

X형 감쇠시스템을 위한 복원성 점성 감쇠기 성능 실험 및 수치모형 개발

김다위 · 박장호* · 옥승용** · 박원석***

동국대학교 건축공학과 · *아주대학교 건설시스템공학과 · **한경대학교 토목안전환경공학과 · ***목포대학교 토목공학과
(2016. 8. 10. 접수 / 2016. 11. 28. 수정 / 2016. 12. 1. 채택)

Performance Test and Numerical Model Development of Restoring Viscous Damper for X-type Damper System

David Kim · Jangho Park* · Seung-Yong Ok** · Wonsuk Park***

Department of Architectural Engineering, Dongguk University

*Department of Civil System Engineering, Ajou University

**Department of Civil, Safety & Environmental Engineering, Hankyong National University

***Department of Civil Engineering, Mokpo National University

(Received August 10, 2016 / Revised November 28, 2016 / Accepted December 1, 2016)

Abstract : In this study, a restoring viscous damper is introduced for X-type damper system which is designed for the seismic response control of large spatial structures. A nonlinear numerical model for its behavior is developed using the result of dynamic loading tests. The X-type damper system is composed of restoring viscous dampers and connecting devices such as adjustable wire bracing, where the damping capacity of the system is controllable by changing the number of the dampers. The restoring viscous damper is devised to exert main damping force in tension direction, which is effective to prevent the buckling of bracing subjected to compressive axial force. To evaluate the performance of the proposed damper, dynamic cyclic loading tests are performed by using manufactured dampers at full scale. In order to construct the numerical model of the damper system, its model parameters are first identified using a nonlinear curve fitting method with the test data. The numerical simulations are then performed to validate the accuracy of the numerical model in comparison with the experimental test results. It is expected that the proposed system is effectively applicable to various building structures for seismic performance enhancement.

Key Words : restoring viscous damper, dynamic cyclic loading test, seismic response control, X-type damper system

1. 서론

최근 주변국에서 발생한 지진은 내진설계가 반영되지 않거나 내진보강이 시행되지 않은 노후 건축물 또는 다중이용시설에 피해가 집중되면서 대규모 인명피해와 경제적 손실을 초래하였다. 또한 국내의 경우 근거리 단층에서 발생하는 지진의 빈도가 증가하고 있고, 강진발생에 대한 불안감으로 인해 건축물의 내진설계 및 내진보강에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 지진 발생 후 즉시 제 기능을 수행해야 하는 사회기반시설 및 주요 산업시설에 대해서는 더 높은 수준의 내진 성능이 필요하다는 공감대가 형성되고 있다.

국내의 경우 학교, 체육관 및 강당 등 다중이용시설

물과 대공간 건축물을 재난·재해에 대비한 대피시설로 지정하고 있다. 하지만 이에 해당하는 다수의 건축물은 내진설계가 반영되지 않거나 내진보강이 필요한 것으로 나타나고 있다. 국내 주요 건축물의 내진 보강은 2011년 이후 5개년 단위의 내진보강 기본계획이 수립되어 실시되고 있으나 대상 건축물에 대한 내진보강 시행률은 2013년까지 13.4%에 그치고 있으며, 우리나라 전체 건축물을 기준으로 할 때 내진설계가 적용된 구조는 3% 미만으로 조사되고 있다. 따라서 기존 구조물의 내진성능 향상에 대한 사회적 요구는 더욱 커지고 있는 상황이다.

일반적으로 건축물의 내진성능을 향상시키기 위한 내진보강 방법은 구조물의 강성 및 강도를 증가시키는

* Corresponding Author : Wonsuk Park, Tel : +82-61-450-2471, E-mail : wonsuk@mokpo.ac.kr
Department of Civil Engineering, Mokpo National University, 1666 Youngsan-ro, Chonggye-myeon, Muan-gun, Jeonnam 58554, Korea

방법과 구조부재의 강도와 변형 능력, 즉 연성도를 증가시키는 방법이 주로 사용된다. 하지만 강도 및 강성을 증가시키는 방법은 대규모의 지진이 발생하였을 때 갑작스런 취성파괴에 의해 구조물이 붕괴될 우려가 있고, 구조부재의 변형 능력을 증가시키는 경우 일시적인 구조물의 붕괴는 방지할 수 있으나 구조부재에 발생한 소성흔적을 보수·보강하는데 어려움이 따른다. 따라서 최근에는 다양한 감쇠장치(damping device)를 이용하여 구조물의 감쇠성능을 증가시키고, 동적응답을 감소시키기 위한 내진 및 제진보강방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁴⁾.

