

Exo-type 감쇠시스템의 강성비와 감쇠장치의 항복비에 따른 라멘조 건물의 제진효과

허무원¹, 이상현², 천영수^{3*}

Vibration Control Effect of the Framed Building Structures according to the Stiffness Ratio of Exo-type Damping System and Damper Device Yield Ratio

Moo-Won Hur¹, Sang-Hyun Lee², Young-Soo Chun^{3*}

Abstract: In this paper, the vibration control effect of the Exo-type damping system was investigated by applying the Kagome dampers to 15-story and 20-story frame structure apartment. A new Exo-type damping system composed of the dampers and supporting column was proposed in the previous work and numerical analysis were performed to investigate the effects of optimum stiffness ratio between controlled structure and supporting column, the size of damper and yield ratio of the damper. The numerical analysis results of a structure with Exo-type damping system up to the third story showed that the stiffness ratio should be higher than 7.0 and the damper device yield ratio be at least 8.0% ($V_{\text{damper}}/V_{\text{base shear}}$) to effectively reduce the base shear and the maximum drift of the uppermost story. When the Exo-type damping system was installed up to the fifth story, the stiffness ratio should be higher than 2.5 and damper device yield ratio needs to be at least 3.5% ($V_{\text{damper}}/V_{\text{base shear}}$) for obtaining the target performance.

Keywords: Isotropic damping device, Stiffness ratio, Damper device yield ratio, Vibration control, Guidelines

1. 서 론

제진구조는 지진피해를 최소화하기 위한 방법으로서 감쇠장치를 구조물 내부 혹은 외부에 설치하여 감쇠장치가 진동 에너지의 대부분을 흡수하도록 유도함으로써 구조물의 내진 성능을 향상시키는 방법이다. 이러한 제진구조는 지진에 대한 경험이 많은 일본 및 미국 등 외국의 경우 실증적으로 효과가 입증되어 실무에 널리 활용되고 있으며, 지진 후 복구문제와 관련하여 초기 설치비용과 관련된 경제적인 이점이 있어 면진구조와 비교하면 강진 및 지진다발 지역보다는 중약진 지역에서 특히 선호도가 높다.

최근 들어 우리나라에서도 제진구조에 대한 필요성이 대두되면서 감쇠장치를 도입한 건물들이 다수 설계 및 건설되고 있으며, 감쇠장치 중 저렴한 비용으로 높은 에너지소산능력을 제공할 수 있고 설치와 유지관리가 용이하다는 장점이 있어 강재이력형 감쇠장치를 이용한 수동형 제진구조시스템이 널리 사용되고 있다.

이러한 개발과 실무적용의 일환으로 최근 카고메 감쇠장치를 이용한 강재이력형 감쇠시스템인 Exo-type 감쇠시스템이 허무원 등(2014)에 의하여 제안되었다. 하지만 기존연구(Hur et al., 2015)는 연구대상 건물의 층수를 20층 한 타입만을 선정하여 외부지지구조물과 대상 건물의 강성비와 감쇠장치의 사이즈를 결정하였다. 또한, 주요 영향인자인 대상 건물과 지지구조물 사이의 강성비 값의 검토 간격이 너무 커서 Exo-type 감쇠시스템 최적 강성비를 산출하기 어려운 문제점이 있었다. 본 연구는 기존 Exo-type 감쇠시스템의 최적설치와 관련된 연구의 보완적인 연구로서, 연구대상 건물의 층수를 15층과 20층으로 확대하여 라멘조 공동주택을 대상으로 Exo-type 감쇠시스템의 적용 높이에 따른 제진효과를 검토하고자 하며, 대상 건물과 감쇠장치 지지구조물 사이의 강성비를 세분화하여 최적 강성비 산출과 감쇠장치의 항복비($V_{\text{damper}}/V_{\text{base shear}}$)에 따른 제진효과를 검토하고자 한다.

2. Exo-type 감쇠시스템 및 연구 대상 건물

기존연구(Hur et al., 2015)에서 제안한 Exo-type 감쇠시스템은 공동주택의 외부에 독립된 캔틸레버형 지지구조물을 별도로 축조하고, 건물의 바닥레벨과 지지구조물 사이에 감쇠

