

케이블과 도르래를 이용한 변위증폭형 감쇠시스템의 실험적 성능평가

Experimental Performance Evaluation of Displacement Amplification Damping Systems Using Cables and Pulleys

오진탁¹⁾ · 정인용²⁾ · 류재호^{3)*}

Oh, Jintak¹⁾ · Jung, In Yong²⁾ · Ryu, Jaeho^{3)*}

¹⁾한국시설안전공단 차장, ²⁾(주)테크스퀘어 내진설계본부장, ³⁾(주)테크스퀘어 기술연구소장

¹⁾Senior Manager, Korea Infrastructure Safety Corporation, ²⁾Division Director, Earthquake Resistant Design Dept., TechSquare Co., Ltd, ³⁾Head of Technical Research Center, TechSquare Co., Ltd

/ A B S T R A C T /

The vibration control device such as the damper can be used to reinforce the seismic performance of structures. The damper is activated by the deformation of structures during earthquake; however, the deformation of structures is extremely small, causing difficulty in using the damper. Therefore, there is a need for a method capable of amplifying small deformities and transmitting them to the damper. The purpose of this paper is to develop and evaluate a displacement amplification seismic system using cable-pulley. The appropriate cable was selected through a cable tensile performance test and the results of the frame experiment were compared with theoretical displacement amplification ratio values. As a result, it may be said that the proposed system using cable-pulley is useful for displacement amplification.

Key words: Cable, Pulley, Displacement amplification, Damping system, Steel wire

1. 서론

우리나라는 그동안 판구조 이론에 의해 환태평양 조산대에 위치한 미국 서부와 일본에 비하여 비교적 지진으로부터 안전한 국가라고 인식되어 왔으나 최근 발생한 경주지진(규모 5.8)과 포항지진(규모 5.4)으로 인해 내진 성능 확보에 대한 국민적 관심이 증가하고 있다.

내진설계가 되지 않은 기존 건축물의 내진성능을 향상시키기 위한 방법으로 건축물이 보유한 강도, 강성, 연성과 같은 성능을 향상시키는 방법과 제진장치를 통해 건축물의 감쇠 능력을 향상시켜 건물에 발생하는 응답을 감소시키는 방법이 있다(Fig. 1)[1]. 이때, 진동 제어를 위해 사용되는 장치의 구성요소에 따라 점성댐퍼, 마찰댐퍼, 이력댐퍼 등으로 구분 지을 수 있으며[2-4], 적용 건물의 다양한 조건에 따라 적합한 장치를 선택할 수 있다.

감쇠장치를 통한 내진보강 시, 설치된 감쇠장치의 효율은 장치로 입력되는 변위와 그에 따른 장치의 저항력(또는 하중)으로 형성되는 면적에 비례

한다. 따라서 해당 면적이 클수록 많은 에너지를 소산하여 구조물의 응답을 줄일 수 있다(Fig. 2). 그러나 건축구조물 내진설계 기준 상 구조물에 허용되는 층간변위각은 2% 수준으로 크지 않아 설치된 감쇠장치의 성능을 충분히 활용하기에 제한적이며, 그 효율을 높이기 위해 설치되는 감쇠장치의 개수를 늘리거나 용량을 키워야 하는 단점이 있어 왔다. Fig. 3과 같이, 대각 가새형으로 골조 내부에 감쇠장치를 설치할 경우 감쇠장치의 작동 변위는 가새의 기울기에 따라 골조 층간변위의 약 80~90%밖에 되지 않게 된다.

설치된 감쇠장치의 이러한 저효율 문제를 극복하기 위해 고안된 것이 바로 변위증폭형 감쇠시스템이다. 가장 대표적인 것이 토글형 감쇠시스템으

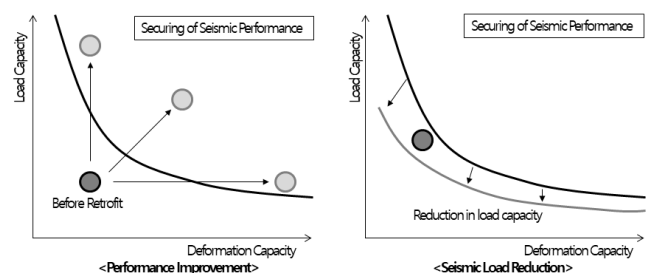


Fig. 1. Methods for improving seismic performance

*Corresponding author: Ryu, Jaeho

E-mail: jryu@techsq.co.kr

(Received February 7, 2020; Revised April 22, 2020; Accepted April 22, 2020)

