

면외변형방지 강재댐퍼의 이력특성에 관한 실험적 연구

정용호¹ · 김동건^{2*}

¹석사과정, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과공학과, ²정교수, 동아대학교, ICT융합해양스마트시티공학과

Experimental Study on Hysteretic Characteristics of Steel Dampers in Restraining Out-of-Plane Deformation

Jeong, Yong Ho¹, Kim, Dong Keon^{2*}

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

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

Abstract - In this study, an OPR-SD (Out-of-Plane Restrained Steel Damper) system was proposed as a supplementary detail to prevent out-of-plane deformation in steel dampers made of carbon steel (SS275). Cyclic static loading tests were conducted on steel dampers with shape ratios of 2.3, 2.9, and 3.3, intentionally designed to observe out-of-plane deformation. To analyze the seismic performance and out-of-plane deformation restrained effects of the OPR-SD system, fracture patterns, load-displacement hysteretic curves, maximum deformation, energy dissipation, and equivalent damping ratio were examined. The experimental results confirmed that the proposed OPR-SD system demonstrates superior out-of-plane deformation restraint compared to conventional steel dampers, as well as excellent deformation resistance and energy dissipation capacity under cyclic loading.

Keywords - Steel slit damper, Out-of-Plane restrained system, Hysteretic characteristics, Cyclic static loading, Shape ratio

1. 서론

전 세계적으로 지진의 발생빈도와 규모가 증가함에 따라 지진에 의한 재산 및 인명피해도 증가하고 있다. 국내의 경우 규모 2.0이상의 연평균 지진 발생 횟수는 2011년에서 2016년까지 약 105회, 2017년에서 2022년까지 약 116회, 2023년에는 약 122회로 지진이 발생하였다^[1]. 2016년 경주와 2017년 포항에서 발생한 규모 5.0이상의 큰 지진의 발생가능성이 증대되고 있다^[2]. 이에 따라 내진설계에 대한 기준 정립 이전에 건설된 노후화 건축물은 내진성능 부족으로 지진에 의한 피해가 상당할 것으로 판단되며, 내진설계 대상에서 제외된

구조물에 대하여 내진성능 평가 및 보강이 필요하다^[3].

구조물의 내진보강 방법에는 내진, 면진, 제진구조 시스템이 존재하는데, 제진구조 시스템은 강재, 점성물질, 점탄성물질 등 다양한 재료를 사용하여 구조물의 에너지를 소산시킴으로써 지진과 같은 수평하중으로부터 구조물을 보다 안전하게 하는 내진설계 방안으로 관심이 증가하고 있다^{[4],[5]}. 제진장치 중 하나인 강재이력댐퍼는 주요 구조 부재가 항복하기 이전에 항복한 후 소성거동을 해야 하며, 이를 위해 구조물이 저항하는 지진하중에 대응하여 설계 및 제작 되어야 한다^{[6]-[8]}.

하지만 대부분의 강재댐퍼는 하중에 저항하는 방향으로의 강성을 확보하기 위해 면내방향 강성이 면외방향 강성 보다 크게 설계되는 경우가 많다^[9]. 이는 대변형과 반복적인 소성거동에 의해 강재댐퍼가 한계상태 도달하기 이전에 면외변형을 동반한 균열의 가능성이 있다^[10]. 면외변형은 강재댐퍼의 보유강도 및 강성을 저하시켜 안정적인 거동을 방해할 뿐만아니라, 전체적인 구조시스템의 저하를 유발한다^[11]. 따라서 면외변형

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 08, 2024; revised on November 28, 2024; approved on December 02, 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

을 방지 및 억제 할 수 있는 보완상세에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 강재댐퍼의 면외변형을 방지하기 위해 ㄷ자형 덧댐 플레이트와 ㄷ형강 부재를 적용한 OPR-SD (Out-of-Plane Restrained Steel Damper) 시스템을 제안한다. 각각 OPR은 면외변형방지, SD는 강재댐퍼를 의미한다. 강재댐퍼는 면외방향으로의 변형이 가능하도록 형상비를 기준으로 2.3, 2.9, 3.3으로 설계되었고, 제안된 시스템을 적용한 강재댐퍼를 대상으로 정적반복가력을 수행하였다. 실험 결과에 따른 파단 형태를 통해 시각적으로 면외변형을 방지했는지에 대해 분석하고, 하중-변위 이력곡선, 항복점, 에너지소산량, 등가감쇠비를 통해 OPR-SD 시스템의 이력특성을 분석하고자 한다.

2. 면외변형방지 시스템

본 연구에서 제안하는 면외변형방지 시스템의 상세도면은 Fig. 1과 같이 나타내었다. 강재슬릿댐퍼는 반복적인 수평하중에 대해 스트럿의 소성변형을 통해 지진에너지를 소산 시키는 역할을 한다. 제안한 시스템은 1) 강재댐퍼, 2) ㄷ자형 덧댐 플레이트, 3) ㄷ형강 부재로 구성된다.

