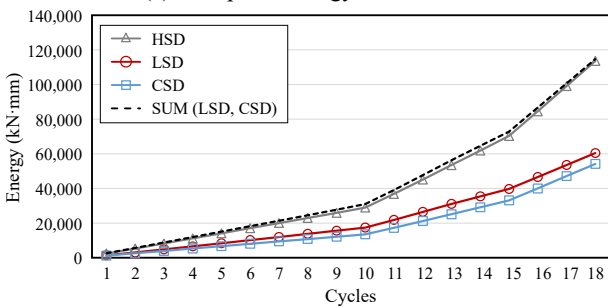


Fig. 15. Decomposition of hysteresis for computation of dissipation energy

$$W_D = W_S + W_B \quad (7)$$



(a) Dissipated energy under LP-1



(c) Cumulative dissipated energy under LP-1

여기서,  $W_D$ : 강재댐퍼의 에너지소산량

$W_S$ : 골격곡선부의 에너지소산량

$W_B$ : 바우싱거부의 에너지소산량.

누적소성변형배율( $\eta$ )<sup>[17]</sup>은 지진 등 수평외력에 의해 발생하는 구조물의 소성변형에너지를 구조체의 항복변형에너지로 나눈 무차원량이며 구조물이 파괴상태에 이르기까지 잔류하여 축적되는 소성변형을 대변하는 값으로 손상의 척도로 볼 수 있다<sup>[18]</sup>. 이는 식 (8)과 같이 골격곡선부의 누적소성변형배율( $s\eta$ )과 바우싱거부의 누적소성변형배율( $B\eta$ )의 합으로 나타내며  $s\eta$ 와  $B\eta$ 는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\eta = s\eta + B\eta \quad (8)$$

$$\eta = \frac{W_D}{Q_y \delta_y}; s\eta = \frac{W_S}{Q_y \delta_y}; B\eta = \frac{W_B}{Q_y \delta_y} \quad (9)$$

여기서,  $\eta$ : 누적소성변형배율

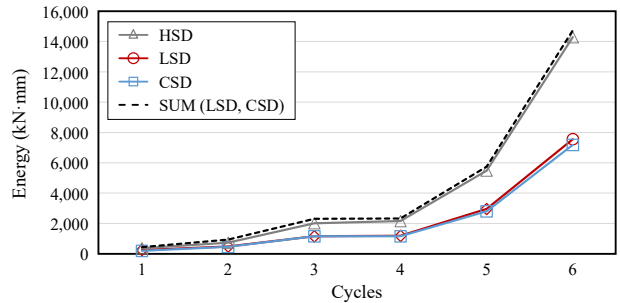
$s\eta$ : 골격곡선부의 누적소성변형배율

$B\eta$ : 바우싱거부의 누적소성변형배율

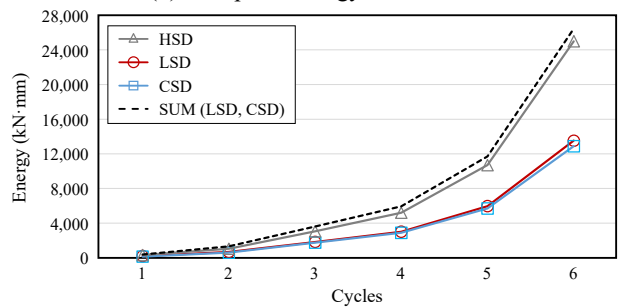
$Q_y$ : 항복하중

$\delta_y$ : 항복변위.