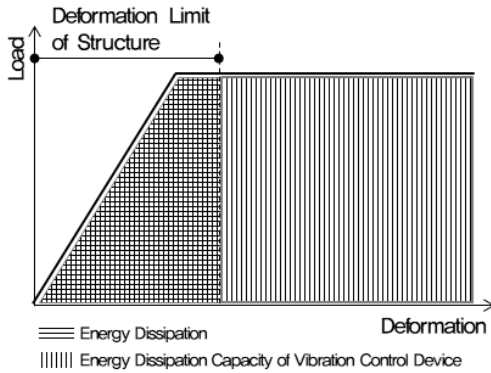


Fig. 2. Load-displacement curve and energy dissipation capacity

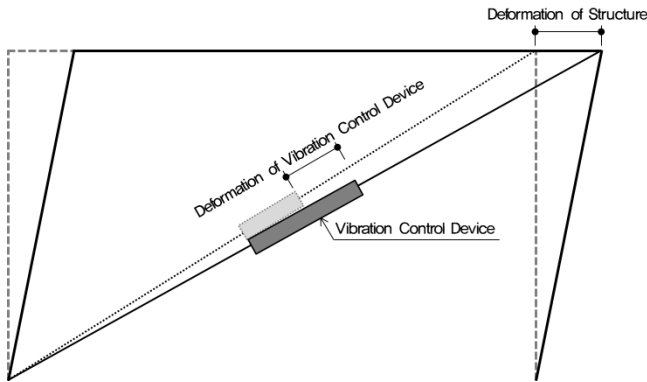


Fig. 3. Operation principle of vibration control device

로 골조 내부에 토글 형상으로 설치된 가새의 기하 특성에 근거하여 일반 대각가새 타입보다 2배에서 3.5배에 이르는 변위 증폭을 얻을 수 있다[5-7]. 또 다른 변위증폭형 시스템으로 피봇형 변위증폭 시스템이 있다[8]. 이는 피봇형 힌지와 프레임의 회전을 이용하여 감쇠장치의 변위를 증폭시키는 원리에 기반한 것으로 기존 V형 가새 시스템과 비교하여 약 2배의 증폭효과가 있는 것으로 연구 결과 나타났다. 그러나 본 시스템들 역시 실제 시공 시 발생하는 접합부들의 공차 등을 감안한다면 이론적으로 기대되는 성능보다 다소 작은 증폭효과가 발생하는 한계가 있다.

본 연구에서는 움직도르래와 케이블의 작동 원리에 근거한 새로운 개념의 변위증폭 시스템에 대해 소개하고, 해당 감쇠시스템의 작동원리와 그 효용성에 대해 실험적인 성능 평가를 통해 확인해 보고자 하였다.

2. 케이블-도르래 조합형 감쇠시스템의 원리

Fig. 4는 움직도르래의 원리를 나타낸 그림이다. 4번 조합의 경우 100 N의 물체를 10 cm 들어올리기 위해서 25 N의 힘으로 40 cm를 당겨야 한다. 이때 작용점과 힘점에서의 에너지는 $1,000 \text{ N}\cdot\text{cm}$ 로 동일한데, 이 원리를 역으로 활용하여 건축물의 횡변위를 힘점에 적용시키면 변위가 증폭되어 작용점으로 전달되므로 작용점에 감쇠장치를 설치하면 증폭된 변위로 장치의 성능을 충분히 이끌어 낼 수 있다.

힘력에 의해 건물에 전단변형이 발생하면 전단각이 줄어들드는 대각방향에 마주보고 설치된 도르래는 거리가 멀어지고 해당 대각선 방향으로 감겨 있던 케이블은 그 거리 차이만큼을 보상하기 위해 움직이게 된다. 이때 발생

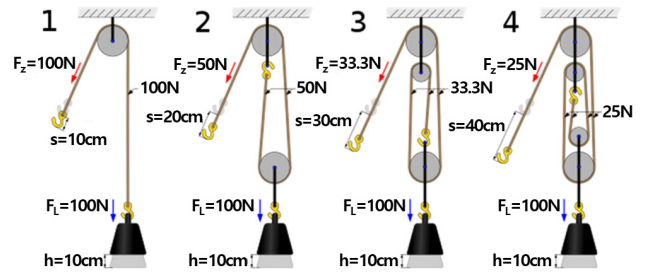


Fig. 4. Principle of moving pulley

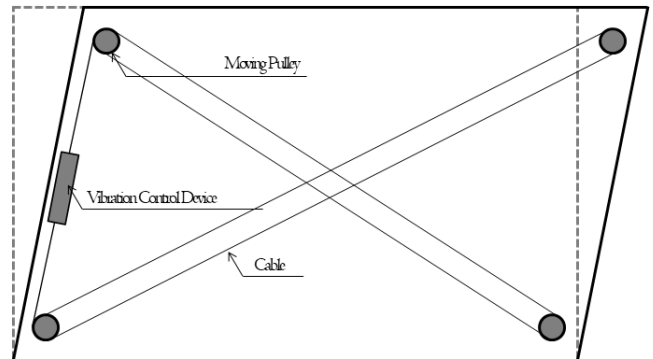


Fig. 5. Principle of proposed damping system

한 변위를 감쇠장치로 전달을 하여 변위를 증폭시킨다(Fig. 5). Fig. 4에서 움직도르래의 개수에 따라 작용점에서 움직여야 하는 변위량이 달라지는 원리처럼 Fig. 5에서도 각 모서리에 설치되는 도르래의 개수를 늘려 대각선 방향으로 감기는 케이블의 횡수 변화시킴으로써 댐퍼에 전달되는 변위의 증폭량을 조절할 수 있다. 만약 전단변형이 반대방향으로 발생할 경우, 앞서 기술된 방향으로 감긴 케이블은 하중에 저항하지 못하게 된다. 따라서 Fig. 5에 나타난 것과 같이, 전단변형이 어느 방향으로 발생하더라도 케이블의 인장력으로 감쇠시스템이 작동할 수 있도록 X형으로 케이블을 배치하는 것이 필요하다.

제안된 감쇠장치의 변위 증폭비는 골조의 대각선 방향으로 위치하는 도르래 사이를 연결하는 강와이어 케이블의 개수, n 에 케이블의 설치 각도를 고려한 코사인 값을 곱하여 산정할 수 있다(즉, $n \cdot \cos \theta$). 예를 들어, 골조의 스패인이 5 m이고 높이가 3 m 일 경우, 대각 방향으로 감긴 케이블의 개수가 3 개라면 해당 감쇠시스템의 증폭 비율은 2.57배가 된다. 또한, 동일하게 케이블을 5개, 7개로 연결한 경우 각각의 증폭비는 4.29배, 6.00배로 증가한다. 이러한 특징 때문에, 설계자가 원하는 증폭비만큼 댐퍼에 입력되는 변위를 증가시킬 수 있다는 점이 본 시스템의 장점 중 하나라 할 수 있다.

