다중 슬림형 감쇠장치의 개발 및 성능 실험

성은희 · 김다워 · 박두환* · 박관순 · 박장호*** · 조해진*

동국대학교 건축공학과 · *테크스타 코리아 · **아주대학교 건설시스템공학과
(2013. 10. 29. 접수 / 2014. 2. 3. 채택)

Development of Multiple Slim Type Damper System and Performance Test

E. H. Sung · D. Kim · D. H. Park* · K.-S. Park · J. H. Park*** · H. -J. Cho*

Department of Architectural Engineering, Dongguk University · *TechStar Korea

**Department of Civil System Engineering, Ajou University

(Received October 29, 2013 / Accepted February 3, 2014)

Abstract : For the vibration control of residential buildings, a multiple type slim damper system is developed and dynamic performance test is performed in this study. In conventional damping systems, larger installation space is required in order to achieve acceptable seismic performance, and as a result, it is difficult to determine efficient damping capacity of the device. The proposed damping device is composed of several small slim type dampers and linkage units. It can control damping capacity easily by changing the number of the small damper. To evaluate the proposed damping device, three slim type dampers (single-type, triple-type and penta-type) are designed and manufactured in real scale. Dynamic loading tests are performed by using the three manufactured dampers. From the tests, it is shown that damping coefficient is proportional to the number of the damper combined. Thus, test results validates the practicality of the proposed slim type dampers. applying nonlinear curve fitting technique, numerical model of the dampers are developed and presented.

Key Words : installation space, damping capacity, multiple slim type damper, performance test, numerical model

1. 서론

최근 들어 세계 곳곳에서 대규모 지진이 빈번히 발생하고 있으며, 그 범위 또한 확대되고 있다. 2008년 5월 중국 쓰촨성 지진(규모 8.0)¹⁾과 2010년 1월 아이티 포르토프랭스 지진(규모 7.0)²⁾, 2011년 3월 동북부 대지진(규모 9.0)은 지진에 대한 더욱 철저한 준비가 중요한 요소임을 알려 주고 있다. 국내 기상센터의 조사³⁾에 따르면, 매년 지진발생횟수가 점점 증가하고 있는 추세이며, 2013년에(1~12월 기준) 총 93회의 지진이 발생한 것으로 나타났다. 이는 이전에 비해 월등히 높은 수치이며, 그 중 규모 3.0 이상의 지진이 17회나 발생하여 지진에 대한 불안감이 커지고 있다. 또한 인접국가인 중국과 일본의 잦은 지진발생은 이러한 불안감을 가중시키고 있는 실정이다⁴⁾.

지진은 모든 자연재해의 특성인 불확실성과 발생에

따른 방대한 피해로 인해 사후 대응보다는 사전대비가 가장 좋은 방법이라고 할 수 있다. 국내에서는 건축물의 내진설계 및 보강을 위해 그 기준이 1988년에 최초로 도입되었고, 적용대상 건축물이 6층 이상 또는 연면적 100,000 m²으로 규정하였다. 그 이후 2005년에 그 범위가 3층 이상 또는 연면적 1000 m²이상으로 확대되었으며, 내진설계기준 또한 강화되었다⁵⁾. 2013년 10월 현재 서울시 내진대상 건축물 27만 3,636동 가운데 22.2%에 해당하는 6만 685동의 건축물만이 내진설계가 적용된 것으로 나타났다⁶⁾. 그리고 비적용대상 건축물까지 포함할 경우 서울시 전체 건축물 65만 1,079여동 중에서 9.3%만이 내진성능을 확보하였으며, 이를 통해 서울시의 대다수 건축물이 여전히 지진에 취약함을 확인할 수 있다. 따라서 신규 건축물뿐만 아니라 기존의 건축물의 내진성능향상을 위한 보강기술이 필요하다고 할 수 있다.

* Corresponding Author : Jang Ho Park, Tel : +82-31-219-2506, E-mail : jangho@ajou.ac.kr

Department of Civil System Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-dong, Youngtong-gu, Suwon 443-749, Korea

현재 국내에서는 기존 비내진 건축물의 내진보강을 위해 다양한 공법⁷⁻⁹⁾을 적용하고 있으며, 그 중에서도 구조 형식과 사용성에 구애받지 않는 제진보강공법¹⁰⁻¹⁶⁾을 널리 이용하고 있다. 제진보강공법에 사용되는 감쇠장치(damping device)는 주로 수동형 감쇠장치(passive damper)¹⁷⁻²⁴⁾로 점·탄성댐퍼, 이력댐퍼, 마찰댐퍼 등이 있다. 점·탄성댐퍼는 경제적이거나 중량대 용량비가 증가하여 설치 공간점유율이 높고, 이력댐퍼는 규모가 큰 지진에만 유리하여 다양한 지진동에 적용하기 어렵다. 그리고 마찰댐퍼는 댐퍼의 크기가 작으나 감쇠용량 조절이 어려운 문제점을 가지고 있다.

