

내진보강을 위한 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템의 성능 평가

박장호[†] · 안성찬 · 박관순^{*}

아주대학교 환경건설교통공학부 · *동국대학교 건축공학과
(2011. 10. 21. 접수 / 2012. 1. 17. 채택)

Performance Evaluation of a Pivot-Type Displacement Amplification Damper System for Seismic Strengthening

Jang Ho Park[†] · Sung Chan Ahn · Kwan Soon Park^{*}

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University

^{*}Department of Architectural Engineering, Dongguk University

(Received October 21, 2011 / Accepted January 17, 2012)

Abstract : For the vibration control of earthquake-excited structures, a pivot-type displacement amplification damper system is proposed and its validity is investigated in this study. A rotational frame amplifies the stroke of the proposed damper system and it can absorb more vibrational energy compared to the conventional dampers of which strokes are not large. In order to prove the effectiveness of the system, time-history analyses are performed with a three story building modelled by a three dimensional frame and numerical results are compared with those for a conventional V-shape braced damper system. In addition, the seismic performances are investigated according to the changes of damper capacity and location.

Key Words : earthquake loading, vibration control, pivot-type displacement amplification damper system, vibration energy, seismic performance

1. 서론

전 세계적으로 지진의 발생 빈도가 증가하고 그 규모도 커짐에 따라 지진 발생시 구조물에 가해지는 손상을 최소화하기 위한 많은 연구와 노력이 이루어지고 있다¹⁻⁹⁾. 우리나라의 경우 건축물에 대한 내진설계는 국토해양부의 내진설계 시행령에 의하여 이루어지고 있으며, 점차 대상 구조물이 확대되고 있다. 그러나 내진설계개념이 도입되기 전에 지어진 구조물이 다수 존재하며, 이러한 구조물의 경우 지진 발생 시 대규모 피해가 발생할 가능성이 있어 적절한 대책이 필요한 실정이다. 최근에는 국토해양부와 LH공사가 공동으로 ‘소규모 건축물 내진보강 포인트 20’이라는 책자를 발간한 바 있으며, 여기에서는 내진보강의 필요성을 강조하고 건축물의 내진성능을 향상시키기 위한 내진보강 기술을 크게 3가지로 구분하여 제시하였다¹⁰⁾. 건축물의

내력을 향상시키는 방법, 연성을 증대시키는 방법, 지진 시 거동을 제어하는 방법 등이 그것이다. 각 방법은 서로 다른 특징과 장단점을 가지고 있으며, 현장 여건에 따라서 적용이 선택적으로 이루어지는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 세 가지 방법 중에서 지진 시 제어장치를 이용하여 구조물의 응답을 감소시키는 방법에 관하여 연구하였다.

현재 내진설계가 이루어져 있지 않은 기존 구조물의 내진성능 향상을 위한 제진장치 중에는 층간 설치형 진동저감 장치가 많이 알려져 있다. 일반적인 층간 설치형 진동저감 장치는 구조물의 층과 층 사이에 별도의 가새 시스템을 이용하여 감쇠장치를 설치하는 것으로 층간에서 발생하는 지진응답을 이용하여 제진효과를 나타낸다. 그런데, 건축물에 발생하는 층간 변위나 속도 등은 설치된 감쇠장치가 충분한 제어력을 발생하기에는 상대적으로 작은 양에 해당하기 때문에 이러한 작은 응답에 대하여 감쇠장치가 적정수준의 제어효과를 가지기 위해서는 감쇠장치의 용량이 커지거나 다수의 감쇠장치를 사용하여야 하는 단점을 지니고 있다. 또한 가새 시스

[†]To whom correspondence should be addressed.
jangho@ajou.ac.kr

템을 이용한 감쇠장치들은 구조물의 공간 활용도를 떨어뜨리기도 한다.

이 연구에서는 이러한 층간 설치형 진동저감 장치의 단점을 보완한 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템을 제안하였다. 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템은 피봇형 힌지와 프레임의 회전을 이용하여 감쇠기의 변위를 증폭시켜 감쇠효과를 높이는 것으로 기존 감쇠 시스템에 비하여 더 좋은 제진효과를 나타낼 수 있다. 제안된 장치의 지진응답 감소 효과를 살펴보기 위하여 3차원으로 모델링된 3층 프레임 구조물에 대하여 지진응답해석을 수행하였고 기존 V자형 가새 감쇠 시스템과 제진성능을 비교하였다.