제진보강시스템은 지진에 의해 발생하는 진동에너지를 감쇠기에 집중시켜 소산시키고 구조물의 소성변형에 따른 손상을 방지하는 방법으로 안정적인 이력거동으로 신뢰성이 보장되며 입력에너지에 의한 손상이 감쇠기에 집중되기 때문에 구조물의 보수 및 보강에 용이한 장점이 있다. 하지만 기존에 개발된 대부분의 제진 감쇠기 시스템은 Fig. 1에 보인 바와 같이 구조시스템을 구성하기 위한 브레이싱(bracing)의 설치로 인해 개방성에 영향을 주고 감쇠성능을 만족하기 위한 보강장치의 충분한 작동공간이 요구되어 공간 활용의 제약이 발생할 수 있다⁵⁾. 특히 대공간 구조물의 경우 높은 층고와 긴 경간으로 인해 기존의 보강시스템을 적용하는데 한계를 보이고 있다⁶⁾.

이와 같은 한계를 극복하기 위한 방법으로서 와이어 브레이싱을 사용하여 압축력으로 감쇠력이 전달되지 않고, 인장력만으로 감쇠력이 전달되도록 함으로써 좌굴에 대한 저항력을 높인 X형 감쇠시스템을 개발하였다(Fig. 2). 이 시스템은 건축물이 좌우로 움직일 때 발생하는 동적응답이 장력(prestressed tension)을 도입한 와이어 브레이싱을 통해 에너지 소산장치인 점성 감쇠기의 피스톤 운동에 전달되어 진동에너지가 소산되도록 고안된 장치이다. 따라서 감쇠기에 작용하는 압축력에 대해서는 저항력이 약하고, 인장력에 대해서는 강한 저항력을 발휘할 수 있는 새로운 형식의 감쇠기 개발이 요구된다.



Fig. 1. Examples of typical bracing damper system.

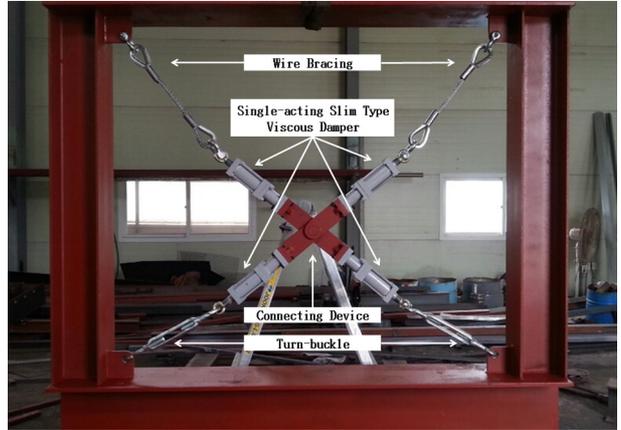


Fig. 2. Configuration of X-type damper system.

이 논문에서는 X형 감쇠시스템에 적용할 수 있는 새로운 점성 감쇠기의 개발과 성능 실험, 수치모형 개발결과를 제시한다. 인장력이 작용하는 방향의 거동에 대하여 보다 우수한 감쇠성능을 발휘하는 복원성 점성 감쇠기(restoring viscous damper)를 개발하고 동적 성능 실험을 수행한 결과를 제시한다. 또한, 성능 실험 결과로부터 감쇠기가 장착된 구조물의 내진 해석 및 설계가 가능한 비선형 동적 해석 수치 모형을 개발하여 실험 결과와 비교 검증하였다.

2. 복원성 점성 감쇠기의 개발

점성 감쇠기는 유체의 점성을 이용하여 진동에너지를 소산하는 장치로서 넓은 진동수 범위에서 선형응답을 보이고 감쇠력이 구조물의 동적거동 시 발생하는 응답속도에 비례하는 특징을 가진다. 구조물의 제진을 위해서는 일반적으로 실린더 내부 피스톤의 왕복운동으로 인해 발생하는 인장력과 압축력 양방향에 대하여 점성이 높은 유체를 이용하여 에너지를 소산하는 복동식(double-acting type)이 주로 사용된다.