따라서 이 연구에서는 이러한 기존의 감쇠장치의 문제점을 보완하여 신규 및 기존 건축물의 내진성능향상을 위한 다중 슬림형 감쇠장치를 개발하였다. 개발된 다중 슬림형 감쇠장치는 한 개의 중량이 큰 감쇠기 대신 감쇠용량이 작은 여러 개의 감쇠기에 이들을 하나로 묶어주는 연결부를 추가한 것으로 설치공간을 줄일 수 있을 뿐 아니라, 감쇠용량 조절이 용이하여 다양한 지진동에 적용 가능한 장점을 가진다. 또한 개발된 다중 슬림형 감쇠장치는 실물크기로 제작하고, 동적실험을 통하여 감쇠성능을 검증하였다. 동적성능실험 및 수치해석을 통해 감쇠성능을 검토하였다

2. 다중 슬림형 감쇠장치 개발

2.1. 개요

본 연구에서는 기존 감쇠장치의 문제점을 해결하기 위하여 점성댐퍼를 이용한 다중 슬림형 감쇠장치를 개발하였다. 개발된 다중 슬림형 감쇠장치는 Fig. 1과 같이 기존의 감쇠장치와 달리 슬림형 감쇠장치를 기본 단위로 하여, 요구되어지는 감쇠성능에 따라 여러 개의 슬림형 감쇠장치를 병렬로 결합하는 방식이다. 따라서 감쇠용량이 증가하여도 감쇠장치의 단면지름이 증가하지 않아 설치시 필요한 공간, 즉 벽체두께 증가 없이도 벽체 내에 설치가 가능하여 공간 효율성이 좋다. 그리고 슬림형 감쇠장치의 결합수에 따라 감쇠용량을 결정하므로, 감쇠용량 조절이 용이할 뿐만 아니라 다양한 지진동에 적용이 가능한 특징을 가지고 있다.

2.2. 제작과정

Fig. 1의 개념을 토대로 다중 슬림형 감쇠장치를 제작하기 위하여, 먼저 여러 개의 슬림형 감쇠장치를 결합하는 연결부의 형태를 검토하였다. 다중 슬림형 감쇠장치는 기존 감쇠장치와 달리 면외거동 가능성이 있으므로 연결부를 직접 연결할 수 있도록 단순화 하였

Fig. 1. Concept of multiple slim type damper system

Fig. 2. Details of multiple slim type damper system

다. 그리고 병렬로 결합되는 감쇠장치들은 설치 효율 증가를 위해 기존의 원형 케이스를 사각형으로 변경하였다. 세부적으로는 케이스별 연결부위를 좌굴방지를 위해 강접합이 되도록 처리하였으며, 단위 슬림형 감쇠장치의 단면 지름은 기존의 건축물의 벽체두께와 벽체 내 설치시 예상 소요되는 공간, 케이스 두께를 합산하여 100 mm로 결정하였다. Fig. 2는 다중 슬림형 감쇠장치의 최종 상세도면을 나타낸다.

Fig. 3 (a)~(f)는 단위 슬림형 감쇠장치의 제작과정으로, (a)는 연결부위의 절삭과정으로 슬림형 감쇠장치가 서로 맞물려 결합할 수 있도록 하였다. (b)는 기존의 감쇠장치와 동일한 방법으로 피스톤 로드를 제작하였고, 실용화된 점성댐퍼와 같이 점성이 높은 실리콘으로 피스톤 내부를 충전하였다. (c) 각 연결부위를 (d)와 같이 해당위치에 맞게 천공하였고, 위의 모든 부품들을 체결하여 최종 단위 슬림형 감쇠장치를 제작하였다. 제작된

Fig. 3. Production process of a single slim damper

Fig. 4. Triple slim type damper system

단위 슬림형 감쇠장치는 최대스트로크 ± 40 mm, 33 kN 급으로 설계·제작되었다. Fig. 4는 제작된 단위 슬림형 감쇠장치를 3개 결합한 Triple Slim Type Damper 이다.