2. 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템

건물의 진동을 제어하는 방법은 크게 수동제어, 능동제어, 준능동제어 등으로 분류할 수 있으며, 능동형과 준능동형 제진장치는 성능이 우수하고 다양한 불확실성에 적극적으로 대처가 가능하나 구조가 복잡하고 가격이 고가인 단점이 있어 중소형 건물에 사용하기에는 다소 어려운 점이 있다. 반면 수동형 제진장치는 다양한 진동수를 포함한 지진하중에 대한 대처 능력면에서 다소 성능이 떨어지나 비용 대비 효과가 뛰어나다. 특히, 수동형 제진장치의 일종인 층간 설치형 진동저감 장치는 층간의 상대변위를 이용하여 진동에 의한 에너지를 마찰, 변형, 재료의 항복 등을 통해 소산시킴으로써 구조물의 동적 응답을 효과적으로 감소시킬 수 있으며, 비교적 설치가 간단하고 비용이 저렴하여 기존 중소형 구조물의 내진보강에 사용되고 있다¹¹⁾.

일반적인 층간 설치형 진동저감 장치에는 장치의 양단을 구조물의 층과 층 사이에 고정시킬 수 있는 별도의 가새 시스템이 사용된다. 그러나 큰 강성을 가지는 구조물의 경우 구조물의 층과 층 사이에 발생하는 변위, 속도, 가속도가 작은 값을 가지며, 설치상의 제약으로 인해 감쇠장치가 연결되는 지점에서의 변위 등의 응답은 역시 매우 작은 값을 가지게 된다. 이러한 작은 변위 등으로 인하여 감쇠장치가 적정수준의 제어효과를 가지기 위해서는 감쇠장치의 용량이 커지거나 다수의 감쇠장치가 사용되어야 한다. 특히, 일반적인 가새 시스템인 대각형이나 웨브론 형태의 가새는 구조물의 층간 변위보다 작은 크기의 변위가 가새에서 발생하기 때문에 이러한 문제는 더욱 심각해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 층간 설치형 제진 장치에 토글(to-

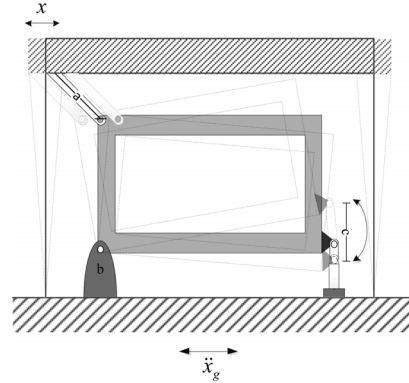


Fig. 1. Pivot-type displacement amplification damper system.

ogle) 가새를 적용하거나 마찰감쇠기를 변형한 회전마찰감쇠기를 이용하여 변위를 증폭시켜 에너지 소산효과를 증가시키는 기술이 개발되었다. 그러나 이러한 장치 역시 가새 시스템으로 인하여 구조물의 공간 활용도를 저하시키는 문제점을 지니고 있다.

본 논문에서는 이러한 층간 설치형 진동저감 장치의 단점을 보완한 Fig. 1과 같은 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템을 개발하였다. 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템의 에너지 소산 메카니즘은 다음과 같다. 구조물에 지진하중이 가해지면 구조물에 층간 변위가 발생하고 이로 인하여 피봇형 힌지에 의해 프레임에 회전이 발생하여 구조물에서의 층간 변위가 프레임의 형상비에 따라 증폭되어 감쇠기에 작용함으로써 보다 효과적으로 구조물의 진동을 제어하는 시스템이다. 또한 내부에 프레임을 설치하여 기존 구조물에 설치가 가능하고 기존의 대각 가새 시스템에 비해 공간 활용도도 뛰어난 장점이 있다.

3. 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 프레임 구조물의 지진응답해석

제안된 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템의 유효성을 확인하기 위하여 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 프레임 구조물에 대한 지진응답해석을 수행하였다¹²⁾.

