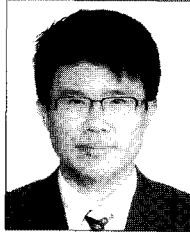
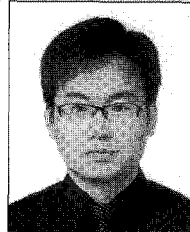


중폭형 제진시스템의 내진보강 효과에 대한 해석적 연구

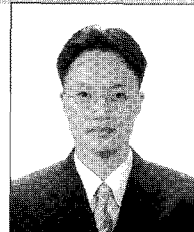
Analysis on the Seismic Rehabilitation of the Building
with Displacement-Amplified Damping Systems



유영찬*



최기선**



김준희***

* 한국건설기술연구원 건축구조자원연구실 연구위원
** 한국건설기술연구원 건축구조자원연구실 수석연구위원
*** 한국건설기술연구원 건축구조자원연구실 수석연구위원

1. 서론

노후 건축물의 내진보강을 위한 강도보강형 공법은 보강에 의해 구조물 자중 및 강성이 증가하므로 지진응답이 더욱 커지는 문제점이 있으며, 지진발생시에 구조물의 손상을 피할 수 없기 때문에 재난후 복구에 필요한 비용이 증가하는 등의 추가적인 단점이 있다. 이에 반하여 제진시스템은 구조물에 작용하는 지진에너지의 대부분을 제진장치에서 흡수 또는 소산시킴으로서 구조물에 전달되는 지진력 자체를 감소시키기 때문에 구조물의 손상을 최소화할 수 있으며 지진 발생 후에도 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 유용한 공법이다.

한편, 제진장치는 구조물의 주 구조부재보다 먼저 항복하거나 비선형 거동을 통하여 구조물에 작용하는 지진에너지를 흡수/소산시키는 역할을 하며, 제진장치의 이력면적에 비례하여 감쇠성능을 발휘한다. 따라서 구조물의 주요 손상이 발생되지 않는 층변위 이내에서 제진장치에 유도되는 변위를 증폭시킬 수 있도록 시스템을 구성하면 구조물의 손상을 최소화하는 동시에 제진장치의 감쇠성능을 극대화할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 기사에서는 상용화 구조해석 프로그램인 MIDAS-Gen을 이용하여 변위증폭 제진

시스템의 적용에 따른 내진보강성능을 평가하기 위해 모멘트 저항골조 구조물을 대상으로 비선형 구조해석을 실시하여 보강시스템의 종류(강도보강형, 제진보강형) 및 제진보강시의 변위 증폭비에 따른 특성을 분석하였다.

2. 변위증폭 제진시스템의 해석적 평가

2.1 변위증폭형 제진시스템의 특성

변위증폭형 제진시스템은 지진응답으로 인해 제진장치에 유도되는 응답변위를 증폭시켜 보강효과를 고효율화하기 위한 제진보강시스템으로서 그림 1에 나타난 바와 같이 유닛형식에 따라 크게 2가지로 구분할 수 있다. 이 중에서 토글형 변위증폭시스템은 일정한 각도를 지니는 토글-가새에 의해 제진장치의 변위가 증폭되는 시스템으로 포털프레임의 형상비, 가새 토글의 초기각도 및 댐퍼의 설치각도에 따라 증폭비가 결정되며, 기존 가새형태의 제진시스템에 비해 2배~3배 정도의 변위증폭이 가능한 것으로 분석되었다. 그러나 토글가새에 의한 증폭시스템은 토글의 설치각도에 매우 민감하게 반응하며, 토글가새의 설치각도가 임계점을 초과하면 오히려 변위가 감소되는 단점도 지적되