3. 케이블 성능 실험

본 시스템의 성능 실험에 사용할 케이블을 선택하기 위해 Fig. 6과 같이 KSD 3514 규격에 의거한 로프심(7×7 , 기호 IWRC)이 들어가고 필러형 25 개 강선이 스트랜드(6개)를 구성하는 IWRC $6 \times \text{Fi}(25)$, 워링된 실형 36 개 강선이 6코임으로 들어가고 가운데 로프심이 있는 IWRC $6 \times \text{WS}(36)$, 그리고 7개선 18코임(18×7)의 헤라클레스의 인장성능 실험을 수행하였다[9].

인장실험 결과 케이블을 구성하고 있는 스트랜드(strand)는 물론, 스트

랜드 내 강와이어(steel wire)까지 일체로 꼬여있던 부분들이 절단과 함께 풀려나오며 최종 파괴되었으며, Fig. 7의 하중-변형률 그래프에서 확인할 수 있듯이 인장력이 가해질 때 케이블의 거동은 크게 3단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 단계는 케이블의 강성이 안정화되는 단계로 꼬여 있는 강선 및 스트랜드들이 인장력 하에서 공극을 메우며 소정의 강성을 발현할 수 있도록 정착이 되어가는 과정을 거친다. 두 번째 단계는 안정화된 케이블이 인장 저항력을 발현하며 선형적인 하중 증가를 나타낸다. 마지막 단계에서는 파단이 발생할 때까지 강선의 소성변형과 함께 비선형적인 하중-변형률 곡선이 나타나는 구간이 형성된다.

본 연구에서는 이러한 케이블의 인장 특성을 감안하여 감쇠장치에 달린 케이블이 작동할 때, 감쇠장치의 저항력에 의해 추가적으로 발생하는 케이블의 탄성변형을 최소화할 수 있도록 고려해야 한다. 이를 달성하기 위해, 최소한 케이블 강성의 안정화단계 이상의 하중으로 초기 긴장력을 도입하는 것이 필요하다. 또한, 안정화 단계 이후 형성되는 선형구간의 기울기와 감쇠장치 하중에 의해 케이블에 추가로 발생하는 인장력의 크기를 바탕으로 케이블-도르래 감쇠시스템 작동 시 케이블에 발생하는 추가 탄성변형을 계산할 수 있으며, 이를 통해 감쇠장치에 증폭되는 변위의 감소효과를 평가할 수 있다.

Table 1는 케이블 종류별 인장실험 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 해당 실험 결과로부터 확인할 수 있듯이, 케이블의 지름이 증가할수록 강성이 안정화되었을 때의 하중에 대한 변형 강성이 더 높게 나타났다. 또한, 실험

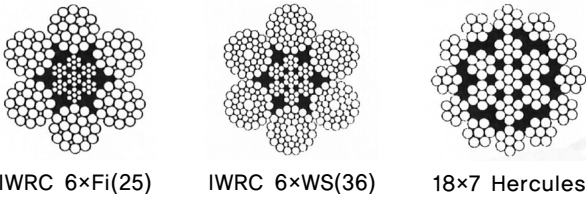


Fig. 6. Cables for tensile test

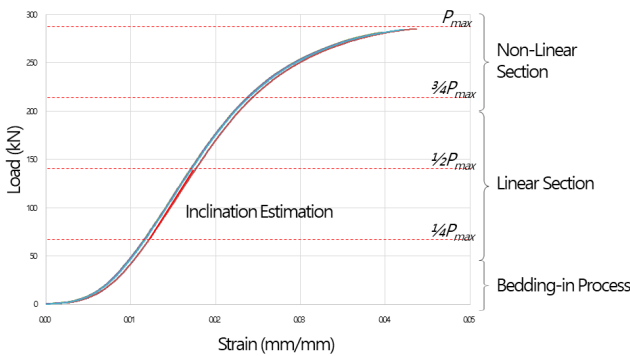


Fig. 7. Tensile load-strain curves of cables

Table 1. Results of cable tensile test

	18x7 Hercules	IWRC 6xFi (25)		IWRC 6xWS (36)			
Diameter (mm)	16	16	20	25	25	28	30
Maximum load (kN)	190.4	193.6	281.2	508.9	504.4	537.1	608.7
Stiffness (kN/(mm/mm))	7,777	8,027	13,347	19,229	15,723	15,577	17,712

체 종류별로 보면, IWRC 6xFi(25) 제품군이 IWRC 6xWS(36) 제품군보다 더 높은 강성을 가지는 것으로 확인되었다.

케이블의 인장 실험 결과를 바탕으로, 실제 케이블-도르래 감쇠시스템에 적합한 케이블로 IWRC 6xFi(25) 제품군을 사용하는 것이 케이블의 탄성변형에 의한 증폭비를 저감 효과를 완화시키는데 더 적절할 것으로 판단된다.