3.1. 해석 대상 구조물

해석 대상 구조물은 Fig. 2와 같이 3층의 프레임 구조물과 구조물의 내부에 설치된 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템으로 구성된다. 3층의 프레임 구조물의 높이는 9.6 m이고, 각층의 단면 크기는 56 ×

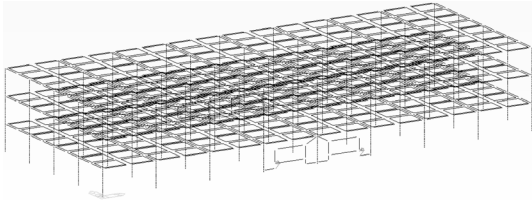


Fig. 2. Structure model with pivot-type displacement amplification damper system.

Table 1. Properties of structural members

부재	Section	탄성계수 (kg/m ²)	단위질량 (kg/m ²)
Column(Steel)	H 350 × 357 × 19/19 (mm)	2.141 × 10 ¹⁰	7850
Girder(Steel)	H 450 × 200 × 9/14 (mm)	2.141 × 10 ¹⁰	7850
기본층 Plate (Concrete)	B : 56 m H : 22 m t : 0.28 m	2.911 × 10 ⁹	2500
최상층 Plate (Concrete)	B : 56 m H : 22 m t : 0.23 m	2.911 × 10 ⁹	2500

Table 2. Applied loads to structure

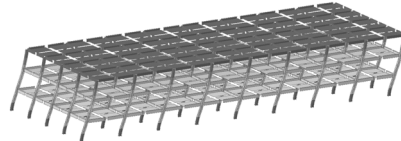
층	고정하중 (kgf/m ²)	적재하중 (kgf/m ²)
기본층	510	220
최상층	380	200

22 m이다. 구조물을 구성하고 있는 부재의 특성은 Table 1과 같다. 해석 대상 구조물에 적용된 고정하중과 적재하중은 Table 2와 같다. 감쇠기는 구조물의 전면과 구조물의 후면에 각각 2개를 부착하였으며, 감쇠기의 감쇠값은 80,000 kgf·sec/m을 사용하였다.

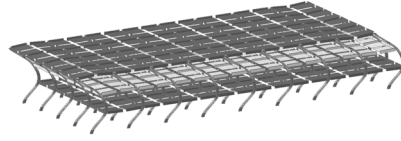
Fig. 3 및 Fig. 4에는 감쇠 시스템이 적용되지 않은 구조물과 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물의 주요 모드형상과 고유진동수를 도시하였다. 고유진동수의 변화는 나타나지 않았으며, 구조물의 모드형상은 전체적으로 유사하게 나타나고 있다.

3.2. 지진응답해석

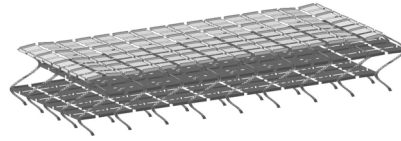
지진하중에 대한 구조물의 동적해석을 위한 입력 지진파로는 인공 지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 사용하여 최대지반가속도(PGA) 0.154 g를 갖는 인공 지진 가속도 시간이력을 Fig. 5와 같이 생성하여 사용하였다¹³⁾.



Mode 1(Frequency : 2.015 Hz)

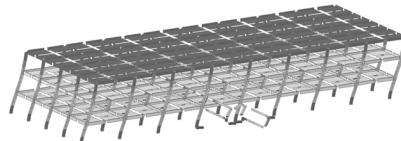


Mode 2(Frequency : 6.092 Hz)

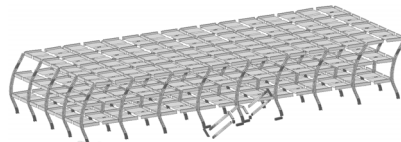


Mode 3(Frequency : 9.934 Hz)

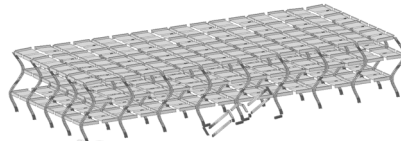
Fig. 3. Mode shapes and natural frequencies of structure without damper system.



Mode 1(Frequency : 2.015 Hz)



Mode 2(Frequency : 6.092 Hz)



Mode 3(Frequency : 9.934 Hz)

Fig. 4. Mode shapes and natural frequencies of structure with pivot-type displacement amplification damper system.

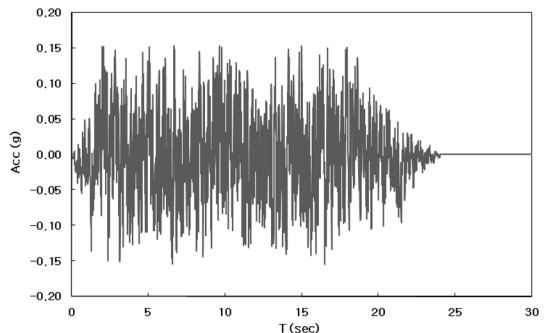


Fig. 5. Artificial earthquake acceleration time history.

