

## 2

## 인방보의 전단항복형 강재댐퍼(SS Damper)의 적용기술 및 VE사례

글 | 안태상 | 동일 drb 소장 || 전화 : 011-9274-2722 || E-mail : ahn,tae.sang@drbworld.com

글 | 박홍기 | 건축기술부 과장 || 전화 : 02-3433-7736 || E-mail : park7882@ssyenc.com

## 1 서론

최근 발생한 아이티지진(2010년, 15만 명 사망)과 중국 쓰촨성지진(2008년, 8만 명 사망)의 사례에서 인구밀집 지역의 지진재해에 대한 경각심을 되새길 수 있었으며, 이러한 계기를 통해 소규모 조적건물, 학교 및 통신설비 등에 대한 내진설계 기준이 강화되는 것은 상당히 반가운 일이다.

구조물의 내진성능 향상이라는 측면에서 기존의 내진설계는 하중기반 설계방식으로 설계수준 지진하중에 저항할 수 있도록 구조물의 강도와 강성을 결정하는 방식으로 실제 지진하중 하에서 구조물의 내진성능을 좌우하는 연성능력에 대해서는 평가하지 못하는 불합리성이 있다. 반면 제진구조는 비선형 해석을 적용한 성능기반 설계에 의해 구조물의 비선형 거동특성과 연성능력을 정밀하게 평가하여 최적설계가 가능함으로 공사비 절감과 내진성능 향상이라는 상반되는 가치를 동시에 획득할 수 있다.

지진하중 작용 시 제진장치의 소성화에 따른 추가감쇠를 구조물에 더함으로써 구조물의 손상을 최소화하는 제진장치는 미국의 노스리지지진과 일본 고베지진을 통해 전통적인 내진설계 방식의 한계에 대한 대안으로서 해외에서는 그 적용이 급속도로 증가하고 있다.

반면 국내의 경우 공동주택의 대부분이 내력벽식 구조로 내력벽식에 적용할 수 있는 시공성과 경제성이 우수한 제진댐퍼와 구조물의 비선형해석 방식의 생소함으로 적용이 활성화되지 않았다.

따라서 공동주택의 내진성능 향상과 경제성을 확보할 수 있는 인방보에 설치되는 전단항복형 강재댐퍼 개발을 2009년에 추진하여 개발을 완료하였으며, 실적용 및 국토해양부의 건설신기술 지정을 진행 중에 있다.

## 2 제진구조의 필요성

2009년 기상청 10대 이슈 중의 하나가 한반도의 지진발생 횟수가 60회라는 것으로 최근 지속적으로 지진발생 횟수가 증가되고 있다. 또한 판내부의 중진지역으로 분류된 쓰촨성지진사례에서 알 수 있듯이 한반도도 더 이상 지진에 대해 안전하지 않다는 것은 주지의 사실이다.



(a) Northridge Earthquake(미국, 1994)



(b) Chi-Chi Earthquake(대만, 1999)

[그림 1] 지진피해 사례

제진구조의 필요성은 구조물의 내진성능의 향상과 장수명화로 요약할 수 있으며, 구조물의 내진성능은 강성과 연성으로 평가할 수 있다. 구조물의 내진성능을 향상시키기 위해 강성을 키워서 탄성 범위 내에서 지진에 저항하는 방식은 현실적으로 불가능하기 때문에 건축구조설계기준에서도 하중저감계수(R)를 적용하여 구조물의 내진등급에 적절한 수준의 지진하중으로 설계하도록 하고 있다. 하중저감계수(R)는 지진하중 작용시 구조물이 비탄성거동을 경험할 것을 가정하 고으로 하중저감계수(R) 값에는 구조물의 유연도 개념이 포함되어 있다.

따라서 구조물의 내진성능은 연성 즉 유연도로 평가된다.

