

일정진폭 하중하에 변폭 스트럿을 갖는 강재슬릿댐퍼의 구조성능에 관한 실험적 연구

김유진¹ · 김태수^{2*}

¹석사과정, 한양대학교 대학원, 건축시스템공학과, ²교수, 한양대학교 ERICA, 건축학부 건축공학전공

An Experimental Study on the Structural Performance of Steel Slit Dampers with Varied Strut Width under Constant Amplitude Loading Protocol

Kim, YuJin¹, Kim, TaeSoo^{2*}

¹Graduate Student(Master's Course), Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Professor, School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea

Abstract - In this study, steel slit dampers with various strut widths were subjected to cyclic tests with constant displacement amplitude loading protocol to investigate their structural performance. A total of nine specimens were fabricated using general structural rolled steel, with varied strut widths and loading protocols. Three cyclic loading protocols consisted of shear deformation angles of 3 %, 5 %, and 7 %. Experimental results indicated that as the shear deformation angle increased, the total number of cycles to reach 90 % of the maximum load decreased to an average of about half. Specimens with a maximum strut width of less than 50mm exhibited lower initial stiffness and maximum load compared to those with a maximum strut width of 100 mm, however, they demonstrated higher energy absorption capacity. This is because the specimen with a strut width of 100 mm experienced shear cracking and failure at an earlier stage, leading to a quicker reduction in strength. The arrangement of strut widths was confirmed to be a significant varied influencing the structural performance of the damper.

Keywords - Steel, Structure, Steel slit damper, Constant amplitude deformation, Cyclic loading, Strut width, Energy dissipation

1. 서론

경주 및 포항지진을 계기로 국내 건축물의 내진설계 및 내진보강에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이에 따라 다양한 내진저항 시스템 및 장치가 개발되고 적용되고 있다. 그 중에서도 강재슬릿댐퍼는 건축물의 감쇠를 증가시키는 데 효과적인 기술로 자리 잡고 있다.

강재슬릿댐퍼는 진동에너지를 흡수하는 제진시스템으로 19세기 초반에 이론이 제시된 면진시스템에 비해 늦게 개발되었다. 제진시스템은 진동 제어 방법에 따라 수동제어, 준능동제어, 능동제어로 구분되며, 그 중 수

동형 제진장치는 속도의존형 또는 변위의존형 메커니즘을 통해 바람이나 지진으로 인한 진동 에너지를 효과적으로 흡수하여 구조물의 내진성능을 향상시키는 중요한 기술로 자리 잡고 있다.

1970년대 초반, Kelly *et al.*^[1]에서 강재댐퍼에 대한 연구를 수행하였고, 구조물의 감쇠를 증가시키면서 강성을 향상시키고 환경 변수에 대한 영향을 최소화하는 안정적인 이력거동을 제안하였다. 이러한 연구는 미국, 일본, 한국 등 여러 나라에서 다양한 형태의 강재댐퍼 개발의 계기가 되었다. 현재까지도 내진설계에서 강재슬릿댐퍼는 지속적인 연구와 개발을 통해 그 성능이 더욱 개선되고 있다.

Lee^[2]는 전단형 마찰댐퍼와 변단면 강재댐퍼를 결합한 하이브리드 SAFE 댐퍼와 일반 강재슬릿댐퍼를 비교하여 실제실험 및 수치해석을 진행하였다. 실험 결과, SAFE 댐퍼는 두 댐퍼의 장점을 극대화하여 다양한 하중 조건에서 더 높은 내진성능을 보였으며, 비교대상

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 02, 2024; revised November 25, 2024; approved on November 26, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +31-400-5131

E-mail. tskim0709@hanyang.ac.kr

보다 응력이 고르게 분산되어 피로성능이 향상되는 것을 확인하였다.

Kim *et al.*^[3]은 강재슬릿댐퍼의 면외변형 구속이 구조성능에 미치는 영향을 실제실험을 통하여 분석하였다. 실험결과, 면외변형 구속이 적용된 강재슬릿댐퍼가 구속이 없는 댐퍼에 비해 전반적으로 에너지흡수능력이 향상되었으며, 대변형에서 면외좌굴이 발생이 지연되어 피로성능을 개선하였다. 또한, 반복하중에 대한 저항력이 강화되어 구조물의 비탄성변형 제어 효과가 나타나는 것을 확인하였다.

Kim *et al.*^[4]은 스테드타입의 강재슬릿댐퍼 시스템을 제안하였고, 스테드타입 강재슬릿댐퍼의 설치위치와 크기를 변수로 하였다. 실험결과, 보강된 구조물이 지진하중에 대해 높은 에너지흡수능력을 보였으며, 구조물의 비탄성변형이 감소하는 효과가 나타났다.

최근 강재슬릿댐퍼 연구의 동향은 강재슬릿댐퍼의 형상 최적화를 통하여 구조물의 비탄성 변형을 제어하고 댐퍼의 응력집중 현상을 보완하는 데 중점을 두고 있다.

현재까지 개발되고 적용되는 슬릿 및 봉 댐퍼의 구성은 일반적으로 동일한 폭, 직경 또는 단면을 가진 스트럿을 일정한 간격으로 구성되어 제작되었다. 이러한 구성은 스트럿의 단부에 응력과 손상이 국부적으로 집중되었고 거의 동시에 파단되어 댐퍼의 피로성능을 저하시키는 양상을 보였다.

강재슬릿댐퍼에서 Kim *et al.*^[5]과 Kim^[6]은 응력집중으로 인하여 스트럿 전부가 동시에 취성파괴를 방지하기 위하여 스트럿폭과 배치 등을 상이하게 조합한 강재슬릿댐퍼를 개발하였다. Kim^[7]은 개발된 강재슬릿댐퍼를 기반으로 동일한 스트럿폭을 가진 댐퍼와 변폭 강재슬릿댐퍼 실험체를 제작하여 점증변위 반복가력 실험을 통해 파단형태와 구조성능을 비교하였다. 실험결과로 동일한 폭을 가지고 있는 실험체는 최대내력시점에서 동시에 스트럿 상하부에 전단파단이 발생하였고 폭이 다르게 구성된 실험체는 가장 큰 폭을 갖는 스트럿에서 하중이 집중되어 스트럿상하부가 파단되는 것을 확인하였다.

또한, 스트럿 형상을 최적화하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있으나, 국내에서는 스트럿폭이 서로 다른 강재슬릿댐퍼에 대한 연구가 아직 충분히 이루어지

지 않았으며 구조적 거동이나 피로성능에 대한 연구 사례도 거의 없었다.

강재슬릿댐퍼의 스트럿폭을 다양하게 설정하여 기존 동폭 댐퍼에서 발생하는 일시적인 구조성능저하를 최소화하고 초기강성과 내력을 목표 성능에 따라 설계하기 위해 이 연구에서는 댐퍼의 제작, 설계 및 설치 환경에 따른 범용성을 높인 변폭 강재슬릿댐퍼를 동변위 반복가력 실험을 통하여 내진성능을 확인하고, 강성, 연성 및 에너지 변형 능력 등 사용 성능에 따른 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

2. 강재슬릿댐퍼의 설계

강재슬릿댐퍼는 스트럿의 휨과 전단변형을 통해 수평하중에 저항하는 구조적 메커니즘을 가지고 있다. 이상화한 스트럿의 형상수치에 따른 슬릿댐퍼의 항복강도, 소성내력 및 최대내력은 한국면진제진협회의 제진 구조설계지침^[8]과 기존연구^{[9],[10]}에 제시된 아래의 식으로 산정할 수 있다.

