

# SPHC강을 사용한 복합강재 제진시스템의 이력거동 평가

권원기<sup>1</sup> · 김동건<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>석사과정, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과공학과, <sup>2</sup>부교수, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과

## Evaluation of Hysteretic Behavior of Composite Steel Damper System Using the SPHC Steel

Kwon, Won Ki<sup>1</sup>, Kim, Dong Keon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>M.Sc.Student, Dept. of ICT Integrated Safe Ocean Smart Cities Engineering, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

<sup>2</sup>Associate Professor, Dept. of ICT Integrated Safe Ocean Smart Cities Engineering, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

**Abstract** - In this study, a single slit damper was designed using SPHC, which has a relatively higher elongation than SS275, is more economical than HSA80, and has a relatively high yield strength. The main variables were set to 1, 1.5, and 2.0 by representing the yield strength of SD(SPHC Damper) as a ratio based on the yield strength of CD(Carbon Steel Damper). In addition, HSD(Hybrid SPHC Damper) combined with CD was designed using SD\_1.0, which has the greatest yield strength. Through the static loading experiment, it was confirmed whether the historical characteristics of SD and HSD represent the sequential yield, which is a characteristic of the composite steel vibration control system, and the error between the experimental results and the analysis results was confirmed through the finite element analysis. Finally, the history characteristics of HCD(Hybrid Carbon Damper) and HSD combined with slit steel damper using SS275 and SPHC were compared, and HSD showed superior results in yield displacement, yield strength, initial stiffness, and energy capacity than HCD

**Keywords** - Carbon steel, SPHC, Slit steel damper, Composite steel damper, Sequential yield, Static loading test, Finite element analysis

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 지진의 발생빈도와 규모가 증가함에 따라 지진에 의한 재산 및 인명피해도 증가하고 있다. 특히 내진설계 기준이 제정되지 않았거나, 내진설계 기준을 적용하지 않은 건축물이 많은 국가에서 지진에 의한 피해가 크게 발생 되었다.

국내의 경우 규모 2.0 이상의 연평균 지진 발생 횟수는 1999년에서 2015년까지 70.7회, 2016년 263회, 2017년에서 2022년까지 641회로 해마다 지진이 발생하고 있다. 경주, 포항지진과 같이 규모 5.0 이상의 큰

지진<sup>[1]</sup>으로 인해 수많은 인명 및 재산피해가 발생하였고, 우리나라도 더 이상 지진 안전지대가 아니므로 지진피해에 대한 저감 대책을 마련해야만 한다. 이러한 지진의 방지대책으로는 제진, 면진, 내진구조 시스템이 존재하는데, 기존 건축물들의 보강을 위해서는 제진구조 시스템이 설계, 경제적 측면에서 가장 적용하기에 적절하다<sup>[2]</sup>.

제진구조시스템은 강재, 점성물질, 점탄성물질 등 다양한 재료를 사용하여 구조물의 에너지를 소산시킴으로써 기존 구조물의 손상을 감소시켜주는 내진 보강 방법이다. 최근 내진 보강을 위한 제진장치 중 강재댐퍼가 널리 사용되고 있으며 그에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>[3]</sup>.

강재댐퍼는 다른 종류의 댐퍼에 비해 설계 내력에 맞춰 제작하기 쉽고, 강재의 안정적인 이력거동을 통해 더 많은 에너지를 흡수할 수 있으며 높은 강성을 확보할 수 있는 장점<sup>[4],[5]</sup>이 있다. 하지만, 일반적인 강재댐퍼를 적용한 구조시스템의 경우 설계하중에 도달하지

Note.-Discussion open until December 31, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 29, 2024; revised on April 15, 2024; approved on April 15, 2024.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

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

E-mail. [dkkzone@dau.ac.kr](mailto:dkkzone@dau.ac.kr)

않더라도, 저주기의 반복적인 지진하중에 의해 피로가 가속되어 강재댐퍼에 저주기 피로파괴(Low Cycle Fatigue Failure)가 발생할 가능성이 있다<sup>[6]</sup>. 기존 강재댐퍼의 단점을 보완하기 위해 저항복강 댐퍼가 고안되었는데, 패널댐퍼의 형태로 많은 연구가 수행되었다<sup>[7]</sup>. 그러나 폭두께 비율이 큰 경우 면외좌굴이 발생하기 쉽다는 문제점이 있다<sup>[8]-[10]</sup>. 반면 SPHC강은 저항복강(HSA80) 대비 항복강도가 약 2배가량 크고, 냉간압연 공정을 거치지 않아 제작 공정이 단순하여 생산성이 좋으며 경제적이다. 또한, 휨 성능이 뛰어나고, 표면의 검은 밀스케일이 녹 발생을 막아 주기 때문에 내산화성이 높다. 하지만 SPHC강 역시 패널댐퍼<sup>[11]</sup>로 연구가 수행되었으며 강재댐퍼<sup>[12]</sup>에 적용한 사례는 적기 때문에 추가 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 HSA80 대비 좌굴에 강하고 생산성이 우수한 강재인 SPHC강을 단일 제진시스템에 적용하고자 한다. 또한, SPHC강을 적용한 복합강재 제진시스템이 SS275를 적용한 복합강재 제진시스템보다 다양한 크기의 수평하중으로부터 우수한 에너지 소산 능력을 발휘하는지 알아보기 위해 항복변위가 상이한 두 가지 강재를 병렬식으로 복합하여 정적가력실험을 진행하였다.