Fig. 16은 LP-1, LP-2의 하중 프로토콜에 대한 각 실험체의 cycle별 에너지소산량을 나타내며, HSD의 에너지소산



(b) Dissipated energy under LP-2



(d) Cumulative dissipated energy under LP-2

Fig. 16. Dissipated energy plots

량은 항복변위가 상이한 두 가지 강재댐퍼 LSD와 CSD를 더한 값과 유사하게 나타났다. Table 4는 각 실험체의 누적 소성변형배율을 두 가지의 하중프로토콜에 대하여 나타냈다. 이 때, 누적소성변형배율은 LSD가 CSD에 비해 크게 나타났다으며, HSD는 LSD가 먼저 항복한 후 소성거동을 하여 탄소강을 사용하여 설계한 CSD보다 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

누적소성변형배율은 강재댐퍼의 에너지소산량을 항복 하중과 항복변위의 곱으로 나눈 것으로, LSD의 누적소성변형배율이 CSD보다 크게 나타난 이유는 실험결과 강종이 상이한 두 가지 댐퍼의 에너지소산량은 유사하였지만 LSD의 항복하중과 항복변위가 CSD보다 상대적으로 작기 때문으로 판단된다.

**Table 4.** Cumulative plastic deformation ratio of specimen

Specimen	$W_D$ (kN·mm)		$\eta$	
	LP-1	LP-2	LP-1	LP-2
LSD	59,782	13,556	7,282	1,654
CSD	54,196	12,918	541	129
HSD	113,568	25,021	1,616	356

4.5 파단형태

각 강재댐퍼는 LP-1에 의한 결과에서 18 cycles까지 내력 저하현상 없이 안정적인 이력거동을 나타냈고, LP-2에 의한 결과에서는 6 cycles까지 내력저하현상 없이 안정적인 이력거동을 나타냈다. 가력프로토콜 이후 LP-1에서의 LSD는

19 cycles, CSD는 22 cycles, HSD\_LSD는 20 cycles, HSD\_CSD 22 cycles에서 내력저하현상이 발생하였다. Fig. 17과 같이 LP-2에서의 LSD는 8 cycles 이후 Fig. 17(a)와 같이 파단되었고 CSD는 9 cycles 이후 Fig. 17(b)와 같이 파단되었으며, HSD\_LSD는 8 cycles, HSD\_CSD는 9 cycles 이후 내력저하현상이 발생하며 응력이 집중되는 스트럿 단부에서 균열이 발생하여 Fig. 17(c)와 같이 파단되었다.

결과적으로 HSD의 경우 항복변위가 상대적으로 낮은 실험체인 LSD가 항복변위가 상대적으로 높은 실험체인 CSD보다 먼저 내력저하현상을 나타내며 최종파단에 도달하였다.