일반적인 복동식 감쇠기와는 달리 본 연구에서는 복원성 점성 감쇠기를 개발하였다. Fig. 3 (a)에 나타낸 바와 같이 복동식 감쇠기는 피스톤 로드(piston rod)가 인장, 압축방향으로 동일하게 실린더 내부의 실리콘이 저항할 수 있도록 구성되어 있다. 그러나 개발한 복원성 점성 감쇠기는 피스톤 로드에서 인장력이 작용할 때 실린더 내부의 실리콘에 의해 에너지를 주로 소산하는 방식으로 인장력이 제거되면 실린더 내부 스프링의 복원력을 이용하여 피스톤 헤드(piston head)가 평형위치로 복귀하는 방식이다(Fig. 3(b)).

이 감쇠기의 제작과정은 Fig. 4 (a)-(d)와 같이 실린더에 피스톤 로드를 체결하고, 점성이 높은 실리콘으

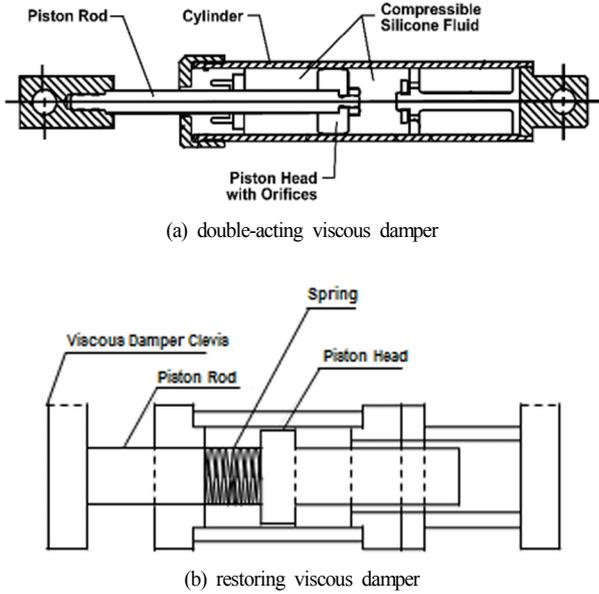


Fig. 3. Schematic drawings of double-acting and restoring viscous damper.



Fig. 4. Production process of a restoring viscous damper.

로 실린더 내부를 충전하는 다중 슬림형 감쇠기^{7,8)}의 제작과정과 유사하다. 하지만 기존 슬림형 감쇠기는

Fig. 3(a)와 같은 일반 복동식 감쇠기와 같은 구조를 가지며, 새롭게 개발된 복원형 감쇠기는 (e)에서 볼 수 있듯이 실린더 내에 일방향 스프링을 결합하여 감쇠기의 클레비스(clevis)를 통해 피스톤 로드와 인장력이 작용할 때 단방향 거동을 구현하게 된다. 본 연구에서는 35 kN의 감쇠력과 50 mm의 제어 스트로크를 갖는 감쇠기를 (f)와 같이 설계·제작하였다. 개발한 복원성 점성감쇠기는 인장복원력을 만들기 위해 스프링을 사용한 것과 스프링을 감쇠기 내부에 장착한 구조물 내진용 감쇠기라는 점에서 독창성을 가진, 개발 선례가 없는 고유 개발 감쇠기이다.

3. 감쇠기 동적 성능 실험 및 수치해석 모형

3.1 감쇠기의 동적 성능 실험

복원성 점성 감쇠기의 거동특성 및 감쇠성능을 파악하기 위하여 하중재하기(actuator)의 수직방향으로 가력속도를 변화하는 방식으로 동적실험을 수행하였다(Fig. 5). 하중재하기의 끝에 로드셀과 개발한 복원성 점성 감쇠기의 피스톤 로드 체결부를 직결하고, 동적하중재하기의 피스톤의 운동을 변위계로 계측하여 동적 힘변위 곡선을 얻을 수 있도록 실험을 수행하였다.

실험시 감쇠기의 최대 스트로크를 ± 15 mm로 설정하고, 재하속도를 1 mm/sec~30 mm/sec까지 변화시켜가며 반복 가력 실험을 수행하였다. 실험 수행 결과 힘변위 이력곡선 일부를 다음 Fig. 6에 나타내었다. 동적 실험을 통해 산출된 복원성 슬림형 점성 감쇠기의 힘변위 이력곡선을 살펴보면 복원력에 의해 인장(그림에서 -방향)과 압축(+방향)이 다른 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 의도한 대로 인장 거동시 감쇠력이 압축 거동시보다 최대 약 50%이상 증가된 감쇠력을 보임을 확인하였다.