실험변수는 SPHC 댐퍼(SD, SPHC Damper)의 항복내력에 대한 SS275 댐퍼(CD, Carbon Steel Damper) 항복내력의 비율을 각각 1, 1.5, 2로 설정하여 SD를 설계하였으며, 항복내력이 가장 큰 SD\_1.0을 사용하여 HSD(Hybrid SPHC Damper)를 설계하여 정적가력실험을 진행하였다. 또한, 실험 결과와의 오차를 확인하기 위해 사용한 유한요소해석 모델은 등방경화(Isotropic Hardening)<sup>[13]</sup>와 이동경화(Kinematic Hardening)<sup>[14]</sup>를 표현할 수 있는 복합경화이론(Combined Isotropic/Kinematic Hardening)<sup>[15]</sup>를 통해 유한요소해석을 수행하였다. 최종적으로 항복변위가 상이한 복합강재 제진시스템을 제안하여 항복변위가 상대적으로 작은 SD가 먼저 항복하고, 항복변위가 상대적으로 큰 CD가 순차적으로 항복하는 복합강재 제진시스템의 특성을 확인할 예정이다. 또한, 기존에 연구되었던 SS275를 적용한 제진시스템(HCD, Hybrid Carbon Damper)과 같은 항복강도로 설계된 SPHC강을 적용한 제진 시스템(HSD)의 내진성능을 확인해보고자 한다.

## 2. 실험적 연구

### 2.1 SPHC강의 재료적 특성

복합강재 제진시스템에 사용된 SS275 및 SPHC강의 재료특성을 파악하기 위해 ASTM E8/E8M-16a에 따라 Fig. 1에 해당하는 금속재료 시험편 인장시험을 진행하였다. 인장시험에 따른 결과를 Fig. 2와 Table 1에 나타내었으며 SPHC강과 재료특성을 비교하기 위해 HSA80의 인장시험 결과<sup>[16]</sup>를 추가하였다.

SPHC강의 항복강도( $\sigma_y$ )는 273 MPa, 인장강도는( $\sigma_u$ ) 343 MPa, 연신율은 36%로 나타났다. 인장시험 결과를 통해 SPHC강은 항복강도 측면에서 SS275보다는 약 0.94배, HSA80과 비교하여 3.55배를 나타냈다. 또한 연신율(EL) 측면에서 SS275보다는 약 1.33배, HSA80보다는 약 0.55배를 나타냈다.

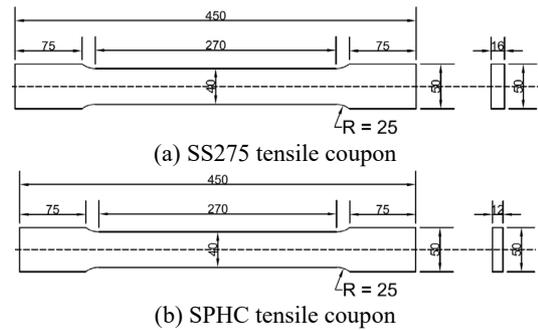


Fig. 1. Details of tensile coupon tests(Unit : mm)

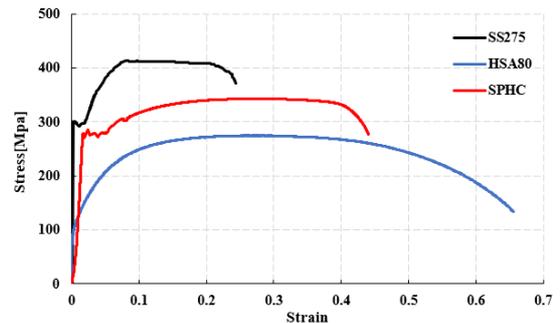


Fig. 2. Stress-strain diagram

Table 1. Results of tensile coupon tests

Specimens	$E$ (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y/\sigma_u$	EL (%)
SS275-16t	210	291	413	0.71	27
HSA80-15t	190	77	274	0.28	66
SPHC-12t	225	273	343	0.79	36

### 2.2 복합강재댐퍼 HSD의 이력 특성

SPHC강으로 제작된 SD(SPHC Damper)와 SS275로 제작된 CD(Carbon Steel Damper)를 병렬식으로 복합한 복합강재 제진시스템 HSD(Hybrid SPHC Damper)는 Fig. 3에서 제시한 설계 개념과 같이 설계되었다.

본 연구에서 사용된 HSD의 이력거동은 총 3개의 구간으로 구분된다. 첫 번째 구간인 CD와 SD가 탄성거동 하는 구간(Zone 1 <math>\delta\_{sy1}</math>), 두 번째 구간인 SD가 항복한 이후 소성거동을 하지만 CD는 탄성거동 하는 구간 (<math>\delta\_{sy1} < \text{Zone 2} < \delta\_{sy2}</math>), 마지막 구간인 CD와 SD가 항복한 이후 소성거동 하는 구간(<math>\text{Zone 3} > \delta\_{sy2}</math>)으로 구분하여 복합강재댐퍼 HSD의 항복변위에 따른 순차적인 항복을 확인할 수 있도록 설정하였다.