Fig. 1은 이상화한 스트럿의 형상을 나타내며, 스트럿 하나에 대한 항복강도와 최대내력은 스트럿의 휨 및 전단에 의한 내력 중 더 작은 값으로 결정된다. 변폭 강재슬릿댐퍼의 경우, 스트럿폭이 상이한 조합으로 구성되어 있어, 각 스트럿에 대하여 개별로 산정한 후 합산하여 내력을 산정한다.

$$P_y = \left[n \frac{\sigma_y t B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_y t B}{\sqrt{3}} \right]_{\min} \quad (1)$$

$$P_u = \left[n \frac{\sigma_u t B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_u t B}{\sqrt{3}} \right]_{\min} \quad (2)$$

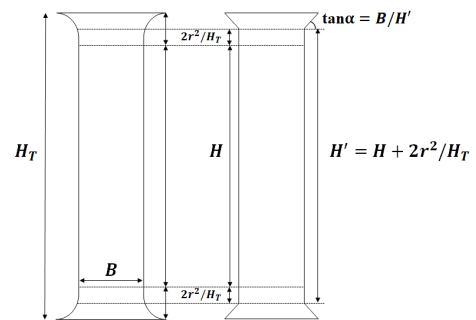


Fig. 1. Design configuration of the slit damper

여기서, σ_y 는 재료의 항복강도(MPa), H' 는 스트럿의 유효높이, n 는 스트럿의 개수를 나타낸다.

강재슬릿댐퍼의 항복변위(δ_y)는 휨에 의한 항복변형(δ)과 전단에 의한 항복변형($s\delta$)을 합하여 구할 수 있다.

$$\delta_y = \delta + s\delta = \frac{1.5\sigma_y H_T}{nEtB} \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right] \quad (3)$$

여기서, E 와 G 는 탄성계수와 전단탄성계수이다.

스트럿의 휨항복과 전단항복이 동일하다고 가정할 경우, 스트럿폭에 대한 유효높이의 비는 약 1.4으로 계산된다. 1.3보다 큰 경우 이론적으로 휨항복형 거동을 나타내고, 반대의 경우 전단항복이 스트럿의 거동을 지배하게 된다. 일반적으로 휨항복형으로 설계된 슬릿댐퍼는 전단 항복형으로 설계된 슬릿댐퍼보다 변형능력이 우수한 것으로 알려져 있다^[11].

3. 실험 계획

3.1 실험체 계획 및 제작

강재슬릿댐퍼의 실험체 일람과 형상을 각각 Table 1과 Fig. 2에 나타낸다. 모든 실험체는 실험을 위한 고정부분을 포함한 전체 폭 480 mm와 높이 475 mm, 스트럿의 높이는 233 mm, 스트럿 순높이는 220 mm로 계획하였으며, 강종은 제작당시의 시장 수급 상황을 고려하여 구 KS강종인 일반구조용 압연강재인 SS400(SS275로 변경)를 사용하였다.

댐퍼의 스트럿폭(b)에 대한 유효높이(h_e)의 비(h_e/b)는 각 실험체에서 큰 스트럿을 기준으로 CSD-W3는 4.4, CSD-W4는 2.75, CSD-W5는 2.2이다.

Table 1의 실험체명에서 'CSD'는 탄소강 댐퍼(Carbon Steel Damper), 'W3, W4와 W5'는 Fig. 2에서 스트럿폭의 배치에 따른 댐퍼번호를 나타낸다. 마지막으로 숫자 '1, 2와 3'은 각각 전단변형각에 따른 동변위 반복가력에서의 3%, 5%, 7%를 나타낸다.

3.2 실험방법 및 가력계획

반복가력실험을 수행하기 위해 실험체에 설치된 변위계(LVDT) 개요와 전체 세팅 현황을 각 Fig. 3와 Fig. 4에 나타냈다. 실험체의 상하부는 하부에 고정지

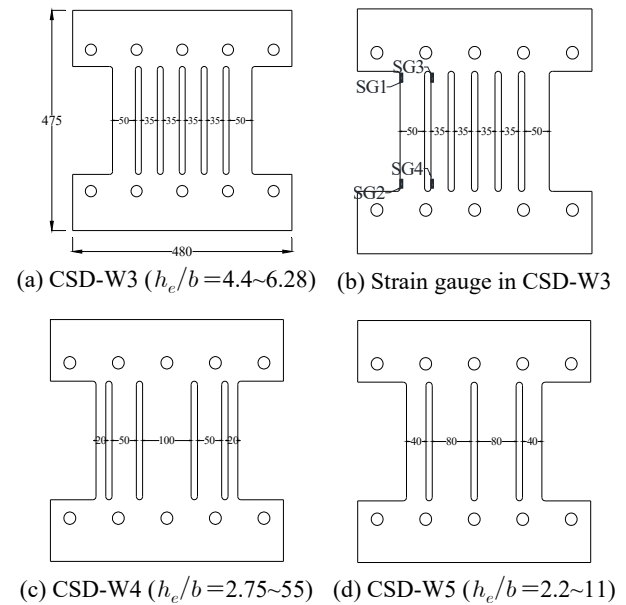


Fig. 2. Details of specimens and strain gauge location (unit: mm)

Table 1. Specimen list and loading protocol

Specimens	Thickness of damper [mm]	Strut width combination [mm]	Number of struts	Loading Protocol	Common
CSD-W3-1	14.70	50+35+35+35+35+50	6	Constant-3 %	-Steel material: SS400 -Height of the straight strut part: 233 mm -Total height of the strut: 406 mm
CSD-W3-2	14.88			Constant-5 %	
CSD-W3-3	14.80			Constant-7 %	
CSD-W4-1	14.93	20+50+100+50+20	5	Constant-3 %	
CSD-W4-2	14.98			Constant-5 %	
CSD-W4-3	14.70			Constant-7 %	
CSD-W5-1	14.88	40+80+80+40	4	Constant-3 %	
CSD-W5-2	14.97			Constant-5 %	
CSD-W5-3	15.02			Constant-7 %	