Table 3. Comparison of maximum displacements between the model without damper system and model with pivot-type displacement amplification damper system

위치	감쇠 시스템 미적용 구조물	감쇠 시스템 적용 구조물
1층	0.00796 m	0.00595 m
2층	0.0173 m	0.0124 m
3층	0.0232 m	0.0163 m

감쇠 시스템이 적용되지 않은 구조물과 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물에 대하여 상용 구조해석프로그램인 MIDAS를 이용하여 주어진 지반운동에 대한 시간이력해석을 수행하였다. Table 3은 감쇠 시스템이 적용되지 않은 구조물과 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물의 각 층에서 발생한 최대변위를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있는 것과 같이 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용됨으로서 구조물에서의 변위가 25.3%에서 29.7%까지 감소하였다. 이러한 결과는 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템이 구조물의 진동을 감소시킬 수 있음을 보여준다.

3.3. 감쇠기 용량과 배치에 따른 감쇠 시스템의 성능 평가

감쇠기의 감쇠값 및 감쇠기의 배치에 따른 진동저감효과를 살펴보았다. 감쇠기의 감쇠값으로는 40,000 kgf·sec/m, 80,000 kgf·sec/m, 160,000 kgf·sec/m을 사용하였으며, 감쇠기의 배치는 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 경우(Fig. 2)와 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우(Fig. 6)에 대하여 지진 응답해석을 수행하였다. 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우는 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 경우에 비하여 감쇠기의 수가 2배가 되어 총 8개가 부착되었다.

Table 4와 Table 5는 각각 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 경우와 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우에 구조물 각 층에서 발생한 최대변위를 나타낸 것이다.

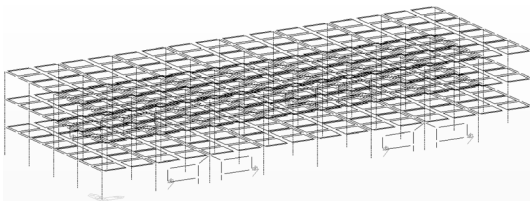


Fig. 6. Structure model with distributed pivot-type displacement amplification damper system.

Table 4. Maximum displacements of structures with centered pivot-type displacement amplification damper system

위치	C = 40,000 kgf·sec/m	C = 80,000 kgf·sec/m	C = 160,000 kgf·sec/m
1층	0.00657 m	0.00595 m	0.00467 m
2층	0.0140 m	0.0124 m	0.00991 m
3층	0.0185 m	0.0163 m	0.0130 m

Table 5. Maximum displacements of structures with distributed pivot-type displacement amplification damper system

위치	C = 40,000 kgf·sec/m	C = 80,000 kgf·sec/m	C = 160,000 kgf·sec/m
1층	0.00570 m	0.00465 m	0.00354 m
2층	0.0121 m	0.00990 m	0.00742 m
3층	0.0160 m	0.0130 m	0.00964 m

감쇠값이 80,000 kgf·sec/m인 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 경우와 감쇠값이 40,000 kgf·sec/m인 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우는 구조물에 적용된 총 감쇠값이 동일하다. 이때 두 구조물에 발생한 최대변위를 각 위치에서 비교하여 보면 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 경우(Table 4의 C = 80,000 kgf·sec/m)보다 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우(Table 5의 C = 40,000 kgf·sec/m)가 최대 4.2% 작게 나타나고 있다. 또한 감쇠값이 160,000 kgf·sec/m인 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 경우(Table 4의 C = 160,000kgf·sec/m)와 감쇠값이 80,000 kgf·sec/m인 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우(Table 5의 C = 80,000 kgf·sec/m)에 대하여 구조물에 발생한 최대변위를 비교하여 보면 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우가 최대 0.4% 작게 나타나고 있다. 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우가 감쇠기를 구조물의 중앙에 집중 배치한 경우보다 응답 개선 효과가 조금 더 있는 것으로 판단된다.