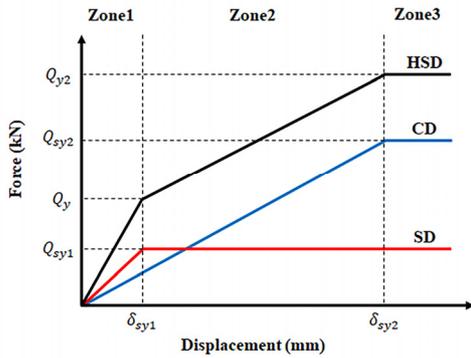


Fig. 3. Design concept of hybrid steel damper system

### 2.3 실험체 설계

실험에 사용된 강재댐퍼는 제진구조 설계 지침에서<sup>[17]</sup> 제시하는 설계식을 사용하여 설계하였다. 강재댐퍼의 항복내력은 식 (1)의 휨에 의한 항복내력과 식 (2)의 전단에 의한 항복내력 중 최솟값을 사용하여 식 (3)를 통해 산정되었다. 또한 항복변위는 식 (5)를 통한 휨에 의한 항복변위 및 식 (6)의 전단에 의한 항복변위를 합한 식 (4)를 통해 산정하였다. Fig. 4는 식에 사용되는 스트럿 상세이다.

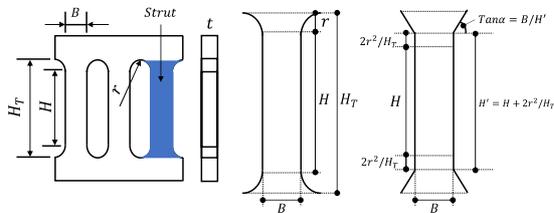


Fig. 4. Strut detail model

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

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

여기서,  $t$  : 댐퍼의 두께  
 $B$  : 스트럿의 폭  
 $H$  : 스트럿 직선부의 높이,  
 $H' = H + 2 \frac{r^2}{H + 2r}$

$${}_d Q_y = n \times \min({}_d Q_{b,y}, {}_d Q_{s,y}) \tag{3}$$

여기서,  $n$  : 스트럿의 개수  
 ${}_d Q_{b,y}$  : 휨에 의한 항복내력  
 ${}_d Q_{s,y}$  : 전단에 의한 항복내력

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

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

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

SD의 안정적인 이력거동 및 HSD의 순차적인 항복을 확인하기 위해 Table 2 및 Fig. 5와 같이 강재댐퍼를 설계하였다. SD의 항복내력에 대한 CD의 항복내력 비율을 변수로 설정하여 각각 약 1.0, 1.5, 2.0으로 나타내었으며 그중 항복내력이 가장 큰 SD\_1.0을 사용하여 복합 강재댐퍼 HSD를 설계하였다.

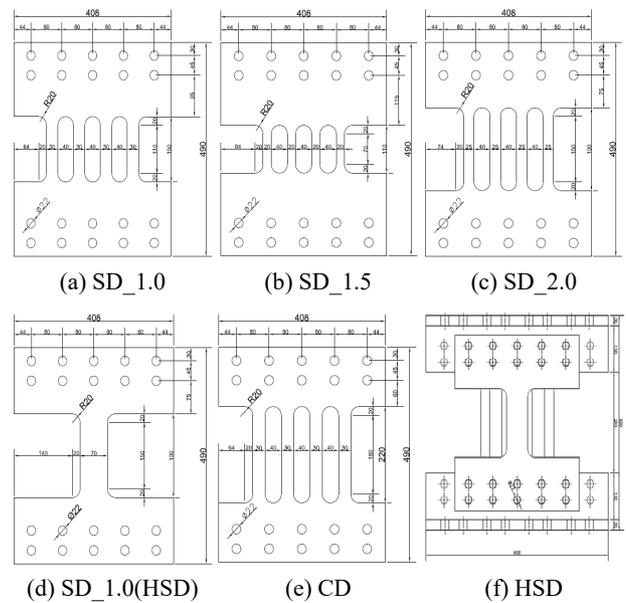


Fig. 5. Details of test specimens

Table 2. Test specimens(SD\_n, HSD)

Specimens	Strut				H/B ratio	$d_{y,d}$ (mm)	$Q_{y,d}$ (kN)	$d K_{i,d}$ (kN/mm)
	t (mm)	B (mm)	H (mm)	Number				
SD_1.0	12	30	110	4	3.67	0.51	39.74	78.4
SD_1.5	12	20	70	4	3.5	0.37	26.36	70.7
SD_2.0	12	25	150	4	6	0.94	20.64	22.1
HSD	SD_1.0	12	70	150	1	2.14	40.46	84.2
	CD	16	30	180	4	6	40.28	30.5

2.4 실험 방법

본 실험에서는 각 강재댐퍼의 이력특성을 평가하기 위해 Fig. 6와 같이 1000 kN 용량의 만능시험기(UTM)을 사용하여 유사정적가력 실험을 수행하였다. 강재댐퍼의 면외좌굴 및 축방향 하중을 방지하기 위해 두 개의 “L”타입의 지그를 설치하였으며 댐퍼를 설치하기 위해 “T”타입의 지그를 두 개 설치하였다. 또한, UTM과 댐퍼 실험체의 변위 오차를 측정하기 위해 변위 측정기인 LVDT 및 변형률을 측정하는 스트레인게이지를 응력이 집중되는 가력부 스트럿 단부에 부착하였다.

Fig. 7은 정적가력에 사용되는 프로토콜을 나타내었으며, KDS 41 17 00: 2019 건축물 내진설계 기준을 반영하여 실험에 적용하였다. 가력프로토콜은 총 3개의 Step으로 이루어져 있으며, Step 1에서 장치 최대변위의 0.33배로 10회, Step 2에서 0.67배로 5회, Step 3에서 1.0배로 3회 점증 변위 가력을 진행하였다. 이때, 장치의 최대변위는 층고 3.3 m를 기준으로 내진 등급 중 특등급 허용층간변위에 해당하는 1%인 33 mm로 설정하였다.

