

제진장치를 이용한 기존 건축물의 내진성능

Seismic Performance of Existing Buildings with Passive Energy Dissipation Devices



최 경 석¹⁾

Choi, Kyung Suk



김 형 준^{2)*}

Kim, Hyung Joon

1. 머리말

국내 내진설계 기준은 1988년 제정된 이후 계속된 개정을 거치며, 보다 엄격하고 체계화된 내진설계 요건을 가지는 KBC2013이 적용되고 있다. KBC2013에서는 설계지진에 대해서 인명 안전에 해당하는 성능수준과 동시에 해당 지역에서 발생 가능한 최대 지진에 대해서 붕괴방지 성능수준의 내진설계 목표수준을 암시적으로 규정하고 있다. 하지만 국내의 대다수 기존 건축물은 내진설계가 도입되기 이전에 건설되었거나, 현행 내진설계기준에서 제시하는 성능수준에 미치지 못하는 이전 기준에 의해 건설되었기 때문에, 이들 건축물에 대한 내진성능평가와 더불어 내진성능향상에 대한 필요성이 대두되고 있다.

기존 구조물의 내진성능을 향상시킬 수 있는 방안으로는 추가적인 구조 부재의 설치를 이용하여 구조물의 강도 및 강성을 증가시키거나 기존 구조 부재의 보수 및 보강을 통해 구조물의 연성도를 증가시키는 방법이 있다. 하지만 이와 같은 방법으로 건축물에 요구되는 내진성능을 만족시키기에는 경제성 혹은 사용성 측면에서 한계가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존 건축물에 제진장치를 설치하여, 지진으로 인한 건축물의 진동을 제어하고 내진

성능을 향상시키는 방안이 제안되고 있다.

본 고에서는 우선 기존 건축물에 적용 가능한 대표적인 제진장치의 종류 및 설계 요구 사항을 간략히 소개한 후 내진 설계가 적용되지 않은 기존 건축물을 제진장치로 보강된 연구 사례를 통해 향상된 건축물의 내진성능에 대해 소개하고자 한다.

2. 기존 건축물에 적용가능한 제진장치의 종류 및 설계요구사항

일반적으로 기존 건축물의 내진성능 향상을 위해 적용가능한 제진장치는 횡력저항시스템의 변형에 의존하여 건축물에 입력되는 에너지의 일정부분을 소산할 수 있는 수동형 제진장치로서, Table 1과 같이 크게 변위의존형 제진장치와 속도의존형 제진장치로 구분할 수 있다.

변위의존형 제진장치는 양쪽 끝단의 상대변위에 의하여 작동하며, 탄-소성 거동을 이용하여 에너지를 소산시킬 수 있는 능력을 보유한 장치로서, 강재의 소성능력을 이용하여 지진에너지를 소산시키는 강재 이력형 제진장치와 마찰 메카니즘을 이용하여 마찰력과 미끄러짐의 변위관계를 사용한 마찰형 제진장치 등이 있다.

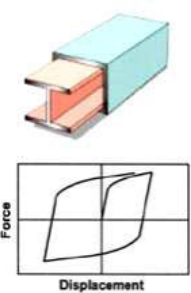

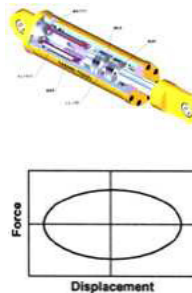
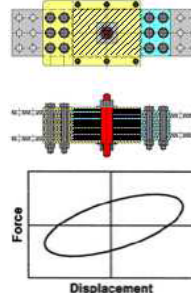
점성 혹은 점·탄성 물질을 이용한 속도의존형 제진장치는 바람에 의한 진동제어 목적으로 개발되었으며, 장치 양 쪽 끝단의 상대속도에 의해 에너지를 소산시킬 수 있도

1) 서울시립대학교, 건축공학과 박사과정

2) 서울시립대학교, 건축공학과 부교수

* E-mail : hyungjoonkim@uos.ac.kr

Table 1 수동형 제진장치의 종류 및 이력 거동

변위의존형 제진장치		속도의존형 제진장치	
강제 이력형	마찰형	점성	점·탄성
			

록 고안된 장치로 하중-변위 곡선은 진동 주파수에 의해 결정된다. 이로 인해 구조물의 동적 거동 시 구조물의 저항력과 장치의 저항력 사이에 위상차가 발생하며, 제진장치와 구조물이 동시에 최대하중에 도달하는 변위 의존형 제진장치와 달리 속도의존형 제진장치와 구조물의 최대하중 도달 시점이 다른 구조적 특성을 가진다.

