

폭이 다른 스트럿을 갖는 강재슬릿댐퍼의 구조성능에 관한 실험적 연구

범계정¹ · 김태수^{2*}

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

Experimental Study on the Structural Performance of Steel Slit Dampers with Different Struts

Fan, Kaicheng¹, Kim, Tae Soo^{2*}

¹Graduate Student(Master's Course), Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea

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

Abstract - In this study, steel slit dampers with various combinations of strut widths were fabricated to investigate the structural performance through cyclic tests with incremental displacement loading protocol. Six specimens were planned, with the identical steel material (SS400), whole height (233 mm), thickness (14 mm), and total width of struts (240 mm), including 2 specimens with the same strut width (40 mm, 60 mm) and 4 specimens with varying strut widths. Experimental results showed that specimens with the same strut width simultaneously cracked and specimens with varying strut widths failed at the top and bottom ends of the widest struts. In specimens with a maximum strut width of less than 50 mm, initial stiffness and yield strength were on average 33% lower compared to specimens with a maximum strut width of 60 mm or more. However, due to larger ultimate displacements and cycles to failure, the energy absorption capacity was more higher.

Keywords - Steel slit damper, Incremental amplitude loading, Strut width, Ultimate strength, Initial stiffness, Energy dissipation capacity

1. 서론

지진발생으로 인한 지반의 진동이 구조물에 전달되는 것을 최소화시켜주는 면진장치와 가속도 및 변형을 저감시키며 구조물의 진동에너지를 흡수하는 제진장치가 개발되고 적용되어 왔다. 제진장치 중 하나인 강재 슬릿댐퍼는 건축구조물의 감쇠를 증가시키는 동시에 강성도 향상시키며 안정적인 이력거동을 나타내 국내외에서 다양한 형태로 개발 및 적용되고 있다.

제진시스템은 19세기 초반에 이론이 제시된 면진시스템에 비하여 늦게 개발되기 시작하여 1970년대 초반에 Kelly *et al.*^[1]에서 강재댐퍼에 대한 연구를 수행하여 최

초로 제안되었으며, 이후 현재까지 국내뿐만 아니라 미국, 일본 등에서 다양한 형태의 강재댐퍼가 개발되었다.

Whittaker에 의한 ADAS댐퍼^[2]와 Bergman & Geol 및 Tsai *et al.*에 의한 TADAS 댐퍼^{[3],[4]}로 강재댐퍼의 단일 스트럿에서 폭이 변하고 강재 댐퍼의 면외방향 저항 성능에 대한 연구가 수행되었다. 허니컴댐퍼(Kobori *et al.*)^[5] 또는 슬릿댐퍼(Benavent-Climent *et al.*)^[6], Chan & Albermani^[7], Oh *et al.*^[8], Ahn *et al.*^[9]의 경우에는 다수의 슬릿이 있는 강판의 면내 전단변형메커니즘에 의해 작동되고, 에너지는 슬릿 사이의 스트럿 휨변형 또는 전단변형에 의해 흡수하도록 고안되었다.

Kim *et al.*^[10]는 캔틸레버형 강재댐퍼를 대상으로 강판의 두께, 폭비, 면수 등을 변수로 하여 반복가력 실험을 통해 안정된 이력특성과 함께 큰 에너지소산능력을 보유하고 있음을 검증하였다. Ke *et al.*^[11]은 패널 중앙부에 슬릿 플레이트를 마찰댐퍼에 결합한 브레이스형 하이브리드 댐퍼에 대하여 반복하중실험을 수행하였다. 그 결과, 새로운 하이브리드 댐퍼 시편의 우수한 연

Note.-Discussion open until December 31, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 22, 2024; revised on April 08, 2024; approved on April 11, 2024.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-400-5131 Fax. +82-31-400-5959

E-mail. tskim0709@hanyang.ac.kr

성을 동반한 예상 에너지 소산 순서가 확인하고 슬릿 플레이트를 통해 댐퍼의 마찰 에너지 소산을 향상시킬 것을 검증하였다.

현재까지 강재 슬릿 및 봉댐퍼의 구성은 동일한 폭, 직경 또는 변단면의 스트럿을 일정한 간격으로 배치하여 제작되었고, 스트럿의 양단부에 응력과 손상이 국부적으로 집중되어 균열이 발생하여 동시에 파단되어 최대내력이후 급격한 내려저하 양상을 나타냈다. 강재 슬릿댐퍼에서 스트럿에 응력집중으로 인하여 생기는 취성파괴를 방지하기 위하여 스트럿의 폭, 배치, 단면의 구성을 변화시켜 내진성능을 보완하기 위하여 지속적으로 연구되어왔다. 그래서, Kim *et al.*^[12]과 Kim^[13]은 스트럿폭을 변화시켜 구성하는 강재댐퍼를 개발하였다. 현재까지 스트럿폭이 다른 강재슬릿댐퍼의 구조거동에 관한 연구 및 적용사례가 거의 없는 것으로 조사되었다.

이 연구에서는 최근 개발한 강재댐퍼를 기반으로 동일 스트럿폭을 갖는 강재댐퍼와 다양한 스트럿 폭의 구성을 갖는 변폭 댐퍼의 실험체를 제작하여 점증가력 실험을 통해 파단형태, 내력, 초기강성 및 에너지 흡수능력을 조사하고 비교하는 것은 연구 목적으로 한다.

2. 실험체 계획 및 실험방법

2.1 실험체 계획 및 제작

강재 슬릿댐퍼의 실험체 일람과 실험체의 형상을 각각 Table 1과 Fig. 1에 나타냈다. 강재댐퍼 실험체는 실험을 위한 고정부분을 포함한 전체 폭은 480 mm, 전체 높이는 475 mm, 스트럿의 높이는 233 mm, 스트럿 순

높이는 220 mm로 계획하였다. 공칭 두께 15 mm로, 강종은 제작당시 시장수급상황을 고려해 일반구조용 압연강재인 SS400(구 KS강종)로 선정·제작하였다.