Fig. 5. Dynamic experimental configuration of proposed damper.

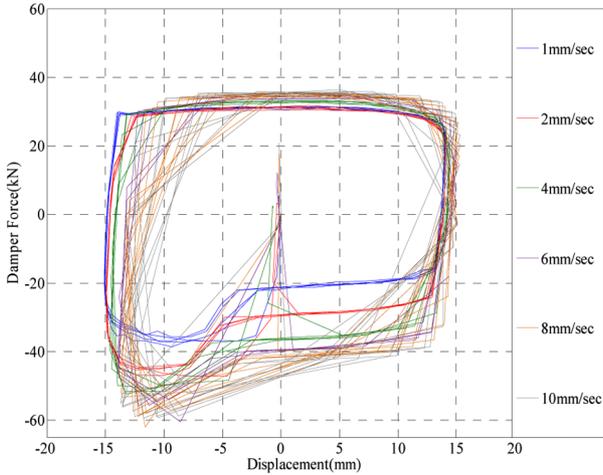


Fig. 6. Load–displacement hysteresis curves according to variations of loading velocity.

3.2 감쇠기의 수치해석 모형

본 연구에서 사용한 점성 감쇠기의 수치해석 모형은 인장과 압축에 따른 차이를 표현할 수 있는 식 (1)과 같은 특성방정식으로 정의할 수 있다.

$$F_d = sgn(\dot{u}) C_d |\dot{u}|^\alpha \quad (1)$$

여기서, F_d 는 감쇠기의 감쇠력(kN), C_d 는 실험에 의해 결정되는 감쇠계수이고 v 는 감쇠기 피스톤 로드의 운동속도(mm/sec), 그리고 α 는 감쇠기의 비선형 특성을 나타내는 속도지수를 나타낸다. 식 (1)은 속도의 지수 승에 비례하는 일반 점성감쇠기의 힘-속도 관계식을 기반으로하여, 인장, 압축방향 속도의존성을 표현할 수 있도록 부호함수 $sgn(\dot{u})$ 를 도입하여 구성하였다.

Table 1에 동적실험을 통해 산출된 가력속도에 대한 최대 감쇠력을 나타내었다. 이를 속도-감쇠력 그래프

Table 1. Maximum damping forces according to variations of loading velocity

Positive (Tension Spring)		Negative (Compression Spring)	
Velocity (mm/sec)	Damping Force (kN)	Velocity (mm/sec)	Damping Force (kN)
1	32.828	-1	-37.602
2	31.412	-2	-46.522
4	33.410	-4	-53.349
6	34.977	-6	-58.571
8	35.388	-8	-60.362
10	36.165	-10	-61.686
15	38.051	-15	-64.616
20	40.511	-20	-64.563
30	41.421	-30	-63.874

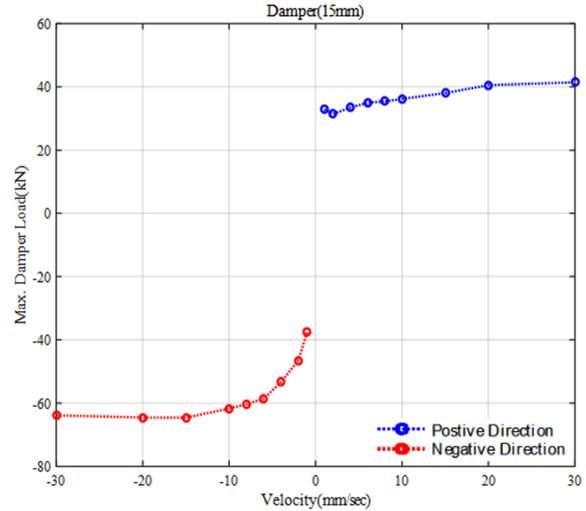


Fig. 7. Peak Load–velocity hysteresis curve.

