중심가새골조의 내진성능향상을 위한 전단항복댐퍼의 개발

가마리 알리¹·정 성 훈^{2†}

¹샤리프대학교 토목공학과 조교수, ²인하대학교 건축학부 교수

Development of a Shear Yielding Steel Damper for Concentrically Braced Frames

Ali Ghamari¹ and Seong-Hoon Jeong^{2†}

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran

²Professor, Division of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

Abstract

In this study, the use of a steel yielding damper is considered as an appropriate method to enhance the behavior of CBFs and a steel damper which is economical and straightforward to construct and replace after a severe earthquake is developed. The proposed damper was investigated experimentally and numerically. In addition, a parametric study was performed to evaluate the effect of the three types of damper mechanisms (shear, shear-flexural, and flexural) on the behavior of the proposed damper. The experimental results, as well as the numerical results, indicate that the shear damper exhibits better performance than the other dampers in terms of strength and stiffness.

Keywords : steel yield damper, shear yielding, brace, hysteresis

1. 서론

건축구조물에 지진과 같이 횡하중이 작용하는 상황에서 중심가새골조(CBF; Centrally braced frame)는 모멘트저항골조 및 편심가새골조(EBF; Eccentrically braced frame)처럼 상당히 높은 횡강성과 횡강도를 발휘할 수 있다. 그러나 중심가새골조의 대각 부재는 좌굴에 취약하며, 에너지 소산 능력이 상대적으로 떨어진다(Park and Oh, 2020). 이 문제를 극복하기 위해 지난 수십 년 동안 세장비 감소(Kumar *et al.*, 2019), 구조시스템 최적화(Yang *et al.*, 2019), 댐퍼를 통한 시스템 보강(Jaisee *et al.*, 2021)과 같은 몇 가지 대안이 제시되어 왔다. 하지만, 중심가새골조 활용과 대각 부재의 거동 향상을 위해 도입된 세장비 감소와 구조 최적화는 압축 부재의 강성과 강도의 저하를 방지하는데 한계가 있다. 반복 가력 조건에서의 비선형 거동 중 강성과 강도 저하는 중심가새골조의 에너지 흡수 능력을 떨어뜨리는 주요한 원인이다. 세장비 감소를 통해 중심가새골조

시스템의 이력 곡선이 개선되더라도 압축 부재의 좌굴로 인한 에너지 흡수 능력 저하를 완전히 배제할 수 없다. 우수한 강성과 강도에도 불구하고 중심가새골조는 낮은 에너지 소산 능력으로 지진 하중에 대해 적합하지 않은 시스템으로 분류되어 왔다. 앞서 언급한 방법 중 에너지 흡수 장치는 다른 장치에 비해 성능과 경제성이 높은 것으로 알려져 있다. 에너지 흡수 장치의 사용을 통해 입력 지진 에너지의 상당량을 흡수 장치로 유도할 수 있다. 이에 따라 구조요소의 손상을 효과적으로 저감할 수 있다(Symans *et al.*, 2008). 또한 에너지 흡수 장치는 구조물에 작용하는 지진력을 감소시킨다(Hu *et al.*, 2020).

모든 능동, 준능동 및 수동 에너지 댐퍼는 일반적으로 구조물의 거동을 개선하지만, 비용을 증가시킨다(Ghadami *et al.*, 2021). 또한 능동 및 준능동 댐퍼는 수동 댐퍼보다 구성 및 설치 과정이 더 복잡하다. 구조물의 기능을 촉진시키는 수동 에너지 댐퍼는 내진 보강 기술에서 효과적인 구성 요소로 간주되며 지진이 발생하였을 때 구조적 안정성과 지진 후 일부 구조

[†]Corresponding author:

Tel: +82-32-860-7585; E-mail: jeong@inha.ac.kr

Received November 9 2021; Revised November 19 2021;