Table 1의 실험체명에서 ‘CSD’는 탄소강 댐퍼 (Carbon Steel Damper), ‘W1, W2, W3, W4, W5, W6’은 Fig. 1에서 스트럿폭과 배치에 따른 댐퍼번호이다. 마지막으로 “W3-4, W4-4, W5-4”에서 번호 ‘4’는 이 연구의 대상에는 포함되지 않은 동일 형상의 실험체상에서 일정변위가력 프로토콜과 구분하기 위해 점증가력 프로토콜 번호(4)를 나타낸다. 각 댐퍼를 구성하는 스트럿(Strut)폭과 구성도 Table 1과 Fig. 1에 나타낸다. 스트럿 폭의 구성은 Kim의 결과^[13]를 참조하여 계획하였다. 실험체 CSD-W1의 경우 스트럿폭이 모두 40 mm 이고 총 6개이다. 실험체 CSD-W4-4는 각각 2개의 폭 20 mm와 50 mm 스트럿과 1개의 폭 100 mm 스트럿으로 구성된다.

2.2 실험방법 및 가력계획

반복가력실험을 하기 위한 실험체 세팅, 변위계 및 스트레인 게이지 설치위치를 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2(a)에서 댐퍼실험체의 상하부는 하부에 고정지그와 상부가력보를 고장력볼트로 고정하였으며, 실험체의 양옆에는 액추에이터와 연결된 상부가력보의 들뜸 및 횡변위를 방지하기 위하여 횡변위 고정가이드를 설치하였다. 실험체 및 고정체의 위치별 수평변위의 변동상황을 측정하기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 6개의 변위계(LVDT)를 설치하였다.

수평하중 하에서 강재슬릿댐퍼에서 변형이 집중될 것으로 판단되는 중앙부 및 외측 스트럿의 상하부의 끝단으로부터 5 mm떨어진 지점에서 변형률을 측정하

Table 1. Specimen list and geometric information

Specimen	Measured thickness t_e (mm)	Measured thickness t_e (mm)	Strut width combination [mm]	No. struts (EA)	Minimum aspect ratio (H/B_{max})	Common
CSD-W1	14.90	14.90	40+40+40+40+40+40	6	5.83	Loading protocol : FEMA-461 Steel Material=SS400 Nominal thickness : 15 mm Height of the straight strut part = 233 mm Total height of the strut = 406 mm
CSD-W2	14.95	14.95	60+60+60+60	4	3.88	
CSD-W3-4	14.83	14.83	50+35+35+35+35+50	6	4.66	
CSD-W4-4	14.76	14.76	20+50+100+50+20	5	2.33	
CSD-W5-4	14.84	14.84	40+80+80+40	4	2.91	
CSD-W6	14.84	14.84	80+40+40+80	4	2.91	

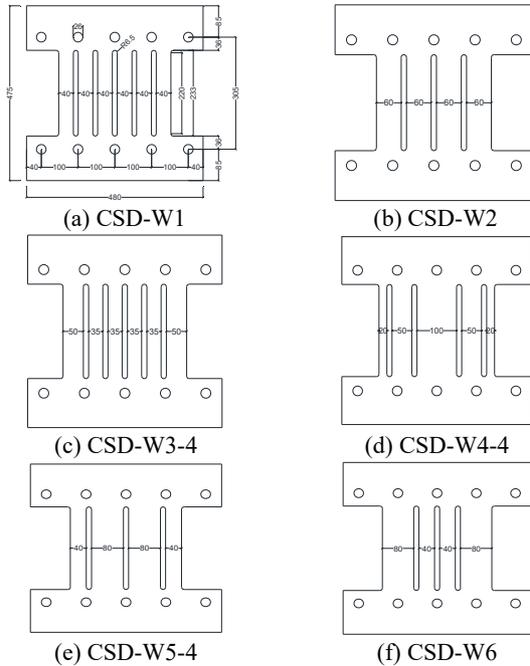


Fig. 1. Specimen configuration and strut dimension

기 위하여 Fig. 2(c)와 같이 4개의 스트레인 게이지(SG)를 세로방향으로 부착하였다.

가력방법은 FEMA461^[14]에 제시된 방법을 적용하였다. 각 가력단계의 진폭(a_i)은 실험체가 충분한 누적된 소성변형을 경험할 수 있도록 계획하였다. 1단계와 2단계는 각각 가장 낮은 진폭(Fig. 3에서 0.44 mm와 0.62 mm)으로 3회 반복하고, 이후 단계부터는 2회씩 반복 가력한다. 3단계부터 12단계까지는 이전단계 변위값의 1.4배로 동일한 증분($a_{i+1} = 1.4a_i$)으로 변위를 증가시켜 진폭(a_i)을 적용하였다. 12단계 이후부터 변위가 과도하게 상승되는 것을 방지하기 위하여 증분변위를 5.4 mm로 고정하고 내력이 최대내력에 비해 50% 이상 저하될 때까지 수행하였다.

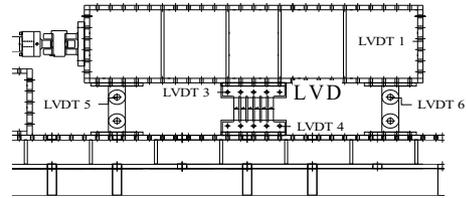
2.3 재료시험

강재 슬릿댐퍼 실험체에 사용된 일반구조용 압연강재인 SS400(최저항복강도 235 Mpa, 최저인장강도 400 MPa)에 대한 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801^[15]에 규정된 5호에 의해 압연방향으로 3개의 인장시험편을 채취하였고, KS B 0802^[16]에 따라 단순인장재료시험을 수행하였다.

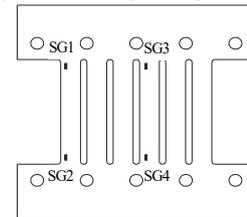
재료인장시험 결과는 Table 2와 Fig. 4에 정리하였



(a) Specimen set-up



(b) Transducer(LVDT) location



(c) Strain gauge in CSD-W1

Fig. 2. Specimen set-up and measurement plan

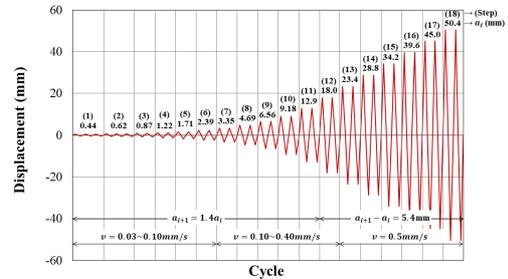


Fig. 3. Loading protocol (FEMA461)

Table 2. Material properties of SS400 material

Tensile coupon	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
Average	25.52	14.78	185.80	250.00	408.50	61.20	47.47
COV	0.001	0.001	0.005	0.021	0.003	0.019	0.011

Note : CS=Carbon steel, '1', '2', '3' : Number of coupon, W_c : Measured width of coupon, t_c : Measured thickness of coupon, E : Elastic modulus, σ_y : Yield stress, σ_u : Tensile strength, EL : Elongation at fracture

다. 평균 탄성계수(E)는 188.80GPa, 항복강도(σ_y) 및 인장강도(σ_u)는 각각 250 Mpa와 408.50 Mpa로 KS D 3503:2016의 최소 설계항복강도와 설계인장강도를 만족하는 것을 확인하였다.