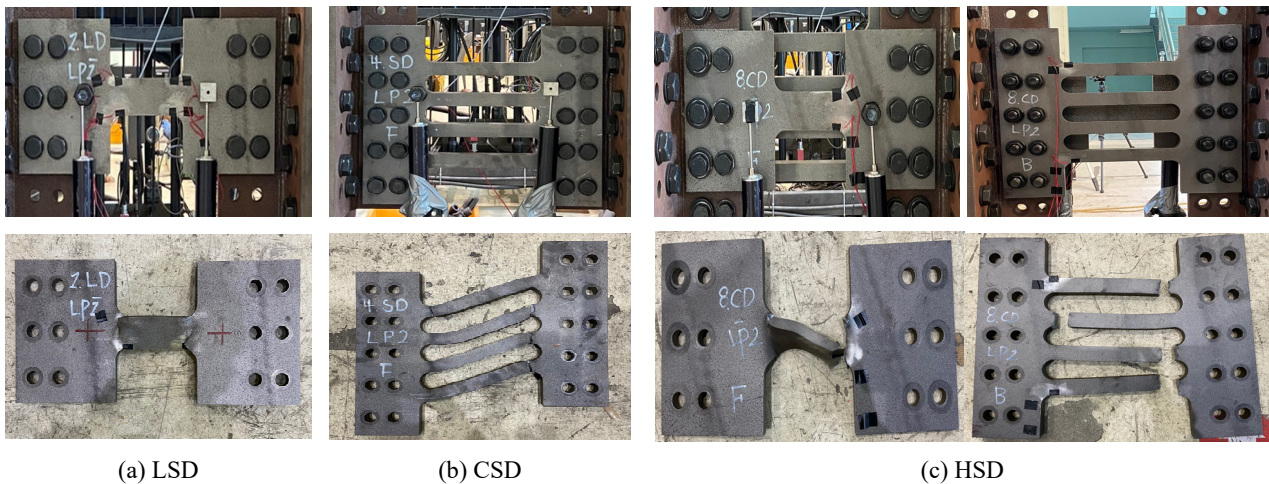
5. 복합강재 제진장치의 비선형 해석

5.1 비선형 해석모델 구축 및 해석계획

본 연구에 사용된 제진시스템의 내진성능을 파악하기 위해 유한요소해석 소프트웨어 ABAQUS(Ver. 2017)를 사용하였다. 제진시스템의 비선형 거동을 예측하기 위해 등방경화화 및 이동경화를 동시에 고려한 비선형이동경화모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 식(10)은 등방경화 함수( $r(p)$ )<sup>[13]</sup>를 나타내며 식(11)은 백 응력(backstress) 텐서( $\alpha$ )<sup>[13]</sup>로서 이동경화를 나타낸다. 또한, Table 5는 해석에 사용된 비선형 이동경화모델의 매개변수이다.

$$\Delta r(p) = b(Q - r) \Delta p \tag{10}$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{\gamma_i} (1 - e^{-\gamma_i p}) \tag{11}$$



**Fig. 17.** Failure configuration after tests

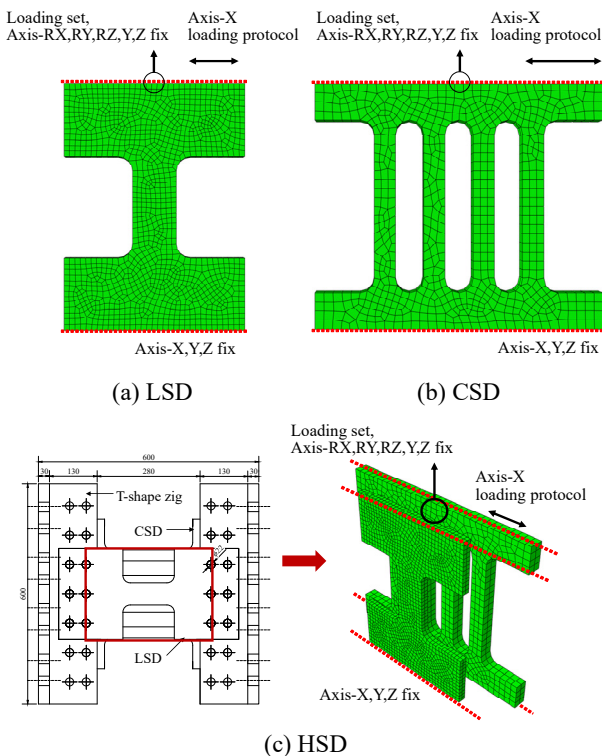


여기서,  $Q$ 와  $b$ 는 등방경화의 재료상수이며,  $C$ 는 이동경화 재료상수이고,  $\gamma$ 는 백응력의 기울기를 결정하는 상수이다.

**Table 5.** Material parameter of nonlinear kinematic hardening model

Material	Isotropic hardening		Kinematic hardening	
	$Q$ (MPa)	$b$	$C$ (MPa)	$\gamma$
HSA80	145.02	59.05	8,589.88	72.40
SS275	87.76	53.87	4,728.41	53.87

변위제어에 의한 LP-1 및 LP-2는 실험과 동일한 가력프로토콜을 사용하였으며, 강재댐퍼의 크기와 형상에 따라 산되는 에너지가 다를 수 있으므로, 실제 실험에서 제안한 댐퍼형상과 동일하게 Fig. 18과 같이 모델링하였다. 구속조건 또한 실험과 동일하게 가력면의 면외방향 및 수직방향 변위를 구속하여 해석을 수행하였다. 실험에서 HSD의 경우 T형 지그를 사용하여 병렬식으로 복합한 후 가력을 진행하였지만, Fig. 18(c)와 같이 해석시간을 고려하여 모델링을 단순화하였다.