이상의 수동형 제진장치는 대부분 특정 자유도의 상대응답에 의해 작동하도록 개발되기 때문에, 기존 건축물에 설치시 지진에너지를 효과적으로 소산할 수 있도록 적절히 배치하여야 하고, 기존 건축물의 중력하중 및 풍하중에 의한 하중 및 변위, 노화에 따른 구조 성능의 저하, 온도 및 습도 등 환경적인 요인들을 종합적으로 고려하여 설계되어야 하며, 충분한 안전성과 성능이 입증되어야 한다.

국내외 기준에 따르면, 제진장치는 설계 지진뿐만 아니라 최대급 지진에서도 효과적으로 작동할 수 있도록 설계되어야 하고, 실험을 통해 검증된 제진장치만 사용할 수 있도록 제한하고 있다. 특히 FEMA356에서는 설치된 제진장치의 개수 및 배치 방식에 따라 제진장치는 최대급 지진에 의해 산정된 최대 변위 및 속도보다 1.3배 혹은 2.0배 이상 큰 응답에서도 작동할 수 있도록 제한하고 있다.

한편 제진장치를 기존 건축물에 설치하기 위해서는 보-기둥 라멘구조에 가새형태로 적용되는 경우가 대부분이기 때문에, 가새 및 부속 철물들이 필요하며, 이와 같은 추가적인 요소들은 비탄성 변형으로 인한 제진장치의 효과적인 작동을 저해하지 않고, 탄성상태를 유지할 수 있도록 설계되어야 한다.

제진장치가 설치된 건축물은 단순히 에너지 소산 능력의 증가 이외에도 제진장치의 종류에 따라 추가적인 강성 및 강도의 증가로 인해 기존 건축물과 확연히 다른 동적 특성을 보인다. 따라서 제진 보강된 구조물은 기존 건축물의

지진력저항시스템과 적용된 제진장치의 변위, 진동수 등에 대한 의존성을 명확하게 반영할 수 있는 비선형 해석 모델을 이용하여 비선형정적해석 혹은 비선형동적해석을 이용한 성능평가를 수행하여, 제진장치에 의한 보강효과를 검증하여야 한다. 이에 제진장치로 보강된 기존 건축물의 내진성능에 대한 실험적, 해석적 연구가 지속되고 있으며, 본 고에서는 변위의존형 제진장치로 보강된 기존 구조물의 내진성능과 관련된 대표적인 기존 연구를 소개하고자 한다.

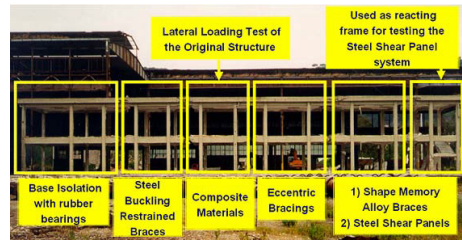
3. 제진 보강된 기존 건축물의 내진성능

3.1 제진 보강된 철근콘크리트 건축물 내진성능의 실험적 연구

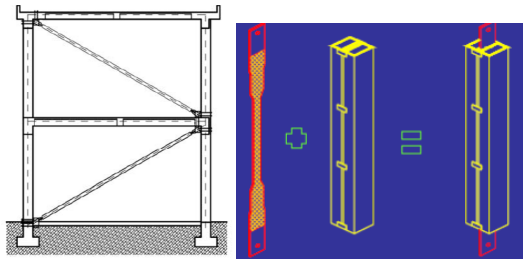
Mazzolani(2009)*은 내진설계가 적용되지 않은 철근콘크리트 건축물을 대상으로 내진성능 향상을 위하여 다양한 보강공법에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 연구에서 고려한 대상건물은 Fig. 1(a)과 같이 1970년 건축된 2층 규모의 철근콘크리트 모멘트 골조로 내진상세가 적용되지 않은 건축물이다. 연구는 우선 대상건물의 외장재, 칸막이 벽 등 비구조요소를 제거한 후 각 층 슬라브를 커팅하여 건축물을 6등분 한 후 각 구조물은 다음과 같이 각기 다른 방법에 의해 보강되었다.