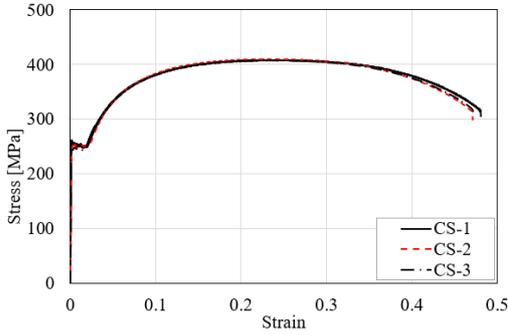


Fig. 4. Stress-strain curves of damper material

3. 반복실험결과

2.2절에 의한 점증가력방법에 의한 반복실험결과를 다음과 같이 정리하였다.

3.1 하중-변위 관계

강재슬릿댐퍼의 스트럿 배치에 대한 구조적 성능을 비교하기 위하여 실험결과를 바탕으로 등가에너지법^{[10],[17],[18]}에 의해 항복내력(P_{ye})과 항복변위(δ_{ye})를 산정하였다. 최대내력(P_{uc}), 초기강성(K_1)과 최대내력 80% 이하 시점의 에너지흡수능력(P_{uc} of 80%, ED)을 산정하여 Table 3에 정리하였다^[19]. Fig. 5와 Fig. 6는 각각 실험결과로부터 얻은 하중-변위 곡선과 이 곡선에서 변위를 누적한 하중-누적변위 곡선이다.

최대 스트럿폭이 각각 40 mm, 50 mm인 CSD-W1과 CSD-W3-4 실험체는 내력과 강성은 다른 실험체에 비해 내력과 강성은 평균 33%정도 낮았지만 Table 3로부터 알 수 있듯이 연성적 거동으로 최대내력시점에서

(+)최대변위(δ_{uc}^+)는 각각 39.61 mm, 34.27 mm로 높게 나타났다. 이는 내력과 강성측면에서는 강재슬릿댐퍼를 구성하는 스트럿폭이 중요한 인자임을 확인할 수 있다. 항복내력에 대한 (+)최대내력의 비인 강도상승률($\beta = P_{uc}^+ / P_{ye}$)은 1.54 – 1.78의 범위로 나타났다.

최대내력이후 최대내력의 80%까지의 이력곡선에서 계산된 에너지흡수능력(ED)과 그 시점에서의 사이클수(N_f)는 내력과 강성이 가장 낮게 나타난 CSD-W1가 141.03 kNm, 32.5회로 가장 높았다. 이는 항복내력과 최대내력은 낮았지만 반복가력에 따른 피로손상이 스트럿이 병렬연결되어 동일한 누적변형을 경험하였다. 그러나, 스트럿 형상비가 상이한 CSD-W4-4 실험체(최대스트럿폭 100 mm, 27회)는 폭이 큰 스트럿이 우선적으로 반복이력에 의해 파괴가 선행되었고, 사이클수가 5.5회 커서 누적에너지 흡수능력이 높아진 것으로 판단된다. 이러한 경향은 동일 실험체 내 최대스트럿폭이 50 mm 이하인 실험체 CSD-W1과 CSD-W3-4에서 에너지흡수능력이 높은 것으로 나타났다.

Fig. 5에서 최대스트럿폭이 60 mm 이상인 실험체(CSD-W2, CSD-W4-4, CSD-W5-4와 CSD-W6)의 하중-변위곡선에서 최대내력이 300 kN 전후의 값을 나타냈고, Fig. 6에서 최대 스트럿폭이 50 mm 이하인 CSD-W1과 CSD-W3-4의 내력은 낮았지만 손상이 지연되어 누적변위가 큰 것을 알 수 있다. Table 3에서 총 에너지 흡수능력이 낮았던 CSD-W4-4, CSD-W5-4와 CSD-W6실험체는 누적변위도 낮았다. 스트럿 폭의 조합은 동일하고 위치가 다른 두 실험체 CSD-W5-4와 CSD-W6는 거의 유사한 거동을 나타냈고, Fig. 6(c)로부터 좌우 외곽쪽에 스트럿폭이 큰 CSD-W6실험체가

Table 3. Test results

Specimen	P_{ye} [kN]	δ_{ye} [mm]	K_{1e} [kN/m]	P_{uc}^+ [kN]	P_{uc}^- [kN]	P_{uc}^+ / P_{ye}	δ_{uc}^+ [mm]	δ_{uc}^- [mm]	ED [kNm]		N_f
									Test end ED	P_{uc} of 80%	
CSD-W1	106.40	1.87	56.84	189.84	-198.78	1.78	33.08	-33/96	150.11	141.03	32.5
CSD-W2	165.77	2.11	78.52	288.43	-286.97	1.74	28.50	-19.90	124.70	120.92	29.5
CSD-W3-4	123.46	2.14	57.81	189.73	-192.15	1.54	26.55	-28.27	126.07	118.04	32.5
CSD-W4-4	172.35	1.97	87.59	268.91	-266.74	1.56	17.37	-17.75	93.72	73.11	27
CSD-W5-4	167.91	1.85	90.92	285.53	-307.62	1.70	23.49	-23.14	100.20	90.07	28
CSD-W6	178.67	2.07	86.40	299.15	-304.41	1.67	23.29	-20.39	104.46	89.23	27.5

