

고용량 실리콘 점성 댐퍼의 성능 특성

Performance Characteristics of High-Capacity Silicone Viscous Damper



류 동 일*
Ryu, Dongil



류 재 호*
Ryu, Jaeho



우 성 우*
Woo, Sungwoo

1. 서언

2016년 규모 5.8의 경주 지진과 2017년 규모 5.4의 포항 지진을 기점으로 국내 건축물에 대한 내진설계 기준이 강화되었으며, 내진성능이 확보되지 못한 기존 건축물을 대상으로도 지진에 대한 안전성을 확보하기 위한 보강사업이 활발히 진행되고 있다.

건축구조물의 내진성능을 확보하기 위한 다양한 방법 중 가장 효과가 높고 확실한 방법은 구조물을 지반과 분리하여 지진에 의한 응답을 원천 차단하는 면진 공법일 것이다. 그러나 해당 기술은 주로 신축 건축물의 설계단계부터 고려되어 적용되어야 하기 때문에 이미 지어진 비내진 구조물에 적용하는 데에는 한계가 있다. 또다른 내진보강법으로 기존 구조부재의 성능(강도, 강성, 연성 등)을 향상시켜 지진에 직접 대응하도록 하는 방법이 있다. 단면증설법이라 명명되는 해당 공법은 기존 구조부재(보나 기둥)에 추가적인 구조요소를 부착하거나 증설하는 방식으로 공사가 진행

된다. 그러나 증가된 단면 사이즈 때문에 건축학적 측면에서 내부 공간 활용도가 떨어질 우려가 있으며, 공사 개소가 많고 기초까지 보강해야 되는 경우가 있어 공사 기간이 길어지고 비용이 증가하는 단점이 있다. 이러한 이유로 현재 국내에서 내진보강을 위해 가장 많이 사용되고 있는 방법은 구조물을 대신해 지진에너지를 소산시켜 줄 수 있는 댐퍼를 설치하는 제진공법이다. 댐퍼를 통해 구조물로 입력되는 지진에너지를 소산시킴으로써 기존 구조부재가 부담하는 저항력을 줄일 수 있으며, 다양한 방식으로 기존 구조물에 설치하는 것이 가능하기 때문에 큰 제약 없이 적용할 수 있다. 지진에너지를 소산하기 위해 사용되는 댐퍼는 작동 메커니즘과 특성에 따라 점성, 점탄성, 마찰, 강재이력 등으로 구분할 수 있다. 해당 댐퍼들은 적용하고자 하는 건축물의 응답 특성에 맞게 적절하게 단독 또는 혼용되어 사용될 수 있다.

본 기사에서는 이러한 댐퍼 중 실리콘 겔(Silicone gel)이 에너지 소산 매개체로 사용된 점성 댐퍼(Viscous damper)에 대한 특징을 알아보고, 대형 구조물이나 고층 건축물에 사용하기 위해 개발 중인 고

* (주)테크스퀘어
TechSquare Co., Ltd.

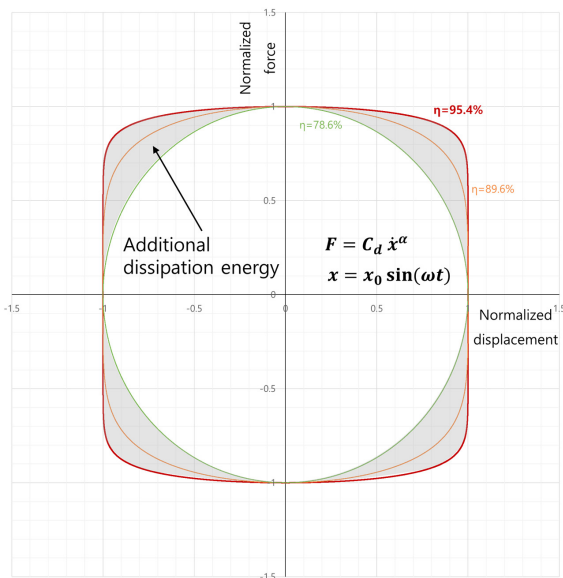
용량 댐퍼에 대한 성능평가 시험 결과를 함께 소개하고자 한다.