감쇠 시스템이 적용되지 않은 구조물에서의 최대변위와 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 피봇형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 최대변위를 보면 감쇠값이 40,000 kgf·sec/m인 경우 17.5%에서 20.3%, 감쇠값이 80,000 kgf·sec/m인 경우 25.3%에서 29.7%, 감쇠값이 160,000 kgf·sec/m인 경우 41.3%에서 44.0%가 감소하였다. 감쇠기의 감쇠값이 증가함에 따라 응답의 감소폭은 감소하고 있다.

Fig. 7-9는 각각 감쇠기가 적용되지 않은 경우, 감쇠기(감쇠값 160,000 kgf·sec/m)를 구조물의 중앙에 배치한 경우, 감쇠기(감쇠값 80,000 kgf·sec/m)를 구

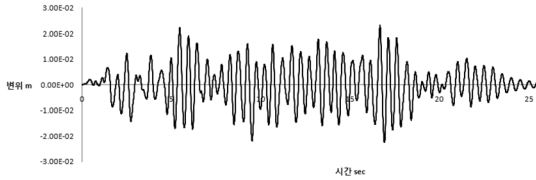


Fig. 7. Displacement time history at the top of structure without damper system.



Fig. 8. Displacement time history at the top of structure with centered pivot-type displacement amplification damper system(C = 160,000 kgf · sec/m).



Fig. 9. Displacement time history at the top of structure with distributed pivot-type displacement amplification damper system(C = 80,000 kgf · sec/m).

조물의 양쪽으로 배치한 경우에 대하여 구조물 상단에서의 변위 시간이력을 도시한 것이다. 제안된 감쇠 시스템이 적용됨으로써 구조물의 응답이 크게 감소함을 확인할 수 있다.

4. 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템과 V자형 가새 감쇠 시스템의 성능 비교

피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템의 성능을 확인하기 위하여 일반적으로 널리 알려진 감쇠 시스템인 V자형 가새 감쇠 시스템에 대한 지진응답해석을 수행하였다. Fig. 10과 같은 V자형 가새 감쇠 시스템이 적용된 구조물과 Fig. 2와 같은 제안된 감쇠 시스템이 적용된 구조물에 대하여 지진응답해석 결과를 비교하였으며, 해석에 사용된 구조물의 제원은 3절에서 제시된 것과 동일하다. 감쇠기는 두 경우 모두 구조물의 전면과 구조물의 후면에 각각 2개를 부착하였고, 사용된 감쇠값은 80,000 kgf · sec/m으로 동일한 용량의 감쇠기를 사용하였다. 입력지진파로는 앞서 생성된 인공 지진파 시간이력(Fig. 5)을 사용하였다.

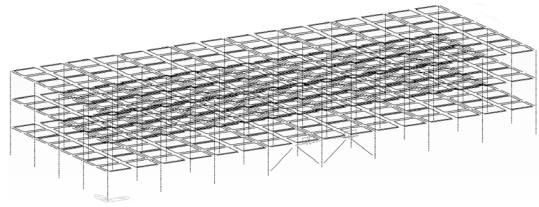


Fig. 10. Structure model with V-shape braced damper system.

Fig. 11은 해석 결과로부터 두 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서 발생한 최대변위와 사용된 감쇠기에서 발생한 최대변위를 도시한 것이다. 결과를 보면 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 응답이 V자형 가새 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 응답에 비하여 22.5%에서 27.9%까지 작게 나타나 제안된 감쇠 시스템의 지진응답 제어 성능이 더 우수한 것으로 판단된다. 또한 감쇠기에서 발생한 최대변위는 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 값이 V자형 가새 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 값보다 92.8% 크게 나타나고 있다. 이러한 결과는 제안된 감쇠 시스템에서 감쇠기 자체에 큰 변위량이 발생되어 보다 많은 진동에너지를 흡수함을 의미하며, 제안된 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 기존의 V자형 가새 감쇠 시스템보다 구조물의 진동을 효과적으로 감소시킴으로서 구조물의 안전성을 확보하는데 유리함을 보여준다. 또한 구조물의 진동이 증폭되어 감쇠기에 작용함으로써 동일한 용량의 감쇠기를 보다 효율적으로 이용할 수 있음을 의미하고, 이를 고려하면 구조물에서 동일한 수준의 진동 저감효과 얻고자 할 때는 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템에서는 기존의 V자형 가새 감쇠 시스템에서보다 더 작은 용량의 감쇠기가 사용될 수 있음을 의미한다.