Note : P_{ye} : experimental value of yield strength, δ_{ye} : yield displacement at yield strength, K_1 : experimental value of stiffness, P_{uc}^+ : experimental value of positive maximum strength P_{uc}^- : experimental value of negative maximum strength, δ_{uc}^+ : experimental value of positive displacement, δ_{uc}^- : experimental value of negative displacement, E : elastic modulus, N_f : number of loading cycle for 80% of P_{uc}

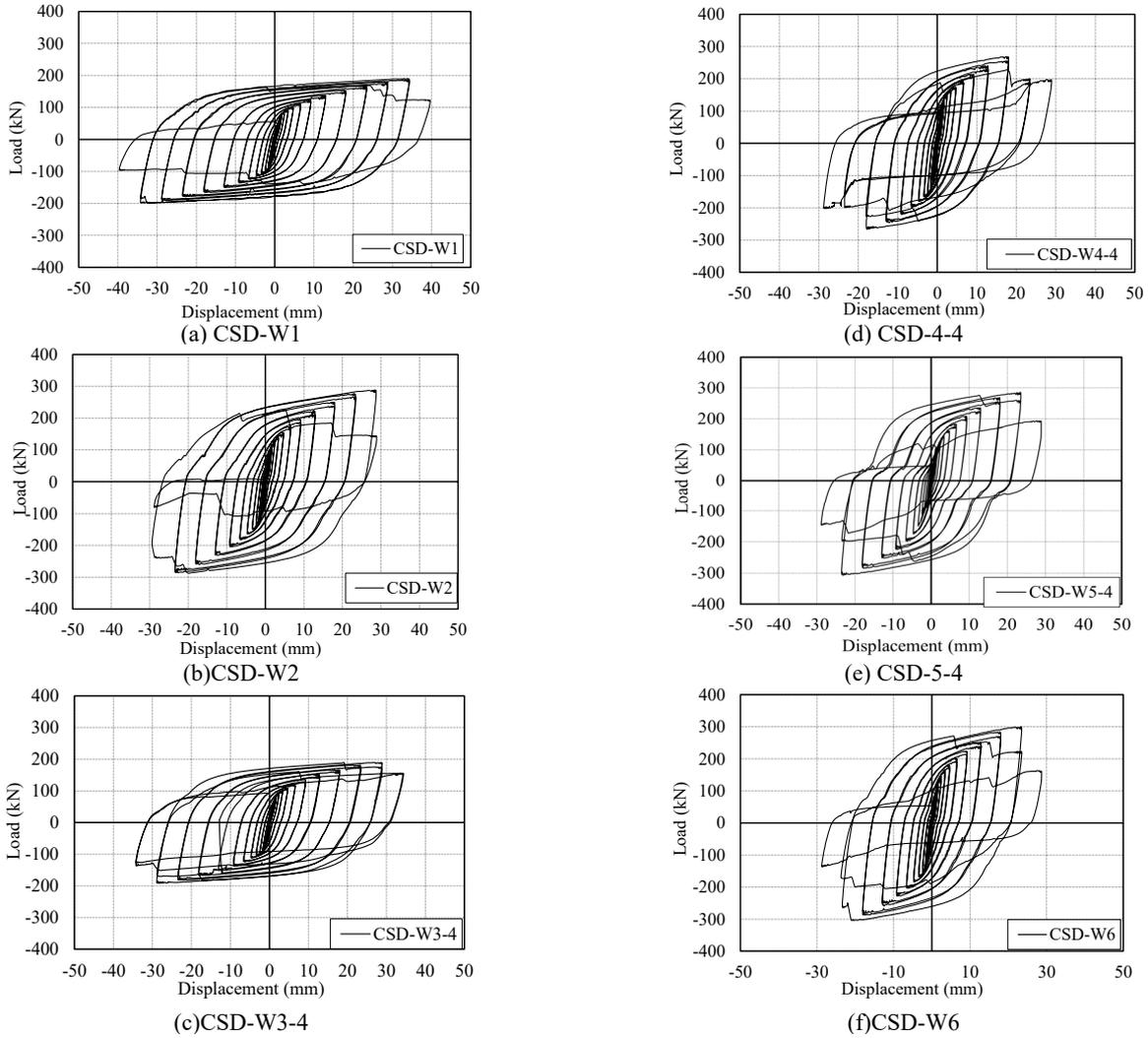


Fig. 5. Load-displacement curves

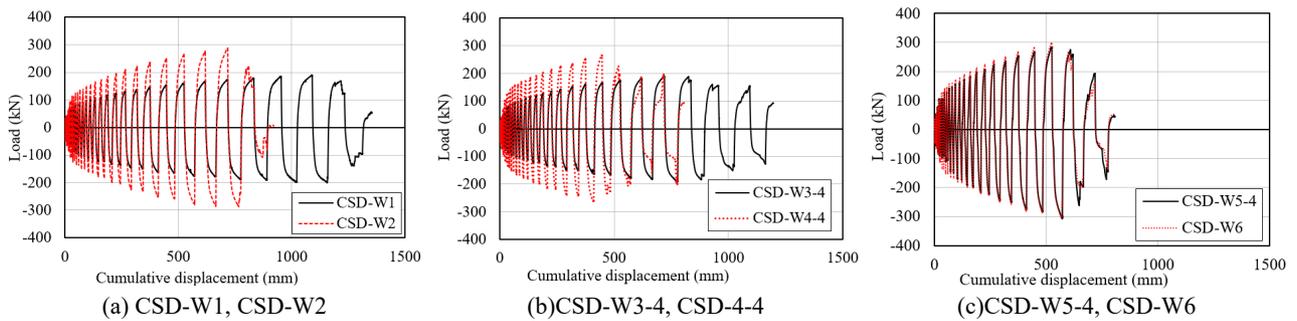


Fig. 6. Load-cumulative displacement curves

CSD-W5-4 실험체보다 매 사이클에서 최대내력이 약간 높게 나타났고 1/2사이클 먼저 최대내력의 80%로 떨어졌다.