기존의 내진설계 방식은 구조형식별 몇 개 범주로 구분하여 동일한 하중저감계수(R)를 적용함으로써 구조물별 특성이 고려되지 않기 때문에 경우에 따라서는 비경제적 또는 불안정하게 설계될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 최근의 성능설계 방식은 비선형 정적해석을 기반으로 단계별 성능목표 만족여부를 확인함으로써 구조물의 비선형능력을 평가할 수 있도록 하고 있다. 제진구조는 지진하중에 저항하는 것이 아니라 댐퍼부재가 소성화하면서 지진에너지를 흡수하는 시스템으로 비선형해석이 기본적으로 적용되어야 해석이 가능하다. 제진구조를 적용함으로써 구조물의 내진성능 향상과 경제성을 확보할 수 있는 것은 상기의 비선형해석을 적용하여 해당 구조물의 비선형 거동특성 및 제진댐퍼의 효과를 확인함으로써 가능하게 된다. 즉, 제진구조를 적용함으로써 비선형 구간에서 구조물의 연성, 강도 및 손상저감 등의 비선형 능력을 증진 시킴으로써 경제적이고 안전한 구조물로 설계할 수 있는 것이다.

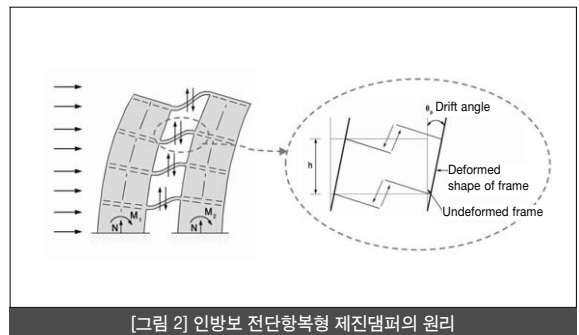
구조물의 장수명화는 최근 정부의 정책방향에 부합되는 사항으로 국내 공동주택의 건물수명은 선진국 수준의 1/3 정도 수준으로 상당히 낮는데 이러한 원인은 벽식구조가 리모델링에 편리한 구조가 아니기 때문에 리모델링보다는 비용편익에 의해서 재건축되는 것이 일반적이기 때문이다. 이러한 자원낭비를 방지하기 위해 정부는 주택법에서 리모델링이 편리한 구조에 용적률 완화 규정을 정하고 있으며, 서울시의 경우에는 금년부터 실제 적용을 하고 있다. 제진구조 특히 인방보에 설치되는 제진댐퍼는 시공성과 건축적인 제약이 없는 우수한 특성을 보유하고 있으며, 구조물의 내진성능 향상에 따라 벽체량이 저감되어 건축평면의 가변성을 확보할 수 있다. 즉 건축계획 부터 가변성 확보가 가능한 평면구성이 가능한 장점이 있어 벽식 구조가 가지고 있는 리모델링시 불리한 측면을 최소화할 수 있으며, 건물의 생애주기 동안 발생할 수 있는 지진 이후에도 건물의 손상을 최소화함으로써 건물의 장수명화가 가능하다.

### 3-1. 인방보형 제진댐퍼의 원리

최근 전단벽식 구조물의 내진설계 방향은 전단벽 하부는 휨모멘트에 의한 소성을 허용하되 이외 전단벽이 소성화되는 것은 제한하고, 전단벽을 연결하는 커플링보 즉 인방보의 전단 및 휨에 의한 소성힌지(Plastic Hinge) 발생은 허용하고 있다. 따라서 손상에 의한 보수보강이 용이하고 양호한 제진성능을 확보할 수 있는 인방보형 제진댐퍼 개발이 필요한 실정이다.

지진하중 등의 수평하중이 구조물에 작용시 전단벽의 상대변위에 의해 발생하는 인방보의 휨모멘트와 전단력 등의 단면력을 이용한 제진댐퍼를 적용할 수 있다. 이러한 제진댐퍼는 풍하중에서는 탄성거동을 할 수 있도록 하고, 지진하중 작용시에는 목표하중에서 항복함으로 반복되는 하중 하에서 에너지를 소산시켜 기존 구조물의 손상을 최소화할 수 있게 된다.