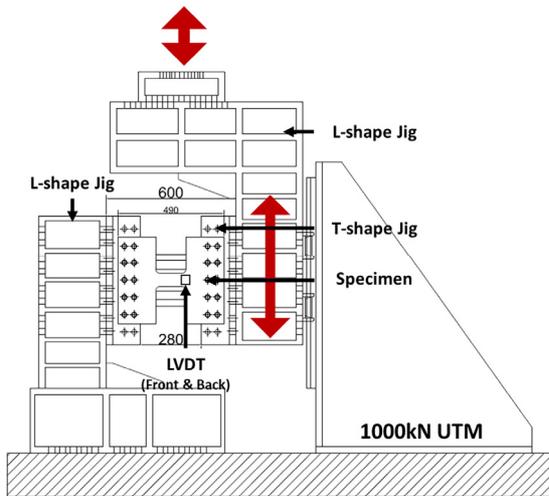


Fig. 6. Detail of the UTM

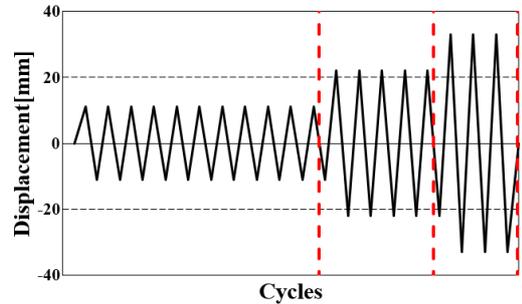


Fig. 7. Loading protocol

3. 해석적 연구

3.1 유한요소해석

본 연구에서 사용된 강재댐퍼의 이력특성을 비교하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Ver. 2017)를 사용하였다. Fig. 8과 같이 유한요소 모델링 요소는 변형, 크리프, 응력 경화 등을 고려할 수 있는 3차원 평면에 8개의 노드와 1개의 적분점으로 이루어져 굽힘 하중 조건에서도 우수한 정확도를 나타내는 C3D8R을 사용하였다. 또한 반복하중을 받는 강재댐퍼의 이력거동을 모사하기 위하여 바우싱거 효과(Bauschinger Effect)를 모사할 수 없는 등방경화(Isotropic Hardening)와 반복적인 소성변형으로 인한 경화를 모사할 수 없는 이동경화(Kinematic Hardening)를 보완할 수 있는 복합경화(Combined Isotropic/Kinematic Hardening)이론을 적용하여 해석을 수행하였다.

Table 3는 2.1절에 언급되었던 금속재료 시험편 인장 시험 결과를 통해 계산된 매개변수이다. 식 (7)은 등방경화를 표현할 수 있는 매개변수는 Q와 b이며, 매개변수 Q는 재료의 경화가 최고응력(Peak Stress)에 도달했을 때 등방경화함수인 r(p)의 안정화된 값이다. 식 (8)

은 백 응력(Back Stress)  $x$ 에 대한 식으로,  $C$ 는 이동경화 계수를 의미하며  $\gamma$ 는 소성 변형률의 증가에 따른 이동경화 계수의 감소분을 의미한다.

또한, Table 3의  $b$ 와  $\gamma$ 는 각각의 경화 메커니즘이 같은 강재뎀퍼 내에서 동시에 발생하고, 이 두 현상이 강재뎀퍼의 전체적인 소성거동에 동일한 영향을 미치기 때문에 같은 값이 도출되었다.

$$r(p) = Q(1 - e^{-bp}) \tag{7}$$

$$x = \frac{C}{\gamma}(1 - e^{-\gamma\epsilon^p}) \tag{8}$$

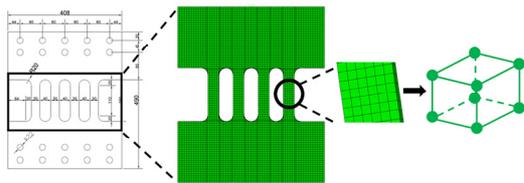


Fig. 8. Finite element analysis model details

Table 3. Material parameters

	Isotropic hardening		Kinematic hardening	
	$Q$ (MPa)	$b$	$C$ (MPa)	$\gamma$
SS275	122	23.85	2909.26	23.85
SPHC	70	6.73	470.5	6.73

### 3.2 해석 설정

모델링에 사용된 HSD는 Fig. 9과 같이 SD와 CD를 결합하기 위해 설치된 “T”형 지그의 두께(30 mm)를 고려하여 해석모델을 구성하였다. SD와 CD의 상부면을 결합하여 결합 중앙부에 Reference Point를 생성하여 실험과 동일한 가력프로토콜을 설정하여 x축으로 가력을 설정하였다. 모든 해석모델들은 실험과 동일한 조건을 유지하기 위해 수직방향인 Y 및 면외방향인 Z축을 구속하여 면외좌굴을 방지하여 해석을 진행하였다.