Fig. 7은 각 사이클의 (+)영역에서 해당 사이클의 최대내력을 연결해서 작성한 골격곡선(Skeleton curves)을

나타내고 초기강성, 항복 및 최대내력을 확인할 수 있다. Table 3의 실험결과에서 나타난 바와 같이 최대스트럿 폭이 50 mm 이하인 실험체 CSD-W1과 CSD-W3-4는 다른 실험에 비해 초기강성과 내력이 낮았지만 내력저하 시점에서의 최대변위는 높은 것을 알 수 있다. 최대스

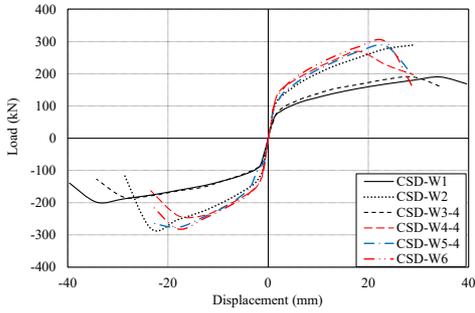


Fig. 7. Skeleton curves(c)CSD-W5-4

트럿폭이 100 mm를 갖는 실험체 CSD-W4-4는 높은 초기강성을 보였지만 응력이 이 스트럿에 집중되어 다른 실험체보다 낮은 변위에서 파단되어 상대적으로 에너지 흡수능력이 낮았다.

3.2 파단형태

다양한 스트럿폭으로 구성된 실험체의 종국시점에서 파단형태와 변형양상을 조사하기 위해 실험결과로부터 얻은 사진을 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 8에서 보여진 바와 같이 강재댐퍼의 전체 또는 일부 스트럿의 상하단부에서 휨변형을 동반한 전단파단에 의해 최대내력이 결정되었다. 실험체에 따라 스트럿의 파단개소가 상이하게 나타났다. 스트럿폭이 동일한 CSD-W1과 CSD-W2는 Fig. 8(a)와 Fig. 7(b)에서와 같이 ①번부터 ④번 스트럿까지 상하단 단부에서 파단이 발행하였다. 실험중에 확인한 결과 좌우측 끝 스트럿에서 손상이 시작하여 파단이 발생하여 중앙부 스트럿으로 파단이 진행되었다. 반면에 Fig. 8(c) – 8(f)에서 스트럿폭이 다른 조합을 갖는 다른 실험체에서는 가장 넓은 폭을 갖는 스트럿 단부에서 파단된 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, Fig. 8(c)의 CSD-W2실험체에서 폭이 50 mm인 ①번과 ⑥번 스트럿 상하단부에서 파단이 발생하였으나 폭이 35 mm인 ②번부터 ⑤번 스트럿에서는 가력 중에 휨변형이 동반되었고 파단은 관찰되지 않았다. Fig. 8(d)의 CSD-W4-4실험체에서도 폭이 100 mm인 ③번 스트럿에서 파단이 발생하였으나 나머지 스트럿에서는 균열 없이 휨변형 또는 전단변형이 관찰되었다.

이로부터 동일 스트럿폭을 갖는 실험체에서는 스트럿이 동일한 강성을 지니므로 변형 및 저항성능도 동일하여 연속적으로 파단이 발생하였으나 스트럿폭이 다른 실험체에서는 폭이 가장 큰 스트럿이 저항강성이 커

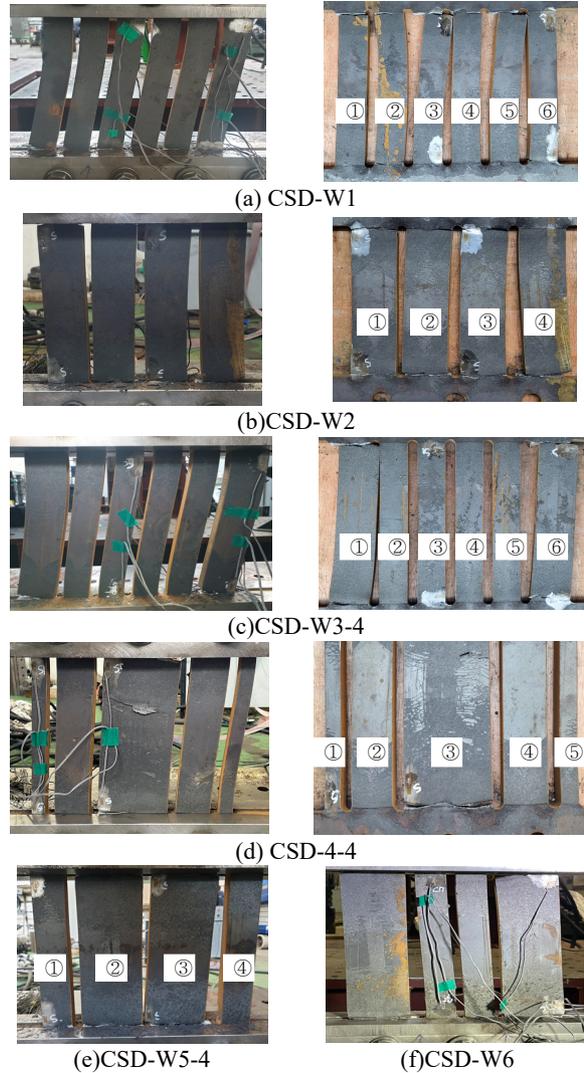


Fig. 8. Fracture shapes

서 이 스트럿 상하단에 하중이 집중되어 파단되었고 다른 스트럿에서는 어느 정도 외부하중에 저항하지만 강성이 작아 변형이 동반되어 파단에 이르지 않는 것으로 판단된다.

3.3 변형도 분포 분석

실험체의 스트럿폭에 따른 변형률의 변화를 확인하기 위하여 Fig. 2(c)에 부착된 4개의 스트레인 게이지(SG1 – SG4)로부터 측정된 변형률을 횡변위에 따른 변형률 분포를 Fig. 9에 나타냈다. SG1과 SG3는 스트럿 상부에, SG2와 SG4는 스트럿 하부에 부착되었다. (+) 변형률은 최대 0.05, (-) 변형률은 최대 -0.1 정도 까지 나타났다. 최대 스트럿 폭이 40 mm, 50 mm로 동일한 실험