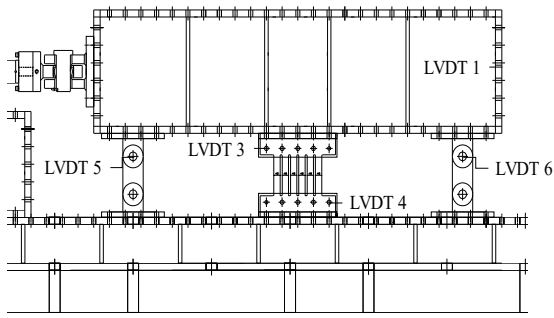


Fig. 3. Test set-up and LVDT location

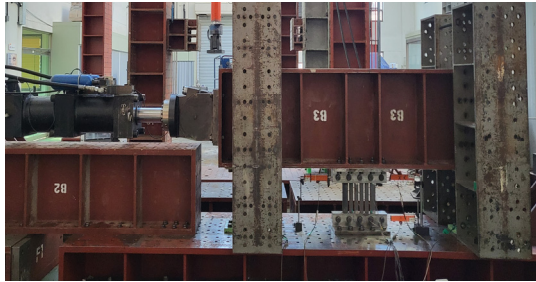


Fig. 4. Test set-up

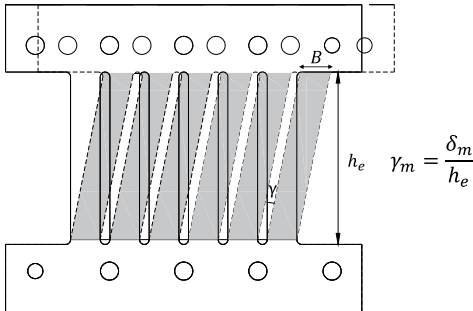


Fig. 5. Deformation of damper strut angle

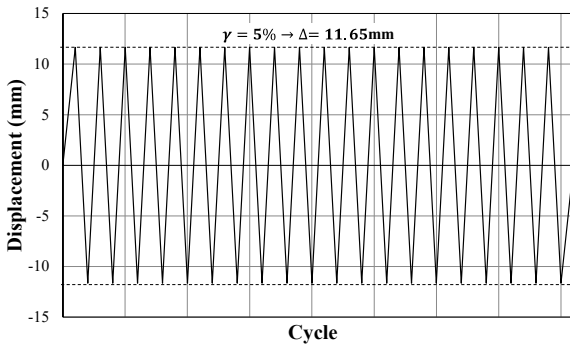


Fig. 6. Loading protocol (5 %, 11.65 mm)

그와 상부 가력보를 고장력볼트로 접합하였으며, 실험체의 양옆에는 액츄에이터와 연결된 상부 가력보의 들뜸과 횡변위를 방지하기 위하여 고정가이드를 설치

하였다. 또한, 실험체 및 고정체의 위치별 수평변위의 변동사항을 측정하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 6개의 변위계(LVDT)를 설치하였다.

수평하중 하에 강재슬릿댐퍼의 응력집중으로 인한 변형이 예상되는 위치의 변형률을 측정하기 위하여 중앙부 및 외측 스트럿 상하부의 끝단으로부터 5 mm 떨어진 지점에 Fig. 2(b)와 같이 총 4개의 스트레인 게이지(SG)를 세로로 부착하였다.

가력방법은 ASCE 7-16^[12] 및 KDS 41 17 00^[13]에서 제시하고 있는 방법을 기반으로 하여, 지진에 의한 1개 층의 층간변형각을 고려하여 댐퍼에 발생하는 전단변형각을 아래의 식과 같이 산정하였다.

$$\gamma_m = \frac{H}{h_e} (R_{\max} - R_{stud}) \quad (4)$$

여기서, γ_m 는 댐퍼의 전단변형각, H 는 층고(3200 mm), h_e 는 댐퍼의 높이(233 mm), R_{\max} 는 지진에 의한 최대 층간변형각, R_{stud} 는 간주(기둥) 또는 가새의 탄성변형에 의한 층간변형각을 나타낸다.

최대 층간변형각은 건축물의 내진등급 중요계수에 따라 내진 특등급, 1등급, 2등급의 허용 층간변위를 기준으로 설정하여, 강재슬릿댐퍼의 전단변형각은 약 3 %, 5 %, 7 %로 결정하였다.

따라서, 가력진폭은 Fig. 5와 같이 강재슬릿댐퍼의 전단변형각(스트럿의 유효높이에 대한 수평변위의 비, $\gamma_m = \delta_h/h_e$)을 기준으로 하여 3 %에 대해 6.99 mm, 5 %에 대해 11.65 mm, 7 %에 대해 16.31 mm의 일정진폭 반복가력을 수행하였으며, Fig. 6는 전단변형각 5 %에서의 하중 프로토콜을 나타낸다. 반복수평하중은 500 kN급 액츄에이터로 가력하였으며, 실험체의 내력이 최대내력을 기준으로 50 % 이상 저하될 때까지 실험을 진행하였다.

3.3 재료시험

실험체에 사용된 일반구조용 압연강재인 SS400에 대한 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801^[14]에 규정된 5호에 의해 압연방향으로 3개의 인장시험편을 채취하였고, KS B 0802^[15]에 따라 단순인장 재료시험을 수행하였다.

재료인장시험 결과는 Table 2와 Fig. 7에 정리하였다. 항복강도는 0.2 % 영구 변형이 발생하는 지점을 기준으로 결정하였으며 그 결과, 평균 탄성계수(E)는 188.80 GPa, 평균 항복강도(σ_y)는 250 MPa, 그리고 평균 인장강도(σ_u)는 408.50 MPa로 나타났다. 이는 KS D 3503^[16]의 최저요구조건인 SS400의 설계항복강도 235 MPa 및 설계인장강도 400 MPa를 만족하는 것을 확인하였다.

Table 2. Material properties of carbons

Specimen*	W_c [mm]	t_c [mm]	E [GPa]	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	σ_y/σ_u	EL (%)
CS-1	25.53	14.79	185.53	253.10	407.96	62.04	48.08
CS-2	25.48	14.76	184.99	252.85	409.95	61.68	47.12
CS-3	25.54	14.79	186.88	244.05	407.60	59.87	47.20

Note: CS = Carbon steel; W_c = measured width of each specimen; t_c = measured thickness of each specimen; EL = rupture elongation

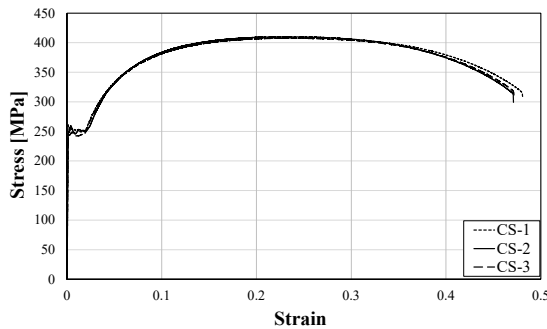


Fig. 7. Stress-strain curves of SS400

4. 실험결과

4.1 하중-변위관계

강재슬릿댐퍼의 스트럿 배치에 따른 구조적 성능을 비교하기 위하여 실험결과를 바탕으로 항복강도(P_{ye}), 최대내력(P_{uc}), 초기강성(K_1), 에너지흡수능력(EAC), 최대내력 90 % (90 % of P_{uc}) 이하 시점에서 에너지흡수능력, 최대내력 90% 이하 시점에서의 싸이클수(N_f)을 산정하여 Table 3에 정리하였다. 여기서, 댐퍼의 항복강도(P_{ye})와 초기강성(K_1)는 첫 번째 싸이클을 기준으로 등가에너지 방법으로 산정하였다.

각 실험체의 강도 상승률($\beta = P_{uc}^+ / P_{ye}$)은 항복강도에 대한 최대내력(+)의 비이며 1.45~1.97의 범위로 나타났다. 모든 실험체는 전단변형각이 증가함에 따라 강도 상승률이 증가하였다.

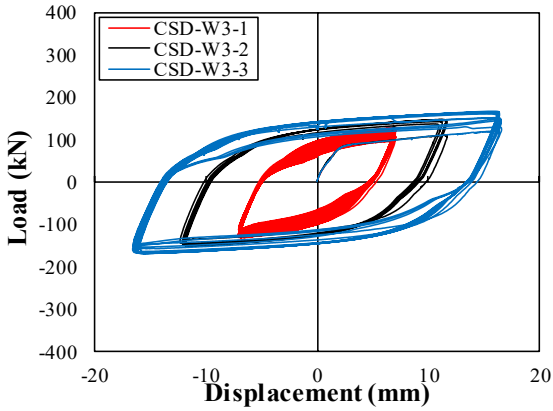
CSD-W3 실험체의 최대내력은 다른 실험체에 비해 약 53 %~66 % 정도 낮았으나, 싸이클수(N_f)와 에너지 흡수능력은 각각 15~88회, 108.04 kN·m~167.5 kN·m로 높게 나타났으며, 전단변형각 5 % (11.65 mm)에 대해 다른 실험체보다 높은 강도 상승률을 보였다.