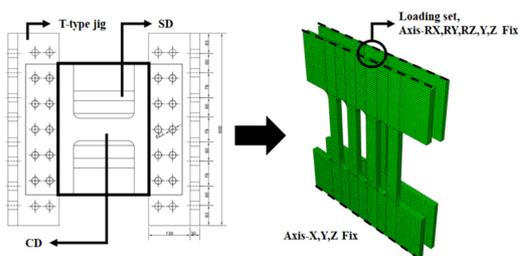


Fig. 9. Boundary condition

## 4. 결과

### 4.1 실험 결과

#### 4.1.1 파단 형태

Fig. 10은 실험종료 후 강재뎀퍼의 상태를 나타내었



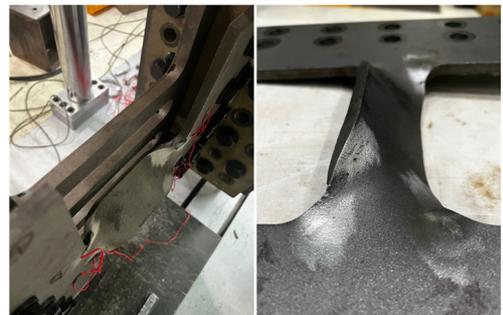
(a) SD\_1.0



(b) SD\_1.5



(c) SD\_2.0



(d) HSD

Fig. 10. Status of the specimen after the experiment

다. Fig. 10(a) SD\_1.0은 Step3 3번째 Cycle 중 스트럿 단부에서 균열이 발생하였다. Fig. 10(b) SD\_1.5는 Step3 2번째 Cycle 중 스트럿 단부에서 파단이 발생하였으며, Fig. 10(c) SD\_2.0은 실험종료까지 안정인 형태를 나타내었다. HSD는 Step2 4번째 사이클에서 Fig. 10(d) SD\_1.0(HSD)에서 좌굴이 일어났지만, CD가 탄성거동하는 것을 확인할 수 있었으며, Step3 3번째 Cycle에서 약간의 균열이 일어나며 내력 저하가 발생하였다.

4.1.2 실험 결과 데이터 도출

본 실험을 통해 강재멤버의 초기강성, 항복하중, 항복변위를 도출하기 위해서 골격곡선을 추출해야 한다. 골격곡선은 반복하중 가력 실험의 하중-변위 곡선을 사이클별로 분해 후 각 사이클의 최초하중을 이전 사이클의 최대하중 다음으로 수평 이동한 곡선이다.

또한 항복점은 다음의 설명과 같이 산정되었다. 첫째, Fig. 11과 같이 골격곡선에서 원점을 지나며 탄성강성(K)의 기울기를 가지는 직선을 찾는다. 둘째, 탄성강성 기울기의 1/3의 직선이 골격곡선과 만나는 점에서의 접선(Tangent Line)을 만든다. 마지막으로, 탄성강성의 기울기를 가지는 직선과 접선이 만나는 점을 항복점으로 산정하였다. 이를 통해 Table 4의 항복강도, 항복변위 및 초기강성을 계산하였다. 누적에너지 소산량의 경우 실험을 통해 얻은 Fig. 13에 해당하는 하중-변위 이력곡선의 면적을 사용하였다. 소산량은 스트럿 파단과 관계없이 1-18 Cycle의 면적을 모두 합하여 계산하였다.

Fig. 12를 통해 균열이나 파괴가 일어난 SD\_1.0 및 SD\_1.5에서 내력저하가 발생함을 확인할 수 있었으며, HSD의 경우 SD\_1.0(HSD)가 좌굴 후 내력 저하가 발생하였지만, CD가 실험종료까지 안정적으로 거동함을 확인할 수 있었다.

Table 4. Experimental results of specimens

Specimens	$d_{\delta_{y,t}}$ (mm)	$Q_{y,t}$ (kN)	$dK_{i,t}$ (kN/mm)	Energy Capacity (kN-mm)
SD_1.0	0.69	54.37	74.69	84286
SD_1.5	0.51	33.33	65.36	56109.8
SD_2.0	1.06	24.8	23.4	40112.2
HSD	SD_1.0	1.07	101.35	94.72
	CD			

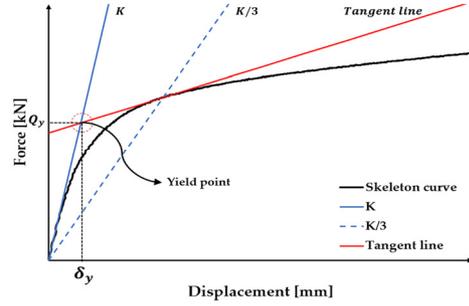


Fig. 11. Calculation method of yield point

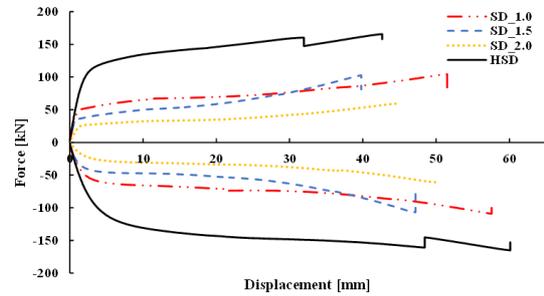


Fig. 12. Skeleton curve through experiments

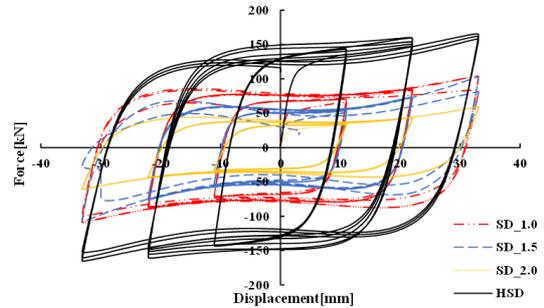


Fig. 13. Hysteresis curve through experiments

4.2 해석 결과

4.2.1 해석 결과

실험과 동일하게 유한요소해석이 완료된 모델의 결과를 통해 Fig. 14와 같이 SD\_1.0, SD\_1.5, HSD 중 SD\_1.0의 스트럿 단부에 응력이 집중된 것을 확인할 수 있다. 이러한 해석 결과는 실험 중 SD\_1.0의 균열, SD\_1.5의 파손, HSD 중 SD\_1.0의 면외좌굴이 일어난 실험체의 실험 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