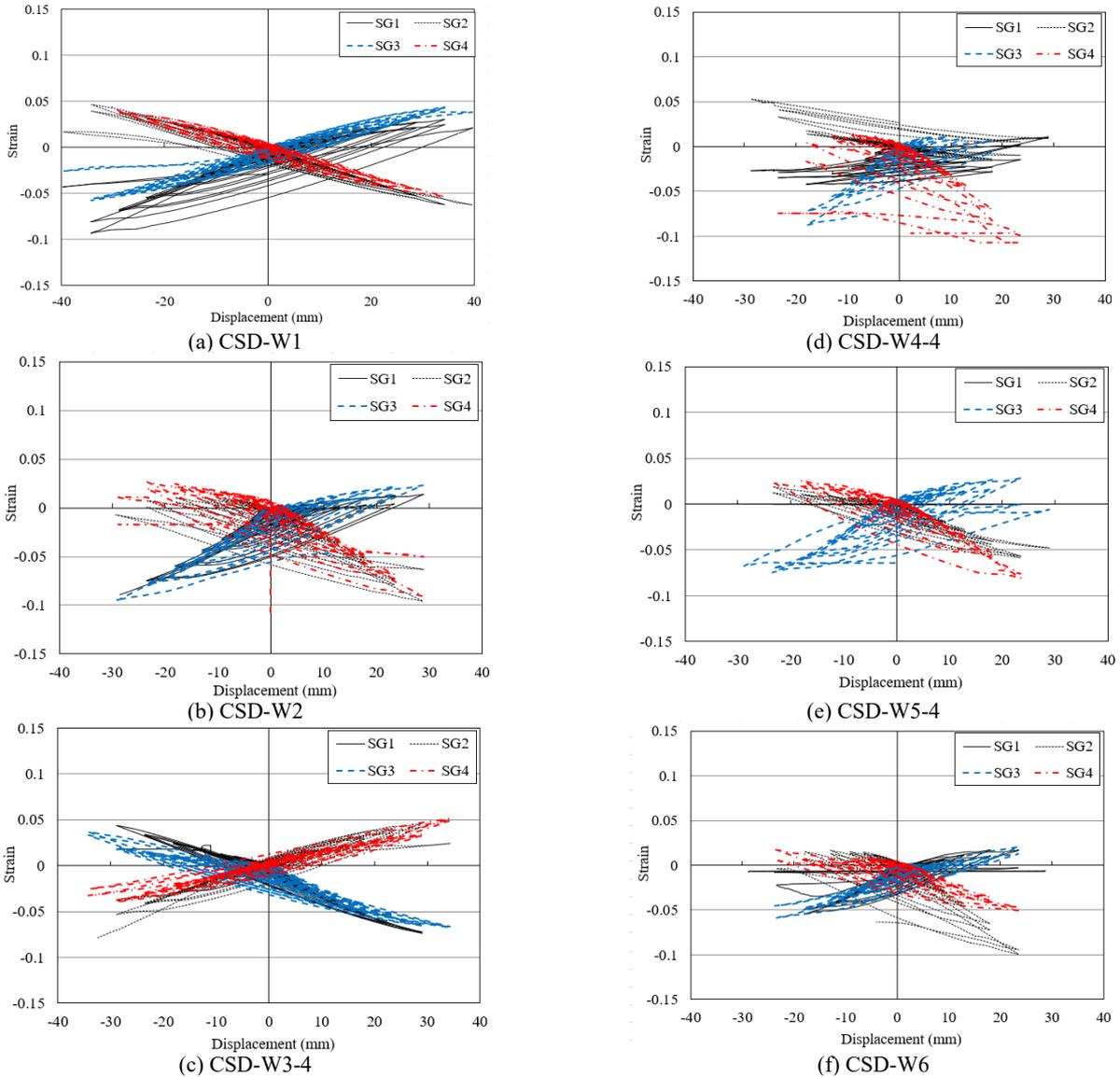


Fig. 9. Strain distribution

험체 CSD-W1, CSD-W2와 스트럿폭이 35 mm와 50 mm로 큰 차이가 없는 CSD-W3-4에서 측정된 변형률은 Fig. 9(a) – Fig. 9(c)로부터 대칭형 분포를 나타내는 것으로 확인하였다. 특히, 최대스트럿폭이 50 mm이하인 CSD-W1과 CSD-W3-4실험체에서의 변형률 분포는 낮은 내력하에 탄성영역내에서 변화하였다.

양쪽 외곽에 폭 20 mm 스트럿과 중앙에 폭 100 mm 스트럿을 갖는 CSD-W4-4에 대해 Fig. 7(d)의 우측 사진에서 폭 20 mm 스트럿이 휨변형 또는 면외비틀림 발생으로 Fig. 8(d)의 SG1과 SG2 변형률이 (+) 또는 (-)구간에서 큰 변화가 없었고, 100 mm 스트럿의 SG3과 SG4에서 응력집중현상으로 변형률의 변동폭이 큰 것

으로 나타났다.

스트럿 구성은 동일하고 배치가 다른 두 실험체 CSD-W5-4와 CSD-W6의 변형률 분포는 Fig. 9(e)와 Fig. 9(f)에서와 같이 역대칭 형태로 유사하게 나타났다. 80 mm 스트럿에 응력이 집중되어 Fig. 9(e)에서 SG3와 SG4, Fig. 9(f)에서 SG1과 SG2의 변형률이 큰 폭으로 변동하였다.

4. 강제슬릿댐퍼의 강성 및 내력 예측

강제슬릿댐퍼의 설계항복내력, 항복변위, 초기강성

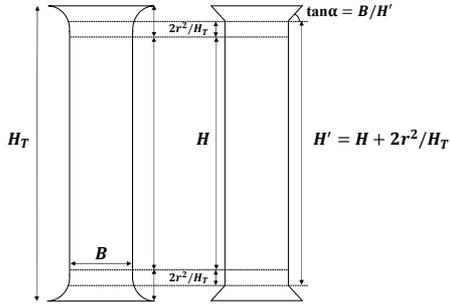


Fig. 10. Design configuration of the slit damper

및 최대내력을 산정하여 실험결과와 비교하였다. 강재댐퍼의 항복내력, 최대내력 및 항복변위는 한국면진제진협회의 제진구조 설계지침^[20]과 기존연구자^{[8],[21]}가 제시한 다음 식을 토대로 산정하였다.