중앙부에 큰 스트럿폭을 배치한 CSD-W4, CSD-W5 실험체는 CSD-W3에 비해 항복강도, 초기강성, 최대내력이 우수한 성능을 보였으나, 전단변형각이 증가함에 따라 실험종료 시점에서의 에너지흡수능력은 CSD-W3 실험체가 우수해지는 것을 확인하였다. 특히, 중앙부에 100 mm 스트럿폭을 배치한 CSD-W5 실험체는 다른 실험

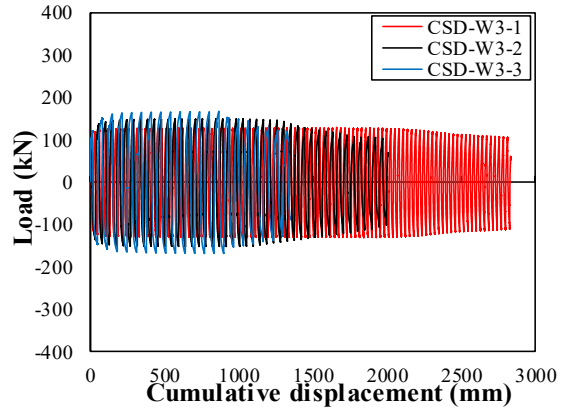
Table 3. Test results

Specimen	P_{ye} [kN]	K_1 [kN/m]	P_{uc}^+ [kN]	P_{uc}^- [kN]	P_{uc}^+ / P_{ye}	δ_{max}^+ [mm]	δ_{max}^- [mm]	EAC [kN · m]		N_f
								at test end	at 90% of P_{uc}	
CSD-W3-1	82.96	57.74	128.15	-131.98	1.54	6.90	6.88	186.48	167.50	88
CSD-W4-1	134.77	117.77	192.55	-203.19	1.43	7.13	6.93	203.80	125.20	49
CSD-W5-1	140.30	94.53	202.96	-209.83	1.45	7.04	7.20	235.31	193.21	73
CSD-W3-2	81.58	72.23	148.23	-152.62	1.82	10.88	11.39	168.17	127.76	30
CSD-W4-2	145.32	101.61	239.43	-241.12	1.65	11.36	11.54	155.48	68.62	11.5
CSD-W5-2	149.16	80.69	246.44	-251.71	1.65	11.54	11.28	138.73	99.81	15
CSD-W3-3	84.45	61.33	166.29	-169.34	1.97	15.87	15.51	139.43	108.04	15
CSD-W4-3	141.97	73.37	265.57	-271.98	1.87	16.4	15.32	118.00	54.13	5
CSD-W5-3	145.78	81.80	276.70	-280.19	1.90	16.21	16.12	100.56	81.04	7.5

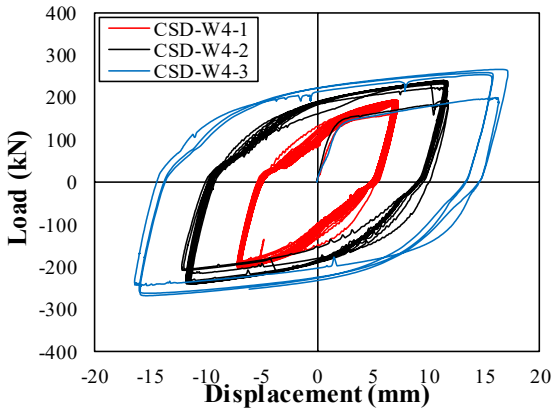
Note: P_{ye} = experimental value of yield strength; K_1 = experimental value of stiffness; P_{max}^+ = experimental value of positive maximum strength; P_{max}^- = experimental value of negative maximum strength; δ_{max}^+ = experimental value of positive displacement; δ_{max}^- = experimental value of negative displacement; EAC = elastic modulus; N_f = number of loading cycle for 90% of P_{max}



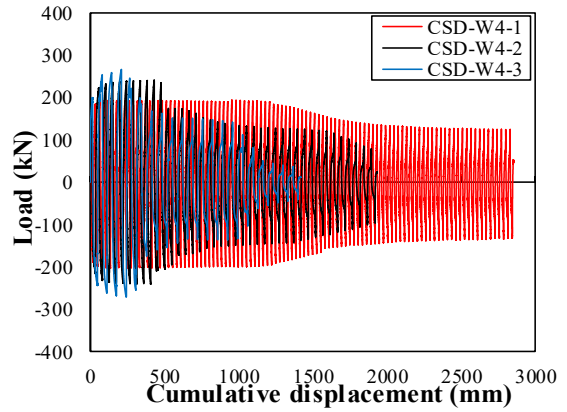
(a) CSD-W3



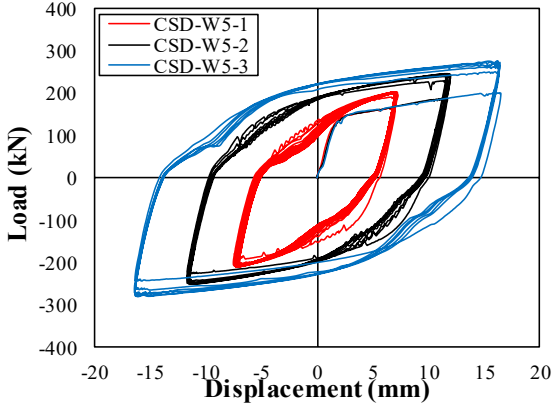
(a) CSD-W3



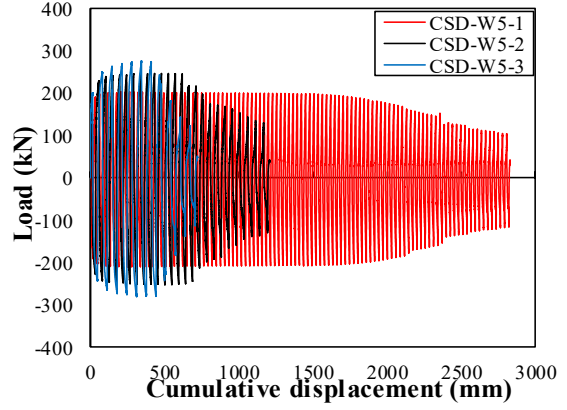
(b) CSD-W4



(b) CSD-W4



(c) CSD-W5



(c) CSD-W5

Fig. 8. Load-displacement curves

Fig. 9. Load-cumulative displacement curves

험체에 비해 실험 중 조기에 중앙부 스트럿에서 전단균열이 발생하여 내력저하가 시작되었고, 이에 따라 최대 내력 90 % 이하 시점에서 에너지흡수능력이 다른 실험체에 비해 낮았다. 이는 외측에 배치된 스트럿폭이 작아 중앙부 스트럿의 전단파단 후 반복하중에 의해 비틀림

좌굴이 발생하여 내력저하가 동반된 것으로 판단된다.