Accepted November 22 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요소의 신속한 수리 또는 교체가 가능한 점은 에너지 소산형 댐퍼를 사용하는데 있어 주요한 장점이다. 작용 하중에 저항하는 시스템의 동적 요구 성능 외에도, 높은 적용성은 실사용 환경에서 고려되어야 하는 주요한 요소이다. 여러 수동 에너지 소산 장치 중 강재 이력 댐퍼는 금속 재료의 비탄성 변형을 통해 작용된 지진 에너지를 소산시키는 효과적이고 경제적인 방법 중 하나이다. 이러한 강재 이력 댐퍼는 Fig. 1과 같이 대각 가새 부재에 대해 직접 설치하는 방식과 가새골조 시스템에 간접적으로 추가 설치하는 두 가지의 유형으로 분류할 수 있다. 가새골조 시스템에 간접적으로 설치하는 수동 강재 댐퍼는 중심가새골조 시스템의 이력 거동을 개선하기 위해 개발되었다. 선행 연구 문헌을 통해 조사된 몇 가지 사례는 다음과 같다.

a) 강판 기반 댐퍼: ADAS, TADAS, 마름모형, 단일 원형 구멍형, X자형, 슬릿형, 빗살형, 포물선형, 사전 벤딩 스트립, 곡선 강재 댐퍼 및 전단 댐퍼, 강재 기반 댐퍼는 우수한 내진성능을 보이나 제조에 높은 수준의 제작 품질이 요구된다.

b) 링크형 댐퍼: 편심가새골조(Roeder and Popov, 1978; Richards and Uang, 2005), 수직 전단 링크(Bouwkamp *et al.*, 2016; Vetr *et al.*, 2017; Vetr and Ghamari, 2019; Zahrai, 2015), 전단 댐퍼, 니브레이스, U자형 강철, 토션 빔, 테이퍼형 캔틸레버, 테이퍼형 튜브 댐퍼, J-댐퍼, 크롤러 댐퍼(Deng *et al.*, 2013) 및 쿠션 댐퍼도 실험 및 해석적 연구를 통해 검증되었다. 댐퍼의 에너지 소산 메커니즘은 강판의 기하학적 형상으로 인해 작동하는 강판의 롤-벤딩 거동에 기초한다. Deng 등(2013)의 2013년 연구에서는 U자형 강판을 활용한 크롤러 강재 댐퍼를 개발했다. 크롤러 강재 댐퍼는 두 개의 U자형 강판이 서로 마주 보고 있으며

두 개의 연결 플레이트 사이에 고정되어 있다.

상술한 댐퍼는 주로 역V형 가새골조와 바닥 보 사이에 위치한다. 대다수의 강재 기반 댐퍼는 대각 부재에 직접 설치하도록 만들어졌다. 이러한 유형의 댐퍼는 CBF 시스템에서 간접적으로 부착된 댐퍼보다 비교적 경제적이다. 이러한 범주에서 에너지 소산에 효과적인 장치는 좌굴 관련 가새(BRB), 세미 BRB, 대각 가새 부재에 부착된 U자형 댐퍼, 링 댐퍼 및 박스 댐퍼이며 일반적으로 대각 가새 부재에 직접 설치되는 형식으로 사용된다. BRB 시스템은 우수한 내진성능을 나타내었으나 제작과 설치에 특수한 시설과 장비를 필요로 하여 높은 비용이 소모된다. 링 댐퍼 및 박스 댐퍼는 연성 거동, 높은 적용성, 지진 발생 후 교체의 용이성 등 적절한 성능을 보이나 댐퍼의 좌굴 및 핀칭 효과가 발생할 우려가 있다. 전단 댐퍼는 높은 탄성 강성 및 최적의 에너지 소산 능력과 같은 특성 때문에 다른 댐퍼보다 성능이 우수하다(Wang *et al.*, 2020).