Fig. 10과 같이 강재슬릿댐퍼의 스트럿 한 개에 대한 항복내력(P_{yt})과 최대내력(P_{ut})은 식 (1)과 (2)에 의해 스트럿의 휨과 전단에 의한 내력 중 작은값으로 산정하였다. 폭이 동일한 댐퍼인 CSD-W1과 CSD-W2의 경우는 구성하는 스트럿이 동시에 항복하고 한계상태에 도달하는 것으로 가정하여 스트럿 총수를 곱하여 계산하였고, 그 외 폭이 다른 조합을 갖는 댐퍼의 경우, 수평하중에 대해 각 스트럿의 강성은 각각의 폭에 대해 산정한 후 총합으로 내력을 산정하였다.

$$P_{yt} = \text{Min} \left\{ n \frac{\sigma_y t B^2}{2H}, n \frac{2\sigma_y t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (1)$$

$$P_{ut} = \text{Min} \left\{ n \frac{\sigma_u t B^2}{2H}, n \frac{2\sigma_u t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (2)$$

여기서, H 는 댐퍼의 높이, B 는 스트럿폭, t 는 댐퍼의 두께, n 은 스트럿의 개수, σ_y 는 재료항복강도, σ_u 는 인

장강도이다.

동일 폭을 갖는 강재슬릿댐퍼의 이론 항복변위(δ_{yt})는 휨에 의한 항복변형($\delta_{b,y}$)과 전단에 의한 항복변형($\delta_{s,y}$)을 합하여 구하고 폭이 다른 조합을 갖는 댐퍼의 경우는 각 스트럿이 분담하는 항복변위를 합하여 산정한다.

$$\delta_{yt} = \delta_{b,y} + \delta_{s,y} \quad (3)$$

$$\delta_{b,y} = \frac{P_y (H')^3}{nEtB^3} \left(1 + 3\ln \frac{H_T}{H} \right) \quad (4)$$

$$\delta_{s,y} = \frac{3P_y H'}{2ntBG} \left(1 + 3\ln \frac{H_T}{H} \right) \quad (5)$$

$$\delta_{yt} = \frac{1.5P_y H_T}{nEtB} \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right] \quad (6)$$

여기서, E 는 탄성계수, G 는 전단탄성계수이다.

초기강성(K_{1t})은 수평내력에 대해 각 스트럿이 병렬로 연결되어 저항하고 동일한 변형이 발생한다. 각 스트럿의 강성의 합이 전체강성으로 산정한다.

실험결과와 상기 식으로부터 계산된 댐퍼의 이론성능을 Table 4에 정리하였다. 실험체의 실험항복 및 최대내력에 대한 이론항복 및 최대내력비(P_{yc}/P_{yt} , P_{uc}/P_{ut})의 평균값은 각각 1.34, 1.40으로 현행 설계식에 의해 과소평가하는 경향을 보였으나 구조안전성 측면에서 문제는 없다고 판단된다. 항복변위가 초기강성은 실험세팅 및 가력 시 실험장치의 슬립 등의 영향으로 실험결과와 이론계산값에 의해 편차가 발생하는 것으로 나타났다. 특히, CSD-W1과 CSD-W2를 제외한 변폭 스트럿을 갖는 실험체의 경우, 전체 댐퍼의 항복내력 시점에서 전체 시스템의 항복변위는 동일하지만, 스트럿 폭과 강성이 서로 달라 각 항복내력시점에서 각 스트럿의 응력상

Table 4. Comparison of test results and theoretical predictions

Specimen	P_{yc} [kN]	P_{uc} [mm]	δ_{yc} [kN/m]	K_{1c} [kN]	P_{yt} [kN]	P_{ut} [mm]	δ_{yt} [kN/m]	K_{1t} [kN]	P_{yc}/P_{yt}	P_{uc}/P_{ut}	δ_{yc}/δ_{yt}	K_{1c}/K_{1t}
CSD-W1	106.40	198.78	1.87	56.84	81.14	132.58	1.41	57.7	1.31	1.50	1.33	0.99
CSD-W2	165.77	288.43	2.11	78.52	122.12	199.54	1.03	118.56	1.36	1.45	2.05	0.66
CSD-W3-4	123.46	192.15	2.14	57.81	83.28	136.08	2.75	30.26	1.48	1.41	0.78	1.91
CSD-W4-4	172.35	268.91	1.97	87.59	132.29	216.16	4.62	28.65	1.30	1.24	0.43	3.06
CSD-W5-4	167.91	307.62	1.85	90.92	134.69	220.08	2.28	59.18	1.25	1.40	0.81	1.54
CSD-W6	178.67	304.41	2.07	86.40	134.69	220.08	2.28	59.18	1.33	1.38	0.91	1.46

Note : P_{yt} : theoretical yield strength, δ_{yt} : theoretical yield displacement at yield strength, K_{1t} : theoretical initial stiffness, P_{ut} : theoretical maximum strength

태가 상이하다. 식 (3)에 의해 이론 항복변위(δ_{yt})는 이론 항복내력(P_{yt})시점에서 각 스트럿의 응력상태를 고려하지 않고 각 스트럿의 개별적인 항복변위를 산정한 후 합산하였기 때문에 실험항복변위(δ_{ye})보다 크게 나타났다. 상대적으로 초기강성은 작게 되어 이론 초기강성에 대한 실험 초기강성 비(K_{1e}/K_{1t})는 동일한 폭의 스트럿을 갖는 CSD-W1과 CSD-W2보다 높았다.

5. 결론

이 연구에서는 동폭 및 변폭을 갖는 강재슬릿댐퍼 실험체를 대상으로 점증변위 반복가력 실험을 수행하였고, 파단형태, 초기강성, 내력, 에너지 흡수능력 및 변형률 분포에 대한 비교 결과는 다음과 같이 도출하였다.