Figs. 8-9은 실험결과로부터 얻은 하중-변위곡선과 변위를 누적한 하중-누적변위곡선을 나타낸다. 스트럿폭 차이가 적은 CSD-W3 실험체는 전단변형각과 관계없이 안정적인 이력거동을 나타냈으나, CSD-W4

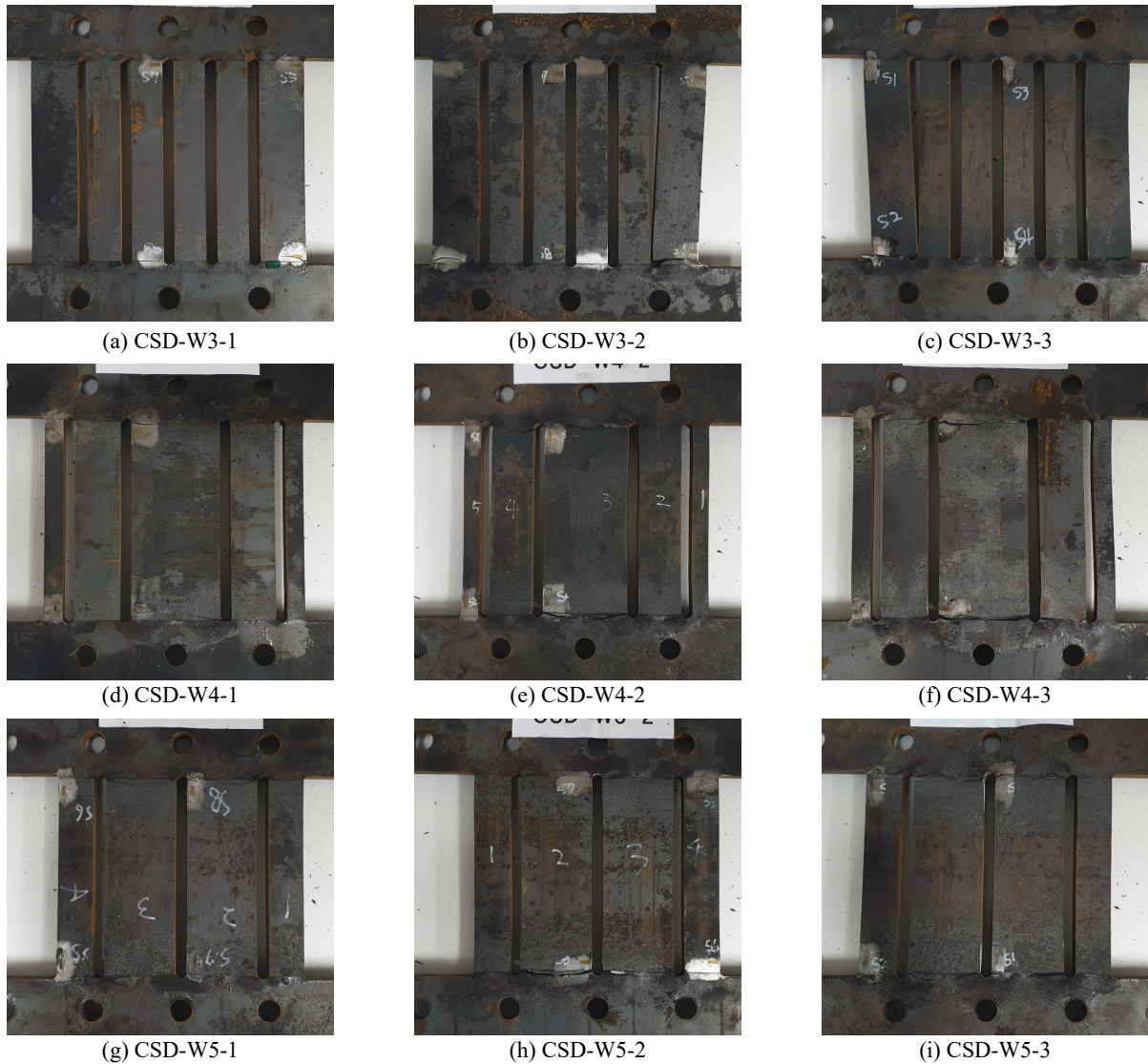


Fig. 10. Fracture shapes at test end

와 W5 실험체는 반복가력에 따른 내력저하가 빠르게 나타났다.

이는 강제슬릿댐퍼의 스트럿폭 배치가 요구성능에 따라 내진설계 상황에 맞게 성능을 조정하는 중요한 변수로 작용하는 것을 확인할 수 있다.

실험체의 종국시점에서의 파단과 변형형태를 확인하기 위하여 실험결과로부터 얻은 사진을 Fig. 10에 나타냈다.

일부 상하단부 스트럿에서 휨변형 및 전단파단에 의해 최대내력이 결정됐다. 스트럿폭의 차이가 적은 CSD-W3 실험체는 외측 스트럿(50 mm)에서 파단이 발생했으나, 스트럿폭 차이가 큰 CSD-W4와 W5 실험

체는 중앙부 스트럿부터 파단이 진행됐다. 또한, 폭이 20 mm, 40 mm인 스트럿에서 휨 변형이 동반되는 경향이 확인됐다.

4.2 변형도 분포

실험체의 스트럿폭에 따른 변형도 추이를 조사하기 위하여 Fig. 2(b)의 스트레인 게이지(SG)로부터 측정된 변형도 분포를 Fig. 11에 나타냈다. 스트럿폭의 차이가 큰 CSD-W4와 W5 실험체는 유사한 폭을 가진 CSD-W3 실험체에 비해 불안정적인 변형도 분포를 보였다. 이는 스트럿폭이 다르게 배치되어, 스트럿의 위치에 따라 하중이 불균형하게 분포되어 비대칭적으로

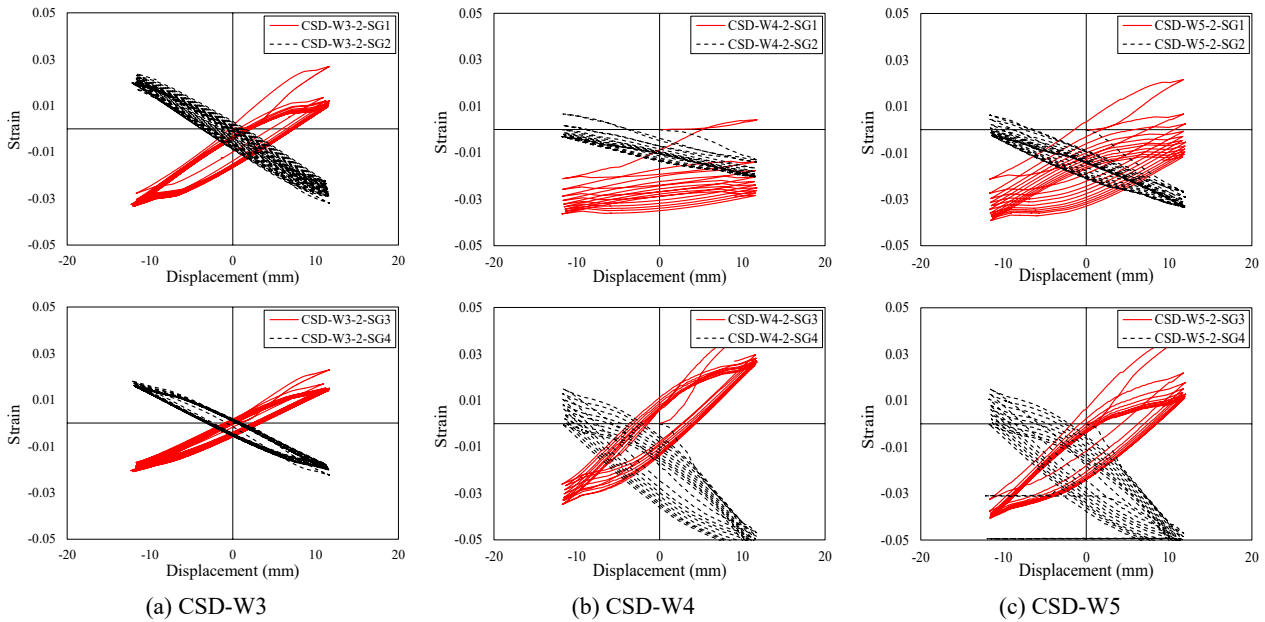


Fig. 11. Strain-displacement curves (Constant 5 %)

나타났다고 판단된다.