¹정회원, 단국대학교 건축공학과 박사수료

²정회원, 단국대학교 건축공학과 부교수

³정회원, LH 토지구획연구원, 연구위원, 교신저자

*Corresponding author: cysoo@lh.or.kr

•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

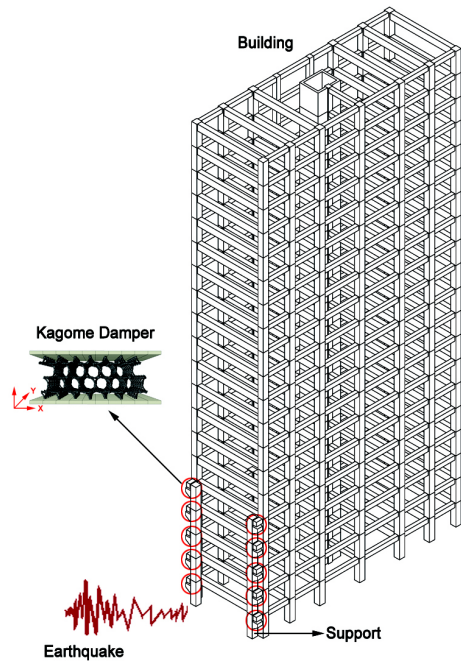


Fig. 1 Concept diagram of Exo-type damping system

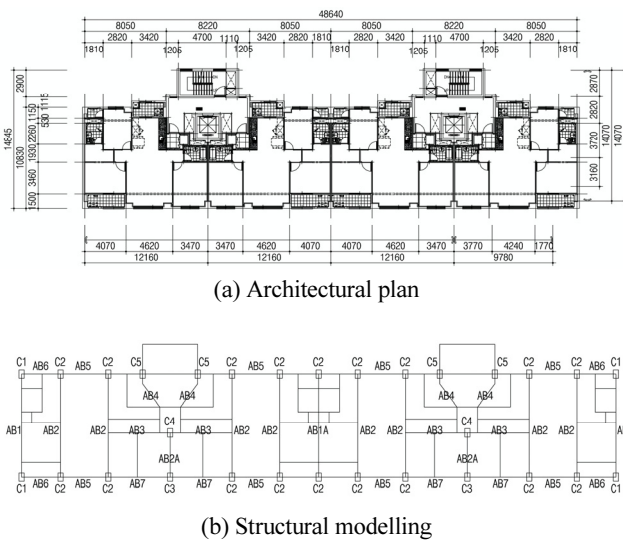


Fig. 2 Model building structure

장치(Kagome damper)를 설치하여 지지구조물의 강성과 건물의 강성 차에 의한 상대변형에 의하여 감쇠장치의 변형을 유도한 시스템이다. Fig. 1은 Exo-type 감쇠시스템의 개념을 도식화하여 나타낸 것이다.

Fig. 2는 연구 대상 건물을 도시한 것으로 4세대 조합의 장방향 평면으로 구성되어 있다. 계단실과 엘리베이터 코어는 전단벽으로 이루어져 있으며, 장축방향으로 4.0 m, 4.6 m 및 3.5 m의 모듈을 가지는 기둥이 배열되고 단축방향으로 약 10.0 m 경간의 두 개 기둥이 슬래브를 지지하는 모듈로 구성

Table 1 Seismic design parameters and member size

Seismic design parameters		Member size (mm)		
Zone	0.22	Column	C1, C2, C3, C5	800×500
			C4	
Response modification factor	5.0	Girder	AB1, AB2, AB2A, AB1A	700×500
			AB3, AB5, AB6, AB7	
Importance factor	1.5			
Site soil	Sd		AB4	300×500

되어 있다. 건물의 층수는 15층 및 20층이며, 층고는 3.0 m이다. Table 1에 내진설계 시 변수와 함께 부재들의 크기를 나타내었다. 고유치해석으로부터 얻은 건물의 주기는 15층의 경우 1.71초(단변), 1.64초(장변)이며, 20층의 경우 2.56(단변), 2.40초(장변)이다. Exo-type 감쇠시스템의 지지구조물은 건물 좌우측 양 끝단에 2열로 설치하였다.

3. 해석방법

본 논문에서는 기존연구(Hur et al., 2015)와 동일하게 15층 및 20층 모두 밀면전단력의 경우 약 20% 내외를 최상층 변위의 경우 약 10% 내외를 저감 목표로 설정하였다. 또한, 밀면전단력 저감효과 비교 평가 시 효과를 알기 쉽게 하기 위해서 기존연구에 비교한 방법을 활용하여 상대비로 나타내었다. 여기서 외부지지구조물의 부담 밀면전단력을 제외하고 대상건물의 순수 밀면전단력을 비교하였다.

Table 2는 해석 시 사용된 변수들을 정리하여 나타낸 것이다. Exo-type 감쇠시스템의 높이는 기존연구와 마찬가지로 3층과 5층으로 하였다. 대상 건물 대비 Exo-type 감쇠시스템의 강성비는 지지구조물의 탄성계수의 변화로서 조절하여 6가지의 변수를 설정하였다. 이때 강성비는 최적 강성비 산출을 위하여 기존연구의 결과를 활용하여 더 세분화 되게 설정하였다. 또한, 본 연구에서도 건물의 강성은 고정된 조건 하에서 지지구조물의 강성을 변화시킴으로서 감쇠장치의 크기 변화에 따른 효과와 함께 제진효과를 검토하였다. 감쇠장치의 항복하중은 기본모듈인 100×100 mm을 기준으로 64배까지 설정하여 총 8가지 경우의 수를 고려하였다. 따라서 총 해석의 경우의 수는 연구대상 건물(2가지), Exo-type 감쇠시스템의 설치 높이(2가지), 감쇠장치의 용량(8가지), 탄성계수의 변화(6가지)와 비제어를 포함하여 194개이며, 각각에 대하여 밀면전단력과 최상층 변위를 비교 평가하였다. Table 3은 Exo-type