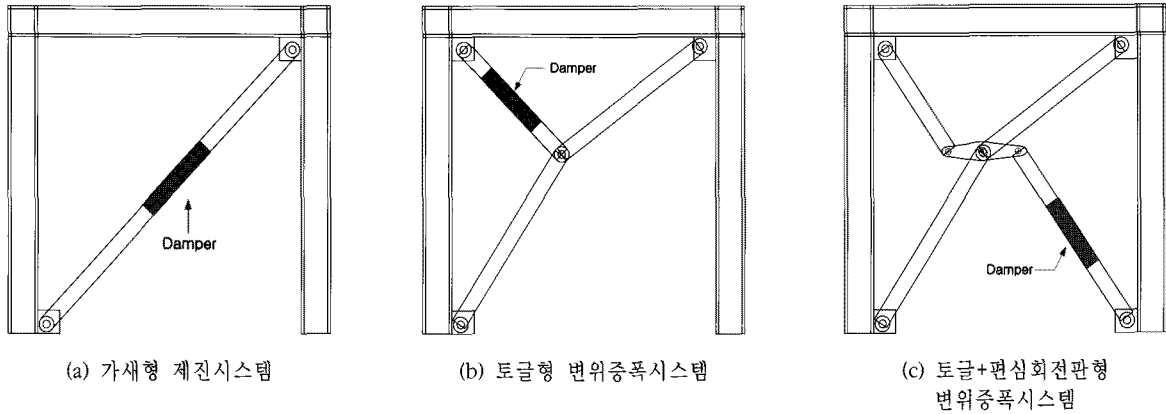


그림 1 제진시스템의 유형

고 있다. 이에 대하여 편심회전판과 토글-가새시스템을 병용하여 구성된 이중변위증폭시스템에서는 개개 변위증폭시스템이 직렬로 연결되어 이 단계에 걸친 변위증폭이 가능하므로 이론적으로 최대 약 4~8배 이상의 변위증폭 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 내진보강성능 구조해석

상용화 구조해석 프로그램인 MIDAS-Gen을 이용하여 변위증폭 제진시스템의 적용에 따른 내진보강성능을 평가하기 위해 그림 2에 나타난 바와 같이 모멘트 저항골조 구조물을 대상으로 비선형 구조해석을 실시하였다. 대상구조물은 저층형(6층), 중층형(10층) 및 고층형(20층)으로 기존 구조물에서 수직증축이 되는 것으로 가정하였다. 즉, 각 시스템별로 층고 3.5m인 지상 4, 7, 15층의 철근콘크리트 구조물위에 각각 2, 3, 5개층씩 수직증축이 된 지상 6층, 10층, 20층 세 가지 규모를 검토하였다. 이와 같이 기존 구조물의 상부에 증축을 하면, 수직증축에 따른 지진하중의 증가로 인해 부재력 및 층간변위 등의 성능이 감소된다. 이렇게 부족한 구조내력 및 구조성능 확보를 위해 상기에 제안한 변위증폭 제진시스템의 해석모델을 이용하여 제진보강 설계를 실시하였으며, 각 구조형식 및 규모타입에 따른 제진보강 전후의 구조성능 평가를 수행하였다. 구조해석을 위한 대상건축물의 구조설계에 대한 기본 가정은 다음과 같다.

- i) 기존건물은 중력하중에 대해 수직증축을 고려하여 설계되었지만 지진하중에 대해서는 수직증축이 고려되지 않은 것으로 가정한다.
- ii) 증축건물(수직증축)은 KBC 2009기준에 따라 고정하중, 활하중, 풍하중에 대해서는 모두 만족하지만, 지진하중에 대해서는 만족되지 못한 것으로 가정한다.

- iii) 제진보강된 증축건물의 부족한 지진내력을 변위증폭 제진시스템을 이용하여 보강하고, 비선형시간이력해석을 수행하여 설계한다.

시간이력해석은 지반조건에 맞는 최소한의 3개 이상의 계측된 지진기록을 바탕으로 구성된 시간이력 성분을 이용하여 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 KBC 2009 설계기준에 맞추어 Elcentro 1940, Hachinohe 1968, Taft 1952 지진파를 국내 상황에 맞게 조정된 인공지진파를 사용하여 시간이력해석을 실시하였으며, 사용된 인공지진파는 그림 3과 같다.