면외변형방지(OPR-SD) 시스템은 강재댐퍼의 전면, 후면, 상부, 하부면의 4개소에 각각 설치되어, 스트럿의 중앙부 일부를 제외한 모든 면적에 대해 물리적으로 구속하는 역할을 수행한다. 2 mm의 ㄷ자형 덧댐 플레이트는 강재댐퍼의 거동을 방해하지 않기 위해 스트럿 단부와 접촉이 없도록 한다. ㄷ형강 부재는 높이 × 변이

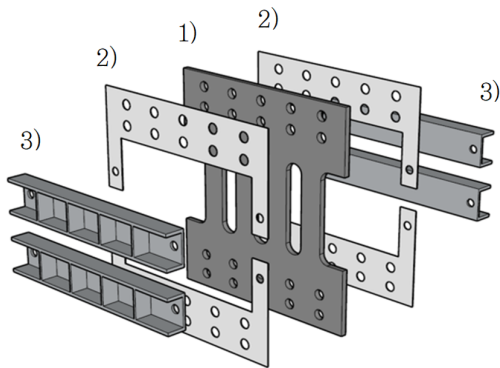


Fig. 1. Out-of-Plane restrained steel damper(OPR-SD)

75 mm × 40 mm, 길이 440 mm인 ㄷ형강을 84 mm간격으로 5 mm의 판을 용접결합한 형태다. 강재댐퍼와 ㄷ형강 부재간의 직접적인 결합을 방지하고, 강재댐퍼와 2열의 고장력 볼트를 통해 마찰접합으로 회전에 의한 기능저하를 방지한다. ㄷ형강 부재는 스트럿 단부의 응력이 집중되는 지점에 대해 물리적으로 구속하는 역할을 수행하며, 고장력볼트를 통해 ㄷ자형 덧댐 플레이트와 최소한의 결합만으로 진행된다.

3. 실험적 연구

3.1 SS275강의 재료적 특성

면외변형방지 시스템에 사용된 SS275강의 재료적 특성을 파악하기 위해 Fig. 2와 같이 시험편을 ASTM E8/E8M-24^[12] 규정에 맞게 3개의 시험편을 절취하여 인장시험을 진행하였다. 시험편의 인장시험 결과는 각 인장시험 결과의 평균치로 Fig. 3와 Table 1과 같이 나타내었다.

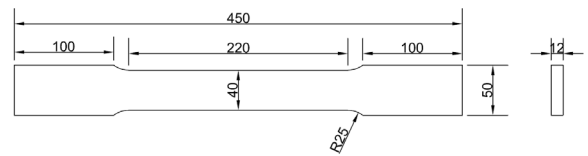


Fig. 2. Details of tensile coupon test(Unit : mm)

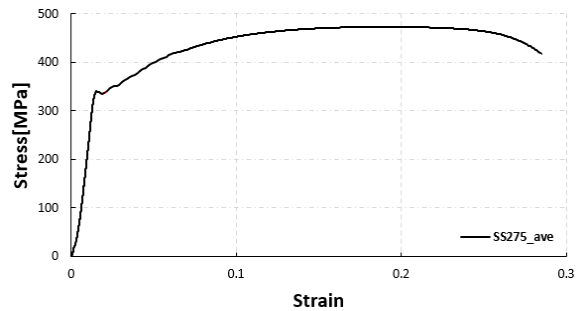


Fig. 3. stress-strain diagram

Table 1. Average results of tensile coupon tests

Materials	E [MPa]	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	EL [%]
SS275	220009	346.1	473.4	25.8

3.2 실험체 계획

본 연구에서 사용된 강재댐퍼는 제진구조 설계 지침^[13]에서 제시하는 설계식을 사용해서 설계하였다. 강재댐퍼의 항복내력($Q_{y,c}$)은 식 (1)의 휨에 의한 항복내력($Q_{b,y}$)과 식 (2)의 전단에 의한 항복내력($Q_{s,y}$) 중 최솟값을 사용하여 식 (3)을 통해 산정되었다. 항복변위($\delta_{y,c}$)는 식 (4)의 휨에 의한 항복변위($\delta_{b,y}$)와 식 (5)의 전단에 의한 항복변위($\delta_{s,y}$)를 합한 식 (6)을 통해 산정되었다. 스트럿의 형상은 Fig. 4와 같이 산정되었다.

$$Q_{b,y} = \frac{tB^2\sigma_y}{2H'} \quad (1)$$

$$Q_{s,y} = \frac{2}{3} \frac{tB\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$Q_{y,c} = n \times \min(Q_{b,y}, Q_{s,y}) \quad (3)$$