4.2.2 해석 결과 데이터 도출

해석을 통해 얻은 결과를 사용하여 Fig. 15의 골격부

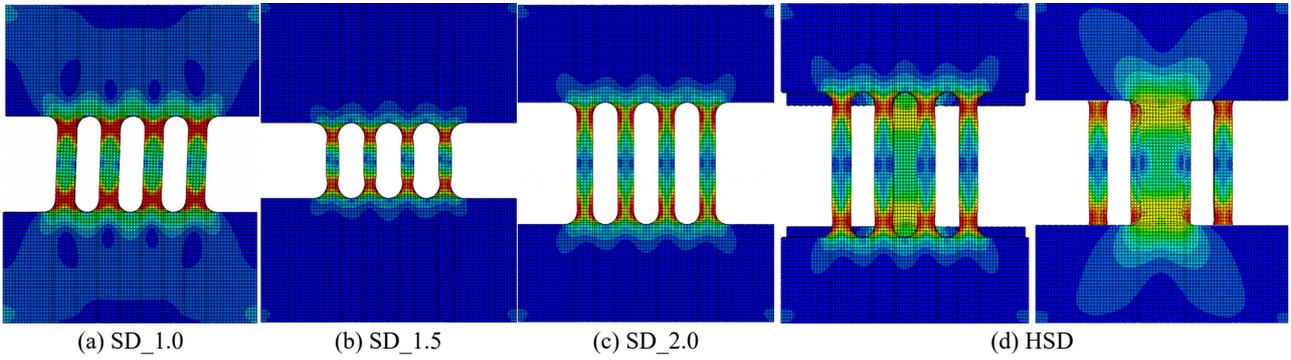


Fig. 14. Status of the specimen after the analysis

Table 5. Experimental and analytical results of specimens

Specimens	$d\delta_y$ (mm)		$Q_y$ (kN)		$dK_i$ (kN/mm)		Energy Capacity (kN·mm)	
	Analysis	Exp/Ana	Analysis	Exp/Ana	Analysis	Exp/Ana	Analysis	Exp/Ana
SD_1.0	0.72	0.96	51.85	0.95	72.51	1.03	78024.6	1.08
SD_1.5	0.48	1.06	33.41	0.99	69.6	0.94	52556.4	1.07
SD_2.0	1.06	1	26.22	0.95	24.86	0.94	40676.9	0.99
HSD	SD_1.0	1.06	97.9	1.04	97.41	0.97	151006.4	0.91
	CD							

곡선 및 Fig. 16의 이력곡선을 도출하였다. Table 4와 Table 5를 통해 해석 결과에 대한 실험 결과를 비교한 결과 항복변위는 최대 6%, 항복내력은 최대 5%, 초기 강성은 최대 6%, 에너지소산량은 최대 9%의 차이를 보이며 실험 결과와 유사한 결과를 나타냈다.

또한, Fig. 16을 통해 11 Cycle에서 SD\_1.0은 76.76 kN, SD\_1.5는 54.09kN, HSD는 160.57 kN을 나타내며 최대내력에 도달함을 알 수 있었다. 최대내력에 이후 각 실험체는 해석 종료까지 내력이 저하되는 것을 확인할 수 있었다. SD2.0의 경우 실험 결과와 같이 18 Cycle에서 최대내력 43.45 kN으로 내력 저하 없이 해석이 종료됐다.

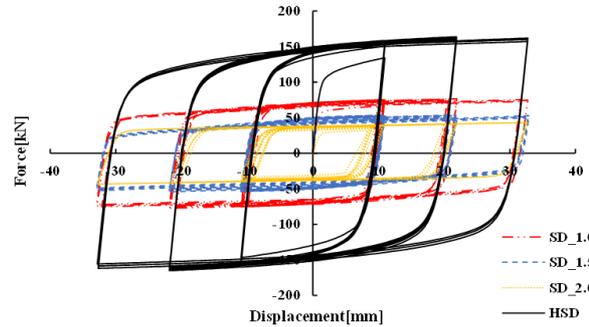


Fig. 16. Hysteresis curve through analysis

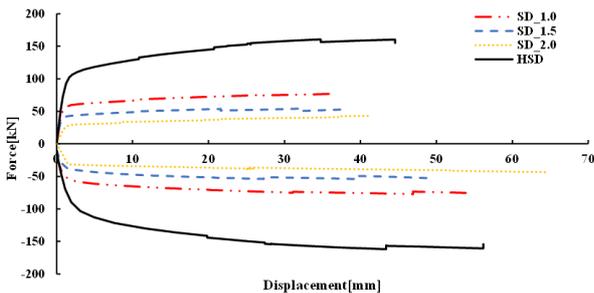


Fig. 15. Skeleton curve through analysis

## 5. 탄소강을 사용한 복합강재 제진시스템

### 5.1 HCD(Hybrid Carbon Damper)

SS275강을 사용한 복합강재 제진시스템(HCD, Hybrid Carbon Damper)과 HSD를 비교를 진행하였다. HCD는 Table 6와 같이 HSD와 동일한 설계 항복강도로 설계되었다. Fig. 17과 같이 스트럿 1개인 CD\_1.0과 스트럿 4개인 CD가 결합된 HCD의 실험을 진행하였다. HCD는 Step3 첫 번째 Cycle에서 Fig. 18과 같이 CD\_1.0에서 파단이 발생하였다.