본 연구에서는 제작과 설치가 간편하고 중대한 지진 발생 후 쉽게 교체할 수 있는 개선된 전단 댐퍼를 개발하고자 한다. 제안하는 댐퍼는 대각 가새 시스템의 좌굴과 같은 불안정거동을 연성거동으로 변환한다. 앞서 언급한 바와 같이 이 댐퍼는 현재 세계적으로 활용되고 있는 ADAS, TADAS, 점성 댐퍼, 마찰 댐퍼, BRB와 같은 일반적인 댐퍼에 비해 제작이 용이하고 경제적이며 건설 현장에서 설치가 용이하다. 본 연구를 통해 제안하고자 하는 전단 댐퍼는 지상에 있는 상태에서 대각 가새 부재에 먼저 설치한 후 구조물에 설치하는 방식이다. 따라서 현장에서의 고공 작업 및 위보기 용접, 수직 용접이 필요치 않아 높은 활용성을 갖는다.

Fig. 1 Schematic locations for the installation of metallic dampers in building structures
(a) directly attached to diagonal brace (b) indirectly added to the CBF system

2. 본 론

2.1 작용 메커니즘에 따른 분류

본 연구에서 제안된 댐퍼는 두꺼운 강판 사이에서 항복 에너지 소산 메커니즘을 제공할 수 있는 끼움강판의 조합으로 구성된다(Fig. 2). 끼움강판은 댐퍼의 중심부 강봉과 외곽의 8각 테두리 강판 사이에 배치된다. 끼움강판은 댐퍼의 비틀림 방지를 위해 단면 중심축을 따라 대칭으로 배치한다. 끼움강판의 자유물체도(Free-body diagram)가 Fig. 3에 나타나 있다. 여기서, L_{db} 는 끼움강판의 단부이며 고정단 역할을 하는 두꺼운 강판과 연결되어 있는데, 이 부분은 스티프너로 보강하여 탄성상태를 유지하도록 되어있다(Fig. 2). 자유물체도로부터 힘의 평형 원리를 적용하면, $2M = Vh$ 의 관계식을 정리할 수 있다. 단면이 항복에 이르는 상태에서의 강도를 소성모멘트 $M_p = ZF_y$ 와 소성전단강도 $V_p = 0.6F_y t b$ 로 정의할 수 있다. 여기서, Z 와 F_y 는 각각 소성단면계수와 항복응력을 의미한다.

댐퍼는 끼움강판의 상세에 따라서, 전단, 휨-전단, 휨의 세 가지 거동 메커니즘으로 작동할 수 있다. 휨항복이 발생하기 전에 전단항복이 발생하도록 조합한 하중 하에서 끼움강판의 극한 전단력과 극한 모멘트는 각각 $1.5V_p$ 와 $1.2M_p$ 로 설정하였다. 이와 반대로 전단항복이 발생하기 전에 휨항복이 발생하도록 조합한 하중 하에서 끼움강판의 극한 전단력과 극한 모멘트는 각각 $0.9V_p$ 와 $1.2M_p$ 로 가정하였다. Fig. 3의 자유물체도의 평형방정식에 $V = 1.5V_p$ 와 $M = 1.2M_p$ 를 대입하고, $M_p = (th^2/4)F_y$ 로 고쳐쓰면, 끼움강판의 전단항복, 휨-전단항복, 휨항복 메커니즘 발생을 위한 조건을 각각 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

Fig. 3 Free body diagram of the damper

$$\frac{b}{h} \geq 1.5 \quad \text{shear yielding} \quad (1)$$

$$0.9 < \frac{b}{h} < 1.5 \quad \text{flexural-shear yielding} \quad (2)$$

$$\frac{b}{h} \leq 0.9 \quad \text{flexural yielding} \quad (3)$$

본 연구에서는 위의 세 가지 항복 메커니즘에 대한 끼움강판의 비선형 거동 분석을 중심으로 댐퍼의 내진성능을 조사하였다. 이를 위해 ANSYS를 이용한 비선형 유한요소해석 시뮬레이션을 수행하였고, 해석모델의 검증에 위한 끼움강판에 대한 하중 요소 실험을 수행하였다.