4. 케이블-도르래 조합형 감쇠시스템 프레임 실험

4.1 실험계획

4.1.1 실험체 형상

본 연구에서는 댐퍼의 설치 유무에 따른 제안된 감쇠시스템의 작동메카니즘 변화 및 설치된 댐퍼가 시스템 작동에 미치는 영향을 실험적으로 확인

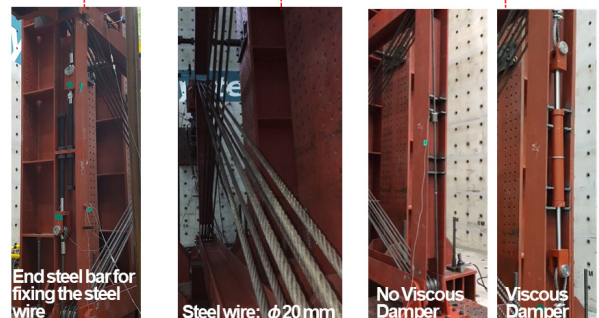
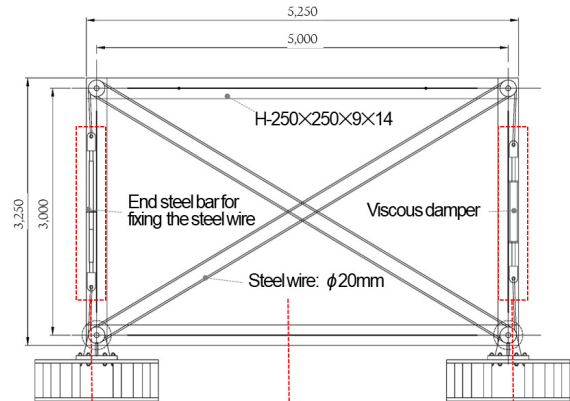
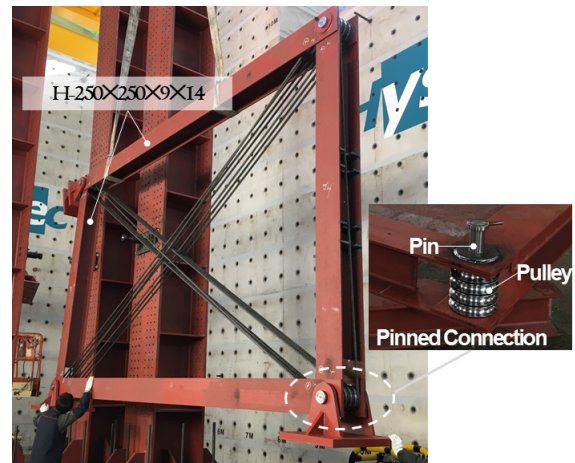


Fig. 8. Specimens details

하고자 하였다. 이를 위해 Fig. 8과 같이 형강 H-250×250×9×14을 이용하여 강재 프레임 제작하였으며, 기둥과 보의 접합부는 핀으로 연결하여 회전성에 대해 자유롭게 움직일 수 있게 하였다. 해당 골조의 크기는 기둥 사이 경간이 5 m, 층고는 3 m로 계획되었다.

핀 접합부에 사용된 도르래의 지름 크기는 200 mm이며, 그 중심부에 지름 60 mm 크기의 핀이 삽입될 수 있도록 구멍을 가공하였다. 또한 케이블이 도르래와 작동 중에 바깥으로 벗어나지 않게 도르래에 20 mm 깊이의 홈을 팠다.

댐퍼에 하중을 전달하기 위한 강와이어 케이블은 앞선 재료 성능 실험 결과에 근거하여 IWRC 6×Fi(25) 제품을 사용하였으며, 작업성 등을 고려하여 지름 20 mm인 케이블을 선택하였다. 앞서 제작된 골조에 대각선 방향으로 케이블을 총 7회 반복하여 감은 후 양 끝단을 각각 프레임과 댐퍼에 고정시켰다.

본 실험에 사용된 감쇠장치의 경우, 변위 증폭 효과를 감안하여 최대 ±300 mm의 스트로크로 거동이 가능한 13 kN급 속도의존형 점성댐퍼를 사용하였다. 감쇠시스템에 적용 전에 해당 감쇠장치의 성능을 확인하기 위해서 사전 성능평가 실험을 실시하였으며, 이를 통해 댐퍼의 작동 힘 (F_d)과 속도 (V_d) 사이의 관계를 식 (1)과 같이 정의하였다. 본 경험식에 근거하여 댐퍼의 작동 속도를 정확히 파악할 수 있다면 그에 따른 댐퍼에 의해 발생하는 힘도 정확히 추정할 수 있다.

$$F_d = 6 V_d^{0.16} \tag{1}$$

3장의 케이블 성능 실험에서 확인하였듯이 케이블-도르래 조합형 감쇠시스템이 원활하게 작동하기 위해서는 케이블의 탄성변형을 최소화해야 하며 이를 위해 안정된 강성을 확보할 수 있도록 초기 긴장력을 케이블에 도입해야 한다. 본 실험에서는 체인 블록을 이용하여 케이블에 10-15 kN의 초기 긴장력을 도입하였으며, 긴장력이 유지될 수 있도록 단부에 핀이 설치된 강봉을 골조 기둥에 설치하였고 이를 잡아당긴 후 너트를 조여 케이블을 고정하였다.

4.1.2 실험 셋업

Fig. 9은 실험체 셋업을 나타낸 것이다. 1,000 kN 성능의 액츄에이터를 이용하여 실험체에 하중을 가력하였으며, 가력 시 실험체의 면외방향 변위를 제어하기 위해 골조 상단 보 측면에 횡방향 지지물을 설치하였다.

Fig. 10에 하중 프로토콜을 정리하였다. 하중은 정현파(Sine wave) 형태로 가력주파수를 0.1 Hz로 고정하여 골조의 왼쪽 상단부 접합부에서 가력하였다. 하중 스텝은 총 9단계이며, 매 스텝별 5회 반복가력 하였다. 이때, 매 하중 스텝별로 일정한 주파수 하에서 가력변위를 증가시켰기 때문에 실제 최대가력속도는 스텝이 진행될수록 증가하게 된다. 본 실험에 설치된 감쇠장치는 속도 의존형 점성댐퍼로 이를 통해 속도 의존형 점성댐퍼가 전체 감쇠시스템의 거동에 어떠한 영향을 미치는지 동시에 확인할 수 있다.