외측 스트럿의 변형률을 측정하 SG1(상부)과 SG2(하부)에서 CSD-W4(20 mm)와 CSD-W5(40 mm) 실험체는 CSD-W3(50 mm) 실험체에 비해 (-) 변형률에 집중된 것을 확인할 수 있다. 특히, CSD-W4의 SG1은 가력을 가함과 동시에 휨변형 또는 면외비틀림이 일어나, 변형도가 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 이후 스트럿의 파단 전까지 변형도 측정이 가능한 범위 내에서 초기 선형 관계를 거의 유지하였다. 이는 실험 초기에 스트럿에 변형이 일어나 내력 저하되었다고 판단된다.

내측 스트럿의 변형률을 측정하 SG3(상부)와 SG4(하부)에서는 CSD-W4(100 mm)와 CSD-W5(80 mm) 실험체가 CSD-W3(35 mm) 실험체에 비해 (+) 변형률은 0.04, (-) 변형률은 -0.05까지 나타나, 변형률의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 스트럿폭이 작은 외측 스트럿에서 조기 변형과 좌굴이 발생하여 댐퍼의 연성능력을 저하시킬 수 있다고 판단된다.

이와 같은 변형도 분포의 불균형으로 스트럿폭의 차이가 댐퍼의 성능에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 특히, 내측 스트럿의 폭이 외측 스트럿폭보다 넓은 실험체의 경우 하중과 변형이 내측 스트럿에 집중되었다.

이처럼 외측 스트럿에서 조기에 발생하는 변형과 좌굴은 댐퍼의 전반적인 연성저하를 일으킬 수 있으며, 이는 스트럿폭이 큰 위치에서 하중 분담이 집중되어 댐

퍼의 성능을 결정하는 것을 확인하였다.

4.3 누적소성변형률

강재슬릿댐퍼의 소성변형능력을 확인하기 위해 하중-누적변형각 관계를 Fig. 12에 나타냈다. 누적변형각은 최대내력 이후 실험내력이 최대내력 90% 이하까지 저하되는 시점의 변형각을 누적한 것으로 누적변형각의 크기는 댐퍼의 변형능력 효과를 확인할 수 있다. 이때, 최대내력 시점은 ×로 표시하였고 최대내력 90% 이하 시점까지는 실선, 이후부터는 점선으로 표현하였다.

실험 결과, 모든 실험체는 전단변형각이 증가함에 따라 누적변형각이 작아졌다. 스트럿폭의 차이가 작은 CSD-W3 실험체가 다른 실험체보다 큰 누적소성변형량을 나타냈으며, 전단변형각과 상관없이 비교적 일정한 강도를 유지했다. 이는 CSD-W3 실험체가 응력분포가 상대적으로 균일하게 되어 안정적인 이력거동을 유지할 수 있어 저주기 피로수명이 큰 것으로 판단된다.

CSD-W4와 CSD-W5에서는 전단변형각이 증가함에 따라 최대강도도 증가하는 경향을 나타냈으나, 스트럿폭이 큰 중앙부에 응력집중현상이 발생하여 외측 스트럿에 좌굴 및 비틀림이 생겨 누적변형각이 작아졌다. 특히, 전단변형각이 증가할수록 변형 분포에 큰 차이가 나타났다.