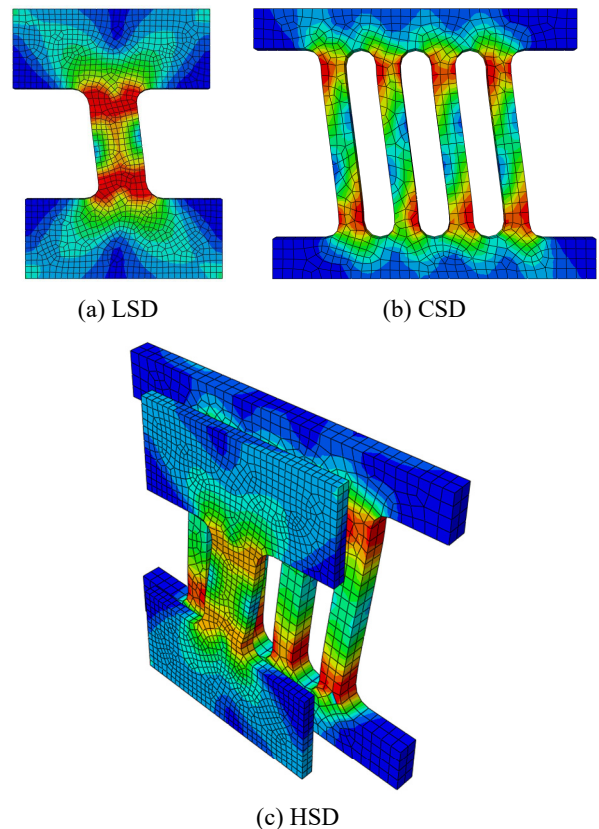


**Fig. 18.** Boundary condition and force direction of analysis model

## 5.2 실험결과와 해석결과 비교 및 검토

Fig. 19(a)는 LSD의 해석모델, Fig. 19(b)는 CSD의 해석모델, Fig. 19(c)는 HSD의 해석모델이며, Fig. 19은 각 LSD, CSD, HSD 해석모델의 최대변위 24 mm에서 응력분포를 나타낸다. 해석모델에서는 단면적의 변화가 발생한 부분인 스트럿의 양단에 응력이 집중하며 파단현상이 나타났으며, 이는 실험에서의 파단부와 해석에서의 응력분포도 및 파단부가 스트럿 단부부분으로 일치함을 알 수 있다.

두 가지 유형의 강재댐퍼의 스트럿 모두 중앙부에는 낮은 응력이 발생하며, HSD의 해석모델의 응력분포에서 LSD와 CSD 해석모델의 응력분포와 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 두 가지 유형의 강재댐퍼를 병렬식으로 복합하여 사용할 경우 각 유형의 강재댐퍼를 독립적으로 실험한 경우와 동일하게 파단형태와 해석모델의 응력분포가 일치함을 알 수 있다.



**Fig. 19.** Stress distribution of each analysis model

실험과 유한요소해석에서 항복변위가 상이한 강재댐퍼 LSD, CSD와 병렬식 복합강재 제진장치 HSD의 LP-1 및 LP-2를 통한 하중-변위 이력곡선 결과의 비교는 Fig. 20와