- 1) 고무베어링을 이용한 면진
- 2) 비좌굴 가새
- 3) 합성 섬유 보강재
- 4) 전단링크 가새

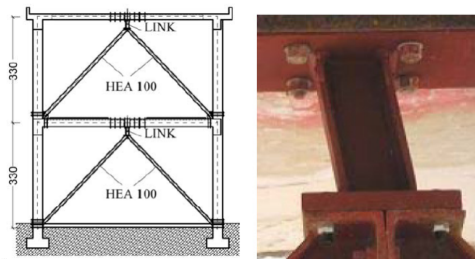
* Mazzolani F.M., Della Corte G., D'Aniello M. (2009) "Experimental analysis of steel dissipative bracing systems for seismic upgrading", Journal of Civil Engineering and Management, 15:1, pp.7-19



(a) 실험 대상 철근콘크리트 건축물



(b) 비좌굴 가새의 보강



(c) 전단링크 가새의 보강

Fig. 1 철근콘크리트 건축물의 실대형 구조 시험 (Mazzolani et al., 2009)

- 5) 형상기억합금 가새
- 6) 전단 패널

각기 보강된 건축물들은 철골 반력 프레임과 2개의 유압 잭을 이용하여 실대형 구조실험이 수행되었다.

위 실험 중 변위 의존형 제진장치로 분류될 수 있는 보강안은 비좌굴 가새와 전단링크로 연결된 편심가새이다. 비좌굴 가새는 비부착 가새(unbonded brace)가 아닌 2개의 각형강관 사이에 항복형 강판이 설치된 형태로 각형강관은 항복형 강판의 좌굴을 방지하고, 실질적인 에너지 소산은 항복형 강판에 집중되도록 하였다. 전단링크는 가새와 함께 중심가새골조 형태로 기존 구조물에 설치되고, 상부 슬라브와 가새 부재 사이에 위치하며, 지진으로 발생하는 층간 변위의 대부분이 전단링크에 집중되어 소성변형이 발생하도록 고안되었다.

Fig. 2에 실험결과인 밑면 전단력-지붕층 변위 곡선을

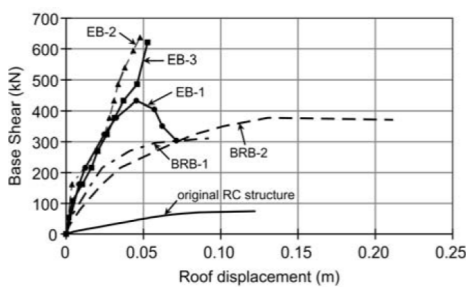


Fig. 2 구조 실험 결과 (Mazzolani et al., 2015)

비교하여 나타내었다. 여기서 BRB는 비좌굴 가새로 보강된 건축물이고, EB는 전단링크로 연결된 가새로 보강된 건축물을 의미하며, 적용된 제진장치의 상세에 따라서 총 5개의 실험 결과를 나타내고 있다. 적용된 제진장치의 상세에 따라 각기 다른 강도 및 변형능력을 보이지만, 일반적으로 제진 구조물은 기존 구조물에 비하여 상당히 뛰어난 횡력저항성능을 보인다. 특히 구조물의 강성 및 강도만을 증가시키는 전단링크 가새보다 비좌굴 가새로 보강된 구조물은 충분한 연성능력을 발휘하는 것으로 나타났다.

3.2 제진 보강된 철골 건축물 내진성능의 해석적 연구

최근 Shin and Kim(2014)**은 철골모멘트골조와 TADAS (Triangular Added Damping Added Stiffness) 제진장치로 보강된 건축물의 내진성능을 해석적으로 평가하였다. 대표적인 강제 이력형 제진장치 중 하나인 TADAS는 전단링크 가새와 동일하게 상부 보와 가새 부재 사이에 위치하며, 보와 결합되는 부분은 고정단으로 가새부재와 결합되는 부분은 힌지형태로 접합되고, 삼각형 모양의 휨모멘트 분포를 유도함과 동시에 길이방향으로 전단면이 항복할 수 있는 역삼각형 형태를 가진다.

** Shin D. H. and Kim H. J. (2014) "Collapse Capacity Evaluation of Steel Intermediate Moment Frames Using Incremental Dynamic Analysis", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 18, No. 2, pp.009-020

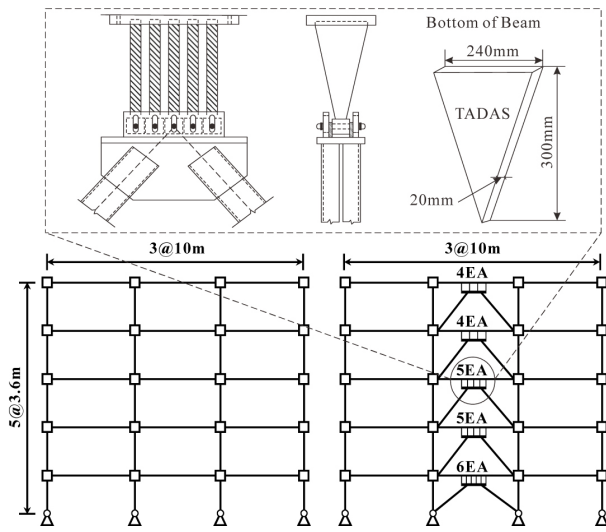
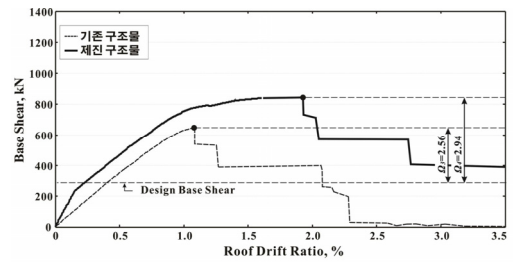