2.2 실험 및 해석모델의 검증

제안된 댐퍼의 거동을 분석하기 위해 두 가지 끼움강판 시편(전단 및 휨 거동)에 대한 반복하중 하중 실험을 수행하였다. 전단 끼움강판과 휨 끼움강판 시편은 길이 140mm, 높이 110mm, 두께 1.5mm의 동일한 강판으로 제작되었으나, 휨 끼움강판 시편의 경우 휨지배 거동을 유도하기 위하여 강판의 중앙을 절단하였다

Fig. 2 Schematic views and placement of the damper in frame

Fig. 4 Specimen of the shear panel and test setup

Fig. 5 Comparison of hysteresis curves of shear and bending mechanism specimens

(Fig. 4). 끼움강판에 대한 재료시험 결과 항복강도는 120MPa, 극한강도는 140MPa로 측정되었다. 실험은 AISC-16에 따라 항복변위를 기반으로 정의된 변위제어로 진행되었다.

실험 결과인 힘-변위 이력곡선(Fig. 5)로부터 전단 끼움강판 시편이 휨 끼움강판 시편에 비해서 더 많은 에너지 소산량을 보인다는 것을 관찰할 수 있다. 전단 끼움강판은 휨 끼움강판에 비해 1.18~1.62배 높은 최대강도를 보였으며, 최대강도 점을 지난 후에도 상당한 변위에 이르기까지 최대강도에 근접한 강도가 유지된다. 위에서 언급된 두 가지 시편에 대한 실험은 변위 26mm까지 진행되었고, 최대변위는 최대강도 점을 지난 후 강도가 20% 감소되는 점으로 정의하여 전단 끼움강판과 휨 끼움강판의 최대변위는 각각 26mm와 8mm로 산정되었다. 전반적으로 전단 끼움강판이 휨 끼움강판에 비해 우수한 내진성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

댐퍼의 구조 거동에 대한 매개변수연구(parametric study)를

Fig. 6 Finite element modeling and boundary conditions of the proposed damper

Fig. 7 Comparison of the experiments and finite element analyses results

위해 ANSYS를 이용한 비선형 유한요소해석이 수행되었다. 가력 지점 반대편의 댐퍼 경계 조건은 고정단으로 가정하고 Fig. 6과 같이 모든 자유도를 고정하였다. 모든 요소들은 4개 노드와 6개 자유도의 쉘요소로 구성되었으며, 요소 최적화를 수행하여 최종 2,560개의 요소로 구성된 모델을 이용하였다(Fig. 6). 댐퍼의 힘-변위 이력곡선에 대한 실험결과와 유한요소해석 결과가 Fig. 7에 비교되어 나타나 있다. Fig. 7의 비교 결과로부터 본 연구를 위한

유한요소해석 모델이 전단 및 휨으로 각각 작용하는 댐퍼의 비선형 거동을 실험결과와 매우 가깝게 예측할 수 있으며, 댐퍼의 매개변수연구에 활용되기에 충분한 신뢰도가 있음을 확인할 수 있다.

2.3 수치해석 및 거동분석

제안된 댐퍼의 매개변수연구를 위한 유한요소해석 모델의 목록과 제원이 Table 1에 정리되어 있다. 해석모델의 종류는 끼움강판의 거동 메커니즘과 좌굴 유형에 따라 나누었다. 모델 이름에서 앞부분인 M, SM, S는 각각 휨(모멘트) 메커니즘, 휨-전단 메커니즘, 전단 메커니즘을 나타낸다. 뒷부분인 P는 플라스틱 좌굴을 나타낸다. 수치해석에서 끼움강판은 항복 응력이 240MPa이고 탄성계수가 200GPa인 A36 강철로 모델링하였다.