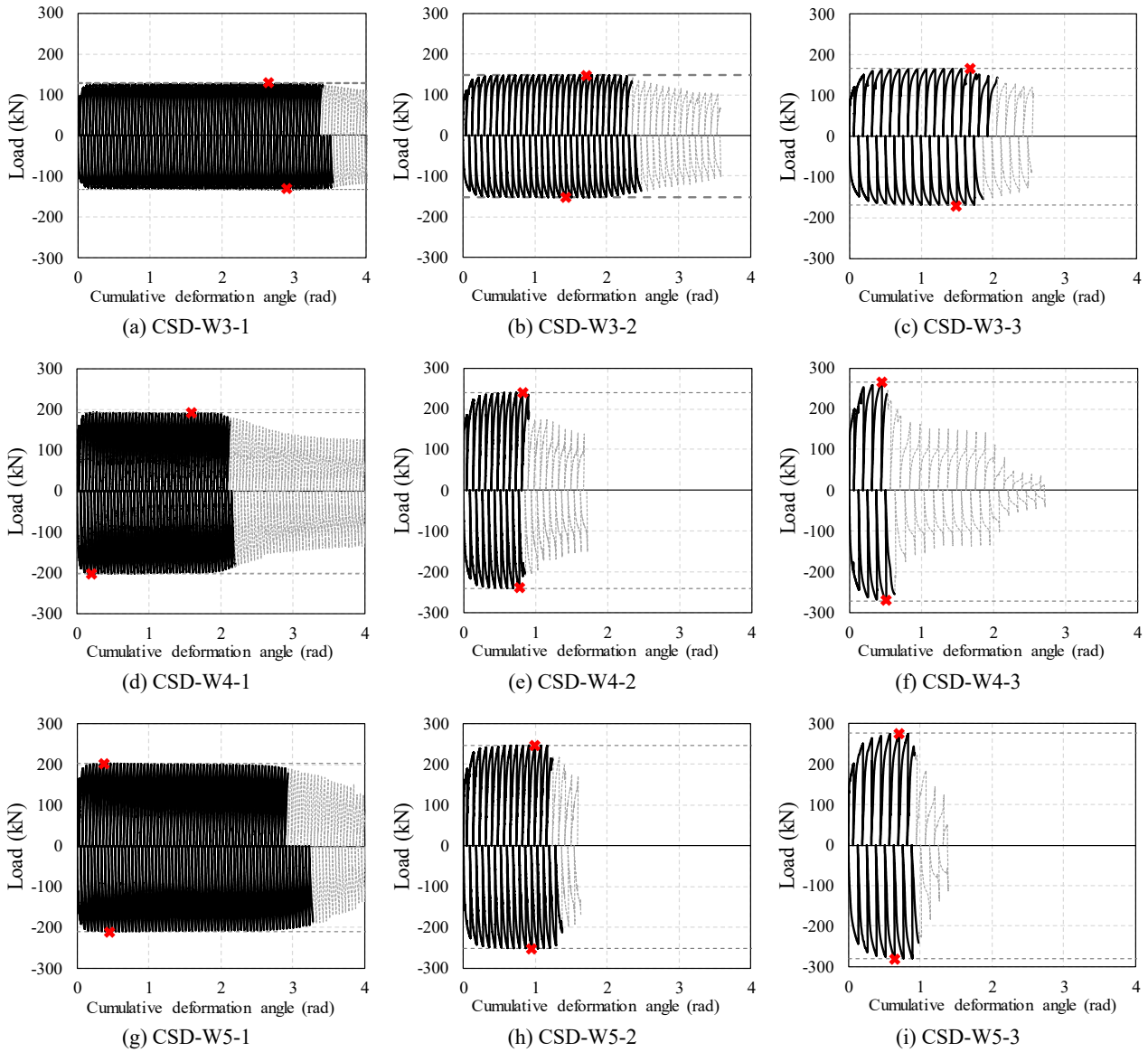


Fig. 12. Load-cumulative deformation angle curves

4.4 재하진폭-재하횟수 관계

댐퍼의 피로성능을 평가하기 위하여 Kim 등^[17]의 기존 연구 분석과 일본 건축학회 강구조 제진설계지침(AIJ)^[18]에서는 일정진폭으로 반복재하한 H형 전단패널댐퍼 (형상비: 1.0, 패널부 적용 강재: SN 강재 또는 저항복합 강재)에 대한 실험 데이터를 기반으로 Manson-Coffin 법칙(Manson, 1966; Tavernelli and Coffin)^[19, 20]을 이용하여 재하진폭과 Fig. 13에 의한 재하횟수의 관계를 식 (5)로 나타낸다.

$$N_f = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\gamma_a}{C} \right|^{-m} \quad (5)$$

여기서, N_f 는 최대내력 90%로 저하된 시점에서의 사이클 수, γ_a 는 재하진폭, C , m 은 실험변수를 나타낸다.

실험결과에 따른 강재슬릿댐퍼의 피로곡선을 Fig. 14에 나타냈다. 또한, Fig. 14의 결과에 따라 스트럿폭의 변화에 따른 피로곡선의 매개변수 C 와 m 을 식 (5)의 N_f 와 γ_a 의 관계에 대해 회귀분석 하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타냈다.

실험을 통해 변폭 강재슬릿댐퍼는 전단변형각 증가

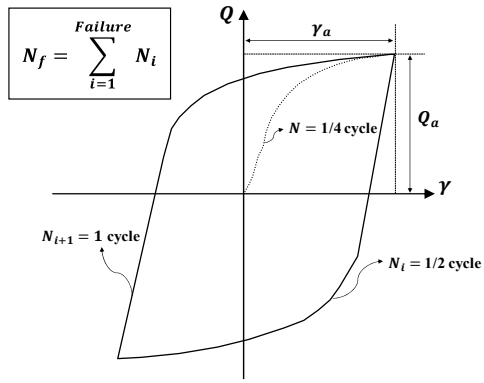


Fig. 13. Definition of loading amplitude and loading cycle^[18]

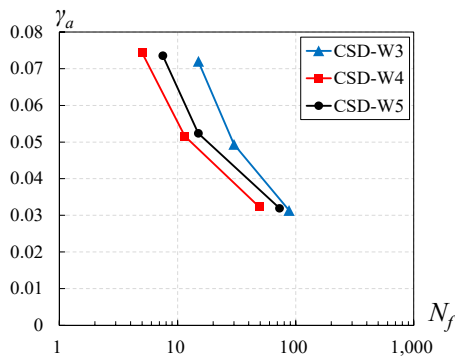


Fig. 14. Fatigue curves of steel slit damper

Table 4. Value of C and m for fatigue curves

Specimen	Experimental variable	
	C	m
CSD-W3	0.181	2.141
CSD-W4	0.101	2.778
CSD-W5	0.114	2.801

Table 5. Comparison of experimental results and theoretical performance

Specimen	eP_{ye} [kN]	eP_{max} [kN]	$e\delta_{ye}$ [mm]	eK_1 [kN/mm]	cP_{ye} [kN]	cP_{max} [kN]	$c\delta_{ye}$ [mm]	cK_1 [kN/mm]	eP_{ye}/cP_{ye}	eP_{max}/cP_{max}	$e\delta_{ye}/c\delta_{ye}$	eK_1/cK_1
CSD-W3-1	77.70	128.15	1.35	57.74	83.28	136.08	2.75	30.26	0.93	0.94	0.50	1.91
CSD-W3-2	78.43	148.23	1.09	72.23					0.94	1.09	0.40	2.39
CSD-W3-3	80.68	166.29	1.07	75.30					0.97	1.22	0.39	2.49
CSD-W4-1	124.23	192.55	1.18	105.47	132.29	216.16	4.62	28.65	0.94	0.89	0.26	3.68
CSD-W4-2	145.51	239.43	1.38	105.45					1.10	1.11	0.30	3.68
CSD-W4-3	136.54	265.57	1.24	109.93					1.03	1.23	0.27	3.84
CSD-W5-1	141.15	202.96	1.49	94.54	134.69	220.08	2.28	59.18	1.05	0.92	0.65	1.60
CSD-W5-2	143.67	246.44	1.78	80.69					1.07	1.12	0.78	1.36
CSD-W5-3	148.24	276.70	1.81	81.80					1.10	1.26	0.80	1.38

Where, eP_{ye} = experimental value of yield strength; eP_{max} = experimental value of maximum strength; $e\delta_{ye}$ = experimental value of yield displacement; eK_1 = experimental value of stiffness; cP_{ye} = calculated value of yield strength (Eq. (2)); cP_{max} = calculated value of maximum strength (Eq. (3)); $c\delta_{ye}$ = calculated value of yield displacement (Eq. (6)); cK_1 = calculated value of stiffness

함에 따라 피로수명이 급격히 감소하는 경향을 확인하였다. 특히, 중앙부에 큰 스트럿폭을 가진 CSD-W4와 W5는 CSD-W3보다 매개변수 m 은 약 30 % 증가하였으나 매개변수 C 는 CSD-W3가 높게 나타났다. 이는 매개변수를 통해 재하진폭의 증가에 따른 피로성능의 감소 등의 현상을 판단된다.

현재 강재슬릿댐퍼의 피로성능곡선에 대한 표준화된 매개변수가 정의되어 있지 않아, AIJ 강구조 제진설계지침의 H형 전단패널 댐퍼 매개변수를 비교하였을 때, H형 전단패널의 C 는 0.482~0.273으로 실험체의 C 와 약 33 %~60 % 정도 차이가 나타났다. H형 전단패널의 피로곡선과 마찬가지로 슬릿댐퍼의 피로성능곡선 또한 선형의 관계로 나타낼 수 있어, 강재슬릿댐퍼의 구조적 특성을 반영한 피로 매개변수를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

4.5 강재슬릿댐퍼의 강성 및 내력 예측

변폭 강재슬릿댐퍼의 설계항복강도, 항복변위, 초기 강성 및 최대강도를 산정하여 실험결과와 비교하기 위해 제 2항에서 제시된 식을 토대로 산정하여 Table 5에 나타났다.

변폭 강재슬릿댐퍼의 설계강도는 각 스트럿폭에 따른 강성을 개별적으로 계산한 후, 이를 더하여 전체 내력을 산출하였다. 각 스트럿의 항복내력과 최대내력은 식 (1)과 식 (2)에 의해 스트럿의 휨과 전단에 의한 내력 중 작은 값으로 산정되며, 강성은 폭에 따라 다르게 계산된다.