3. 다중 슬림형 감쇠장치의 성능 실험

3.1. 실험 개요

다중 슬림형 감쇠장치의 거동특성 및 감쇠성능을 평가하기 위하여 동적실험을 수행하였다. 우선 동적실험을

Fig. 5. Dynamic performance test for multiple slim type damper systems

위해 Fig. 5와 같이 각각 1개, 3개, 5개의 슬림형 감쇠장치를 결합한 실물모형의 다중 슬림형 감쇠장치 (single slim type damper: SSD, triple slim type damper : TSD, penta slim type damper: PSD)를 제작하였다. 그리고 하중 재하기(actuator, 최고용량 500kN)를 이용하여 반복하중 재하시험을 실시하였는데, 이때 속도에 따른 점성댐퍼의 감쇠용량 변화를 알아보기 위하여 가력 속도를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 가력속도는 총 6개(2 mm/sec, 3 mm/sec, 4 mm/sec, 5 mm/sec, 7 mm/sec, 10 mm/sec)로 나누어 실시하였다.

3.2. 결과분석

하중 재하기를 이용한 3개의 실물모형에 대한 성능 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

먼저 SSD(single slim type damper)의 각 속도에 따른 이력곡선은 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6을 살펴보면 5 mm/sec를 제외한 경우에서 초기강성이 유사하게 나타났다으며, 5 mm/sec 경우에서의 차이는 실험시 오차에

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

의한 것으로 보인다. 속도에 따라 SSD의 항복강도가 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 항복 후에는 더 이상 하중 증가 없이 변형만 증가하는 소성변형 구간이 발생하였으며, 10 mm/sec를 제외한 경우에서 압축과 인장거동이 거의 유사하게 나타났다. Table 1은 가력 속도별 SSD의 이력특성치를 나타낸다.

TSD(triple slim type damper)의 이력특성을 살펴보면 Fig. 7과 같다. TSD의 이력곡선에서는 모든 속도에서 초기강성이 유사하게 나타났으며, 항복강도는 SSD의 이력곡선과 같이 속도가 증가함에 따라 비례하여 증가하였다. 그리고 항복 후 소성구간이 발생하였으며, 모든 속도에서 인장과 압축거동이 유사하게 나타났다. Table 2는 TSD의 가력 속도별 이력특성치를 나타낸다.

PSD(penta slim type damper)의 가력속도 변화에 따른 하중-변위 이력곡선은 Fig. 8과 같다. PSD의 이력곡선을 살펴보면 이전의 실험모형 이력곡선과 같이 속도에 관계없이 초기강성이 유사하고, 항복 후 소성구간 또한 존재한다. 그리고 2 mm/sec, 3 mm/sec, 4 mm/sec, 5 mm/sec 속도에서는 속도가 증가함에 따라 비례하여

Table 1. Maximum damping force of SSD according to variations of loading velocity

	+ maximum (kN)	- maximum (kN)	average (kN)
2 mm/sec	42.58	39.83	41.20
3 mm/sec	41.59	43.95	42.77
4 mm/sec	43.85	45.71	44.78
5 mm/sec	44.05	47.48	45.76
7 mm/sec	45.91	49.24	47.58
10 mm/sec	51.21	52.58	51.89

Fig. 7. Load-displacement hysteresis curves of TSD according to variations of loading velocity

Table 2. Maximum damping force of TSD according to variations of loading velocity

	+ maximum (kN)	- maximum (kN)	average (kN)
2 mm/sec	92.12	109.87	100.99
3 mm/sec	98.69	107.91	103.30
4 mm/sec	100.06	115.17	107.62
5 mm/sec	111.25	118.90	115.07
7 mm/sec	115.07	125.96	120.52
10 mm/sec	124.88	135.77	130.33

Fig. 8. Load-displacement hysteresis curves of PSD according to variations of loading velocity

항복강도가 증가하나 7 mm/sec, 10 mm/sec 속도에서는 다른 실험모형과 달리 항복강도가 증가하지 않고 유사한 값을 보이고 있다. 그리고 속도가 증가함에 따라 PSD의 변위가 감소하는 특징을 보이고 있다. 가력 속도별 PSD의 이력특성치를 나타낸 Table 3을 살펴보면 7 mm/sec와 10 mm/sec의 속도에서 유사한 항복강도를 보이고 있는데, 이는 슬림형 감쇠장치의 결합수가 5개로 증가하면서 감쇠장치간의 마찰력이 증가하였을

Table 3. Maximum damping force of PSD according to variations of loading velocity

	+ maximum (kN)	- maximum (kN)	average (kN)
2 mm/sec	174.13	164.71	169.42
3 mm/sec	179.42	177.36	178.39
4 mm/sec	188.65	178.44	183.55
5 mm/sec	188.45	186.00	187.22
7 mm/sec	193.45	184.62	189.04
10 mm/sec	208.17	169.81	188.99