제한된 변위 증폭 시스템에 의해 가력 변위 대비 감쇠장치에 발생하는 변위의 비를 확인하고자 선형 가변 변위 변환기(linear variable displacement

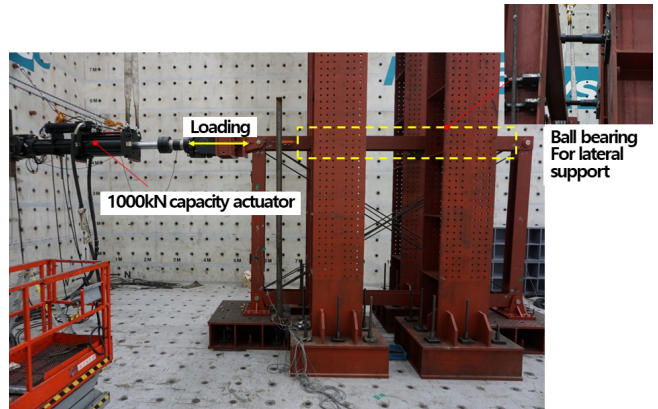


Fig. 9. Specimens set-up

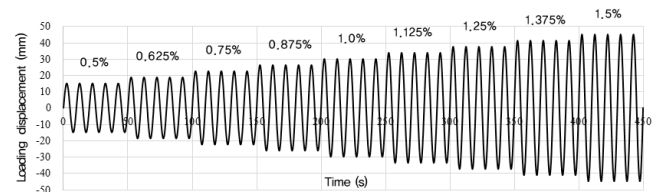


Fig. 10. Loading Protocol

transducer)를 설치하였다. 또한, 케이블에 발생하는 축력의 변환을 확인하기 위해 기둥에 고정된 강재 바에 스트레인 게이지를 설치하였다.

4.2 실험 결과 및 분석

4.2.1 변위증폭 메카니즘 분석 및 효과

Fig. 11에 본 연구에서 제안된 감쇠시스템의 변위증폭 메카니즘을 정리하였다. 이론적으로 본 감쇠장치의 변위와 증간변위 사이의 관계는 그림 Fig. 11에서 점선으로 나타낸 것과 같이 선형적인 관계를 나타내야 한다. 그러나 케이블 안정화를 위해 초기에 도입한 긴장력 때문에 도르래와 그

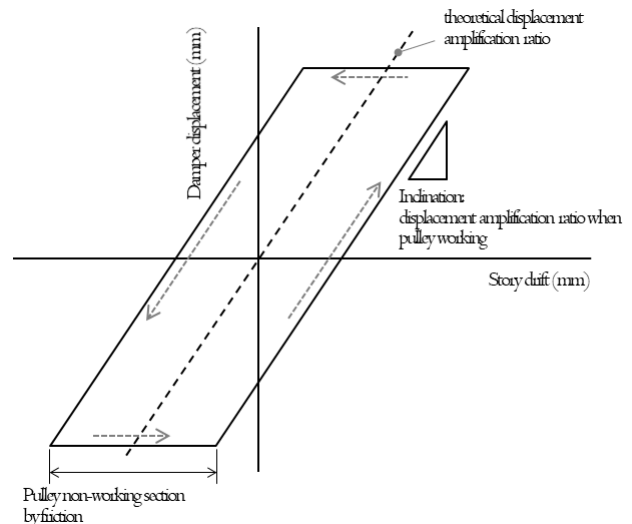


Fig. 11. Displacement amplification mechanism of system

Table 2. Displacement amplification ratio of specimen W/O damper

Specimen		Test specimen W/O damper						
Step	Drift	Displacement at the point where damper will be installed			Displacement amplification ratio	Displacement amplification ratio when pulley working		
		+	-	Average		+	-	Average
1	15.0	79.8	-47.1	63.5	4.23	5.91	5.92	5.92
2	18.8	100.9	-66.0	83.5	4.45	5.82	5.90	5.86
3	22.5	123.3	-87.8	105.6	4.69	5.87	5.83	5.85
4	26.3	144.9	-109.9	127.4	4.85	5.82	5.77	5.80
5	30.0	165.9	-132.6	149.2	4.97	5.84	5.85	5.85
6	33.8	187.5	-154.8	171.2	5.07	5.80	5.87	5.84
7	37.5	210.3	-176.9	193.6	5.16	5.86	5.89	5.88
8	41.3	232.5	-200.1	216.3	5.24	5.87	5.91	5.89
9	45.0	253.5	-223.4	238.4	5.30	5.86	5.93	5.90
Total Average					4.89			5.86

Table 3. Displacement amplification ratio of specimen With damper

Specimen		Test specimen With damper						
Step	Drift	Displacement of damper			Displacement amplification ratio	Displacement amplification ratio when pulley working		
		+	-	Average		+	-	Average
1	15.0	40.7	-35.8	38.3	2.55	5.23	5.16	5.20
2	18.8	61.6	-57.7	59.7	3.18	5.51	5.68	5.60
3	22.5	83.3	-80.5	81.9	3.64	5.94	5.87	5.91
4	26.3	103.8	-102.8	103.3	3.93	5.79	5.98	5.89
5	30.0	124.8	-125.5	125.2	4.17	5.80	5.96	5.88
6	33.8	146.2	-147.6	146.9	4.35	5.83	5.93	5.88
7	37.5	167.5	-168.1	167.8	4.48	5.91	5.89	5.90
8	41.3	185.1	-189.9	187.5	4.55	5.84	5.82	5.83
9	45.0	201.0	-212.6	206.8	4.60	5.85	5.84	5.85
Total Average					3.94			5.77

부에 설치된 핀 사이에 높은 마찰력이 작용하게 되고 이로 인해 가력 초반 횡력에 의해 프레임에 발생하는 전단변형이 그대로 도르래 작동으로 이어지지 않는 지연현상이 발생하게 된다. 이러한 지연현상 때문에 층간변위와 댐퍼의 작동변위 사이에 실선으로 나타난 바와 같이 한쪽으로 기울어진 평행사변형 형상의 그래프가 나타나게 된다.

도르래가 작동하지 않고 멈춰 있는 동안 프레임의 변형은 케이블의 탄성 변형으로 흡수된다. 케이블에 의해 대각 방향으로 연결된 도르래 사이의 거리가 멀어지면서 케이블 내 발생하는 인장력이 커지고, 그 크기가 도르래와 핀 사이의 정지마찰력을 넘어서는 순간부터 도르래의 회전이 진행되게 된다. 이러한 지연현상 때문에 실질적인 댐퍼의 작동변위는 이론값보다 감소하게 되는 특징이 나타난다.