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

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

$$\delta_{y,c} = \delta_{b,y} + \delta_{s,y} \quad (6)$$

여기서, t : 댐퍼의 두께

B : 스트럿의 폭

H : 스트럿 직선부의 높이,

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

n : 스트럿의 개수

$dQ_{b,y}$: 휨에 의한 항복내력

$dQ_{s,y}$: 전단에 의한 항복내력

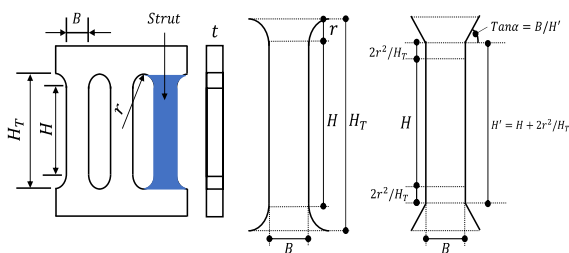


Fig. 4. Design configuration of the steel slit damper

강재댐퍼는 강판에 홀을 천공하여 발생하는 스트럿(strut)의 휨 및 전단 변형을 통해, 강판에 평행한 수평 방향의 하중에 저항하는 구조적 메커니즘을 가지고 있다. 하지만 스트럿의 높이에 대한 스트럿 폭의 비(H'/B) 즉 형상비가 약 1.3보다 커지면 휨 거동이 지배적이며 그 반대의 경우는 전단 거동이 지배한다. 일반적으로 휨 지배형으로 설계된 강재댐퍼는 전단지배형으로 설계된 강재댐퍼에 비해 변형능력이 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서, 면외방향으로 변형이 가능하도록 강재댐퍼의 형상비는 IS series(김진우 *et all.*)^[11]을 참고하여 2.3, 2.9, 3.3으로 선정하였으며, 변수의 영향

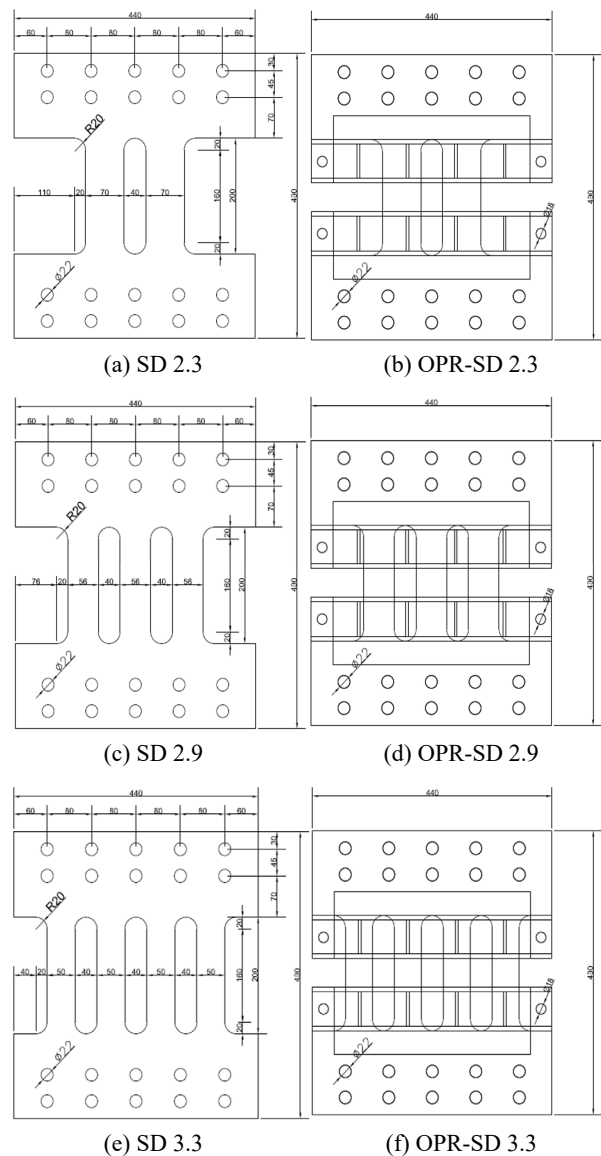


Fig. 5. Details of test specimens

을 감소시키기 위함이다. 모든 실험체에 OPR-SD 시스템을 적용하여 실험체는 총 6종류로 Fig. 5와 같이 나타내었다.

3.3 실험 방법

본 실험에서는 각 강재댐퍼의 이력특성을 평가하기 위해 Fig. 6와 같이 1,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)가 사용되었으며, 기기의 수직 방향 가력은 실험체에 휨/전단 방향의 강제변위를 부여한다. SD series와 OPR-SD series 실험체는 댐퍼를 설치하기 위해 두 개의 “L 타입”의 지그와 “T 타입”의 지그를 두 개 설치하였다. 또한, UTM과 실험체의 변위 오차를 측정하기 위해 변형률을 측정하는 스트레인게이지와 변위 측정기인 LVDT를 응력이 집중되는 가력부 스트럿 단부에 부착하였다.