인방보의 전단항복형 강재댐퍼는 인방보 중앙부의 전단력에 의해 제진댐퍼가 소성힌지로 작동하도록 고안된 제진댐퍼로서 보의 중앙부에 가까울수록 작동하는 회전각은 커지나 휨모멘트는 작아지는 원리를 이용한 것이다. 즉, 전단항복형 강재댐퍼는 인방보가 전단에 의해서 항복되도록 설계되어야 하며, 전단력이 많이 걸리는 보에서 좀 더 많은 에너지를 소산할 수 있게 된다.

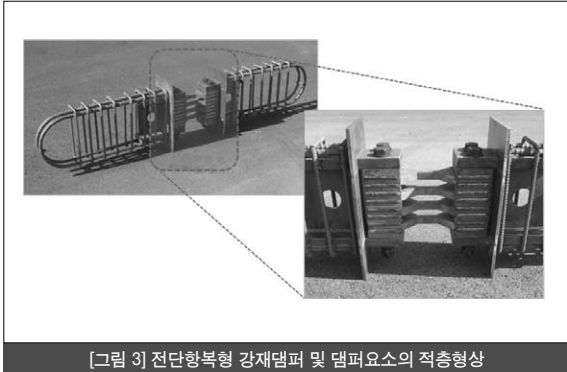


[그림 2] 인방보 전단항복형 제진댐퍼의 원리

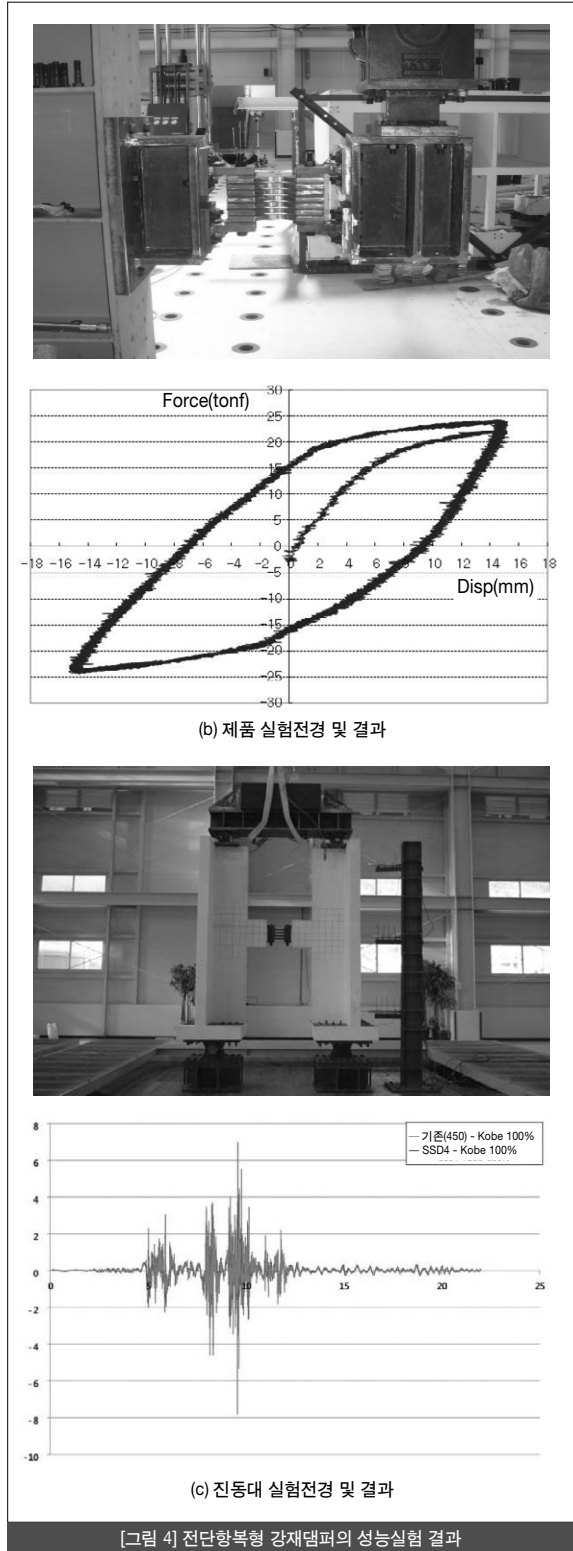
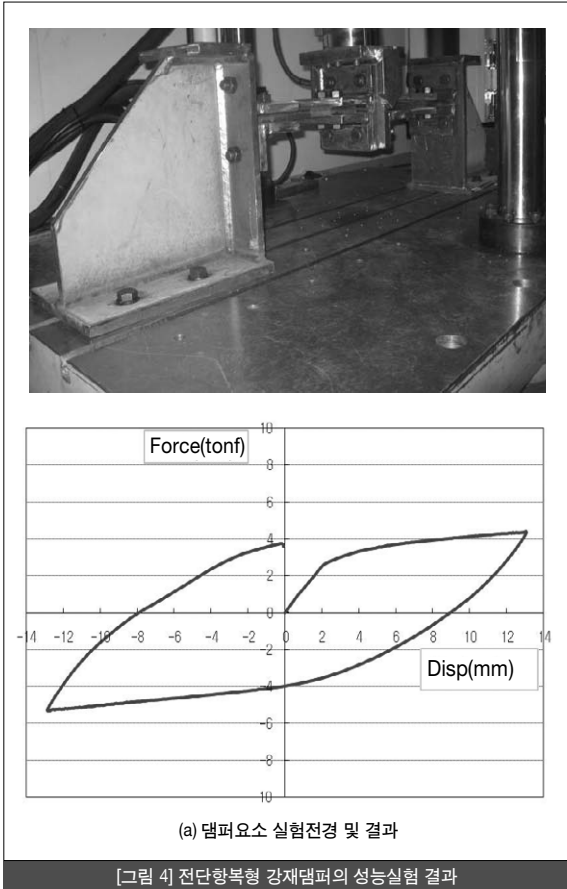
### 3-2. 전단항복형 강재댐퍼의 형상