로 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서 감쇠기의 속도의존성을 살펴보면, 가력 방향에 대한 감쇠력의 크기가 인장과 압축 방향에 따라 상이한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에 적용된 감쇠기의 실린더 내부에는 인장력에 대한 저항이 낮고 압축력에 대한 저항이 높은 스프링이 결합되어 있어 실린더 내부의 작용력과 반대방향으로 작용하기 때문이다. 따라서 와이어 브레이싱을 통하여 감쇠기에 인장력이 작용하고 실린더 내부 스프링은 압축력을 받게 되어 상대적으로 높은 감쇠력을 보이게 된다.

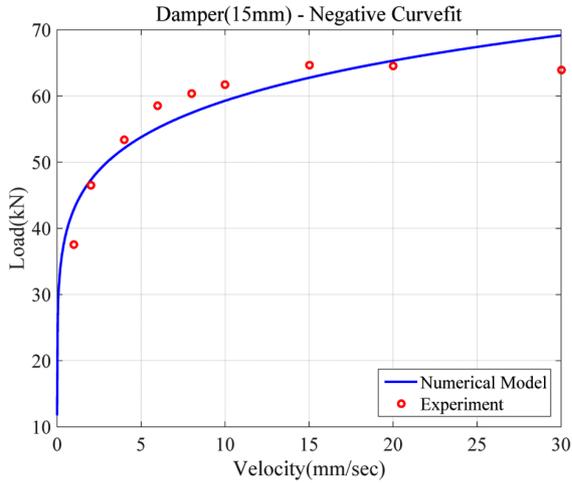
복원성 슬림형 점성 감쇠기의 수치해석 모형을 일반화하기 위하여 동적실험을 통해 얻은 최대 감쇠력-속도 데이터에 대한 비선형 커브 피팅(nonlinear curve fitting)을 수행하여 Table 2의 수치해석 파라미터를 산출하였다. 이 값을 사용한 수치해석 모델과 실험을 통해 얻은 속도-감쇠력 값을 비교한 결과 Fig. 8과 같이 각 방향에 대하여 감쇠기의 이력거동을 근사적으로 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

3.3 수치해석 모델의 검증

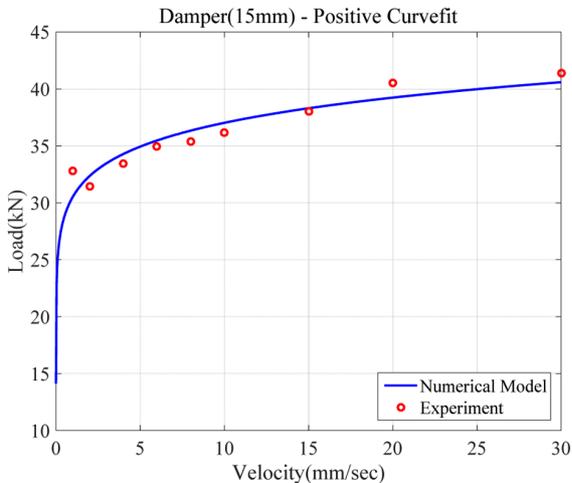
본 연구에서 사용하는 수치해석 모델의 유효성을 검증하기 위하여 4 mm/sec의 가력속도의 실험결과와 수치해석모델의 이력거동을 비교한 결과는 Fig. 9와 같다. 비교결과 제시한 수치해석 모델은 감쇠기의 비선형 속도의존성, 인장 및 압축 방향성, 최대 감쇠력 및 하중-속도 관계 등에서 실험결과를 잘 모사할 수 있음을 확인하였다. 이 수치 모형이 잘 표현하지 못하는 부분은 (a)의 그래프 하단부 최대 인장력 발현 후 압축 쪽으로 움직이는 전이구간의 감쇠력-변위 관계인데, 최대 감쇠력만을 사용하여 수치모형을 구성하는데 따

Table 2. Numerical model parameters using nonlinear curve fitting

Load direction	Parameters	
	C_d	α
Positive (Tension)	54.44×10^3	0.084
Negative (Compression)	113.17×10^3	0.140



(a) Positive (Compression)