정적반복가력 실험에 사용되는 가력프로토콜은 Fig. 7과 같이 나타내었으며, KDS 41 17 00: 2022 건축물 내진설계 기준^[14]을 준수하여 실험에 적용하였다. 가력프

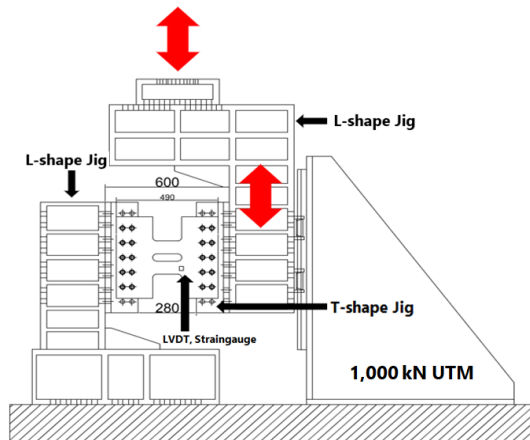


Fig. 6. Details of the specimens

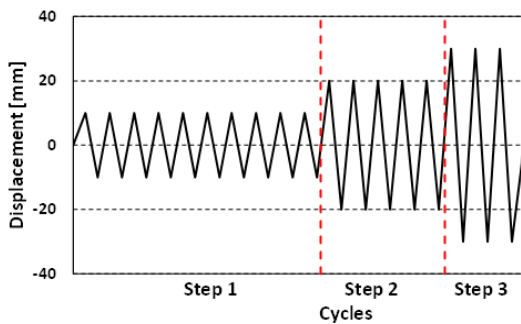


Fig. 7. Loading protocol

로토콜은 총 3개의 Step으로 구성되었으며, Step 1은 장치 최대변위의 0.33배로 10회, Step 2는 0.67배로 5회, Step 3는 1.0배로 3회 점증 변위 가력을 진행하였다. 이때, 장치의 최대변위는 층고 3.0 m를 기준으로 건축물 내진 등급 중 특등급 허용층간변위에 해당하는 1%로 설정하였다.



(a) SD 2.3



(b) SD 2.9



(c) SD 3.3



(d) OPR-SD 2.3



(e) OPR-SD 2.9

(f) OPR-SD 3.3

Fig. 8. Status of the specimens after the experiment

4. 실험 결과

4.1 파단 형상 및 하중-변위 이력곡선

실험종료 후 강재댐퍼의 파단 형상을 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 8(a)의 SD 2.3과 Fig. 8(b)의 SD 2.9는 각각 12 Cycle과 15 Cycle에 면외변형이 발생하였고 종국에는 파단이 발생하였다. Fig. 8(c)의 SD 3.3은 면외변형이 발생하지 않았지만 16 Cycle부터 균열이 발생하였다. Fig. 8(d)의 OPR-SD 2.3는 면외변형을 충분히 방지했으며, 14 Cycle에 균열이 발생하였고 17 Cycle에 파단이 발생하였다. Fig. 8(e)의 OPR-SD 2.9 경우에도 면외변형을 충분히 방지했으며 SD 2.9에 발생한 파단이 발생하지 않고 16 Cycle부터 균열만 발생했다. Fig. 8(f)의 OPR-SD 3.3 경우 SD 3.3에서 면외변형이 발생하지 않아 방지 여부를 파악하기 어렵지만, 균열의 정도가 줄어드는 것을 확인하였다. SD series를 통해 형상비가 증가함에 따라 면외변형 현상이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 제안된 OPR-SD 시스템은 면외변형을 충분히 방지하는 것으로 확인하였다.

실험결과에 따른 각 실험체의 하중-변위 이력곡선은 Fig. 9과 같이 나타내었다. 각 실험체의 주요 이력곡선은 실선으로 표현하였으며, 최대내력 이후 강도가 최대

내력의 90 % 이하로 저하되는 부분은 점선으로 나타내었다.

Fig. 9(a)의 SD 2.3과 Fig. 9(b)의 SD 2.9는 각각 면외변형이 발생한 12 Cycle, 15 Cycle에 내력저하가 발생하였다. Fig. 9(c)의 SD 3.3은 균열이 발생한 16 Cycle에 내력저하가 발생하였다. Fig. 9(d)의 OPR-SD 2.3은 균열이 발생한 14 Cycle에서 내력저하 현상이 발생하였고, 17 Cycle에 발생한 파단으로 비대칭적인 곡선을 확인하였다. Fig. 9(e)의 OPR-SD 2.9와 Fig. 9(f)의 OPR-SD 3.3은 각각 16 Cycle과 17 Cycle에 균열에 의한 내력저하 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

4.2 항복점 및 최대 변형량

실험을 통해 강재댐퍼의 항복내력, 항복변위, 탄성강성을 산정하기 위해서 골격곡선을 도출해야 한다. 골격곡선은 하중-변위 이력곡선에서 각 Cycle에서 이전 Cycle의 최대내력 이후의 하중 및 변위 점을 누적시켜 형성된 곡선이다. 항복점은 골격곡선을 통해 산정 가능하며, 다음의 설명과 같다. 첫째, Fig. 10과 같이 탄성강성(k)의 기울기를 가지며 원점을 지나는 직선을 찾는다. 둘째, 탄성강성의 1/3를 가지는 직선과 골격곡선이 만나는 점에서의 접선(Tangent Line)을 찾는다. 마지막