개발된 전단항복형 강재댐퍼의 형상은 [그림 3]과 같다. 개발된 댐퍼는 인방보 중앙에서 전단항복에 의한 소성힌지가 발생되도록 고안된 댐퍼이며, 설치되는 인방보의 성능수준에 맞게 목표성능을 조절할 수 있도록 단위 댐퍼요소가 적층되는 구조로 고안되었다. 댐퍼요소는 중앙부분에 소성이 집중되어 균질한 강성과 강도를 확보할 수 있도록 아령모양으로 고안되었으며, 적층된 댐퍼요소들이

지진하중에 의해 손상된 이후에 간단하게 교체할 수 있도록 볼트로 고정 함으로서 구조물의 수명에 부합될 수 있도록 하였다.



### 3-3. 제진댐퍼의 성능검증



전단항복형 제진댐퍼의 성능검증을 위해 [그림 3]에 나타난 바와 같이 댐퍼요소, 제품 및 실대형 진동대 실험을 실시하여 성능을 검증하였다. 댐퍼요소의 형상을 결정하기 위해 광범위한 성능실험을 실시하여 댐퍼요소의 강성과 강도를 결정하였다. 이러한 단위 댐퍼요소 7개를 적층한 제품실험 결과 제진댐퍼의 성능기준이 되는 목표 감쇠비를 상회하는 결과를 얻었다. 성능곡선에서 나타난 바와 같이 변형능력 및 항복하중도 목표성능 이상의 우수한 성능을 확보할 수 있었으며, 반복하중 하에서 급격한 강성, 강도저감 및 편칭 현상이 발생되지 않았다.