Table 2 Parameters for numerical analysis

Story	Exo-type damping system		Damper Size (mm)
	Stories	Stiffness ratio	
15	3	0.4, 1.1, 1.9, 3.8, 7.0, 19.1	100×100, 200×200, 300×300, 400×400, 500×500, 600×600, 700×700, 800×800
	5	0.1, 0.4, 0.8, 1.7, 2.5, 4.1	
20	3	0.6, 1.9, 3.2, 7.0, 12.8, 32.1	100×100, 200×200, 300×300, 400×400, 500×500, 600×600, 700×700, 800×800
	5	0.1, 0.7, 1.4, 2.8, 4.2, 7.0	

Table 3 Specifications of damper

Damper Hight (mm)	Yield Strain (%)	Ultimate Strain (%)	Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)
200	0.23	15	0.79	1.31

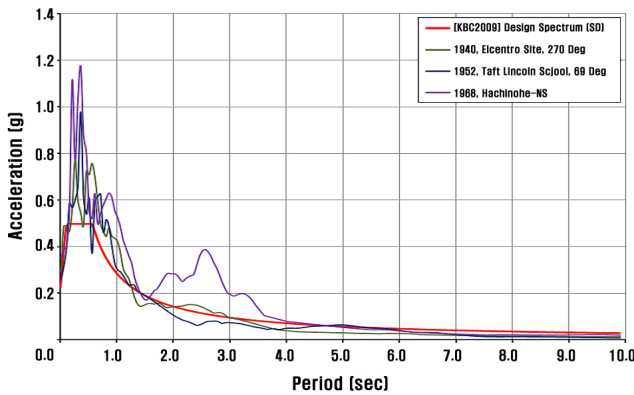


Fig. 3 Scaled response spectra of earthquake data (20F)

감쇠시스템에 설치되는 감쇠장치의 제원을 나타낸 것이다. 해석은 MIDAS GEN 2015 사용하였다.

해석에 사용된 지진파는 비교적 안정된 지반에서 관측된 기록파(El-Centro 1940, Taft 1952, Hschinohe 1968)를 선정하여 총 3개의 지진파를 사용하였으며, KBC2009 0306.7.4.1에 따라 대상 건물의 가정된 지반조건인 S_D 지반의 설계스펙트럼에 적합하게 크기를 조정(scaling)하여 해석에 반영하였다. Fig. 3은 KBC 2009의 스케일링 방법에 따라 크기가 조정된 지진파의 응답스펙트럼과 설계스펙트럼과의 관계를 나타낸 것이다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 감쇠시스템 3개층 적용 시 높이 변화에 따른 효과 분석

Fig. 4 및 Fig. 5는 Exo-type 감쇠시스템을 3개층 적용 시 15

층 및 20층에 대한 강성비에 따른 제진효과를 알아보기 위하여 각 지진파별로 밀면전단력 분포를 비제어구조의 밀면전단력을 기준으로 상대비로 나타낸 것이다. 감쇠시스템을 3개층 적용한 Fig. 4 및 Fig. 5의 결과를 보면 각 지진파별로 다소 차이는 있으나 감쇠시스템과 대상 건물의 강성비가 증가함에 따라 밀면전단력의 감소율이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 목표로 정한 밀면전단력 20% 전후의 감소효과를 얻기 위해서는 15층일 경우 강성비는 7.0배 이상, 감쇠장치의 크기는 600×600 mm 이상 확보되어야 하며, 대상 건물이 20층일 경우는 강성비는 7.0배 이상, 감쇠장치의 크기는 700×700 mm를 확보할 필요가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 감쇠시스템을 3개층 적용 시 15층 및 20층에 대한 강성비에 따른 최상층 최대응답변위의 저감효과를 알아보기 위하여 각 지진파별로 최상층 최대응답변위를 비제어 구조의 최상층 최대응답변위를 기준으로 상대비로 나타낸 것이다. 15층 해석결과 각 지진파별로 다소 차이는 있으나, 밀면전단력의 감소결과와 유사하게 강성비가 증가함에 따라 그리고 감쇠장치의 크기가 증가할수록 최상층 최대응답변위 역시 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 대상 건물이 20층인 경우는 각 지진파별로 강성비와 감쇠장치의 크기가 증가하여도 감소효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 대상 건물의 높이에 대한 감쇠시스템의 적용 높이가 낮아 최상층 응답변위를 제어하지 못한 것으로 판단된다. 최상층 최대응답변위 감소를 얻기 위해서는 대상 건물 대비 적절한 Exo-type 감쇠시스템의 높이 확보 또한 필요한 것으로 판단된다.