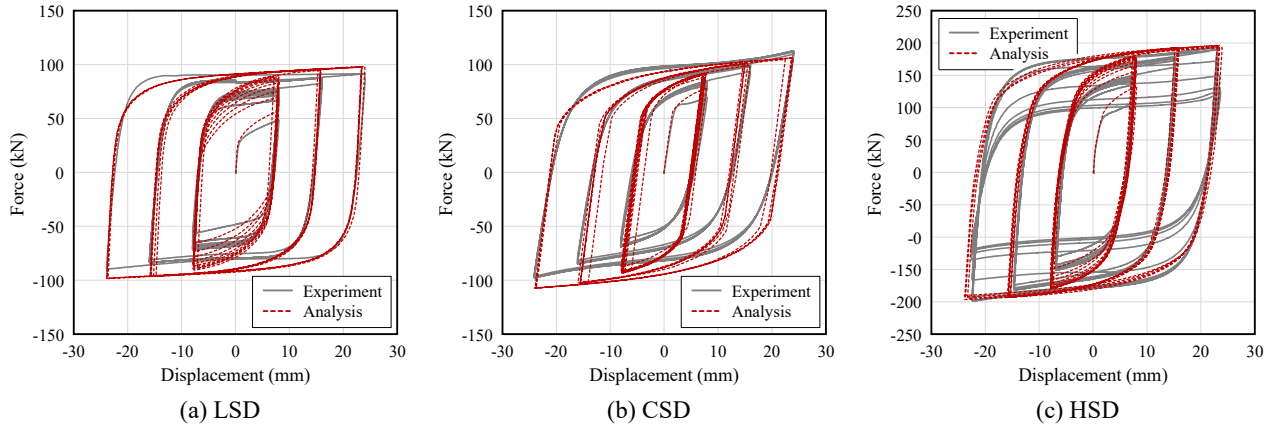


Fig. 20. Force-displacement response of LP-1

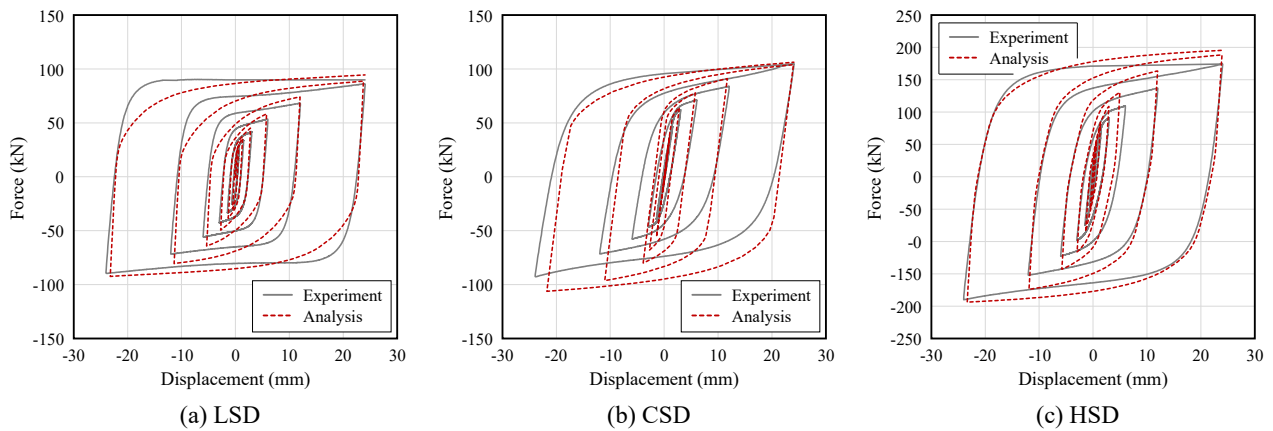


Fig. 21. Force-displacement response of LP-2

Fig. 21과 같다. 비선형이동경화모델을 사용한 해석결과는 실험결과와 유사한 이력거동을 나타낸다. 해석결과를 통해 도출된 LSD, CSD, HSD의 에너지소산량은 LP-1에서 각각 63,776 kN·mm, 60,137 kN·mm, 125,915 kN·mm로 실험결과와 약 10% 이내의 오차를 나타냈고, LP-2에서 LSD, CSD, HSD의 에너지소산량은 각각 13,227 kN·mm, 13,508 kN·mm, 26,940 kN·mm로 실험결과와 약 5% 이내의 오차를 보였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 항복변위가 상이한 두 가지 유형의 슬릿형 강재댐퍼 LSD, CSD를 병렬식으로 복합하여 HSD 복합강재 제진시스템을 설계하였다. 항복변위가 상대적으로 낮은 강재가 먼저 항복하고 항복변위가 상대적으로 높은 강재가 순차적으로 항복하여 다양한 수평하중에 효과적으로 대응하고 안정적인 내진성능을 확보하는 새로운 시스템을 제안하였으며, 종국상황까지 이력거동, 내력저하현상, 에너지 흡