Fig. 17. Hybrid Carbon Damper(CD+CD\_1.0)

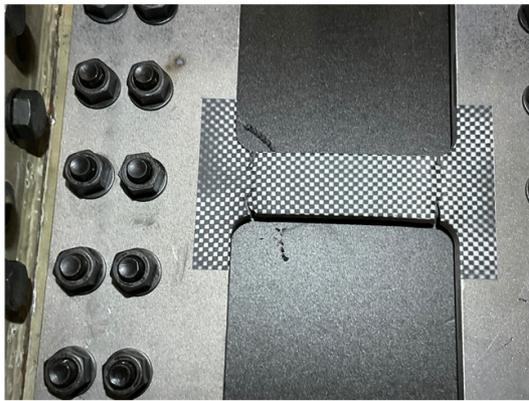


Fig. 18. CD\_1.0 Strut Break

Table 6. Test specimens(HCD, HSD)

Specimens		HCD		HSD	
		CD_1.0	CD	SD_1.0	CD
strut	t (mm)	16	16	12	16
	B (mm)	55	30	70	30
	H (mm)	150	180	150	180
H/B ratio		2.73	7.33	2.14	6
$d\delta_{y,d}$ (mm)		0.65	1.32	0.48	1.32
$Q_{y,d}$ (kN)		40.3	40.28	40.46	40.28
$dK_{i,d}$ (kN/mm)		67.85	30.5	84.2	30.5

5.2 HSD에 대한 HCD 결과 비교

Fig. 19을 통해 HCD 및 HSD 모두 실험 중 SD\_1.0에서 파단 및 CD\_1.0에서 좌굴이 발생하여 내력이 감소하였지만, CD가 실험종료까지 안정적으로 거동하는

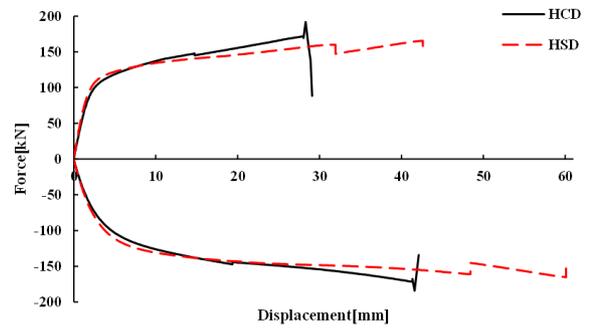


Fig. 19. Comparison of HCD skeleton curves for HSD

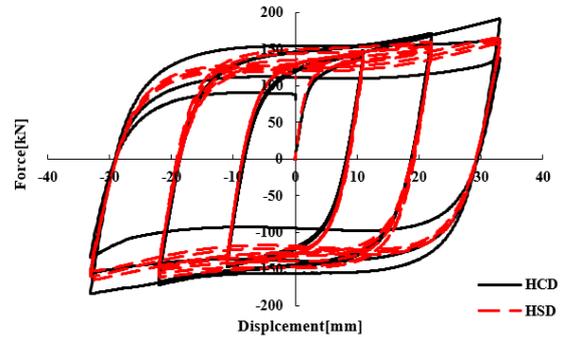


Fig. 20. Comparison of HCD hysteresis curves for HSD

Table 7. Comparison of HCD results for HSD

Specimens		$d\delta_y$ (mm)	$Q_y$ (kN)	$dK_{i,a}$ (kN/mm)	Energy Capacity (kN·mm)
HCD	CD_1.0	1.01	85.02	84.51	137633.9
	CD				
HSD	SD_1.0	1.07	101.35	94.72	137950.7
	CD				
HCD/HSD(%)		94	84	89	99

것을 확인할 수 있었다.

HCD와 HSD의 이력곡선 비교는 Fig. 20에 나타내었으며 Table 7을 통하여 HSD에 대하여 HCD의 항복변위는 0.94배, 항복강도는 0.84배, 초기강성은 0.89배, 에너지소산량은 0.99배를 나타냈다.

6. 결론

본 연구에서는 SPHC강으로 제작된 SD의 항복내력에 대한 탄소강(SS275)으로 제작된 CD의 항복내력의 비율을 약 1.0, 1.5, 2.0으로 상이하게 설정하여 SD를 설계하였다. 또한 SD\_1.0과 CD를 복합한 HSD의 순차

적으로 항복하는 이력특성을 확인하기 위해 정적가력 실험을 수행하였으며, 항복변위, 항복강도, 초기강성, 에너지소산량을 분석하였다. 실험 결과의 오차를 확인하기 위해 유한요소해석을 진행하였으며, SS275를 사용한 복합강재 제진시스템 HCD와 HSD의 비교를 통해 결론을 정리하였다.