제품실험 결과의 실제 적용성을 검증하기 위한 실대형 진동대 실험은 기존 인방보 모델과 전단항복형 강재댐퍼를 적용한 모델의 동일수준 지진파에서의 균열진행 패턴이 비교되었으며, 전단항복형 강재댐퍼를 적용한 모델에서 전단벽 및 인방보 균열이 감소되는 것을 확인하였다.

또한 [그림 4]의 가속도 이력응답 곡선에 나타난 바와 같이 실험체 상단에서 측정된 가속도 응답 측정결과 전단항복형 강재댐퍼를 적용한 모델이 기존 인방보 모델에 비해 약 30% 이상 최대 가속도 응답이 저감되는 것을 확인하였다. 개발된 이력댐퍼의 성능검증을 통해 전단항복형 강재댐퍼의 우수한 성능과 적용성이 입증되었다.

**4 적용효과**

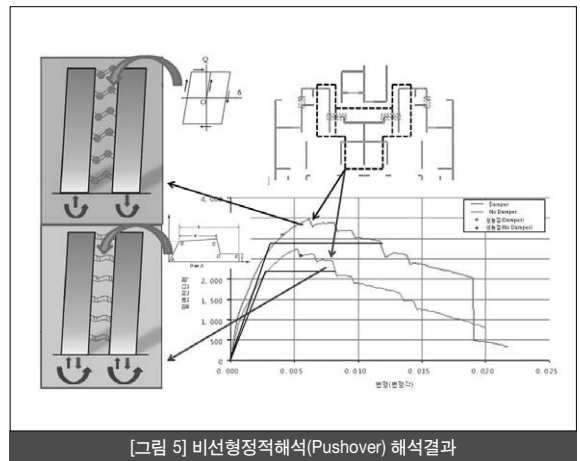
제진댐퍼의 적용효과는 상기에서 살펴본 바와 같이 비선형 구조 해석을 통해 확인할 수 있다. 본고에서는 댐퍼의 적용효과 중에서 연성 및 강도증진 효과가 뚜렷하게 비교되는 평면모델을 가진 구조물의 비선형 해석결과를 살펴보고 쌍용건설 별내지구 A-12-2BL 아파트 신축공사의 제진설계에서 나타난 구조물의 손상저감효과와 경제성을 비교분석하였다. 구조해석에는 비선형 전용 해석프로그램으로 신뢰성이 있는 PERFORM 3D 해석프로그램을 사용하였다.

**4-1. 구조물의 연성 및 강도증진**

기존 내진설계에서 건축적인 요인에 의해 단면에 제한이 있는 인방보는 인위적으로 강성을 낮추어 설계됨으로 전단벽과 전단벽 사이의 커플링보로서 구조적인 성능을 하지 못한 반면 이러한 전단벽과 전단벽 사이에 인방형 제진댐퍼를 설치할 경우 구조물의 비선형 거동 전반에서 커플링보의 순기능이 적용되어 전단벽의 손상을 최소화함으로써 구조물의 연성능력과 강도 및 잉여력이 증대된다. [그림 5]는 국내에서 일반적으로 시공되는 2세대 평면모델의 내진

구조와 제진구조의 비선형정적해석(Pushover) 성능곡선과 성능점을 산정한 결과를 나타낸 것이다. 결과에서 평면상에 표시된 위치에 전단항복형 강재댐퍼를 적용한 제진구조의 성능점이 내진구조의 성능점에 비해 높게 산정되었으며, 성능곡선의 비교에서도 뚜렷하게 댐퍼를 적용한 제진구조의 성능 즉 구조물의 강도 및 연성능력이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

내진구조의 경우 인방보가 파괴된 이후 개개 전단벽의 수평강성과 강도에 의존하는 시스템인 반면, 댐퍼를 적용한 구조물의 경우 댐퍼가 소성한 이후 완전히 파괴되지 않고 세미 커플링보의 기능을 수행함으로써 전단벽과 전단벽의 상호작용에 의해 수평하중에 저항하는 시스템이기 때문에 분석된다.