4.2 감쇠시스템 5개층 적용 시 높이 변화에 따른 효과 분석

Fig. 8 및 Fig. 9는 Exo-type 감쇠시스템을 5개층 적용 시 15층 및 20층에 대한 강성비에 따른 제진효과를 알아보기 위하여 각 지진파별로 밀면 전단력 분포를 비제어구조의 밀면전단력을 기준으로 상대비로 나타낸 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9를 보면 각 지진파별로 다소 차이는 있으나 Exo-type 감쇠시스템을 3개층 적용한 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한, Exo-type 감쇠시스템에 적용되는 감쇠장치의 크기가 200×200 mm 이하인 경우도 3개층 적용 시와는 상반되게 강성비 증가에 따라 밀면전단력이 약 10% 내외로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 강성비의 경우에도 3개층을 적용하였을 때 보다 5개층을 적용한 경우가 밀면전단력 감소가 더 많은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 살펴볼 때 대상 건물 대비 Exo-type 감쇠시스템의 적절한 높이가 필요할 것으로 사료된다. Exo-type 감쇠시스템을 5개층 적용하여 유효한 제진효과를 얻기 위해서는 15층 및 20층 모두 대상 건물과 Exo-type 감쇠시스템의 강성비는 2.5배 이상, 감쇠장치의 크기는 대상 건물이 15층의 경우 400×400

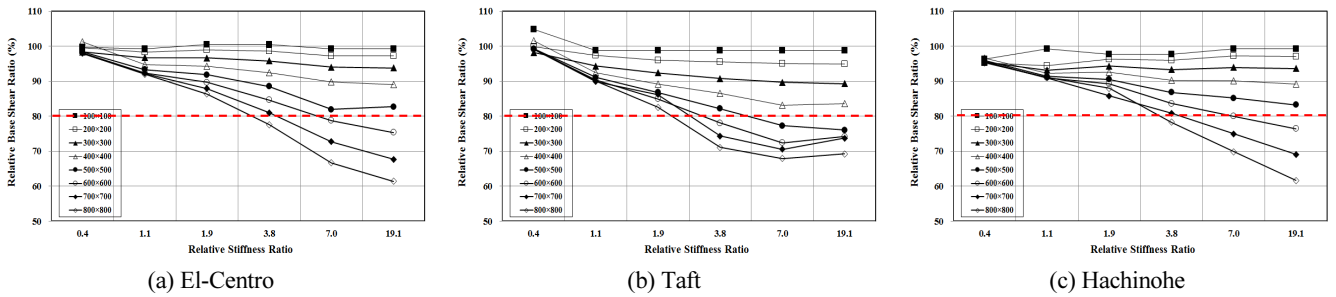


Fig. 4 Distribution of the base shear of Exo-type damping system due to relative stiffness ratio (15F)

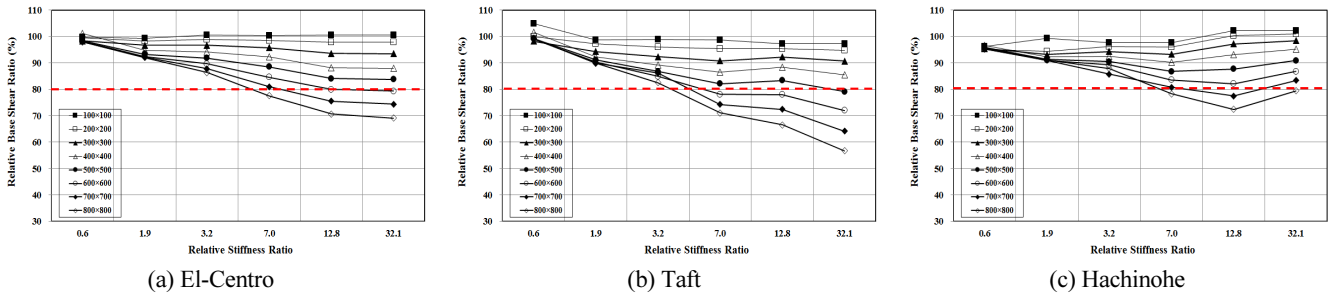


Fig. 5 Distribution of the base shear of Exo-type damping system due to relative stiffness ratio (20F)

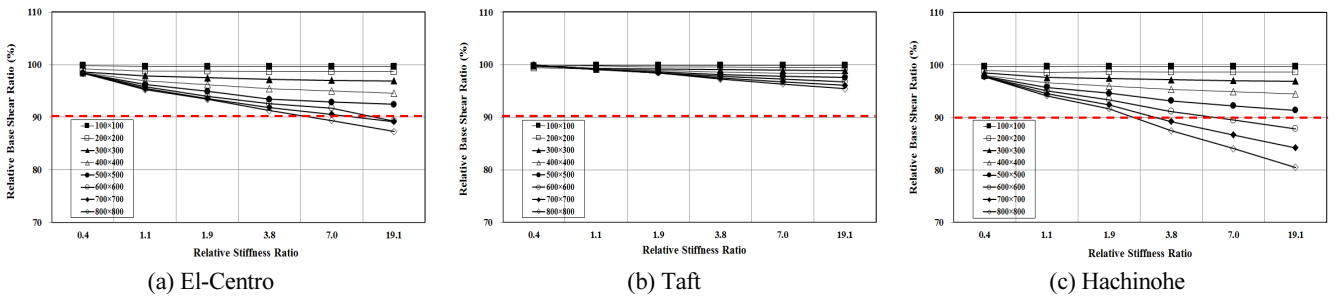


Fig. 6 Displacement reduction ratio with dampers up to the third story (15F)