3. 해석결과에 대한 비교·분석

기존 보강공법인 가새보강 및 변위증폭이 없는 가새형 댐퍼보강과 변위증폭 제진시스템의 가장 기초적인 형태인 토글형 변위증폭 시스템의 제진보강성능을 보강전 대상구조물과 상대 비교함으로써 변위증폭형 제진시스템의 내진보강 적용에 따른 유용성을 판별하였다. 또한, 대상구조물의 규모를 저층형, 중층형, 고층형으로 구별해 규모에 따른 보강성능의 차이를 파악하였다.

3.1 지진응답 해석결과

모멘트저항골조시스템에서 상대 층변위는 그림 4에서 보는 바와 같이 건축물의 하층에서 상층부로 올라 갈수록 그 값이 증가되며, 가새보강, 가새형 댐퍼보강 및 변위증폭 제진시스템 보강 순으로 상대 층변위 감소 폭이 증가되는 것을 알 수 있다. 특히 인공지진파 Elcentro 1940을 사용하여 해석한 결과를 보면 변위증폭 비율($\beta=2.0$)에 따라 상대 층변위의 감소비율이 2배 정도의 값을 나타내어 증폭비율에

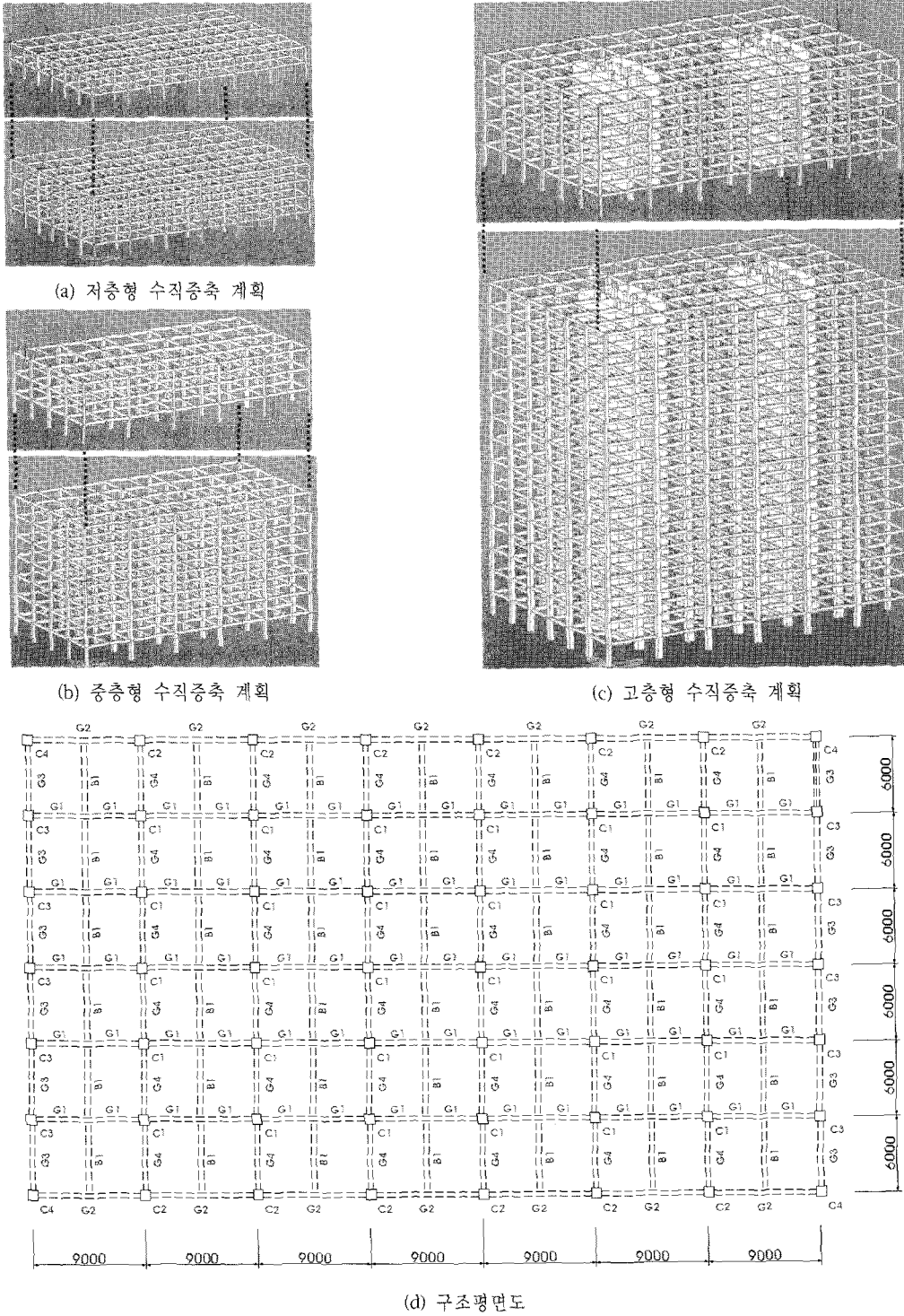
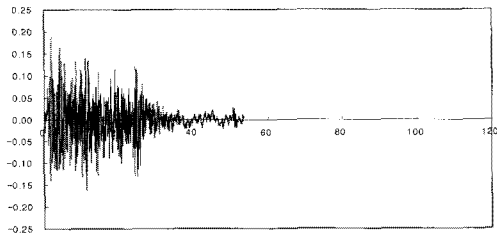