Tables 2, 3 및 Fig. 12에 실험체 별 층간변위 대비 감쇠장치 변위의 증폭비를 나타내었다. 도르래의 정지마찰력으로 도르래가 움직이지 않고 있을 때 댐퍼가 설치되지 않은 실험체에서 감쇠장치 설치 부위의 변위 증가율은 하중스텝 1에서 9까지 4.23배에서 5.3배까지 증가하였으며 감쇠장치가 설치된 실험체에서는 2.55배에서 4.6배까지 하중스텝이 증가할수록 커지는 경향을 나타냈다. 각 스텝별로 확인된 변위증폭비의 평균값을 감쇠장치 설

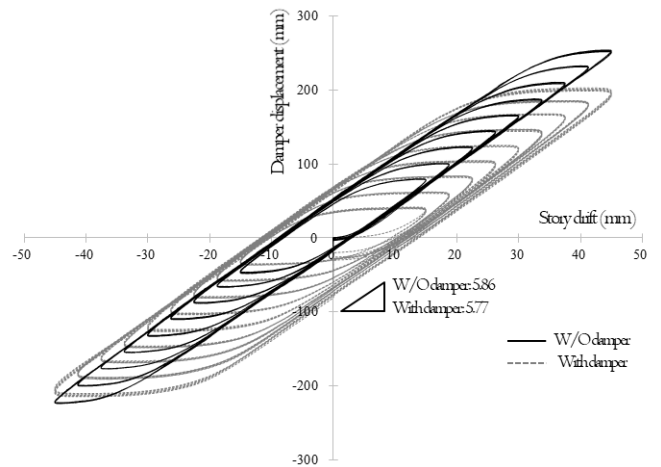


Fig. 12. Story drift-damper displacement curves of specimens

치 전후로 비교하면 3.94/4.89로 약 20% 가량 성능이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 댐퍼 하중에 의해 추가로 마찰력이 증가하고 이에 따라 케이블에 의한 탄성변형도 증가했기 때문이다. 그러나 도르래가 작동한 이후에 확

인된 변위증폭비는 댐퍼가 없는 실험체의 경우 5.86, 댐퍼가 설치된 실험체의 경우에는 5.77을 나타내어 이론 증폭비 6.00 값과 유사함을 확인 할 수 있다.

한편 동일한 실험체 내에서 정지마찰력에 의해 도르래가 작동하지 않는 구간은 일정하기 때문에 하중스텝이 커질수록 즉, 층간변위가 커질수록 감쇠장치가 상대적으로 움직이는 거리가 늘어나 증폭변위가 커지는 경향이 나타났다.

본 연구를 통해 제안된 감쇠시스템은 케이블의 탄성 변형과 도르래와 윈 사이에 발생하는 마찰력으로 이론적 증폭비보다 감소된 효율이 발생하는 것이 실험을 통해 확인되었다. 보다 인장 강성이 높은 소재를 케이블로 사용하고 핀접합부에 발생하는 마찰력을 줄일 수 있다면 보다 이론적 증폭비에 가까운 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 기존에 널리 사용되어 온 변위증폭 시스템의 증폭 효율(2-3배)과 비교하였을 때, 이론값 대비 성능은 떨어지지만 케이블의 감은 횟수에 따라 증폭비를 추가로 증가시킬 수 있기 때문에 3배 이상의 증폭 효율이 요구되는 감쇠시스템에서는 유용하게 적용이 될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.2 댐퍼 작동 속도

본 연구에서 사용된 감쇠장치는 속도의존성을 가지고 있기 때문에 댐퍼에 의해 발생하는 감쇠력을 정확히 예측하기 위해서는 그 작동 속도를 명확히 규명해야 한다. Fig. 13은 마지막 가력 사이클에서 측정된 댐퍼의 변위값을 기반으로 시간에 따른 댐퍼의 실제 작동속도를 계산하여 나타낸 그래프이다.

이 그래프에서 확인할 수 있듯이, 액츄에이터의 가력속도 변화와 더불어 감쇠장치의 작동 속도 역시 사인파 형상으로 증감하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 속도가 0인 시점에서 최고 속도에 도달할 때까지 도르래 작동 멈춤에 의한 지연 현상(lag)이 발생하였고 이 때문에 이러한 지연 현상이 발생하지 않는 이상적인 그래프 형상에 비해 속도가 급격하게 증가하는 특징이 그래프 상에서 관찰되었다.

그러나 모든 실험체에서 측정된 댐퍼의 실제 작동 최고 속도는 이론적으로 예측되는 값과 거의 일치하였다. 본 결과에 근거하여 감쇠장치의 실제 작동 최고 속도를 이론값에 근거하여 정확하게 예측할 수 있으며, 이를 바탕으로

로 감쇠장치에 발생하는 최대저항하중 또한 정확히 계산할 수 있음을 확인할 수 있다.

4.2.3 하중-변위 관계

Fig. 14에 두 실험체로부터 측정된 하중-변위 그래프를 나타냈다. 감쇠장치가 설치되지 않은 실험체의 경우, 가력 초반 케이블 인장력이 균일하게 재분배되기 전까지 약 10% 정도 작은 하중(114.9 kN)에서 거동하였다. 이후 가력스텝이 증가할수록 인장력 재분배와 함께 마찰력이 증가하면서 하중이 커졌으며, 약 125 kN 부근에서 하중이 자리잡기 시작하였다.