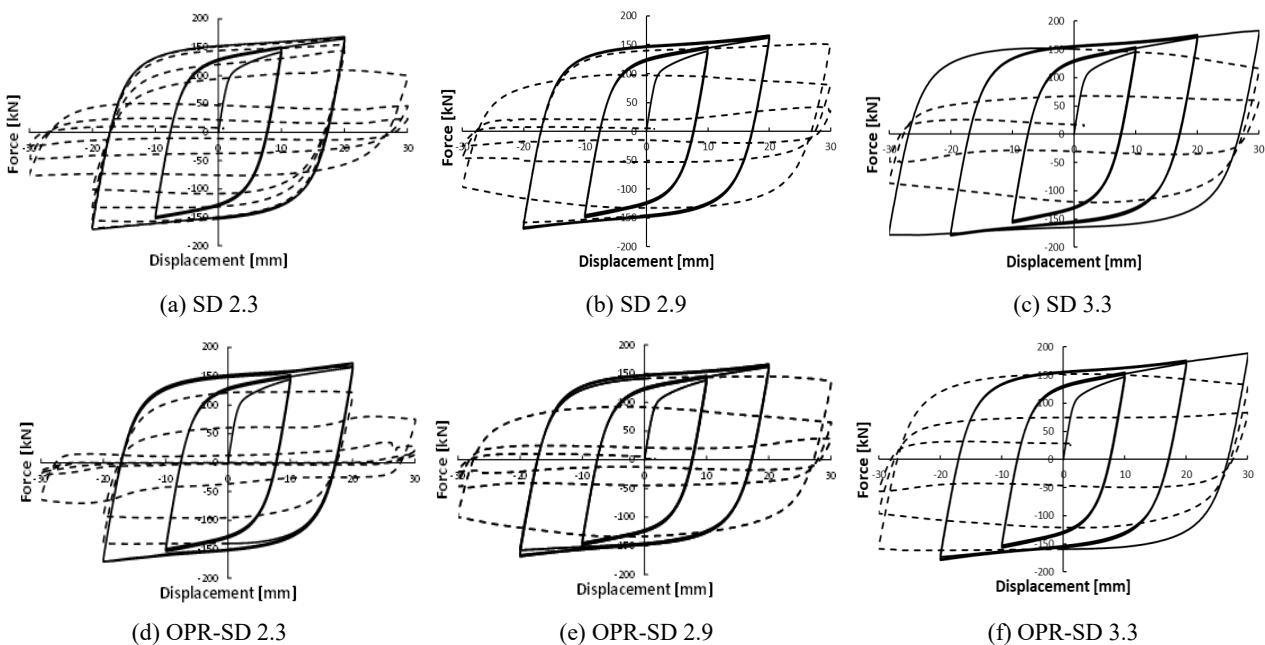


Fig. 9. Hysteretic curve

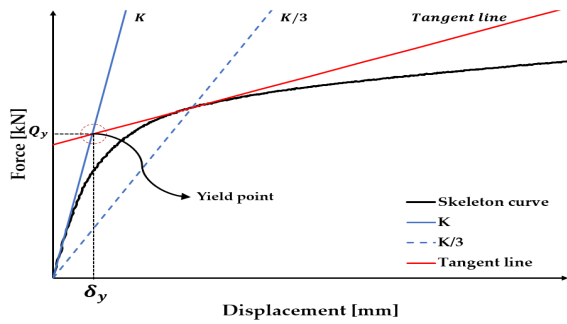


Fig. 10. Selection of yield point in skeleton curve

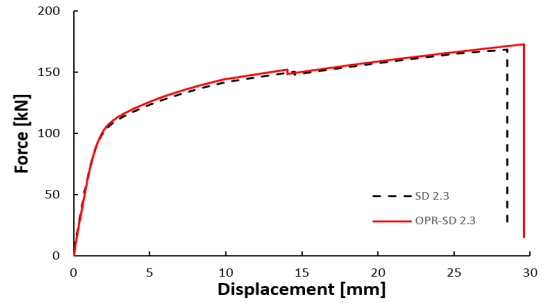
Table 2. Test results of specimens

Specimens	$Q_{y,c}$ [kN]	$Q_{y,e}$ [kN]	$Q_{m,e}$ [kN]	$\delta_{m,e}$ [mm]	$Q_{y,e}/Q_{y,c}$ [%]
SD 2.3	117.6	93.7	168.6	28.5	79.7
OPR-SD 2.3		102.4	172.8	29.6	87.1
SD 2.9	112.9	94.7	165.5	27.8	83.9
OPR-SD 2.9		99.1	166.7	28.2	87.8
SD 3.3	126.6	100.2	183.1	36.5	79.1
OPR-SD 3.3		105.3	188.9	37.1	83.2

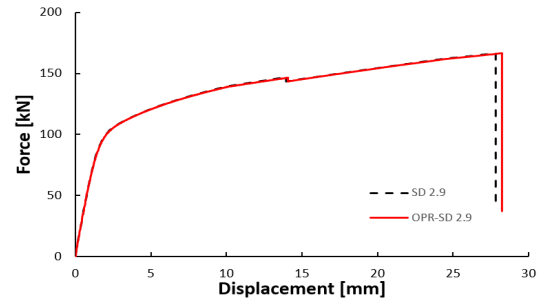
으로, 탄성강성의 기울기를 가지는 직선과 접선이 만나는 점을 항복점으로 선정하였다^[15].