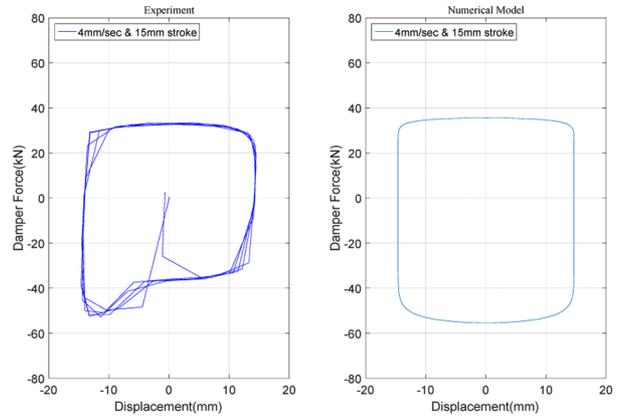


(b) Negative (Tension)

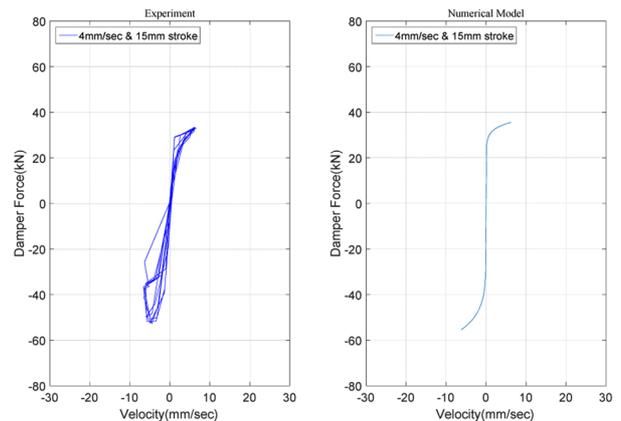
Fig. 8. Comparison of nonlinear curve-fitted numerical model with test results.

른 오차로 판단된다. 그러나 (b)의 그래프와 같이 실제 내진성능을 평가하는 데 있어서 중요한 감쇠력-속도 관계를 잘 표현하고 있어 유효한 수치해석 모델로 사용할 수 있을 것으로 판단되었다.

또한 수치해석 모델의 유효성을 검증하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 속도의존성이 비선형적으로 나타나고 인장과 압축방향의 거동이 다른 상황을 반영한 2D



(a) Load-displacement hysteresis curves

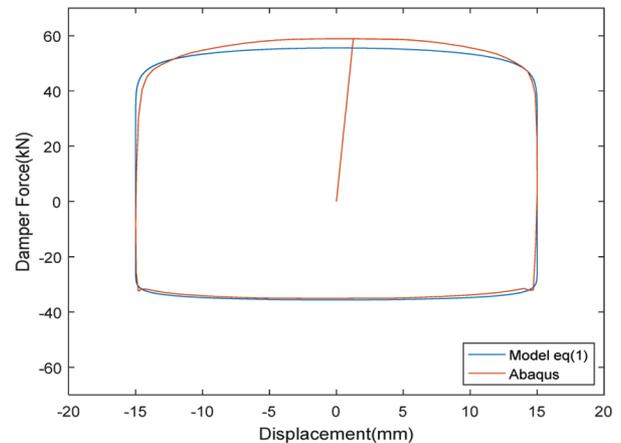


(b) Load-velocity hysteresis curves

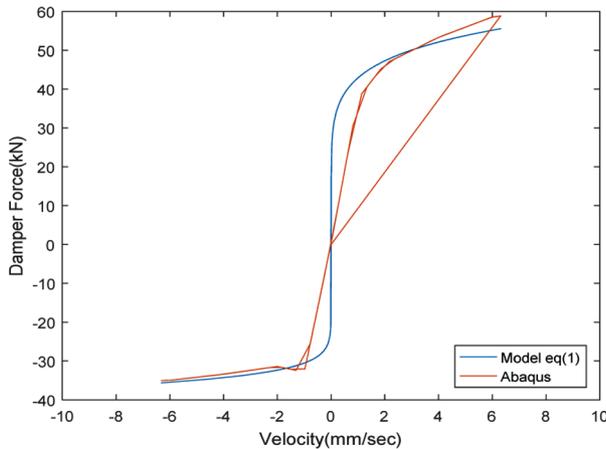
Fig. 9. Comparative results of hysteresis curve between experiment and numerical model (4 mm/sec).

connector요소인 CONN2D를 사용하여 단일요소로 복원성 점성감쇠기를 모델링하였다. 요소의 비선형 힘-속도 관계는 실험을 통해 얻은 데이터 값을 사용하였다.