Table 1 List of analytical models and their parameters

Model	b(mm)	t(mm)	h(mm)	n	b/h	Buckling type	Mechanism
M-P	220	3	260	4	0.85	Plastic	Flexural
SM-P	220	3	220	4	1.00	Plastic	Shear-Flexural
S-P	220	3	120	4	1.83	Plastic	Shear

유한요소해석 결과로 도출된 댐퍼의 이력곡선(Fig. 8)으로부터 끼움판의 거동 메커니즘과 좌굴 유형이 모두 댐퍼의 강도 및 에너지 소산량에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. Fig. 8의 비교로부터 전단거동 댐퍼가 다른 유형의 댐퍼에 비해 강도 및 강성 측면에서 우수한 것으로 관찰되었다. 전단거동 댐퍼는 휨거동 댐퍼에 비해서 강도가 23~59% 높으며 좌굴 유형의

Fig. 8 Hysteresis curves of the dampers

Fig. 9 Yielding mechanism and stress distribution of the shear plate in the damper

Fig. 10 Comparison of stress distribution on the dampers

영향을 작게 받는다. 이는 Fig. 9에서 보여지는 것처럼 전단거동 댐퍼의 경우 끼움판의 대각선을 가로지르는 인장역 작용이 잘 형성되어 있고, 에너지 소산 작용에 끼움판 대부분의 영역이 참여하기 때문이다.

유한요소해석 결과 도출된 끼움강판의 항복 상태 비교(Fig. 9)로부터 전단거동 끼움강판의 항복이 판의 전 영역에 걸쳐서 고르게 퍼져 있음을 볼 수 있다. 반면 휨거동 끼움강판의 항복 영역은 판의 모서리와 중앙부에 좁게 분포되어 에너지 소산량이 상대적으로 작다고 볼 수 있다. 유한요소해석에 의한 시물레이션에서 각 시편의 최종 변위 단계에서 응력 분포를 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 댐퍼의 끼움강판은 전면 항복이 발생했음에도 8각의 테두리 강판은 탄성상태를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 중심가새골조의 내진성능 향상을 위한 실용성이 높은 댐퍼 개발을 위해 전단강판의 항복거동에 대한 분석을 수행하였다. 제안된 댐퍼는 구조가 간단하여 지진 발생 시 항복에 의한 에너지 소산 메커니즘의 작동에 대한 신뢰도가 높고, 지진 발생 후 항복 부위의 교체가 쉽도록 고안되었다. 또한, 댐퍼의 끼움강판 치수를 변경함으로써 전단, 휨-전단, 휨 메커니즘을 조절하여 설계할 수 있다.