2. 실리콘 점성 댐퍼

쥘테크스퀘어에서 개발한 실리콘 점성 댐퍼는 뉴턴 유체(Newtonian fluid)를 점성체로 사용하는 일반적인 점성댐퍼와는 다른 특성을 보인다. 이는 <Fig. 1>과 같이 가소성 재료(Pseudo-Plastic material)인 실리콘 겔을 점성체로 사용하였다. 겔 성상의 점성체를 사용함으로써 <Fig. 2>와 같이 뉴턴 유체를 사용한 댐퍼보다 높은 에너지 소산 효율을 발휘하고, 누유로 인



<Fig. 1> Silicone gel

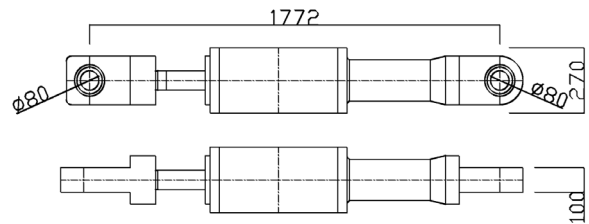


<Fig. 2> Hysteresis curves for varying damping exponents

한 성능저하와 유지보수 비용 발생의 문제점을 해소하였다. (쥘테크스퀘어에서 생산하는 여러 용량의 실리 콘 점성 댐퍼 중 본 기사에서 다루고 있는 댐퍼는 500kN급 제품으로 치수 및 형상은 <Table 1>과 <Fig. 3>에서 확인할 수 있다.

<Table 1> The geometric specification of the damper

	Size (mm)
Cylinder diameter	270
Maximum stroke	± 200
Mid-stroke length	1772
Clevis thickness	100
Bearing bore diameter	80

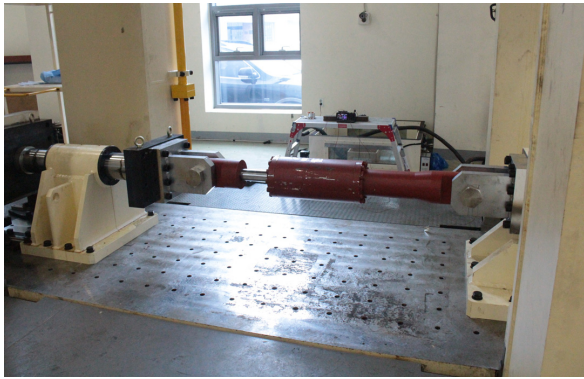


<Fig. 3> The schematic diagram of the damper

3. 시험 조건

3.1 시험 장치

댐퍼의 성능 특성을 평가하기 위해 사용된 시험 장치는 한국건설생활환경시험연구원(KCL)의 제진댐퍼 시험평가 시스템(Seismic Control Devices Testing & Evaluation System)으로 <Fig. 4>와 <Table 2>에서 형상 및 정보를 확인할 수 있다. 해당 시험평가 시스템에는 가력장치(Actuator)가 수평 가력장치(Lateral actuator)와 수직 가력장치(Vertical actuator)로 2가지가 있는데, 이 중 본 연구에서 요구하는 변위 스트로크(Displacement stroke)와 속도(Velocity) 조건을 만족하는 수평 가력장치를 사용하여 시험을 수행하였다. 가이드(Guide) 및 지그(Zig)와 함께 시험제품이 설치된 형태는 <Fig. 5>와 같다.



〈Fig. 4〉 Silicone viscous damper on the testing & evaluation system

〈Table 2〉 Specifications of the seismic control devices testing & evaluation system

	Capacity
Lateral load (kN)	± 2,500
Lateral stroke (mm)	± 250
Lateral velocity (mm/s)	± 500
Vertical load (kN)	± 10,000
Vertical stroke (mm)	± 50
Vertical velocity (mm/s)	± 40
Test space (mm)	4,000 X1,800 X850