감쇠장치가 설치된 실험체의 경우, 가력스텝 증가에 따른 댐퍼하중 증가로 골조의 저항능력이 점차 증가하는 경향이 나타났다. 설치된 감쇠장치 속도 증가에 따라 저항하는 하중이 식(1)에 근거하여 비선형적으로 증가하기 때문에 가력스텝이 높은 단계에서는 상대적으로 골조의 하중 증가량이 다소 둔화되는 모습을 나타냈다. 그러나 가력 첫 스텝에서 나타난 골조의 평균 저항하중 172.6 kN보다 마지막 스텝에서의 하중은 215.8 kN으로 약 25% 가량 골조저항력이 댐퍼의 작동 속도 증가에 의해 나타난 것으로 확인되었다.

두 실험체의 마지막 스텝에서의 하중 차이는 약 90.8 kN으로 나타났으

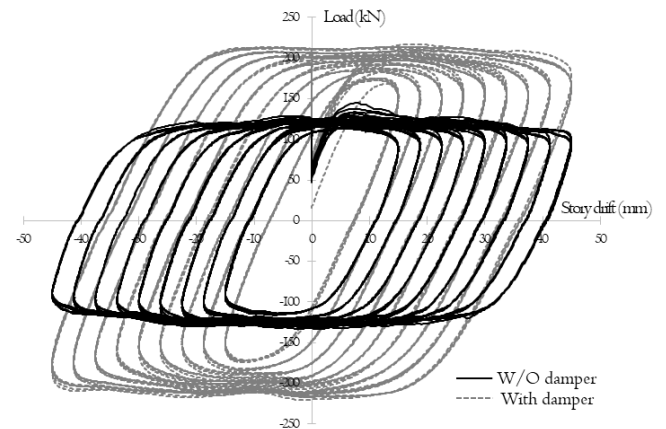


Fig. 14. Load-story drift curves

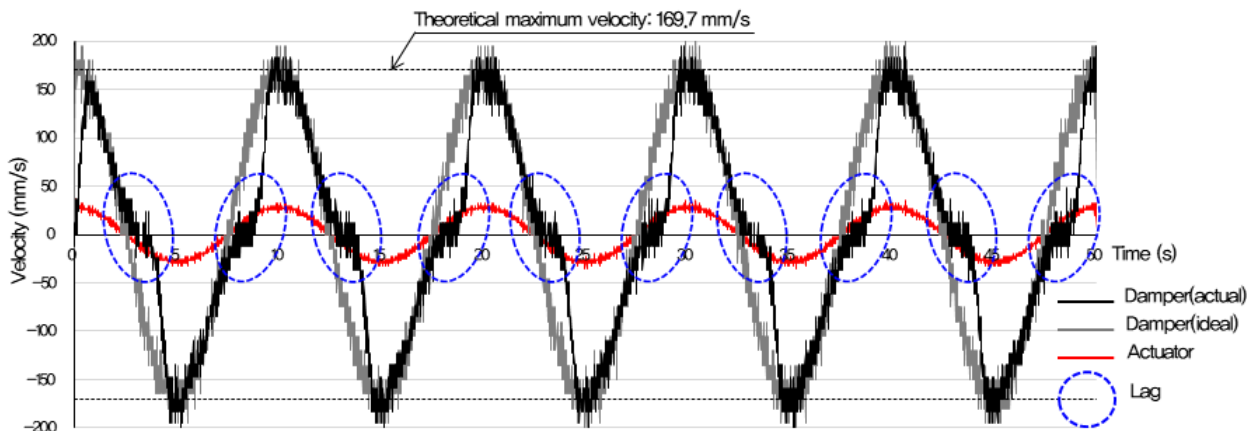


Fig. 13. Velocity curves of damper and actuator

며, 이는 댐퍼가 설치되지 않은 실험체에 비해 설치 후 하중이 약 73% 증가한 결과이다. 설치된 댐퍼의 마지막 가력스텝에서 확인된 속도에 근거하여 식 (1)에 대입하면 댐퍼의 작동 하중을 약 13.5 kN으로 추정해 볼 수 있다. 이를 감안하였을 때, 이론적 끌조 저항력 증가분은 약 81 kN(13.5 × 6)이 된다. 이는 실험에서 확인된 90.8 kN과 유사한 값이며, 약 9 kN은 댐퍼에 의해 케이블에 추가로 발생된 인장력으로 인한 마찰력의 영향인 것으로 판단할 수 있다.

4.2.4 케이블 내 변형률 변화

Fig. 15는 감쇠장치가 설치된 실험체의 고정바쪽에 설치한 변형률 게이지에서 측정한 변형률의 변화를 증간변위에 따라 나타낸 것이다. 그래프에서 확인해 볼 수 있듯이, 가력 방향이 부방향에서 정방향으로 변화할 때에는 왼쪽 아래에서 오른쪽 위에 걸쳐 연결된 케이블의 변형률이 증가하고 반대편에 설치된 케이블의 변형률은 감소하였다. 반대로, 정방향에서 부방향으로 가력 방향이 변화하여 진행될 때에는 왼쪽 위에서 오른쪽 아래에 걸쳐 연결된 케이블의 변형률이 증가하고 동시에 반대측 케이블 변형률은 감소하는 것이 뚜렷하게 나타났다.

또한, 증가하던 케이블의 변형률은 도르래가 작동한 이후에는 정 부방

향 가릴 것 없이 거의 일정한 변형률을 유지하는 특징을 나타냈다.