- (1) 단일슬릿댐퍼 SD\_1.0, SD\_1.5, SD\_2.0의 유사정적가력시험을 통해 실험종료까지 안정적으로 이력거동을 수행하는 것을 확인했다. 항복변위가 비교적 낮은 SD\_1.0 및 SD\_1.5의 스트럿 단부에서 균열 및 파괴가 발생하였지만, 면외좌굴은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 복합강재댐퍼 HSD의 경우 유사정적가력시험을 통해 복합강재 제진시스템의 특성인 순차적 항복거동을 확인할 수 있었다. Zone1 Step2 3번째 Cycle까지 CD와 SD\_1.0이 탄성거동 하는 것을 확인할 수 있었다. Zone2 Step2 4번째 Cycle에서 SD\_1.0(HSD)에서 좌굴 및 항복하여 내력저하가 발생하였지만, CD는 탄성거동 하는 것을 확인할 수 있었다. Zone3 Step3 3번째 Cycle에서 CD 스트럿 단부에서 약간의 균열이 발생하며 항복하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 복합강재 제진시스템을 적용한 HSD와 HCD를 비교한 결과 항복강도와 초기강성은 HSD가 HCD보다 우수한 것을 확인할 수 있었다. 반면 에너지소산량과 항복변위에서는 큰 차이를 이루지 않는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 SS275 강재에 비해 냉간압연 공정을 거치지 않아 생산성이 좋으며 경제적인 SPHC 강재를 적용한 제진시스템의 추후 연구가 필요하다고 판단된다.
- (4) 강재의 시험편 인장시험을 통해 얻은 탄성계수는 시험결과 중 항복변위, 항복강도에 영향을 끼치며 연신율은 시험결과 중 초기강성, 에너지소산량에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 추후에는 저항복강을 사용한 복합강재댐퍼와 HSD를 비교하는 연구를 진행하여 SPHC 및 HSA80강재를 사용한 복합강재댐퍼의 이력특성을 비교하고 복합강재댐퍼에서 발생할 수 있는 면외좌굴을 방지할 수 있는 연구를 진행할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1A6A1A03012812). 이 논문은 2024학년도 동아대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌(References)

- [1] Korea Meteorological Administration Services (2024) Earthquake Statistics, <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/archive/stat/trend.do> (in Korean).
- [2] Ahn, T.S., Kim, Y.J., Hwang, J.Y., and Park, J.H. (2011) The Characteristics and Research Trend of the Friction Dampers in Damped Structures, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.4, pp.31-36 (in Korean).
- [3] 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).
- [4] Zhou, L., Wang, X., and Ye, A. (2019) Shake Table Test on Transverse Steel Damper Seismic System for Long Span Cable-Stayed Bridge, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.179, pp.106-119.
- [5] Kim, Y.J., Choi, K.Y., Park, H.Y., and Kim, J.W. (2023) Seismic Performance of Structures Retrofitted with Stud-Type Steel Slit Damper System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.357-366 (in Korean).
- [6] 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.
- [7] Guo, Y., Hwang, B.K., Ryu, H.S., Kim, Y.J., and Kim, T.S. (2023) Numerical Study on Structural Behaviors of Low-Yield Point Steel Plate Shear Wall, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.335-345 (in Korean).
- [8] Ryu, H.S., Choi, K.Y., Kim, Y.J., Kim, H.J., and Oh, S.H. (2021) The Characteristics and Application Technology of Low Yield Point Steel HSA80, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1,

- pp.8-14 (in Korean).
- [9] 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.
- [10] Kim, G.H., Ryu, H.S., and Kim, D.K. (2021) A Study on the Hysteretic Characteristics of Hybrid Steel Damper System Using the High Ductile Low-Yield-Point Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.4, pp.203-214 (in Korean).
- [11] Kim, J., Eom, T.-S., Kim, S.-B., and Park, H.-Y. (2022) Mechanical Characteristics of H-Shaped Shear Panel Damper Fabricated by SPHC Steel according to Stiffener Reinforcement and Stud Support Installation, *Structures*, Elsevier, Vol.42, pp.563-574.
- [12] Park, H.-Y., Kwon, U.-J., Kim, Y.-J., Kim, J., and Kim Y.-H. (2022) Structural Performance of the Improved Slit Damper System Made of SPHC Steel, *Proceedings of Annual Conference of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, p.39 (in Korean).
- [13] 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.
- [14] Armstrong, P.J., and Frederick, C.O. (1966) *A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect*, Central Electricity Generating Board Report No. RD/B/N7 31, Berkeley Nuclear Laboratories, UK.
- [15] Chaboche, J.L. (1986) Time-Independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity, *International Journal of Plasticity*, Elsevier, Vol.2, No.2, pp.149-188.
- [16] Kim, M.-S., and Kim, D.-K. (2022) Seismic Performance Evaluation of Seismically Retrofitted School Building with Hybrid Steel Damper System using Nonlinear Dynamic Analysis, *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, AIK-RA, Vol.24, No.3, pp.57-64 (in Korean).
- [17] Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control (2015) *Design Techniques for Earthquake Resistance Structure and Applications in Korea*, Kimoondang, pp.59-61 (in Korean).

---

**요 약**: 본 연구에서는 SS275에 비해 비교적 연신율이 크고, HSA80에 비해 경제적이며 비교적 항복강도가 큰 SPHC를 사용하여 단일슬릿댐퍼(SD, SPHC Damper)를 설계하였다. 주요 변수는 CD(Carbon Damper)의 항복내력을 기준으로 SD(SPHC Damper)의 항복내력을 비로 나타내어 1, 1.5, 2.0으로 설정하였다. 또한, 항복내력이 가장 큰 SD\_1.0을 사용하여 CD와 복합한 HSD(Hybrid SPHC Damper)를 설계하였다. 정적가력실험을 통해 SD의 이력특성 및 HSD가 복합강재 제진시스템의 특징과 같이 설계 시 계획한 대로 순차적으로 항복을 하는지 확인하였으며, 유한요소해석을 통해 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 최종적으로, SS275 및 SPHC를 사용한 슬릿형 강재댐퍼를 CD에 결합한 복합강재댐퍼 HCD(Hybrid Carbon Damper)와 HSD의 이력특성을 비교하며 HSD가 HCD보다 항복변위, 항복강도, 초기강성, 에너지소산량 모두 우수한 결과를 나타내었다.

**핵심용어**: 탄소강, SPHC, 슬릿형 강재댐퍼, 복합강재댐퍼, 순차적 항복, 정적가력실험, 유한요소해석

---