Fig. 3 철골 모멘트 골조와 제진 구조물 (Shin and Kim, 2014)

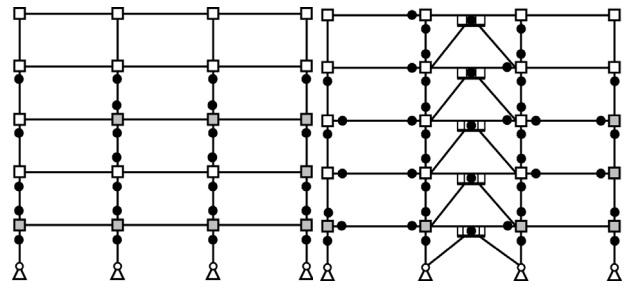
해당 연구에서는 Fig. 3과 같이 5층 규모의 철골 중간모멘트골조와 이를 제진장치로 보강한 제진 구조물을 설계한 후 내진성능을 평가하였으며, 이 때 철골 중간모멘트골조는 내진설계가 되지 않았고, 일정정도 구조성능이 저하되었다는 가정하에 설계 밀면전단력과 구조 부재의 연성도를 적절히 감소하여 설계 및 해석을 수행하였다. 즉 이와 같이 설계된 철골중간모멘트골조는 기존 건축물을 대표한다고 볼 수 있다.

5층 구조물에 대한 비선형 정적 해석 결과인 밀면 전단력-지붕층 변위비 곡선을 Fig. 4(a)에, 소성힌지가 발생한 부재의 분포를 Fig. 4(b)에 제시하였다. 제진 구조물은 기존 구조물에 비하여 내력이 약 15%이상 상승하였으며, 항복 후 소성 변형 능력 역시 약 2배 증가하였다. 기존 구조물과 제진 구조물 모두 소성힌지가 기둥부재에 집중해서 발생하는 약기둥-강보 형태의 거동을 보이며, 특히 제진 구조물의 경우 대부분의 구조 부재에서 소성힌지가 발생되었다. 이는 구조 부재의 힌지 형성으로 인한 모멘트 재분배가 효율적으로 발생하였음을 의미한다.

비선형 정적 해석 결과를 통해 산정된 초과강도계수(Ω)를 살펴보면 기존 구조물과 제진 구조물은 각각 2.56, 2.94의 값을 나타낸다. 기준에서 정의하는 철골 중간 모멘트골조의 초과강도 계수는 3.0으로, 제진 장치로 보강된 기존 구조물은 현행 내진 설계 기준에 의해 설계된 구조물에 근접한 초과 강도를 보유하는 것으로 나타났다.



(a) 밀면 전단력-지붕층 변위비 곡선



(b) 기존 구조물의 소성 힌지 분포 (b) 제진 구조물의 소성 힌지 분포

Fig. 4 비선형 정적 해석 결과 (Shin and Kim, 2014)

4. 맺음말

본 고에서는 내진기준 도입 이전에 지어졌거나, 현행 내진기준에서 정하는 성능수준에 미치지 못하는 건축물의 내진성능 향상을 위해, 적용가능한 제진장치와 이를 실험과 해석으로 검증한 대표적 기존 연구를 소개하였다. 최근 국내에서는 학교 건축물을 중심으로 기존 건축물의 내진보강에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 이에 따라서 여러 가지 형태의 제진장치들이 개발 적용되고 있다. 하지만 제진 장치의 성능이 검증되지 않거나, 제진 보강된 구조물의 성능평가가 제대로 이루어지지 않는다면, 오히려 구조적 성능이 하락할 가능성이 있다. 뿐만 아니라 우리나라의 경우, 제진장치로 보강된 건축물의 설계 및 내진성능평가에 대한 명확한 기준 또는 지침이 마련되어 있지 않다. 따라서 기존 건축물과 제진장치의 특성을 반영한 보강된 건축물의 내진성능평가방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 생각된다.

담당 편집위원: 김형준
(서울시립대학교 건축공학과)
hyungjoonkim@uos.ac.kr