각 실험체별 실험결과에 따른 항복내력($Q_{y,e}$), 최대내력($Q_{m,e}$)을 Table 2와 같이 나타내었다. 설계항복내력($Q_{y,c}$)은 실험체의 실측에 의한 수치를 토대로 계산되었다. SD series의 경우 항복내력에 대한 설계값과 실험값의 오차는 약 20 %이고, OPR-SD series의 경우 약 14 %의 수치를 보이며 보강을 진행한 경우가 높은 정확도를 보였다.

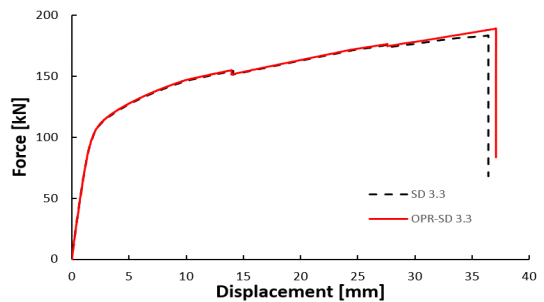
각 실험체별 실험결과는 골격곡선을 형상비에 따라 Fig. 11과 같이 나타내었다. 이는 실험결과에 따른 골격곡선으로 최대내력에 도달했을 경우의 변형량을 분석하기 위함이다. 각 형상비에 따른 그래프는 OPR-SD series와 SD series가 유사한 형상을 보이지만 최대내력과 최대내력의 도달 시점의 차이가 발생한다. 형상비 2.3과 3.3의 경우 OPR-SD series는 SD series 보다 약 3 % 높은 최대내력에 도달하였고, 2.9의 경우 약 1 % 높은 최대내력에 도달하였다. 실험에 따른 휨전단 변형이 가장 큰 형상비 2.3은 형상비 2.9, 3.3의 강재댐퍼보다 약 2배 많은 변형량을 보이며, 전체적으로 OPR-SD series가 SD series 보다 많은 변형량을 가지는 것이 관찰되었



(a) 2.3 series



(b) 2.9 series



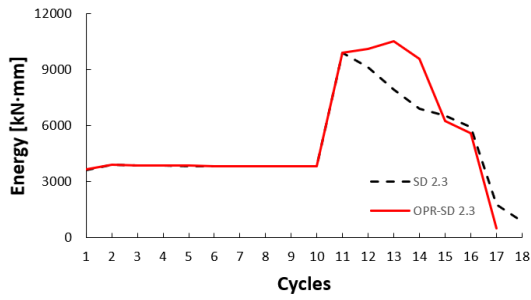
(c) 3.3 series

Fig. 11. Skeleton curve according to shape ratio

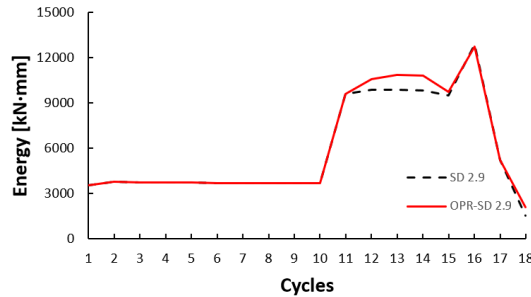
다. 이는 SD에 비해 OPR-SD의 변형능력이 우수한 결과를 보이는 것으로 판단된다.

4.3 에너지소산량

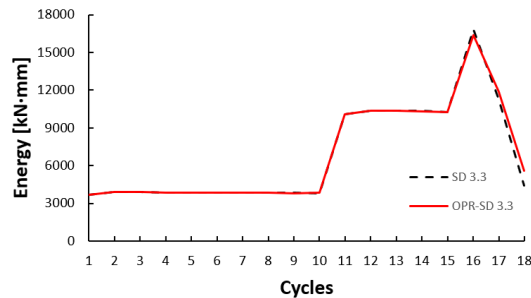
각 실험체별 실험결과에 따른 Cycle별 에너지소산량을 형상비에 따라 Fig. 12와 같이 나타내었다. 형상비 2.3의 경우 OPR-SD 2.3은 17 Cycle에서 파단이 발생했기 때문에 에너지 소산량에 포함하지 않았다. 또한, 면외변형이 가장 많이 발생한 만큼 11 Cycle과 15 Cycle 사이에 에너지소산량 차이가 큰 것을 확인하였다. 11 Cycle과 15 Cycle에서 OPR-SD 2.3이 SD 2.3 보다 약 15 % (5887.12 kN · mm) 우수한 소산능력을 보였고, 형상비 2.9의 경우는 OPR-SD 2.9가 SD 2.9 보다 약 6 %