[그림 5] 비선형정적해석(Pushover) 해석결과

**4-2. 구조물의 손상저감 효과**

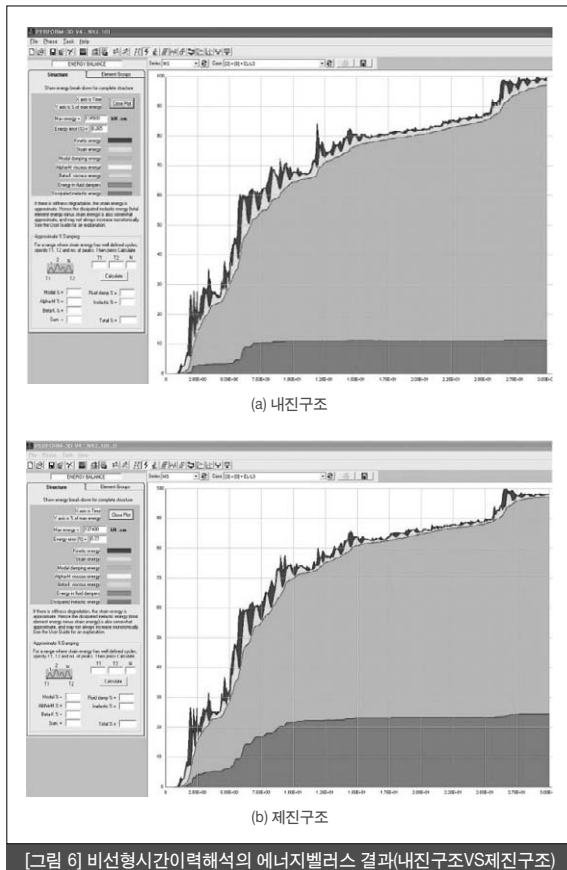
제진댐퍼는 지진하중과 같은 반복하중 하에서 비선형 거동을 통하여 지진에너지를 흡수하는 장치이다. 따라서 이러한 제진댐퍼의 에너지소산에 의한 효과를 직접적으로 평가하기 위해서는 실제 지진하중에 대한 시간이력해석이 수행되어야 한다.

아래 [그림 6]은 전단항복형 강재댐퍼를 적용하여 제진설계가 실시된 남양주 별내지구 공동주택 101동에 대하여 건축구조설계기준(KBC 2005)의 설계수준(LS) 레벨의 EL Centro NS 지진파를 적용한 시간이력해석 결과에서 구조물의 에너지밸런스를 나타낸다. 그림에서 그래프의 Y축은 에너지를 X축은 시간을 나타내며, 이 그림에서 붉은색으로 표시된 부분이 댐퍼를 포함한 구조체의 비선형 거동에 의해 소모되는 에너지량을 의미한다.

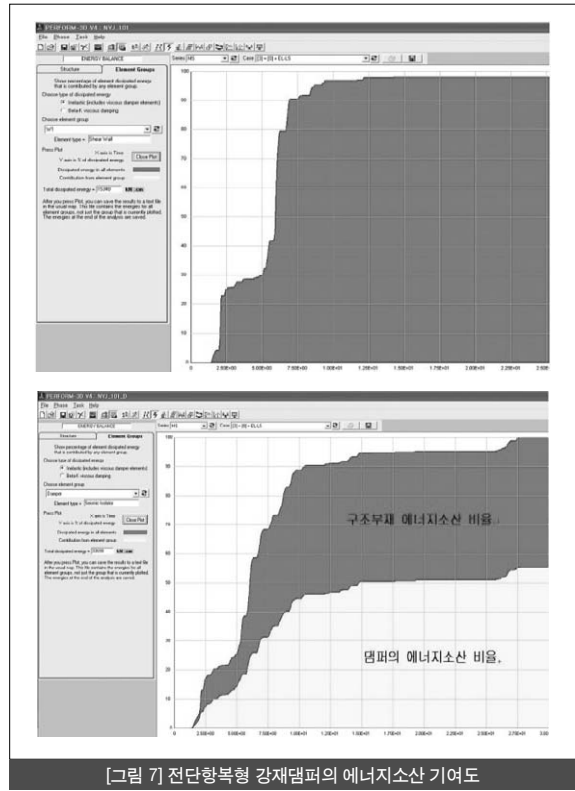
결과에서 구조물이 비선형 거동 시작 직후부터 댐퍼를 적용한 제진구조의 에너지 소산량이 크게 증가하는 것을 알 수 있는데 이러