해석결과와 수치모형 결과를 비교하기 위하여 동적



(a) Load-displacement hysteresis curves



(b) Load-velocity hysteresis curves

Fig. 10. Comparative results between numerical model and nonlinear analysis model using ABAQUS.

실험과 동일한 형태로 0.067 Hz의 진동수와 15 mm의 스트로크로 구성된 사인파형으로 해석을 진행하였으며, Fig. 10에 해석 결과를 비교하였다. 비교 결과 본 연구에서 제시한 수치 모형은 실험을 통해 일반화된 ABAQUS 수치해석 모델과 힘-변위, 힘-속도 부분에서 잘 일치하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 최대 인장력 부분에서 ABAQUS 모델이 좀 더 큰 값을 보이는 것은 식(1)의 수치해석 모델이 속도 5~20 mm/sec 구간에서 ABAQUS 모델에서 사용한 실험 데이터 값보다 작게 평가된 결과로 파악되었다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 중·저층 구조물뿐만 아니라 대공간 구조물에 적용이 가능한 X형 감쇠시스템을 위한 복원성 점성 감쇠기를 개발하였다. X형 감쇠시스템은 긴장력을 도입한 인장형 브레이싱을 통하여 인장력이 작용할 때 감쇠성능을 발휘하는 복원성 점성 감쇠기를 사용하여 좌굴 및 면외 거동을 방지함으로써 안정적인 시스템을 구축하고 협소공간에 설치할 수 있는 장점을 가진다.

감쇠기의 거동특성 및 성능을 확인하기 위하여 가력 속도를 변화하는 동적실험을 수행한 결과 실린더 내부에 결합된 스프링의 특성에 의해 압축력과 인장력에 대하여 서로 다른 속도의존성을 나타내는 것을 확인하였다.

수치해석 모델을 일반화하기 위하여 비선형 커브 피팅을 이용하여 파라미터를 산출하고 실험결과와 비교하였다. 그리고 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용

하여 수치해석 모델의 유효성을 검증하였다.

본 연구에서 제시하는 수치해석모델은 동일한 댐퍼에 대해서는 적용가능하나, 다음과 같은 점에서 한계를 가진다. 첫째는 제작과정에서의 오차에 따른 성능 변동 가능성이 존재하며, 둘째는 댐퍼용량 또는 댐퍼 내부 실리콘 이동통로(bypass)의 설계가 달라지는 경우에는 새로운 수치해석모델의 개발을 필요로 한다.

감사의 글 이 논문은 중소기업청에서 지원하는 2015년도 산학협력력 기술개발사업(No. C0299405)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- 1) Y. -J. Cha and J. -W. Bai, "Seismic Fragility Estimates of a Moment-resisting Frame Building Controlled by MR Dampers using Performance-based Design", *Engineering Structures*, Vol. 116, pp.192-202, 2016.
- 2) J. Kim, J. Lee and H. Kang, "Seismic Retrofit of Special Truss Moment Frames using Viscous Damper", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 123, pp. 53-67, 2016.
- 3) S. Yamazaki, T. Usami, T. Nonaka, "Developing a New Hysteretic Type Seismic Damper (BRRP) for Steel Bridges", *Engineering Structures*, Vol. 124, pp.286-301, 2016.
- 4) H. -L. Hsu and H. Halim., "Improving Seismic Performance of Frame Structures with Steel Curved Dampers", *Engineering Structures*, Vol. 130, pp.99-111, 2017.
- 5) J. H. Park, S. C. Ahn and K.-S. Park, "Performance Evaluation of a Pivot-Type Displacement Amplification Damper System for Seismic Strengthening", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 27, No. 1, pp. 70-75, 2012.
- 6) G.-C. Kim, J.-W. Kang and H. Ko, "Seismic Response of Large Space Structure with Various Substructure", *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 10, No. 3, pp. 81-90, 2010.
- 7) E. H. Sung, D. Kim, D. H. Park, K.-S. Park, J. H. Park and H.-J. Cho, "Development of Multiple Slim Type Damper System and Performance Test", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 29, No. 2, pp. 31-37, 2014.
- 8) D. Kim, E. H. Sung, K.-S. Park and J. Park, "Evaluation of Seismic Performance and Effectiveness of Multiple Slim-Type Damper System for Seismic Response Control of Building Structures", *The Scientific World Journal*, doi : 10.1155/2014/189106, pp. 1-9, 2014.