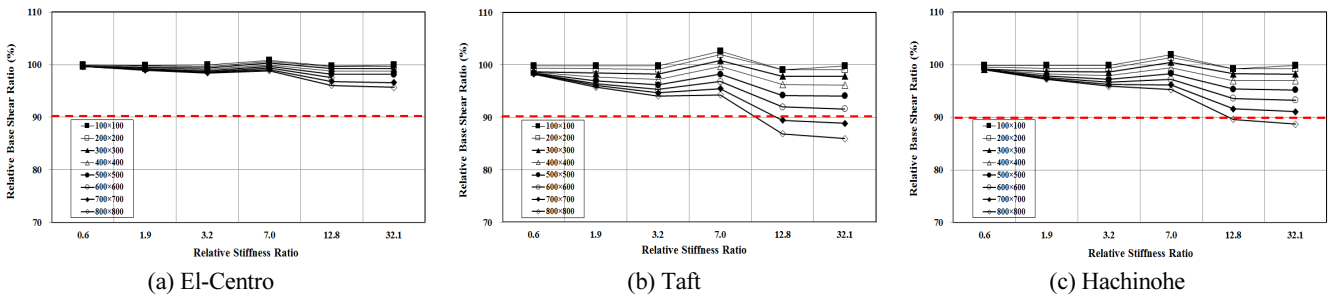


Fig. 7 Displacement reduction ratio with dampers up to the third story (20F)

mm 이상, 20층의 경우는 500×500 mm 이상을 확보할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 Exo-type 감쇠시스템을 5개층 적용 시 15층 및 20층에 대한 강성비에 따른 최상층 최대응답변위의 저감효과를 알아보기 위하여 각 지진파별로 최상층 최대응답 변위를 비제어 구조의 최상층 최대응답변위를 기준으로 상대

비로 나타낸 것이다. 15층 및 20층 모두 밀면전단력의 감소결과와 유사하게 강성비가 증가함에 따라 그리고 감쇠장치의 크기가 증가할수록 최상층 최대응답변위 역시 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 최상층 최대응답변위의 경우 밀면전단력 결과와 다르게 대상 건물과 Exo-type 감쇠시스템 강성비의 영향보다는 Exo-type 감쇠시스템의 적용층수에 영향을 받

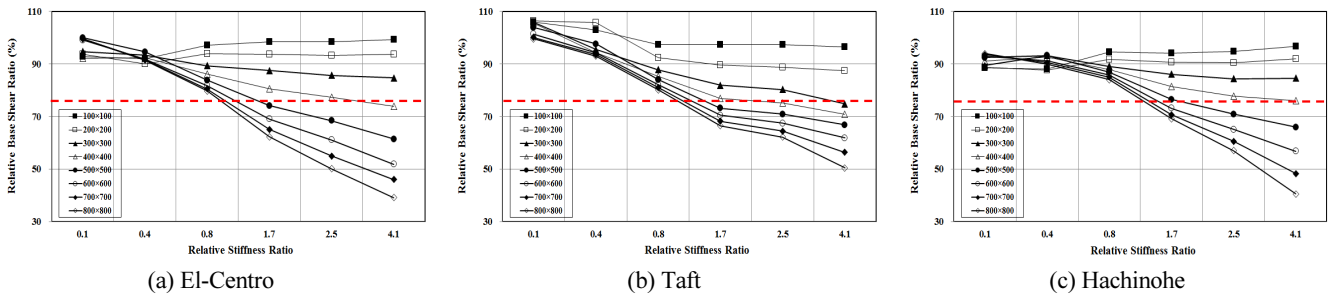


Fig. 8 Distribution of the base shear of Exo-type damping system due to relative stiffness ratio (15F)

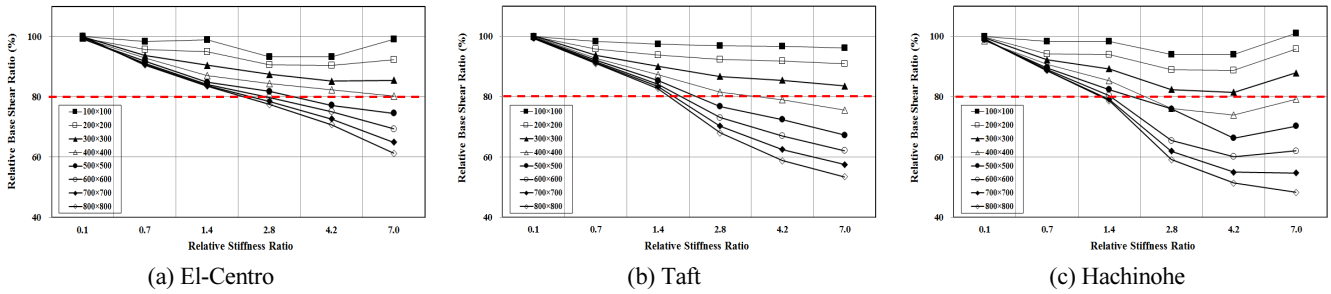


Fig. 9 Distribution of the base shear of Exo-type damping system due to relative stiffness ratio (20F)