수능력 등의 내진성능을 분석하였다. 본 연구는 항복변위가 상이한 복합강재 제진시스템 HSD의 정적가력실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 복합강재 제진시스템 HSD의 설계 시 이력거동은 3개의 구간으로 구분할 수 있으며, 실험결과의 이력거동도 3개의 구간으로 나타났다. ① CSD와 LSD가 탄성 거동하는 구간( $Zone 1 < \delta_{sy1}$ ), ② LSD는 항복 이후 소성 거동을 하지만 CSD는 탄성 거동을 하는 구간( $\delta_{sy1} < Zone 2 < \delta_{sy2}$ ), ③ CSD와 LSD가 항복 이후 소성 거동 하는 구간( $\delta_{sy2} < Zone 3$ ).
- (2) 항복변위를 변수로 한 LSD, CSD의 실험에서 스트레인 게이지 항복변위 결과와 HSD의 실험에서 HSD\_LSD, HSD\_CSD 스트레인 게이지 항복변위 결과는 유사하게 나타났다. HSD에서 항복변위가 상대적으로 낮은 강재가 먼저 항복하고 항복변위가 상대적으로 높은 강재가 순차적으로 항복하는 이력거동을 나타냈다.

- (3) HSD의 이력거동 특징으로 하중-변위 이력곡선에서의 탄성강성 및 최대하중, 에너지소산량은 LSD, CSD의 하중-변위 이력곡선에서의 탄성강성 및 최대하중, 에너지소산량을 더한 값과 유사하게 나타난다.
- (4) 구조물의 소성변형에너지를 구조체의 항복변형에너지로 나눈 무차원량이며 구조물이 파괴상태에 이르기까지 잔류하여 축적되는 소성변형을 대변하는 값으로 손상의 척도인 누적소성변형배율( $\eta$ )의 경우 저항복강으로 설계된 LSD가 CSD보다 크게 나타났다. 이는 LSD의 항복변위가 CSD보다 상대적으로 작기 때문에 탄성영역에서의 에너지가 작게 산정되었기 때문으로 판단된다. 또한, LSD의 소성영역에서의 에너지가 CSD보다 상대적으로 크므로, 이는 LSD의 연성능력이 우수하다는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2016R1A6A1A03012812).