Table 4. Maximum displacement of PSD according to variations of loading velocity

	+ maximum (mm)	- maximum (mm)	average (mm)
2mm/sec	40.04	40.01	40.03
3mm/sec	39.35	40.11	39.73
4mm/sec	38.92	39.85	39.39
5mm/sec	38.49	38.83	38.66
7mm/sec	35.53	33.68	34.61
10mm/sec	29.58	25.11	27.35

뿐만 아니라 속도증가로 인해 감쇠장치의 온도가 증가하여 감쇠장치의 감쇠력에 일부 손실이 발생하여 위와 같은 현상이 나타난 것으로 판단할 수 있다.

그리고 Table 4와 같이 PSD 실험모형의 변위가 감소하는 것은 감쇠장치의 결합수 증가로 인해 PSD의 강성 또한 증가함으로서 점탄성 감쇠장치와 유사한 특성을 지니게 되어 속도가 증가함에 따라 감쇠장치의 강성이 증가하여 변위가 감소하는 현상을 나타내는 것으로 측정된다.

실험결과를 살펴보면 전체적으로 속도에 대하여 비선형성을 보이는 점성 감쇠장치의 특징^{25,26)}을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있으며, 특히 PSD는 감쇠장치 결합수의 증가로 인해 점탄성 감쇠장치의 특성 또한 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 슬림형 감쇠장치의 결합수가 증가함에 따라 감쇠용량이 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

3.3. 수치모델

개발한 다중 슬림형 감쇠장치의 하중-속도 관계를 구하기 위하여 각 감쇠장치의 이산화된 실험치(Table 1,2,3의 average value)를 Nonlinear Curve Fitting 기법^{27,28)}을 적용하였다. 그리고 점성댐퍼의 이력특성식을 이용하여 하중-속도관계를 식 (1)과 같이 수식화 하였으며, 그에 따른 각각의 수치이력모델은 Table 5와 같다. 여기서 각 실험치들과 하중-속도 관계곡선간의 최소 오차간격을 위하여 비선형성을 나타내는 감쇠지수 α 는 0.2로 모두 동일하게 적용하였다.

$$F = C_d^{type} \times V^\alpha \quad (1)$$

여기서, C_d^{type} (type of damping coefficient)는 타입별 감쇠계수, V (damper velocity)는 댐퍼 속도, α (damping index)는 감쇠지수를 나타낸다.

Table 5를 살펴보면 슬림형 감쇠장치 결합수가 증가

함에 따라 타입별 감쇠계수(type of damping coefficient)가 증가하는 것을 확인할 수 있으나 SSD와 비교하여 TSD는 약2.5배, PSD는 약 4.3배의 감쇠계수를 가지고 있다. 이는 연결 등에서 발생하는 마찰로 인해 감쇠력 손실이 발생한 것으로 판단된다. 그러나 이로 인한 손실량은 예상된 것이고, Nonlinear Curve Fitting기법 적용에 의한 오차 또한 감안한다면, 실손실량은 크지 않은 것으로 판단된다. Table 5에서 얻은 수치모델을 근거로 하여 각각의 감쇠장치의 하중-속도 관계 곡선을 실험치와 비교하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9를 통하여 수치모델에 대한 근사가 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 그리고 이러한 수치모델을 통해 해당 감쇠장치의 결합수

Table 5. Characteristics of multi slim type damper

type	SSD (kN · sec/mm)	TSD (kN · sec/mm)	PSD (kN · sec/mm)
C_d^{type}	33.49	82.98	133.49
α	0.2

(a) Nonlinear curve fitting of SSD

(b) Nonlinear curve fitting of TSD

(c) Nonlinear curve fitting of PSD

Fig. 9. Load-velocity curves for multiple slim type damper

별 감쇠계수의 값을 추정할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 신규 및 기존 건축물의 내진성능 향상을 위하여 새로운 형상의 다중 슬림형 감쇠장치를 개발하였다. 제시된 감쇠장치는 요구되어지는 내진성능을 위해 다양한 감쇠용량을 가질 수 있도록 여러 개로 나누어 조합 및 결합할 수 있으며 설치공간을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 다중 슬림형 감쇠장치의 감쇠성능 평가를 위해 하중재하기를 이용한 동적 실험을 실시하였다. 실험수행 결과 실험 모형 모두 점성댐퍼의 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 슬림형 감쇠장치의 결합수에 따라 감쇠계수가 증가하는 것으로 나타나 개발된 다중 슬림형 감쇠장치가 충분히 실용성이 있음을 확인할 수 있었다.