이를 통해 본 감쇠시스템에 설치된 강와이어 로프는 외부 하중의 작용 방향 변화와 더불어 탄성 변형이 동반되는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 도르래와 핀 사이에 발생하는 마찰력 및 댐퍼에 의해 부과되는 하중 때문에 나타나는 특징이다. 이러한 특성은 본 감쇠시스템의 하중-변위 그래프 상에서 가력 방향이 변화할 때마다 발생하는 기울기 즉, 탄성강성으로도 확인될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 국내와 같은 중-약진 지역에서도 감쇠장치의 성능을 최대한 끌어올릴 수 있는 변위증폭형 감쇠시스템을 제안하였다. 본 감쇠시스템은 움직도르래의 원리를 이용하여 케이블과 도르래의 작동으로 댐퍼에 전달되는 변위를 증폭시키는 원리를 기반으로 하고 있다. 개발된 감쇠시스템에 대한 작동 매카니즘을 규명하고 그 성능을 평가하기 위해 실험적 연구를 진행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 제안된 감쇠시스템의 감쇠장치 변위 증폭량은 연결된 케이블의 탄성변형과 도르래와 핀 사이에 발생하는 마찰력 때문에 도르래 작동 지연으로 이어져 이론적으로 예상된 값보다 감소된 성능을 나타냈다. 그러나 도르래 작동 시 확인된 감쇠장치의 변위 증폭 비율은 이론값과 거의 유사한 결과를 나타내어 본 감쇠시스템의 작동 매카니즘의 우수성을 확인할 수 있었다.
- 2) 실험 결과, 마찰력에 의해 감쇠장치의 작동 지연이 발생했음에도 불구하고 구조물의 저항력은 설치된 감쇠장치의 저항성능에 이론증폭비를 곱한 값만큼 정확하게 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 사용된 감쇠장치의 속도의존성 때문으로 작동 변위는 지연되었으나 작동 속도는 이론값과 유사하였기 때문이다. 이를 통해 작은 용량의 댐퍼 사용으로도 그의 수배에 달하는 성능을 가진 댐퍼 효과를 거둘 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 케이블에 연결된 고정바의 변형률 측정을 통해 케이블 내 힘의 변화를 관찰한 결과 감쇠시스템에 설치된 케이블은 외부 하중의 작용 방향 변화와 더불어 탄성 변형이 동반되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 탄성 변형은 주로 도르래와 핀 사이에 발생하는 마찰력 및 댐퍼에 의해 부과되는 하중 때문에 나타나는 특징으로 이를 최소화할 수 있다면 본 감쇠시스템의 성능을 극대화할 수 있을 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2018년도 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업 지원(과제번호: 19CTAP-C142466-02)에 의한 연구의 일환으로 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Ahn TS, Kim HJ. Efficient Seismic Retrofit of Existing Structures, Review of Architecture and Building Science, Architectural Institute

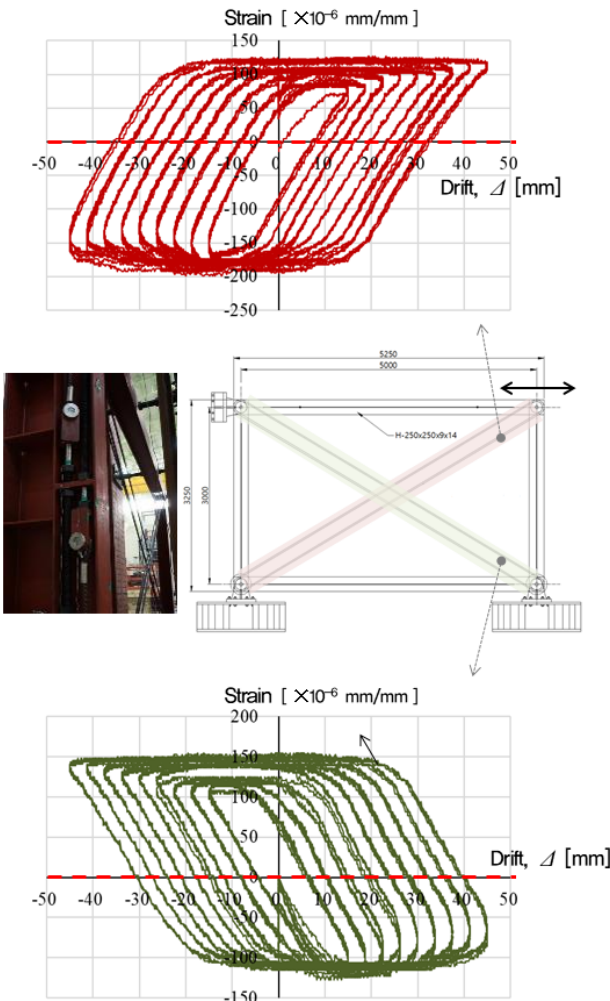


Fig. 15. Drift-cable strain curves

- of Korea, 2008;52(10):62–69.
2. Shin HM, Lee HD, Shin KJ. Measurement of Bolt Tension of Friction Damper Using Manufactured Load Cell. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 2019;31(3):171–178
 3. Oh SH, Choi KY, Ryu HS. Structural Performance Evaluations of Steel Hysteretic Damper in Series for High–Rise Shear Wall System. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 2012;24(4): 371–382
 4. Jung IY, Oh J, Ryu D, Ryu J. Experimental Evaluation of Velocity–dependent Behavior of Viscous Dampers Infilled with Silicone Gel. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 2019;31(5):331–338.
 5. Constantinou MC, Tsopelas P, Hammel W, Sigaher AN. Toggle–Brace–Damper Seismic Energy Dissipation Systems. *Journal of Structural Engineering*, 2001;127(2):105–112.
 6. Hwang JS, Huang YN, Hung YH. Analytical and Experimental Study of Toggle–Brace–Damper Systems. *Journal of Structural Engineering*, 2005;131(7):1035–1043.
 7. Hwang JS, Kim J, Kim YM. Rotational Inertia Dampers with Toggle Bracing for Vibration Control of a Building Structure. *Engineering Structures*, 2007;29:1201–1208.
 8. Park JH, Ahn SC, Park KS. Performance Evaluation of a Pivot–Type Displacement Amplification Damper System for Seismic Strengthening. *Journal of the Korean Society of Safety*, 2012;27(1): 70–75.
 9. Korea Standards Association. KS D 3514: Wire ropes. Seoul, Republic of Korea: KSA; c2019.