〈Fig. 5〉 Seismic control devices testing & evaluation system

3.2 하중 조건

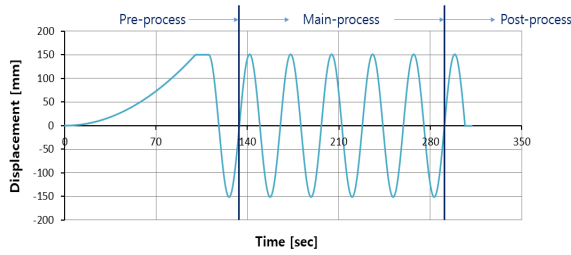
댐퍼 성능의 속도 및 주파수에 대한 의존성을 파악하기 위해 하중 조건을 두 분류로 구분하여 설정하였다. 일정한 수치의 변위를 여러 속도 조건에서 시험하여 속도 의존성을 파악하기 위한 시험을 〈Table 3〉과 같이 설정하였고, 같은 속도에서 변위를 달리하여 여러 주파수 조건에서 시험하는 주파수 의존성을 〈Table 4〉와 같이 설정하였다. 속도 의존성 시험과 주파수 의존성 시험 모두 변위를 정현파(Sine wave)의 형태로 5회 왕복하여 하중을 가하였다. 시험의 시작과 종료 시점에서 급격한 속도의 변화를 구현하기 위해서는 이론상 무한대의 가속도가 필요할 만큼 급격한 하중이 요구되므로 〈Fig. 6〉과 같이 사전 과정(Pre-process)과 사후 과정(Post-process)을 두어 하중 프로토콜을 구성하였다.

〈Table 3〉 Load conditions of the velocity dependence test

No.	Velocity (mm/s)	Stroke ±(mm)	Frequency (Hz)	Repeat count (Cycle)
1	1	150	0.001	5
2	10	150	0.011	5
3	30	150	0.032	5
4	90	150	0.095	5
5	150	150	0.159	5
6	200	150	0.212	5
7	300	150	0.318	5
8	400	150	0.424	5

〈Table 4〉 Load conditions of the frequency dependence test

No.	Velocity (mm/s)	Stroke ±(mm)	Frequency (Hz)	Repeat count (Cycle)
1	400	60	1.061	5
2	400	90	0.707	5
3	400	120	0.531	5
4	400	150	0.424	5



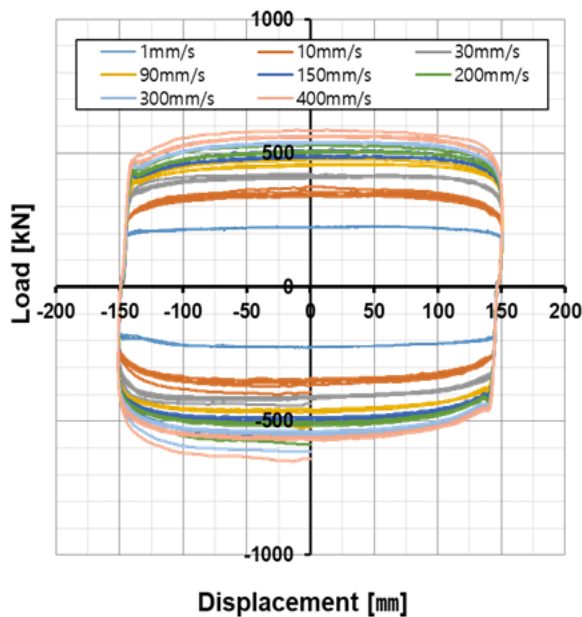
〈Fig. 6〉 Load protocol
(Displacement-Time curve)

4. 시험 결과

4.1 속도 의존성

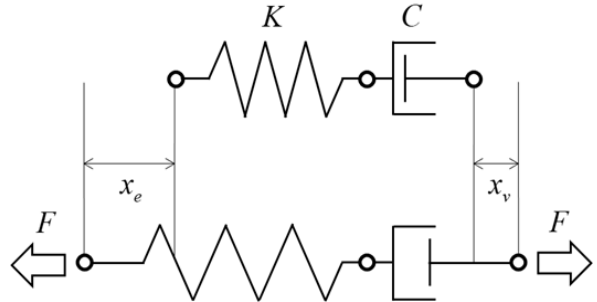
1mm/s에서 400mm/s까지 8가지의 속도 조건에서 동일한 스트로크로 시험을 수행한 결과를 하중-변위 선도로 정리하여 〈Fig. 7〉에 나타냈다.