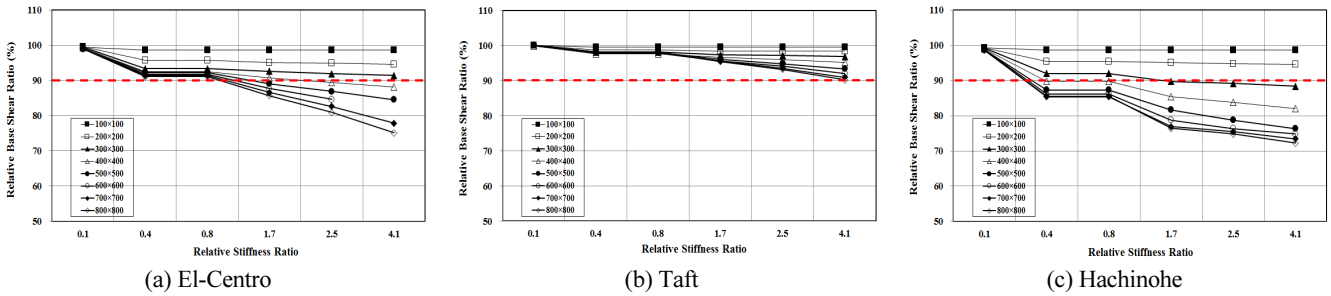


Fig. 10 Displacement reduction ratio with dampers up to the third story (15F)

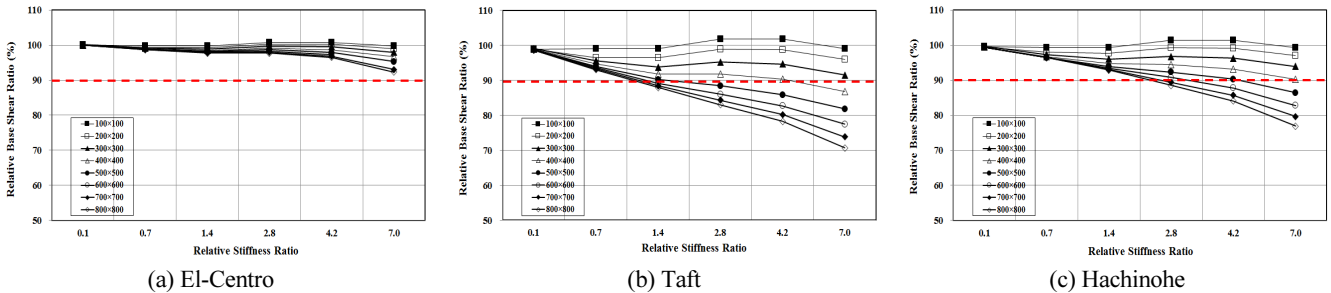


Fig. 11 Displacement reduction ratio with dampers up to the third story (20F)

는 것으로 나타났다.

동일한 높이의 대상 건물에 있어서는 유사한 강성비와 동일한 크기의 감쇠장치를 갖는 경우라도 외부지지구조물의 적용 층수에 따라 최상층 최대응답변위의 감소가 다르게 나타났다. 이처럼 최상층 최대응답가속도 감소를 위해서는 외부지지구조물의 적절한 높이가 필요할 것으로 판단된다.

4.3 Exo-type 감쇠시스템의 최적 강성비 및 감쇠장치의 항복비($V_{damp}/V_{base\ shear}$)

Fig. 12부터 Fig. 15까지는 Exo-type 감쇠시스템의 적용 층수에 따른 제진효과를 좀 더 명확하게 분석하기 위하여 각 지진파별로 항복비와 강성비에 따른 밀면전단력 분포를 비제어구조의 밀면전단력을 기준으로 상대비로 나타낸 것이

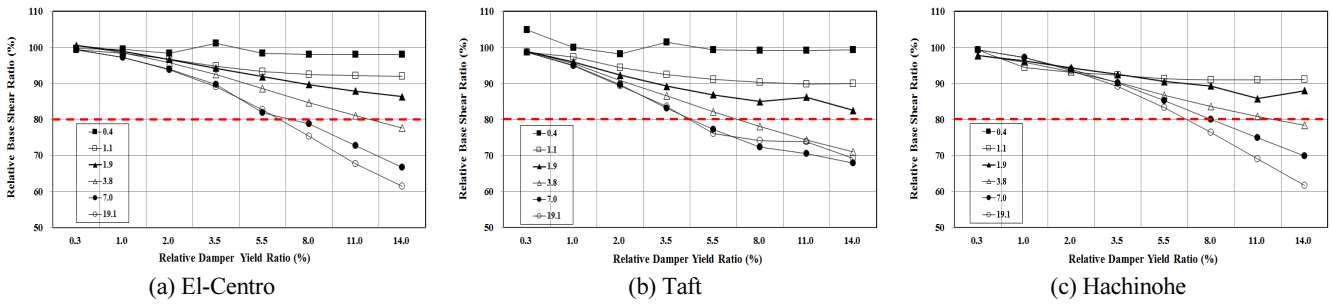


Fig. 12 Distribution of the base shear with stiffness ratio and damper yield ratio (15F-3Story)