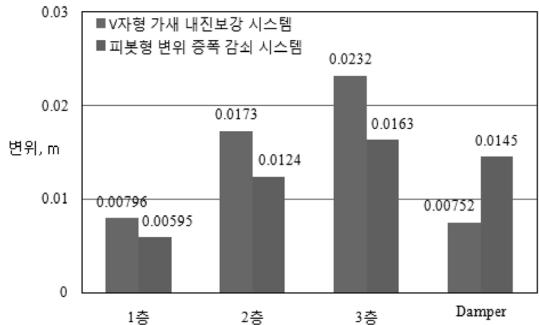


Fig. 11. Comparison of maximum displacements between model with pivot-type displacement amplification damper system and model with V-shape braced damper system.

5. 결론

본 논문에서는 기존 층간 설치형 진동저감 장치에서 나타나는 단점을 보완한 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템을 제안하였으며, 지진하중을 받는 프레임 구조물에 대한 수치해석을 수행하여 제안된 감쇠 시스템의 진동저감 성능을 분석하고 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 응답이 V자형 가새 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 응답에 비하여 크게 감소하였다. 또한 감쇠기에서의 최대변위는 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 값이 V자형 가새 감쇠 시스템이 적용된 구조물에서의 값보다 92.8% 증가하였다. 이러한 결과는 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 V자형 가새 감쇠 시스템에 비해 효율적으로 구조물의 진동을 제어할 수 있음을 의미하며, 동일한 수준의 진동 저감 효과를 얻기 위하여 제안된 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템에서는 기존의 V자형 가새 감쇠 시스템에서보다 더 작은 용량의 감쇠기를 사용할 수 있음을 의미한다. 이로부터 본 논문에서 제안된 피벗형 변위 증폭 감쇠 시스템이 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 감쇠기의 배치에 따른 진동 저감효과를 보면 감쇠기를 구조물의 중앙에 배치한 경우가 감쇠기를 구조물의 양쪽으로 배치한 경우보다 구조물에서의 응답이 다소 크게 발생하였다. 이는 감쇠기의 용량과 개수 뿐 아니라 감쇠기의 배치도 제어 성능에 영향을 주는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) T. T. Soong, and G. F. Dargush, *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, New York, John Wiley & Sons, 1997.
- 2) T. T. Soong, *Active, Hybrid and Semi-Active Control*, John Wiley & Sons, 2005.
- 3) 김진구, “건축 구조물의 면진 및 제진기술”, 대한건축학회지, Vol. 48, No. 8, pp. 85~89, 2004.
- 4) 황재승, “구조물의 사용성 개선을 위한 제진장치 및 적용사례”, 대한건축학회지, Vol. 48, No. 7, pp. 56~61, 2004.
- 5) 황재승, 송진규, 강경수, 윤태호, “Toggle 시스템을 이용한 구조물의 진동제어”, 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp. 491~498, 2003.
- 6) 이상현, 황재승, 민경원, 이명규, “MR감쇠기를 장착한 토글가새시스템을 이용한 건축구조물의 지진응답제어”, 한국전산구조공학회 논문집, Vol. 19, No. 3, pp. 239~245, 2006.
- 7) 이성경, 이명규, 민경원, “토글형 가새를 이용한 MR감쇠기의 제진성능”, 소음진동학회지, Vol. 16, No. 6, pp. 36~41, 2006.
- 8) 민경원, 김형섭, “지진하중을 받는 구조물의 성능에 기초한 마찰감쇠기 설계”, 한국지진공학회 논문집, Vol. 7, No. 6, pp. 17~24, 2003.
- 9) 김형섭, 박지훈, 민경원, 이상현, 이명규, “회전마찰감쇠기의 등가성형시스템에 관한 실험적 연구”, 한국전산구조공학회 2004년도 학술발표 논문집, pp. 296~303, 2004.
- 10) 국토해양부, LH 공사, 소규모 건축물 내진보강 포인트 20, 2010. 2.
- 11) 최현훈, 비좌굴 가새골조의 성능에 기초한 내진설계, 성균관대학교 대학원, 박사학위 논문, 2005.
- 12) 안성찬, 피벗형 변위증폭 감쇠기 시스템을 적용한 프레임 구조물의 동적해석, 아주대학교 대학원, 석사학위 논문, 2011.
- 13) Dario A. Gasparini, and Erik H. Vanmarcke, *User's Manual for SIMQKE*, 1976.