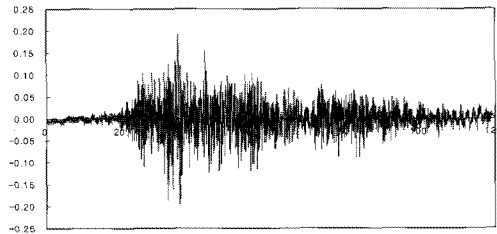
그림 2 모멘트 저항골조시스템

근접한 결과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 보강 시스템별로 상대 층변위 값의 변화를 정량적으로 분석(지진파 Elcentro 1940의 경우)해 보면, 저층건축물 일수록 보강효과가 큰 것으로 나타났으며, 고층 건축물로 갈수록 보강비율이 줄어드는 것으로 나타났다. 즉, 가새보강을 적용한 구조

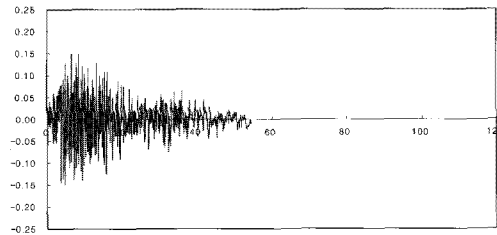
물의 최상층의 변위는 제진시스템을 적용하지 않은 보강 전 구조물에 비해 약 20%~40%, 기존 가새형 댐퍼를 적용한 구조물은 약 15%~51%의 감소효과가 났으며, 변위중폭 시스템의 경우 최상층의 변위가 약 30%~66%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 아울러, 적용된 지진파에 따라