실제 구조물에 해석적으로 댐퍼를 적용하여 성능을 평가하기 위해서는 댐퍼의 작동 성능에 대한 정의가 필요하다. 실리콘 점성 댐퍼와 같이 하중 성능이 속도에 의존적인 경우에는 속도에 따른 하중 값으로 그 성능을 정의하는 것이 바람직하다. 이렇게 하중 성능이 속도에 의존하는 댐퍼의 거동을 수학적으로 정의



〈Fig. 7〉 The results of the velocity dependence test
(Load-Displacement diagram)

하는 모델로 Maxwell 모델과 Kelvin- Voigt 모델이 주로 사용된다. 본 기사에서는 Maxwell 모델에 따라 댐퍼의 거동을 모사(Simulation)할 수 있는 수치모델(Numerical Analysis Model)을 제안하고자 한다.



〈Fig. 8〉 The schematic diagram of maxwell model

Maxwell 모델은 〈Fig. 8〉과 같이 스프링 요소와 감쇠 요소가 직렬로 연결된 형태로 간략화 하여 나타낼 수 있다. 이 모델에 힘이 작용했을 때 전체 시스템에서 발생된 변위는 식 (1)과 같이 스프링 요소의 변위와 감쇠 요소 변위의 합으로 나타낼 수 있다. 이 시스템의 힘 평형 식(Force equilibrium equation)은 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$x = x_e + x_v \quad (1)$$

$$F = Kx_e = C\dot{x}_v \quad (2)$$

여기서, x 는 시스템 전체의 변위, x_e 는 스프링 요소의 변위, x_v 는 감쇠 요소의 변위를 나타내며, K 는 시스템의 강성, C 는 시스템의 감쇠계수를 나타낸다. 시스템의 강성과 감쇠계수가 시간에 따라 변하지 않는다는 가정 하에 식 (1)을 시간으로 미분하고 식 (2)를 대입하여 정리하면 식 (3)을 유도할 수 있다.

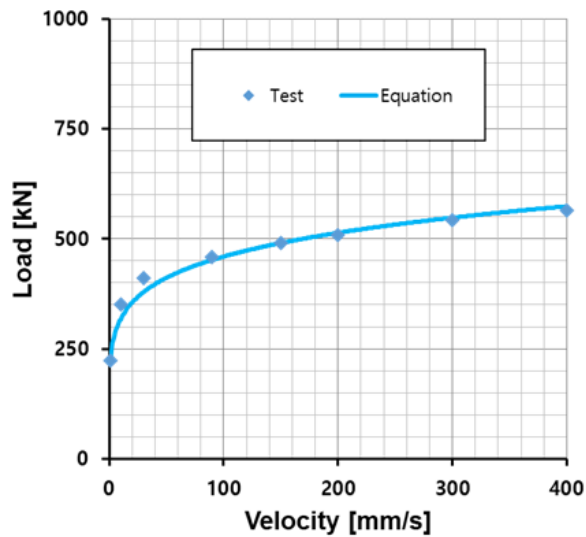
$$C\dot{x} = \frac{C}{K}\dot{F} + F \quad (3)$$

여기서 K 는 댐퍼의 축 방향에 대한 강성을 나타내며, 이 값은 강재(Steel material)의 강성 값으로 감쇠

계수보다 매우 크기 때문에($K \gg C$) 2번째 항은 F 로 간략화 할 수 있다($\frac{C}{K}\dot{F} \approx 0$). 그리고 실리콘 겔의 재료 특성에 따른 비선형성을 반영하여 계수 α 를 지수로 추가해 주면 식 (4)와 같이 본 댐퍼의 수치모델 (Numerical model)을 정의할 수 있다.

$$F = C\dot{x}^\alpha \quad (4)$$

댐퍼의 거동을 모사하기 위해서는 식 (4)에서 상수 C 와 α 의 값이 정의되어야 한다. 속도 의존성 시험 결과를 하중-속도 관계로 정리하여 <Fig. 9>에 나타냈다. 시험 결과 데이터를 회기 분석하여 식 (4)의 댐퍼 수치모델에 적용한 결과, 상수 C 와 α 의 값을 <Table 5>와 같이 얻을 수 있었다. 이 값들을 적용한 댐퍼의 수치모델이 시험 결과를 통해 파악된 댐퍼의 성능을 잘 나타냄을 <Fig. 9>에서 확인할 수 있다.