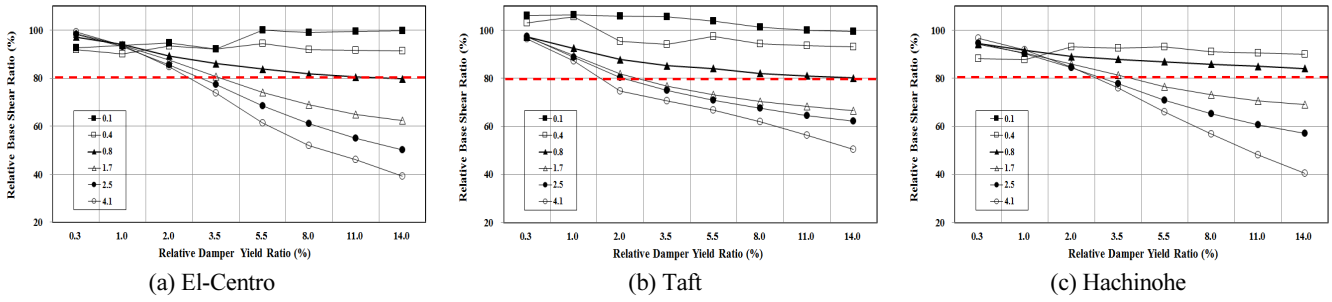


Fig. 13 Distribution of the base shear with stiffness ratio and damper yield ratio (20F-3Story)

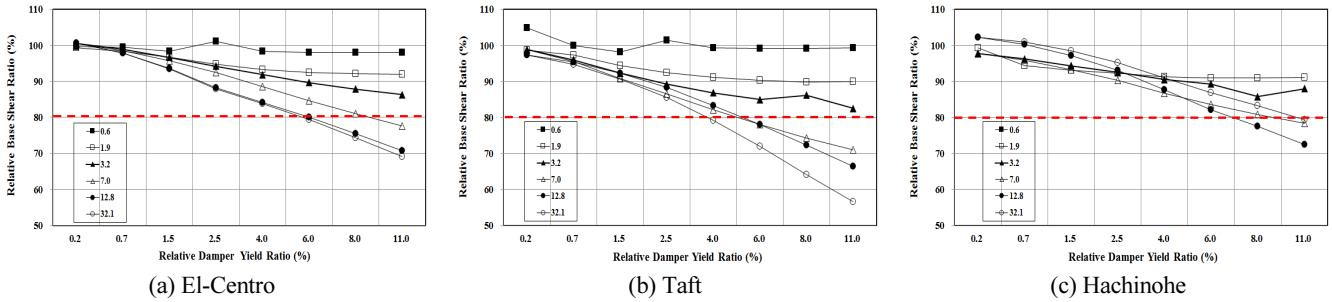


Fig. 14 Distribution of the base shear with stiffness ratio and damper yield ratio (15F-5Story)

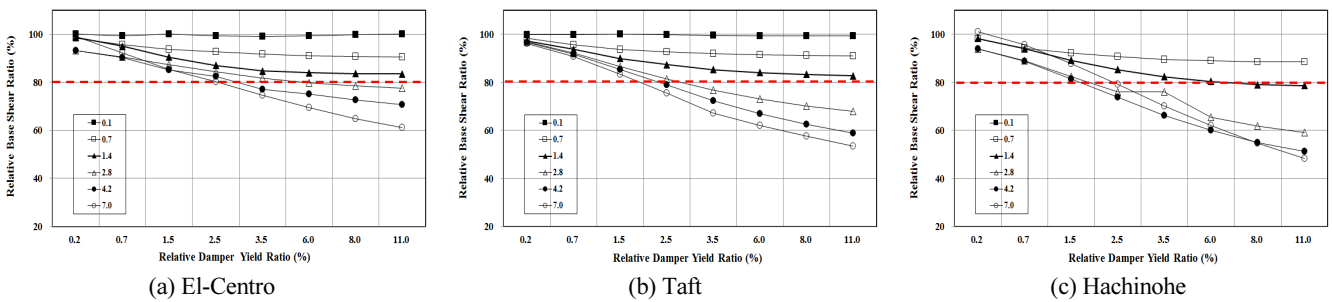


Fig. 15 Distribution of the base shear with stiffness ratio and damper yield ratio (20F-5Story)

다. Exo-type 감쇠시스템 3개층 적용한 경우 각 지진파별로 다소 차이는 있으나 대상 건물과 감쇠시스템의 강성비는 7.0 이상, 감쇠장치의 항복비는 밀면전단력의 약 8.0% 이상 확보되어야만 목표로 정한 제진효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