(a) Elcentro 1940



(b) Hachinohe 1968

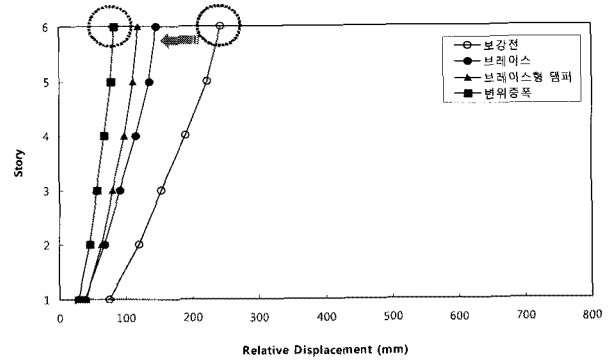


(c) Taft 1952

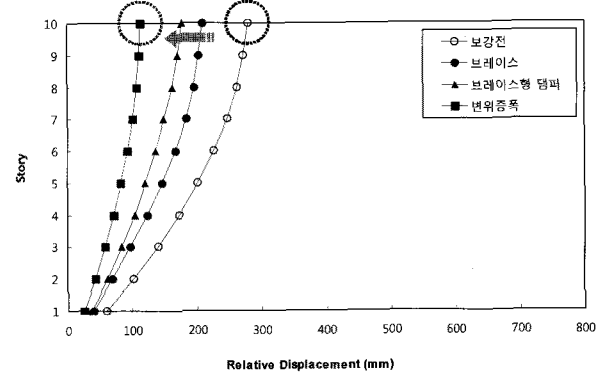
그림 3 설계 인공지진파

층변위의 감소율은 차이가 나타나지만, 기존 보강 시스템에 비해 변위증폭 제진시스템의 최대층변위 감소율이 가장 큰 것으로 나타났다.

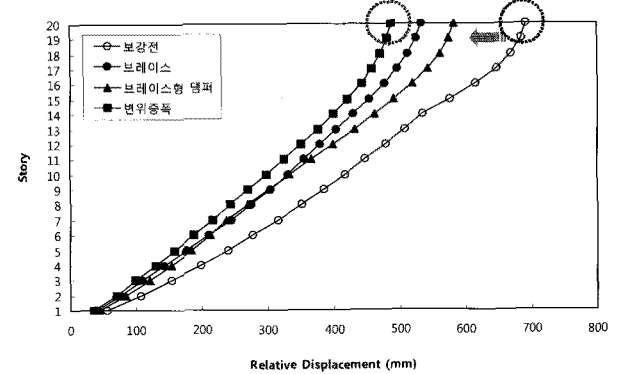
또한 각각의 시스템으로 내진보강된 건축물의 층전단력 분포를 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 기존 가새만으로 보강된 경우, 보강가새의 설치로 인한 건물의 강성이 증가 및 고유주기의 단주기화로 인하여 밑면 전단력의 크기가 증가되었기 때문에 이에 비례하여 층전단력이 증가된 것으로 판단된다. 인공지진파 Elcentro 1940에 의한 해석결과를 검토해 보면, 보강전 구조물 대비 약 1.30~1.56배 정도까지 층전단력이 증가된 것으로 나타났다. 이에 대하여 가새형 댐퍼와 변위증폭 제진시스템으로 보강된 구조물의 층전단력을 정량적으로 검토해 보면, 각각 보강전 대비 층전단력이 감소되는 것을 알 수 있으며, 저층형 건축물에서 상대적으로 큰 비율로 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 각 건물에서 제진보강에 의해 감소되는 층전단력은 증폭비 β 의 일반식에서 예측한 시스템에 따른 변위증폭비율과 동일하게 토글형 변위증폭 제진시스템의 적용에 의해 기존 가새형 댐퍼 보강에 비해 약 2배의 층전단력이 감소되는 보강효과가 나타났다.



(a) 저층 모멘트골조



(b) 중층 모멘트골조

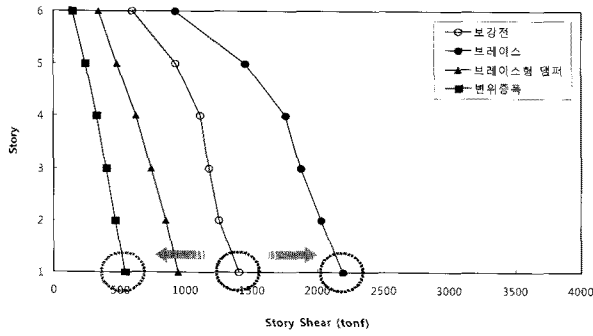


(c) 고층 모멘트골조

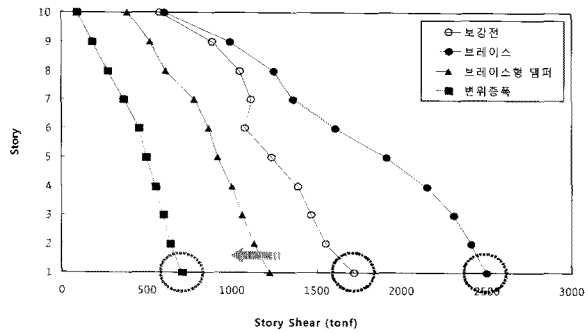
그림 4 상대층변위 해석 결과 분석 (Elcentro 1940)