(a) 2.3 series



(b) 2.9 series



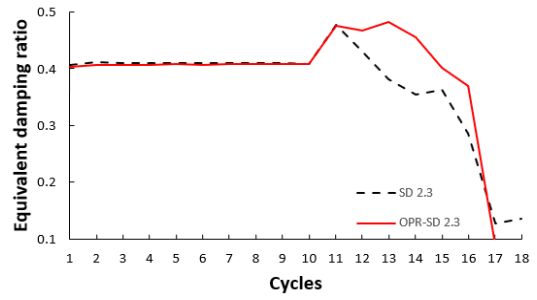
(c) 3.3 series

Fig. 12. Energy dissipation by cycles

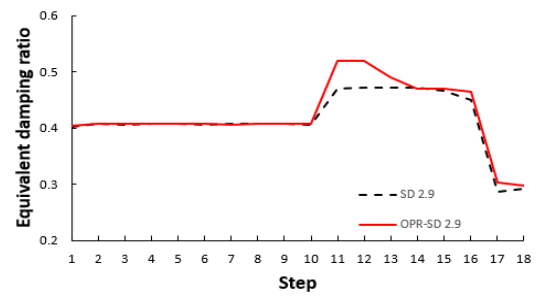
(2889.54 kN · mm) 높은 소산능력을 보였다. 면외변형이 발생하지 않은 다른 Cycle에서는 유사한 소산능력을 보였다. 형상비 3.3의 경우 SD 3.3에서 면외변형 및 파단이 발생하지 않아 OPR-SD 3.3과 에너지소산량 차이는 약 1 % (1318.56 kN · mm)인 것을 확인하였다.

4.4 등가감쇠비

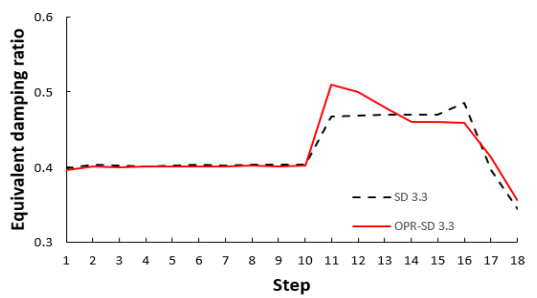
각 실험체별 실험결과에 따른 가력 프로토콜의 각 Cycle별 등가감쇠비를 형상비에 따라 Fig. 13과 같이 나타내었다. 등가감쇠비(B_{eq})는 식 (7)과 같이 탄성 위치에너지(E_{SO})와 누적 에너지 소산량(E_D)의 관계를 통해 정의된다.



(a) 2.3 series



(b) 2.9 series



(c) 3.3 series

Fig. 13. Equivalent damping ratio by cycles

$$B_{eq} = \frac{E_D}{2\pi K_{d(i)} \delta_{ave}^2} = \frac{E_D}{4\pi E_{SO}} \quad (7)$$

여기서, E_{SO} : 탄성 위치에너지

E_D : 누적 에너지 소산량

$K_{d(i)}$: 제진시스템의 유효강성

SD series의 등가감쇠비의 평균은 2.3, 2.9, 3.3에 대해 각각 0.34, 0.41, 0.43을 보이며 OPR-SD series는 0.39, 0.43, 0.44의 수치를 보인다. SD 2.3과 2.9의 전체적인 등가감쇠비는 Step 2에서 면외변형이 발생하기 때문에 감소하는 형상을 보이지만 OPR-SD 2.3과 OPR-SD 2.9는 Step 2에서 면외변형을 방지했기 때문