## 참고문헌(References)

- [1] Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y.H., Kim, S., Kang, S.Y., and Seo, W. (2018) Assessing Whether the 2017  $M_w$  5.4 Pohang Earthquake in South Korea was an Induced Event, *Science*, American Association for the Advancement of Science, Vol.360, No.6392, pp.1007-1009.
- [2] Oh, S.H. et al. (2011) *Development of Technologies for Improvement of Seismic Performance on the Existing Low-Rise Buildings: The Final Report*, Research Report, National Emergency Management Agency, Korea (in Korean).
- [3] Kim, Y.H., Oh, S.H., Kim, Y.J., Ryu, H.S., and Park, H.Y. (2019) Analytical Study on the Damage Control System with Installed Energy Absorber at the End of a Beam Using Resistant Point Steel for Damper, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.25-26 (in Korean).
- [4] Dargush, G.F., and Soong, T.T. (1995) Behavior of Metallic Plate Dampers in Seismic Passive Energy Dissipation Systems, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol. 11, No.4, pp.545-568.
- [5] Ahn, T.S., Kim, Y.J., Park, J.H., Kim, H.G., Jang, D.W., and Oh, S.H. (2012) Experimental Study on a Cantilever Type Metallic Damper for Seismic Retrofit of Building Structures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.2, pp.149-161 (in Korean).
- [6] Lee, S.-H., Oh, S.-H., and Baek, E.-L. (2011) The Proposal of Steel Damper System to Improve the Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.27, No.9, pp.21-28 (in Korean).
- [7] Wang, T., and Lou, Z. (1990) A Continuum Damage Model for Weld Heat Affected Zone Under Low Cycle Fatigue Loading, *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier, Vol.37, No.4, pp.825-829.
- [8] Wang, C., Fan, J.-S., Xu, L.-Y., and Nie, X. (2020) Cyclic Hardening and Softening Behavior of the Low Yield Point Steel: Implementation and Validation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.210, 110220.
- [9] Chen, S.-J., and Jhang, C. (2011) Experimental Study of Low-Yield-Point Steel Plate Shear Wall Under In-Plane Load, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.6, pp.977-985.
- [10] Saeki, E., Sugisawa, M., and Yamaguchi, T. (1998) Mechanical Properties of Low Yield Point Steels, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society Civil Engineers, Vol.10, No.3, pp.143-152.
- [11] Zhou, Z.G., and Li, Y.W. (2020) Experimental Investigation on Cumulative Damage Indices for Steel Members Under Ultra-Low-Cycle Loading, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.172, 106223.
- [12] Frederick, C.O., and Armstrong, P.J. (2007) A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect, *Materials at High Temperatures*, Taylor & Francis, Vol.24, No.1, pp.1-26.
- [13] Chaboche, J.L. (1986) Time-Independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity, *International Journal of Plasticity*, Elsevier, Vol.2, No.2, pp.149-188.
- [14] American Society for Testing and Materials (2016) *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* (ASTM E8/E8M-16a), USA.
- [15] Korea Society of Seismic Isolation and Vibration

- Control (2012) *Peer-Review Guideline for Design of Structures with Damping Systems*, Kimoodang, Korea (in Korean).
- [16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Seismic Design Standard for Buildings (KDS 41 17 00: 2019)*, Korea (in Korean).
- [17] Kato, B., Akiyama, H., and Yamanouchi, Y. (1973) Predictable Properties of Material Under Incremental Cyclic Loading, *Proceedings the IABSE of Symposiums*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Portugal, pp.119-124.
- [18] Park, Y.-J., and Ang, A.H.-S. (1985) Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, America Society of Civil Engineers, Vol.111, No.4, pp.722-739.

---

**요 약**: 본 연구에서는 기존의 강재댐퍼보다 효과적인 에너지 소산능력을 발휘하기 위해 고연성-저항복강(HSA80)을 사용한 복합강재 제진시스템을 제안하였다. 고연성-저항복강을 사용한 복합강재 제진시스템은 높은 강성과 순차적인 항복을 통해 다양한 수평하중에 효과적으로 대응하고 안정적인 내진성능을 확보하는 장점을 가진다. 복합강재 제진시스템의 이력특성을 파악하기 위해 두 가지 종류의 강재인 탄소강(SS275)과 저항복강(HSA80)을 사용하여 강재댐퍼 LSD(low-yield-point steel damper)와 CSD(carbon steel damper), HSD(hybrid steel damper)를 설계하였으며, 그에 대한 유사정적 실험을 수행하였다. 또한, HSD의 비선형 거동을 예측하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 재료비선형해석을 수행하였으며, 실험과 유사한 결과를 나타냈다. 본 연구를 통하여 HSD가 기준에서 제시하고 있는 두 가지의 하중 프로토콜에 대해서 효과적으로 대응하고 우수한 에너지 소산능력을 보여 안정적인 내진성능을 확보하는 것을 확인하였다.

**핵심용어**: 고연성-저항복강, 슬릿형 강재댐퍼, 복합강재 제진시스템, 다단계 응답, 이력특성

---