- (1) 반복실험 결과 동일한 스트럿폭(40 mm, 60 mm)으로 구성된 댐퍼실험체는 최대내력시점에서 동시에 스트럿 상하부에서 전단파단이 발생하였고, 다른 스트럿폭으로 구성된 실험체는 가장 큰 폭을 갖는 스트럿에 하중이 집중되어 스트럿 상하단부에서 파단되었다.
- (2) 스트럿이 전체폭은 240 mm로 동일하였지만, 최대스트럿폭이 50 mm 이하로 구성된 CSD-W1과 CSD-W3-4 댐퍼는 최대 스트럿폭이 60 mm 이상인 댐퍼에 비해 초기강성, 항복내력, 최대내력이 비해 평균 33%정도 낮게 나타났다. 이로부터 스트럿폭이 댐퍼의 초기강성 및 내력의 주요영향인 자라는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 최대스트럿폭이 50 mm 이하로 구성된 CSD-W1과 CSD-W3-4 댐퍼는 초기강성과 내력은 낮았지만, 최대내력시점에서 변형량과 최대내력이후 80%의 최대내력시점에서의 반복사이클수는 최대스트럿폭이 60 mm 이상인 실험체보다 각각 평균 28%와 최대사이클수 5.5회 높았다. 이는 50 mm 이하의 스트럿폭을 갖는 실험체에서 연성적 거동을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.
- (4) 최대 스트럿폭이 60 mm 이하인 CSD-W1, CSD-W2와 CSD-W3-4 실험체는 최대내력 80%까지 시점에서 사이클수와 큰 누적변위량으로 최대 스트럿폭이 80 mm 이상인 CSD-W4-4,

CSD-W5-4와 CSD-W6실험체보다 에너지흡수 능력은 평균 51% 이상 높은 것으로 나타났다.

- (5) 실험결과와 강재슬릿댐퍼의 항복내력과 최대내력은 기존이론식에 의해 계산된 내력보다 각각 33%, 38% 높게 나타났다. 댐퍼를 구성하는 스트럿의 강성차이와 이에 따른 이론 항복변위가 다르게 나타나는데 실험에서 댐퍼전체의 항복변위는 동일하므로 이에 대한 매커니즘을 확인할 필요가 있다.

이 연구결과로부터 스트럿폭의 구성과 배치에 따라 강재슬릿댐퍼의 이력거동이 다르게 나타난다는 것을 확인하였고 이러한 변폭 강재댐퍼와 동폭 강재댐퍼를 골조에 적용하였을 경우 골조의 거동에 어떠한 영향이 있는지 추후 조사할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 ERICA 교내 연구지원(과제번호:HY-2022-0900)과 2022년 한국연구재단 대학 창의적 자산 실용화지원(BRIDGE+)사업의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과에 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.63-88.
- [2] Whittaker, A. (1988) *An Experimental Study of the Behavior of Steel Dual Systems*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, USA.
- [3] Bergman, D.M. et al. (1987) *Evaluation of Cyclic Testing of Steel-Plate Devices for Added Damping and Stiffness*, Report UMCE, Vol. 87, No. 10, Department of Civil Engineering, University of Michigan, USA.
- [4] Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., and Su, Y.-F. (1993) Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.9, No.3, pp.505-528.
- [5] Kabori, T., Miura, Y., Fukusawa, E., Yamada, T., Arita, T.,

- Takenake, Y., Miyagawa, N., Tanaka, N., and Fukumoto, T. (1992) Development and Application of Hysteresis Steel Dampers, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, International Association for Earthquake Engineering, Spain, pp.2341-2346.
- [6] Benavent Climent, A., Oh, S.-H., and Akiyama, H. (1998) Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subjected to Shear Deformations, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Architectural Institute of Japan, No.503, pp.139-145.
- [7] Chan, R.W.K., and Albermani, F. (2008) Experimental Study of Steel Slit Damper for Passive Energy Dissipation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.30, No.4, pp.1058-1066.
- [8] 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.
- [9] Ahn, T.S., Kim, Y.J., Park, J.H., Kim, H.G., Jang, D.W., and Oh, O.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).
- [10] Kim, Y.J., Ahn, T.-S., Bae, J.-H., and Oh, S.-H. (2016) Experimental Study of Using Cantilever Type Steel Plates for Passive Energy Dissipation, *International Journal of Steel Structures*, Springer, Vol.16, No.3, pp.959-974.
- [11] Ke, K., Chen, Y., Zhou, X., Yam, M.C.H., and Hu, S. (2023) Experimental and Numerical Study of a Brace-Type Hybrid Damper with Steel Slit Plates Enhanced by Friction Mechanism, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.182, Part B, 110249.
- [12] 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 Annual Conference of Architectural Institute of Korea*, AIK, p.603 (in Korean).
- [13] Kim, T.S. (2024) *Steel Slit Damper with Varying Strut Width*, Patent No. 10-2641721, Korean Intellectual Property Office (in Korean).
- [14] Applied Technology Council (2007) *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*, FEMA 461, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [15] Korean Standards Association (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials*, KS B 0801, KSA (in Korean).
- [16] Korean Standards Association (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials*, KS B 0802, KSA (in Korean).
- [17] Hwang, B.K., Kim, T.S., Kim, Y.J., and Kim, J.W. (2022) A Comparative Study on Hysteretic Characteristics of Austenitic Stainless Steel and Carbon Steel Slit Dampers under Cyclic Loading, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.45, 103553.
- [18] Hwang, B.K., Kim, T.S., and Ahn, Y.H. (2023) Experimental Investigation of Structural Behavior of 316L Stainless Steel and Carbon Steel Slit Dampers, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.186, 110704.
- [19] Architectural Institute of Japan (2014) *Recommended Provisions for Seismic Damping Systems Applied to Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [20] Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control (2010) *Design Methodology and Application Examples of Vibration Control Structure*, Kimoon dang (in Korean).
- [21] 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.

요약: 이 연구에서는 다양한 스트럿폭의 조합을 갖는 강재슬릿댐퍼의 구조성능을 조사하기 위하여 강재댐퍼실험체를 제작하여 점 증변위 반복가력실험을 수행하였다. 댐퍼 강종(SS400), 전체높이(233 mm), 두께(14 mm) 및 스트럿폭의 총너비(240 mm)는 같게 하고 동일한 스트럿폭(40 mm, 60 mm)을 갖는 실험체와 변폭 스트럿폭을 갖는 실험체 총 6개를 계획하였다. 실험결과, 스트럿폭이 동일한 실험체는 동시에, 변폭 스트럿을 갖는 실험체에서는 가장 넓은 스트럿의 상하부 끝단에서 전단파단되었다. 최대스트럿 폭이 50 mm이던 실험체에서 초기강성과 내력은 최대스트럿폭이 60 mm이상인 실험체에 비해 평균 33% 낮게 나타났지만, 최대변위와 파단시점에서 사이클수가 커서 에너지 흡수능력은 높게 나타났다.

핵심용어: 강재슬릿댐퍼, 점증가력, 스트럿폭, 내력, 초기강성, 에너지흡수능력