실험체의 실험항복 및 최대내력에 대한 이론항복 및 최대내력비의 평균값은 각각 1.01, 1.09로 구조안전성 측면에서 문제가 없다고 판단되지만 항복변위값과 초기강성 값에서는 각각 약 0.27~0.8, 1.38~3.84로 큰 오차가 발생했다. 이는 실험체의 실제 거동과 이론 예측 간의 차이가 있으며, 변폭 강재슬릿댐퍼의 스트럿폭 차이로 인해 발생하는 응력집중과 좌굴이 항복변위에 영향을 미쳤다고 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 변폭 강재슬릿댐퍼를 대상으로 각 형상의 실험체의 전소성 전단내력, 탄성강성, 에너지 흡수능력과 저주기 피로거동을 조사하기 위해 동변위 반복가력 실험을 수행하였고 실험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 모든 실험체는 큰 폭을 가진 스트럿 상하부에서 전단균열이 발생했고 전단면이 파단된 후 급격하게 내력이 저하가 발생하였다. 이는 외측에 좁은 폭을 가진 스트럿이 배치될 경우, 내측에 응력이 집중되어 내측 스트럿의 하중 및 저항 분담이 커지고, 스트럿이 초기에 파단되어 변형능력을 저하할 수 있는 것으로 판단된다.
- (2) 중앙부에 큰 폭의 스트럿이 배치된 CSD-W4와 CSD-W5 실험체는 강도가 높은 반면, 전단변형각이 증가함에 따라 에너지흡수능력이 CSD-W3 실험체에 비해 감소하는 경향을 나타냈다.
- (3) 스트럿폭 차이가 큰 CSD-W4 실험체가 스트럿폭이 비슷한 CSD-W3 실험체에 비하여 변형률 이력곡선이 분산되는 형태를 보였으며 이는 스트럿폭이 좁거나 전단변형각이 증가할 경우에 크게 나타나는 것을 확인하였다.
- (4) 모든 실험체에서 항복변위 값과 초기강성 값에서 큰 오차를 확인하였다. 이러한 결과는 변폭 강재슬릿댐퍼의 스트럿폭 폭 차이로 인해 불균형한 내력분포가 발생하여, 항복시점에서의 변위감소와 초기강성의 과소 또는 과대평가될 가능성이 있다고 판단된다.

이 실험을 통하여 변폭 강재슬릿댐퍼는 스트럿폭의

배치와 크기에 따라 반복가력에 따른 성능을 조정하는 중요한 변수로 작용하는 것을 확인할 수 있다. 결과물 토대로 강재슬릿댐퍼의 내진성능 및 범용성을 높이기 위한 일환으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 실제 실험데이터를 기반으로 변폭 강재슬릿댐퍼에 대한 유한요소해석 모델을 구축하여 다양한 변수에 대한 변폭 강재슬릿댐퍼의 구조거동을 분석할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2022년 한국연구재단 대학 창의적 자산 실용화지원(BRIDGE+)사업과 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 이공분야 기초 연구지원사업(과제번호 No. RS-2024-00346347)의 연구비와 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부임.

참고문헌(References)

- [1] Kelly, J.M., Skinner, R.I., and Heine, A.J. (1972) Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, NZSEE, Vol.5, No.3. pp.63-87.
- [2] Lee, C.-H. (2015) *Structural Performance of SAFE Dampers Combining Shear-Type Friction Damper and Non-Uniform Steel Strip Damper*, Ph.D. Dissertation, Korea University (in Korean).
- [3] Kim, J.-W., Kwon, U.-J., Choi, K.-Y., Kim, Y.-J., and Park, H.-Y. (2023) Experimental Study on Structural Performance of Steel Slit Damper according to Restrained Out-of-Plane Deformation, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.27, No.1, pp.86-94 (in Korean).
- [4] 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).
- [5] Kim, J.S., Hwang, B.K, Kim, E.Y., and Kim, T.S. (2022) Seismic Performance according to Slit Width and Arrangement of Steel Damper, *Proceedings of Spring*

- Annual Conference of AIK*, Architectural Institute of Korea, Vol.42, No.1, p.603 (in Korean).
- [6] Kim, T.S. (2024) *Steel Slit Damper with Varying Strut Width*, Patent No. 10-2641721, Korean Intellectual Property Office (in Korean).
- [7] Fan, K., and Kim, T.S. (2024) Experimental Study on the Structural Performance of Steel Slit Dampers with Different Struts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.3, pp.165-174 (in Korean).
- [8] Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control (2015) *Design Methodology and Application Examples of Vibration Control Structure*, Kimoon dang (in Korean).
- [9] Oh S.-H., Kim, Y.-J., and Ryu, H.-S. (2009) Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.9, pp.1997-2008.
- [10] Lee, C.-H., Kim, J., Kim, D.-H., Ryu, J., and Ju, Y.K. (2016) Numerical and Experimental Analysis of Combined Behavior of Shear-Type Friction Damper and Non-Uniform Strip Damper for Multi-Level Seismic Protection, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.114, pp.75-92.
- [11] Oh, S.-H., and Park, H.-Y. (2022) Experimental Study on Seismic Performance of Steel Slit Damper under Additional Tensile Load, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.50, 104110.
- [12] American Society of Civil Engineers (2017) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-16, ASCE, USA.
- [13] Architectural Institute of Korea (2022) *Seismic Design Standards for Buildings*, KDS 41 17 00 : 2022, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [14] Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials*, KS B 0801:2007, Korean Standards Association (in Korean).
- [15] Korean Agency for Technology and Standards (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials*, KS B 0802:2003, Korean Standards Association (in Korean).
- [16] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Rolled Steels for General Structure*, KS D 3503:2018, Korean Standards Association (in Korean).
- [17] Kim, H.R., Kim, S.B., Eom, T.S., Kim, J.H., and Kim, J.W. (2020) Experimental Study on Mechanical Characteristics of H-Type Shear Panel Steel Damper under Constant Amplitude Deformation, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.5, pp.321-330 (in Korean).
- [18] Architectural Institute of Japan (2014) *Recommended Provisions for Seismic Damping Systems Applied to Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [19] Dolan, T.J. (1966) Book Review: Thermal Stress and Low Cycle Fatigue, *Journal of Applied Mechanics*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.33, No.4, p.957.
- [20] Tavernelli, J.F., and Coffin, L.F., Jr. (1962) Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue, *Journal of Fluids Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.84, No.4, pp.533-537.

요약: 이 연구는 다양한 스트럿폭을 가진 강재슬릿댐퍼를 대상으로 동변위 반복가력실험을 수행하여 강재슬릿댐퍼의 구조성능을 확인하는 것을 목적으로 한다. 총 9개의 실험체는 일반구조용 압연강재로 제작하였으며, 스트럿폭과 하중프로토콜을 변수로 설정하였다. 하중프로토콜은 전단변형각(3%, 5%, 7%)에 대한 동변위 반복가력으로 구성하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 실험체는 전단변형각이 증가함에 따라 최대내력 도달 후 90% 시점까지의 총 사이클수는 평균 1/2정도로 감소하는 경향을 보였다. 최대 스트럿폭이 50 mm미만인 실험체는 최대 스트럿폭이 100 mm인 실험체보다 초기강성 및 최대내력은 낮았으나, 에너지흡수능력이 높았다. 스트럿폭이 100 mm인 실험체가 다른 실험체보다 조기에 전단균열 및 파단이 진행되어 내력저하가 빠르게 나타났기 때문이다. 스트럿폭의 배치는 댐퍼의 구조성능에 영향을 주는 중요한 변수임을 확인하였다.

핵심용어: 강재슬릿댐퍼, 동폭변위, 반복하중, 스트럿폭, 에너지소산