또한, Exo-type 감쇠시스템을 5개층 적용한 경우에도 각 지진파별로 다소 차이는 있으나 대상 건물과 감쇠시스템의 강성비는 2.5 이상, 항복비는 밀면전단력의 약 3.5% 이상 확보되어야만 목표로 정한 제진효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 효과적인 제진설계를 구현하기 위한 설계기술 개발의 일환으로 15층 및 20층 라멘조 공동주택을 대상으로 기존연구에서 제안된 Exo-type 감쇠시스템을 활용하여 대상 건물과 Exo-type 감쇠시스템의 최적 강성비 및 적용된 감쇠장치의 항복비에 따른 라멘조 건물의 제진효과를 검토해보았으며, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 연구결과, Exo-type 감쇠시스템을 3개층 적용 시에는 15층과 20층 모두 밀면전단력과 최상층 최대응답변위 감소라는 관점에서 유효한 제진효과를 얻기 위해서는 Exo-type 감쇠시스템과 대상 건물의 강성비는 7.0 이상 확보를 하여야 하며, 감쇠시스템에 적용된 감쇠장치의 항복비는 대상 건물 층전단력의 약 8.0% 이상 확보할 필요가 있는 것으로 나타났다.
- (2) Exo-type 감쇠시스템을 5개층 적용 시에는 15층과 20층 모두 Exo-type 감쇠시스템과 대상 건물의 강성비는 2.5 이상 확보 하여야 하며, 감쇠시스템에 적용된 감쇠장치의 대상 건물 층전단력의 약 3.5% 이상 확보할 필요가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구에서는 Exo-type 감쇠시스템에 밀면전단력과 최상층변위 감소 결과를 확인하기 위하여 동일한 항복강도를 가진 감쇠장치를 적용하였으나, 경제성 확보를 위해 수직 방향에 대한 감쇠장치의 최적배치에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 본 해석의 경우 탄성 상태의 해석으로서 비선형 동적해석을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

References

1. Hur, Moo-Won, Lee, Sang-Hyun, Chun, Young-Soo (2015) "Vibration Control of the Framed Building Structures Using KGDS System with Isotropic Damping Devices", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 19, no. 2, 52-59.
2. Architectural Institute of Korea (2009), Building code and Commentary, KBC Committee, pp.102-103.
3. ASCE (2010), ASCE/SEI7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Reston: American Society of Civil Engineers, 179-197.
4. Chun, Y. S., Hur, M. W. (2014), Influence of the Beam -Column Stiffness ratio on Passive supplemental Damping, Journal of KSMI, 18(1), 700-702.
5. Hwang, J. S., Park, S. C., Kang, K. J. (2013), A Study on the Hysteresis properties and Mathematical Model of Kagome Truss Damper, Architectural Institute of Korea, 29(9), 21-29.
6. Oh, Sang-Hoon, Kim, Young-Ju, Tyu, Hong-Sik, Choi, Hong-Bae, Kang, Chang-Hoon (2005), "Hysteresis Behavior of Beam-to-Column Connections with Elasto -Plastic Hysteretic Dampers", Architectural Institute of Korea, vol. 25, No 1, pp.635-638.
7. Lee, H. H., Kim, S. I. (2010), Metallic Damper Shape and Cyclic Behavior for the Seismic Capacity Improvement of Building Structures, Journal of Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 14(3), 123-130.
8. Hwang, Jae Seung, Park, Seong Cheol, Kang, Ki Ju, "A Study on the Hysteresis properties and Mathematical Model of Kagome Truss Damper", Architectural Institute of Korea, vol. 29, No 9, 2013, pp.21-29.
9. Lee, D. and Taylor, D.P. (2000), "Viscous Damper Development and future Trends", Structural Design Tall Building 10, May, pp. 311-320.
10. Ko, G. D., Joo, J. H., Hwang, J. S. Kang, K. J. (2010), "Application of Wire-woven Bulk Kagome as a Vibration Control Device for a Building Structure", International Conference on Sustainable Building Asia, pp. 293-298.

Received : 03/28/2015

Revised : 06/16/2015

Accepted : 06/23/2015

요 지 : 본 논문에서는 효과적인 제진설계를 구현하기 위한 설계기술 개발의 일환으로 최근 제안된 Exo-type 감쇠시스템을 활용하여 15층과 20층의 연구 대상 건물을 대상으로 감쇠시스템의 최적 강성비와 적용된 감쇠장치의 최적 항복비에 따른 철근콘크리트 라멘조 건물의 제진효과를 검토해 보았다. 해석결과, Exo-type 감쇠시스템을 3개층 적용 시에는 대상 건물 15층과 20층 모두 밀면전단력과 최상층 최대응답변위 감소라는 관점에서 유효한 제진효과를 얻기 위해서는 Exo-type 감쇠시스템과 대상 건물의 강성비는 7.0 이상 확보를 하여야 하며, 감쇠시스템에 적용된 감쇠장치의 항복비는 대상 건물의 층전단력의 약 8.0% 이상 확보할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한, Exo-type 감쇠시스템을 5개층 적용 시에는 대상 건물 15층과 20층 모두 Exo-type 감쇠시스템과 대상 건물의 강성비는 2.5 이상 확보 하여야 하며, 감쇠시스템에 적용된 감쇠장치의 대상 건물의 층전단력의 약 3.5% 이상 확보할 필요가 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 등방성 감쇠장치, 강성비, 감쇠장치의 항복비, 제진효과, 설계지침