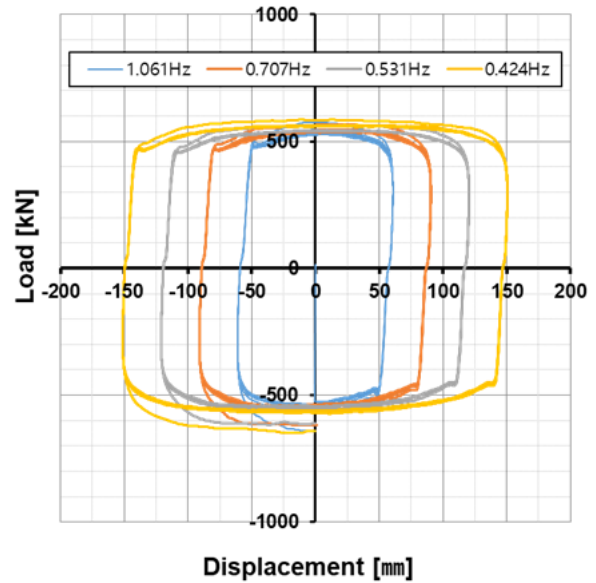
<Fig. 9> The results of the velocity dependence test (Load-Velocity diagram)

<Table 5> The damping coefficients of the damper

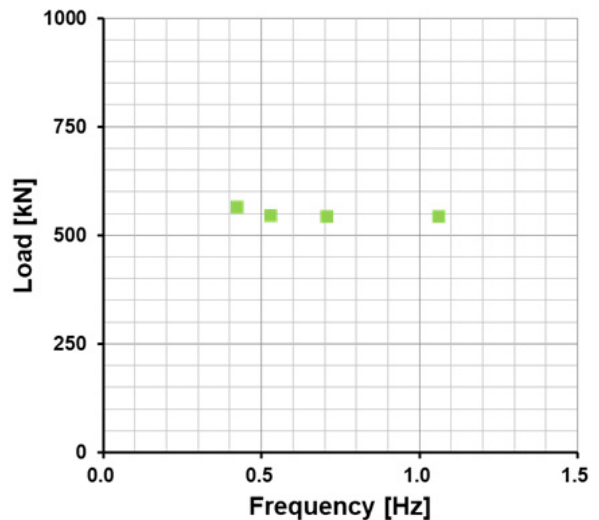
C	α
220	0.16

4.2 주파수 의존성

동일한 속도 조건에서 스트로크를 60mm에서 150mm까지 4가지 조건으로 설정하여 주파수 의존성을 확인하기 위한 시험을 수행한 결과, 하중-변위 선도가 <Fig. 10>과 같이 정리되어 나타났다.



<Fig. 10> The results of the frequency dependence test (Load-Displacement diagram)



<Fig. 11> The results of the frequency dependence test (Load-Frequency diagram)

속도 의존성 시험 결과와는 달리 주파수는 각각의 스트로크 조건에 따라 바뀌고, 발생하는 하중의 값에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이를 좀 더 직관적으로 파악하기 위해 시험 결과를 제로 변위에서의 하중 값으로 하중-주파수 선도를 그리면 (Fig. 11)과 같이 나타난다. 이 주파수 의존성 시험 하중 결과 값들은 평균 549kN, 최대오차 2.81%, 표준편차 17.9로 정리된다.

5. 결론

구조물의 진동에 대한 건전성 평가는 고유 진동수와 관련하여 주파수가 가장 중요한 변수로 작용한다. 그에 따라 구조물의 진동을 저감시키는 장치를 평가할 때에도 주파수를 가장 주요하게 고려하기 쉽다. 본 연구에서 시험 분석하여 하중 성능을 평가한 실리콘 점성 댐퍼의 경우 주파수에는 그 성능이 독립적이고 속도에 의존적임을 확인하였다. 속도 의존성에 따른 하중 성능을 수치로 정의한 본 실리콘 점성 댐퍼의 경우 누유에 따른 유지보수 비용이 들지 않고, 반복적인 하중에도 성능이 저하되지 않는다. 따라서 여진에 대비하기에 적합하며, 구조물의 고유 진동수에 따른 적용 범위가 광범위한 특성을 지닌 제진장치(Seismic device)이다. 본 댐퍼와 같은 고효율, 고성능 제진장치의 개발은 한정된 자원으로 건축구조물의 내진성능을 확보하는 것이 요구되는 현실에서 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 재난안전 산업육성지원 사업 (2019-MOIS32-017)의 지원을 받아 수행되었습니다.