유한요소해석에 의한 비선형 거동 예측의 신뢰도를 요소 실험을 통해 검증하고, 비선형 유한요소해석을 바탕으로 댐퍼의 항복 메커니즘에 따른 구조적 거동을 분석하였다. 주요 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 비선형 유한요소해석 모델에 의한 댐퍼의 거동예측 결과는 실험 결과와 매우 가깝게 나타났으며 해석모델의 신뢰성과 거동분석에 유용함을 확인할 수 있었다.
- 2) 끼움강판에 대한 요소실험 결과와 유한요소해석에 의한 댐퍼의 비선형 거동 분석 결과에 따르면, 전단항복 메커니즘 댐퍼가 휨항복 메커니즘 댐퍼에 비해 강성, 강도, 에너지 소산 측면에서 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.
- 3) 전단항복 메커니즘 댐퍼는 휨항복 메커니즘 댐퍼에 비해 강성 및 강도가 높은 반면, 최대 변형량이 작다. 이는 작은 변위에서도 큰 에너지 소산을 가능하게 하여 지진 응답에 대한 변형이 작은 가새골조시스템의 내진성능향상에 유리하다고 판단된다. 또한, 작은 변형이나 항복 초기에 에너지 소산량을 가능한 많이 확보함으로써 구조시스템의 다른 부분에 손상이 발생할 가능성을 줄여준다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 행정안전부 재난 안전분야 연구개발사업(지역 맞춤형 재난안전 문제해결 기술개발지원)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bouwkamp, J., Vetr, M.G., Ghamari, A.** (2016) An Analytical Model for Inelastic Cyclic Response of Eccentrically Braced Frame with Vertical Shear Link (V-EBF), *Case Stud. Struct. Eng.*, 6, pp.31~44.
- Deng, K., Pan, P., Wang, C.** (2013) Development of Crawler Steel Damper for Bridges, *J. Constr. Steel Res.*, 85, pp.140~150.
- Ghadami, A., Pourmoosavi, G., Ghamari, A.** (2021) Seismic Design of Elements Outside of the Short Low-Yield-Point Steel Shear Links, *J. Constr. Steel Res.*, 178, 106489.
- Hu, S., Wang, W., Qu, B.** (2020) Seismic Evaluation of Low-Rise Steel Building Frames with Self-Centering Energy-Absorbing Rigid Cores Designed using a Force-Based Approach, *Eng. Struct.*, 204, pp.110~138.
- Jaisee, S., Yue, F., Ooi, Y.** (2021) A State-of-the-Art Review on Passive Friction Dampers and Their Applications, *Eng. Struct.*, 235, pp.112~122.
- Kumar, M., Senthilkumar, R., Sourabha, L.** (2019) Seismic Performance of Special Concentric Steel Braced Frames, *Struct.*, 20, pp.166~175.
- Park, H., Oh, S.** (2020) Structural Performance of Beam System with T-Stub Type Slit Damper, *Eng. Struct.*, 205, 109858.
- Richards, P.W., Uang, C.M.** (2005) Effect of Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity, *J. Struct. Eng.*, 131(10), pp.1546~1552.
- Roeder, C.W., Popov, E.P.** (1978) Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquakes, *J. Struct. Div.*, 104(3), pp.391~412.
- Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., McNamara, R.J.** (2008) Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments, *J. Struct. Eng.*, 134(1), pp.3~21.
- Vetr, M.G., Ghamari, A.** (2019) Experimentally and Analytically Study on Eccentrically Braced Frame with Vertical Shear Links, *Struct. Des. Tall & Spec. Build.*, 28, pp.15~87.
- Vetr, M.G., Ghamari, A., Bouwkamp, J.** (2017) Investigating the Nonlinear behavior of Eccentrically Braced Frame with Vertical Shear Links (V-EBF), *J. Build. Eng.*, 10, pp.47~59.
- Wang, C., Qing, Y., Wu, Y., Wang, J., Gu, Z.** (2020) Analytical

and Experimental Studies on Buckling-Restrained Brace with Gap-Supported Tendon Protection, *J. Constr. Steel Res.*, 164, 105807.

Yang, T.Y., Sheikh, H., Tobber, L. (2019) Influence of the Brace Configurations on the Seismic Performance of Steel Centrally Braced Frames, *Front. Built Environ.*, 5, pp.1~27.

Zahrai, S.M. (2015) Cyclic Testing of Chevron Braced Steel Frames with IPE Shear Panels, *Steel & Compos. Struct.*, 19 (5), pp.1167~1184.

요 지

본 논문에서는 중심가새골조의 내진성능 향상을 위한 전단항복 댐퍼의 개발을 수행하였다. 실용성이 높은 댐퍼의 개발을 위해서 구조적 간결성과 내진성능의 신뢰도에 중점을 둔 상세를 제시하기 위해 노력하였다. 지진 발생 시 에너지 소산 메커니즘에 대한 신뢰도가 높고, 지진 발생 후 항복 부위의 교체가 쉬운 형태로 고안되었다. 댐퍼의 끼움강판 치수를 변경함으로써 전단, 휨-전단, 휨 메커니즘을 조절하여 설계할 수 있다. 비선형 유한요소해석을 통해서 댐퍼의 항복 메커니즘에 따른 구조적 거동을 분석하였고, 전단항복 메커니즘 댐퍼가 휨항복 메커니즘 댐퍼에 비해 강성, 강도, 에너지 소산 측면에서 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 강재이력댐퍼, 전단항복, 가새, 이력거동