에 SD 대비 높은 수치를 보이며, 계속 증가하다가 면외 변형 및 균열이 발생한 시점부터 감소하는 수치를 보인다. SD 3.3와 OPR-SD 3.3 경우는 면외변형이 발생하지 않으며 균열 시점도 비슷하기 때문에 유사한 수치를 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 강재댐퍼의 면외변형을 방지하기 위한 보완상세를 제안한다. 면외방향으로 변형이 가능하도록 형상비 2.3, 2.9, 3.3인 강재댐퍼를 설계하였다. 제안된 OPR-SD series와 SD series는 정적반복가력을 통해 실험을 진행하였으며, 실험결과를 바탕으로 파단형상, 하중-변위 이력곡선, 최대변형량, 에너지소산량, 등가감쇠비를 통해 이력특성을 분석하였다. 실험결과를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 제안된 OPR-SD 시스템은 강재댐퍼의 면외변형을 효과적으로 방지하였다. 실험 결과, SD series에 비해 OPR-SD series는 내력저하가 발생하는 사이클 수가 감소하였다. 특히 형상비가 작을수록 면외변형 발생 가능성이 높고 발생 시점이 빨랐으나, OPR-SD 시스템을 적용함으로써 안정적인 기능을 수행하도록 하였다.
- (2) 실험결과 항복내력 산정에 있어 설계 항복내력 대비 SD series는 약 80 %의 정확도를 보였지만 OPR-SD series는 약 86 %의 정확도를 보였다. 이는 OPR-SD 시스템을 적용할 경우 강성이 증가할 뿐만 아니라 면외변형에 의한 항복점 오차율을 최소화하는 것으로 판단된다. 이는 OPR-SD 시스템이 강재댐퍼의 항복 이후의 변형 저항에 효과적이라는 것을 나타낸다.
- (3) 실험결과 에너지 소산능력은 OPR-SD series가 SD series보다 높게 나타난다. 따라서 OPR-SD 시스템이 강재댐퍼의 반복 하중에 대한 저항성을 높여 변형 에너지를 더 효율적으로 흡수할 수 있다는 것을 나타낸다.
- (4) 실험결과 OPR-SD series는 SD series와 비교하여 전반적으로 높은 등가감쇠비를 나타냈다. 이는 OPR-SD 시스템은 강재댐퍼의 등가감쇠비를 증

가시켜 지진하중에 대한 감쇠 성능을 개선하였으며, 이는 구조물의 내진 성능 향상과 장기적인 안정성 확보에 기여할 수 있음을 나타낸다.

- (5) 추후에는 제안된 OPR-SD 시스템에 대한 유한요소해석과 이 시스템을 적용한 강재댐퍼를 RC구조물에 적용하여 시간이력해석을 통해 내진성능 평가를 진행하고자 한다. 다양한 지진하중 조건에서 구조물의 안전성에 미치는 영향을 분석할 뿐만 아니라 제안된 시스템의 비선형 거동 특성과 에너지 소산 능력을 평가할 예정이다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

- [1] Korea Meteorological Administration (2024) Earthquake Statistics, <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/archive/stat/trend.do> (in Korean).
- [2] Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y., 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.
- [3] Oh, S.H. et al. (2011) *Development of Technologies for Improvement of Seismic Performance on the Existing Low-Rise Buildings*, NEMA-Nature-2010-32, National Emergency Management Agency (in Korean).
- [4] 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).
- [5] Dargush, G.F., and Soong, T.T (1995) Behavior of Metallic Plate Dampers in Seismic Passive Energy Dissipation Systems, *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Vol.11, No.4, pp.545-567.

- [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] 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] Suzuki, T., Motomura, S., Kinoshita, T., Inoue, Y., Kushibe, A., and Iida, T. (2023) Shape Optimization of Hourglass-Shaped Damper Using Fe-Mn-Si-Based Alloy Considering Target Load-Displacement Relationship and Target Fatigue Characteristics, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.366, 130091.
- [9] Kwon, W.K., and Kim, D.K. (2024) Evaluation of Hysteretic Behavior of Composite Steel Damper System Using the SPHC Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.3, pp.155-164 (in Korean).
- [10] Lee, B.G. (2023) *A Study on Seismic Capacity Evaluation of Existing RC Buildings Strengthened with Steel Slit Damper Restraining Out-of-Plane Deformation*, Ph.D. Dissertation, Hanyang University (in Korean).
- [11] J.-W. Kim, U.-J. Kwon, K.-Y. Choi, Y.-J. Kim, and H.-Y. Park (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).
- [12] American Society for Testing and Materials (2024) *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8/E8M-24, ASTM International, USA.
- [13] Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control (2012) *Peer-Review Guideline for Design of Structures with Damping Systems*, Kimoondang (in Korean).
- [14] Architectural Institute of Korea (2022) KDS 41 17 00 : 2022 Building Seismic Design Code, KCSC, Korea (in Korean).
- [15] Jeong, S.J. (2016) *A Study on Hysteresis Characteristics and Seismic Performance of Buckling Resistance Steel Damper*, Ph.D. Dissertation, Chosun University (in Korean).

요약: 본 연구에서는 탄소강(SS275)으로 제작된 슬릿형 강재댐퍼의 면외변형을 방지하기 위해 OPR-SD 시스템을 적용한 보완상을 제안하였다. 면외방향으로의 변형이 가능하도록 형상비 2.3, 2.9, 3.3을 가지는 강재댐퍼를 대상으로 정적반복가력 실험을 수행하였다. OPR-SD 시스템의 내진성능과 면외변형 방지 효과를 분석하기 위해 파단형상, 하중-변위 이력곡선, 최대 변형량, 에너지소산량, 등가감쇠비를 분석하였다. 제안된 OPR-SD 시스템은 기존 강재댐퍼 대비 면외변형 방지 효과가 뛰어나며, 반복 하중에 대한 변형 저항성과 에너지 소산 능력이 우수함을 확인하였다.

핵심용어: 슬릿형 강재댐퍼, 면외변형방지 시스템, 이력특성, 정적반복가력시험, 형상비