References

- 1) T. Parson, C. Ji and E. Kirby, "Stress Changes from the 2008 Wenchuan Earthquake and Increased Hazard in the Sichuan Basin", *Nature* 454, pp. 509-510, 2008.
- 2) R. Bilham, "Lesson from Haiti Earthquake", *Nature* 463, pp. 878-879, 2010.
- 3) <http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/domesticlist.jsp>
- 4) S.-K. Kim and T.-S. Bae, "Analysis of Crustal Deformation on the Korea Peninsula after the 2011 Tohoku Earthquake", *Journal of Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 30, No. 1, pp. 7-14, 2011.
- 5) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Earthquake Recovery Plans Act", 2013.
- 6) The Metropolis of Seoul, "The Present Condition of Seismic Design of Buildings in Seoul", 2013.
- 7) W. Yi, "Seismic Performance Evaluation and Retrofit for Existing RC Building", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 48, No. 28, pp. 63-76, 2009.
- 8) K. Lee and S. Oh, "Seismic Performance Evaluation and Retrofit for Existing Steel Buildings", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 48, No. 8, pp. 76-84, 2004.
- 9) T.-S. Ahn and H.-J. Kim, "Efficient Seismic Retrofit of Existing Structures", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 52, No. 10, pp. 62-69, 2008.
- 10) Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control, "Peer-Review Guideline for Design of Structures with

- Damping System", Kimoondang, 2012.
- 11) J.-K. Kim, "Seismic Isolation and Control of Building Structures", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 48, No. 8, pp. 85-89, 2004.
- 12) J. S. Hwang, "Vibration Control System for Serviceability Enhancement of a Structure", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 48, No. 7, pp. 56-61, 2004.
- 13) H.-H. Choi and J.-K. Kim, "Seismic Design of Steel Structure with Buckling Restrained Braces", *International Journal of Steel Structures*, Vol. 15, No. 3, pp. 52-58, 2003.
- 14) J. S. Hwang, J. G. Song, K. S. Kang and T. H. Yun, "Vibration Control of Structure using the Toggle System", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 7, No. 1, pp. 491-498, 2003.
- 15) 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 Korea Society of Safety*, Vol. 27, No. 1, pp. 70-75, 2012.
- 16) I. Takewaki, "Building Control with Passive Dampers", John Wiley & Sons, 2009.
- 17) H. J. Kim, "Practical Applications of Seismic Dampers in Foreign Countries", *Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control*, Vol. 10, pp. 43-52, 2009.
- 18) Y.-S. Chun and Y.-W. Park, "Energy Dissipation Systems for Seismic Applications : Current Practice and Recent Developments", *Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control*, Vol. 9, pp. 68-94, 2009.
- 19) J. Kim, K.-W. Min and Y.-J. Kwun, "Behavior of a Structure with Linear Viscous fluid Dampers", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 144, pp. 41-48, 2000.
- 20) J.-H. Park, T.-W. Park, O.-J. Kim and D.-B. Lee, "Structural Characteristic and the Evaluation Method for Application of Steel Damper", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 1, pp. 33-36, 2006.
- 21) J. K. Kim, Y. K. Kim and H. H. Choi, "Design of Unbond Braces to Satisfy Given Performance Acceptance Criteria", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 5, No. 6, pp. 47-54, 2001.
- 22) K.-W. Min and H.-S. Kim, "Performance Based Design of Friction Dampers for Seismically Excited Structures", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 7, No. 6, pp. 17-24, 2003.
- 23) S.-H. Lee, J.-S. Hwang, K.-W. Min and M.-K. Lee, "Seismic Response Control of a Building Structure Using Toggle-Brace System with an MR Damper", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*,

- Vol. 19, No. 3, pp. 239-246, 2006.
- 24) H. -S. Kim, J. -H. Park, K. -W. Min, S. -H. Lee and M. K. Lee, "Experimental Study on Equivalent Linear System for Rotational Friction Damper", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, pp. 296-303, 2004.
 - 25) K. -S. Choi, H. -J. Cho, Y. -C. You and K. -H. Kim, "Behavior of Viscous Damper for Passive Energy Dissipation System", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 1, pp. 133-134. 2010.
 - 26) Y.-C. You, K. -S. Choi and K. -H. Kim, "Seismic Retrofit using Displacement Amplifying Damping System", Journal of the Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control, Vol. 11, pp. 59-71, 2010.
 - 27) S. C. Chapra and R. P. Canale, "Numerical Method for Engineers", McGraw-Hill, 2006.
 - 28) S. C. Chapra, "Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists", McGraw-Hill, 2011.