3.2 보강공법별 동적응답 특성에 대한 비교·분석

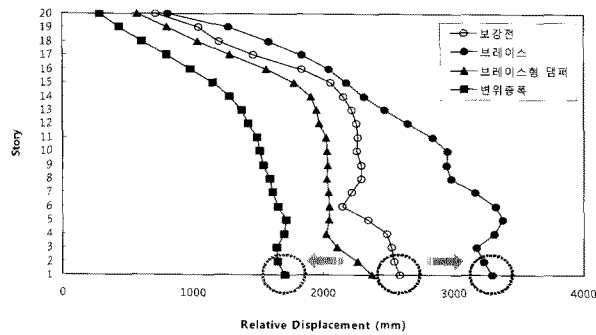
변위증폭 제진시스템의 유용성을 평가하기 위하여 보강전 구조물을 기준으로 건축물의 규모(저, 중, 고층형)에 따라 가새 보강공법, 가새형 댐퍼 및 변위증폭시스템의 동적응답 해석결과(Elcentro 1940)를 항목별로 비교하여 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 기존 가새 보강공법의 경우, 층변위 및 층간 변위비에서는 타 공법과 동일하게 동적응답이 감소되지만, 보강부재로 인한 전체 구조물의 강성 증가로 인하여 전단력 및 상대가속도가 보강 전 구조물에 비해 증가되는 특성이 나타난다. 이는 보강후 건축물의 주



(a) 저층 모멘트골조

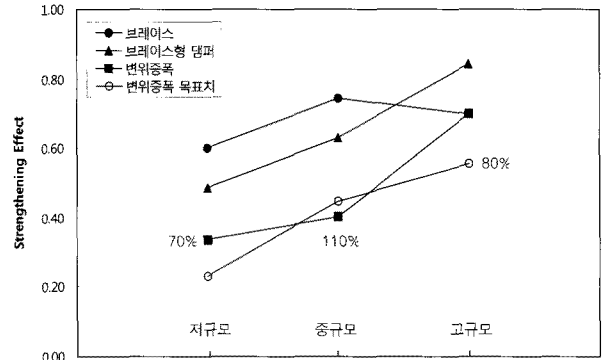


(b) 중층 모멘트골조

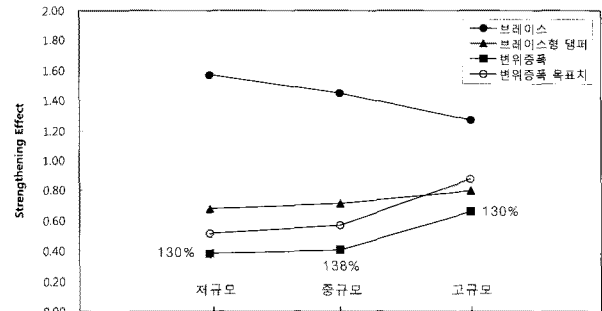


(c) 고층 모멘트골조

그림 5 층전단력 해석(Elcentro 1940)



(a) 상대층변위



(b) 층전단력

그림 6 변위중폭 제진시스템의 보강효과

기가 단주기화 된 것에 기인하는 것으로 강도/강성 증가형 보강공법(전단벽 및 가새보강공법 등)을 사용하여 내진보강을 실시할 때에는 이와 같은 보강의 역효과에 주의하여야 할 것으로 판단된다.

또한 그림 6에서 보는 바와 같이 기존 가새형 댐퍼와 변위중폭 제진시스템을 비교해 보면, 보강전 구조물 대비 저

표 1 모멘트골조 구조형식의 규모별 해석결과(Elcentro 1940)

System	Displacement		Story Drift		Base Shear		Acceleration		
	mm	% ¹⁾	%	% ¹⁾	tonf	% ¹⁾	mm/sec ²	% ¹⁾	
저층형	보강전	243.9	100.0	0.021	100.0	1401.6	100.0	4447.5	100.0
	가새	146.8	60.2	0.011	52.0	2196.7	156.7	6040.5	135.8
	가새형 댐퍼	118.9	48.7	0.011	52.3	945.9	67.5	2986.2	67.1
	변위중폭시스템	82.2	33.7	0.008	38.0	538.7	38.4	3616.1	81.3
중층형	보강전	279.6	100.0	0.017	100.0	1718.8	100.0	4080.7	100.0
	가새	208.5	74.6	0.011	64.2	2494.4	145.1	4813.6	118.0
	가새형 댐퍼	176.7	63.2	0.010	60.0	1222.8	71.1	3882.0	95.0
	변위중폭시스템	112.7	40.3	0.007	41.5	704.6	41.0	3292.1	80.0
고층형	보강전	691.3	100.0	0.016	100.0	2590.8	100.0	5237.4	100.0
	가새	532.9	80.0	0.011	70.0	3294.1	127.1	6302.0	120.0
	가새형 댐퍼	583.3	84.4	0.012	80.0	2369.5	79.5	6212.3	180.6
	변위중폭시스템	487.1	70.0	0.010	65.0	1704.1	65.8	4641.9	88.7

1) 보강전 구조물에 대한 각 보강공법별 특성치 비

층형, 고층형, 중층형 순으로 보강효과가 높게 나타나는 것을 알 수 있으나, 변위증폭비율 $\beta=2.0$ 으로 2배 증폭의 보강효과를 예상한 변위증폭 제진시스템에서 저층형, 고층형의 모멘트저항골조시스템을 제외한 중층형의 대상구조물에서 2배 이상의 보강효과가 나타났으며, 층전단력은 모든 규모에서 예상한 보강효과 이상의 결과가 확인되었다. 따라서 구조물의 단위면적 등 설계조건이 동일한 상태에서 규모에 따른 변위증폭제진시스템의 유용성을 평가해 본 결과, 증폭비의 영향을 고려한 변위증폭 제진시스템은 중층형 이상의 구조물에서 보다 효과적인 보강효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

상용화 구조해석 프로그램인 MIDAS-Gen을 이용하여 변위증폭 제진시스템의 적용에 따른 내진보강성능을 평가하기 위해 모멘트 저항골조 구조물을 대상으로 비선형 구조해석을 실시하여 보강시스템의 종류(강도보강형, 제진보강형) 및 제진보강시의 변위 증폭비에 따른 특성을 분석하였다.

수치해석 결과, 보강 전 구조물에 비해 가새보강을 적용한 경우 최대 40%, 기존 가새형 댐퍼를 적용할 경우 최대

51% 및 변위증폭시스템을 적용할 경우 최대 66%까지 상대 층변위가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 기존보강 시스템에 비해 변위증폭 제진시스템의 최대층변위 감소율이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 층전단력 측면에서 분석해보면 기존 가새만으로 보강된 경우 강성의 증가로 인한 단주기화로 인하여 밑면 전단력이 증가되어 보강전 구조물 대비 약 1.30~1.56배 정도까지 층전단력이 증가된 것으로 나타났다. 이에 대하여 제진보강시스템은 각각 보강전 대비 층 전단력이 감소되는 것을 알 수 있으며, 증폭비 β 의 일반식에서 예측한 시스템에 따른 변위증폭비율과 동일하게 변위증폭 제진시스템의 적용에 의해 기존 가새형 댐퍼 보강에 비해 약 2배의 층전단력이 감소되는 보강효과가 나타났다.

따라서, 변위증폭형 제진시스템의 적용에 의해 상대 층변위의 감소는 물론 층전단력을 감소시킬 수 있어 소정의 보강효과를 달성할 수 있을 것으로 판단되며, 증폭비의 조정에 의해 보강대상 건축물에서 요구되는 성능에 적극적으로 대응할 수 있는 제진보강 설계가 가능할 것으로 사료된다.



[담당 : 유은중, 편집위원]