한 결과는 댐퍼의 비선형 거동에 의한 추가적인 감쇠에 의해 지진 에너지가 소산되고 있음을 의미한다.

댐퍼의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여, 입력된 EL Centro NS 지진파 30초 동안 소모된 에너지량을 면적으로 환산하여 분석한 결과, 전체 그래프의 에너지량에서 붉은색으로 표시된 소산된 지진에너지의 비율이 내진구조는 14%, 제진구조는 28%로 증가된 것을 확인하였다.



[그림 7]은 댐퍼를 적용한 제진구조의 비탄성 에너지 소산량 중에서 순수하게 댐퍼에 의해 소산된 에너지를 나타낸 것이다. 내진구조의 경우 소산된 에너지량 전체가 구조물의 손상을 의미하며, 제진구조의 경우 노란색으로 표시한 부분이 댐퍼의 에너지 소산량으로 제진구조 전체 에너지 소산량의 약 60% 정도로 분석되었다. 내진구조에서 주요 구조체의 손상을 통한 지진에너지 소산량을 제진구조에서는 댐퍼가 부담하게 됨으로써 구조체의 균열과 손상을 저감시킬 수 있음을 나타낸다.



### 4-3. 골조공사비 저감을 통한 경제성 확보

전단항복형 강재댐퍼를 적용한 구조물의 경제성을 분석하기 위하여 본고에서는 남양주 별내지구 공동주택 105동에 대해서 댐퍼 적용 전후의 경제성 평가결과를 분석하였다. <표 1>은 경제성 분석 대상 건물의 일반사항이며, 그림 8은 해당 구조물의 기준층 구조평면도에 전단항복형 강재댐퍼의 배치도를 나타낸다.

전단항복형 강재댐퍼를 적용한 제진구조와 기존 내진구조의 철근 물량 저감에 따른 경제성을 비교 평가한 내용을 <표 2>에 나타내었다. 상기에서 살펴본 바와 같이 제진댐퍼의 추가감쇠에 의해 지진하중이 감소됨으로써 골조부재의 단면축소 및 철근량 저감이 가능하며, 본 고에서는 부재의 단면은 건축적인 측면을 고려하여 수정하지 않고 철근 배근량의 저감에 따른 경제성을 분석하였다.

별내지구 105동에 적용된 전단항복형 강재댐퍼는 83개로 제진댐퍼 1개의 가격은 일반적인 제작가격(80만원/개)을 적용하여 비교하였다. 각 부재별로 산정된 철근량은 이음 및 정착길이를 고려되었다.

결과에 나타난 바와 같이 별내지구 105동의 철근물량 저감에 따른 비용절감은 약 6,000만 원 정도이며, 이러한 비용절감은 전단항복

형 강제댐퍼의 비용이 포함된 것이다. 더욱이 본 예제의 경우 지내력 기초로서 기초파일 물량 저감은 고려되지 않은 것이다. 따라서 구조물에 따라서 편차는 있겠지만 전체 골조의 철근물량 비용의 6~8% 정도의 일정한 경제성 확보가 가능한 것으로 분석되었다.

〈표 1〉 대상건물 일반사항

건물명	경기동 남양주 별내동 아파트 신축공사
용도	공동주택
구조	철근콘크리트조
지상층 층수	21F
층고	기준층 : 2.95m, 최상층 : 3.05m
구조설계방법	철근콘크리트조-극한강도설계법

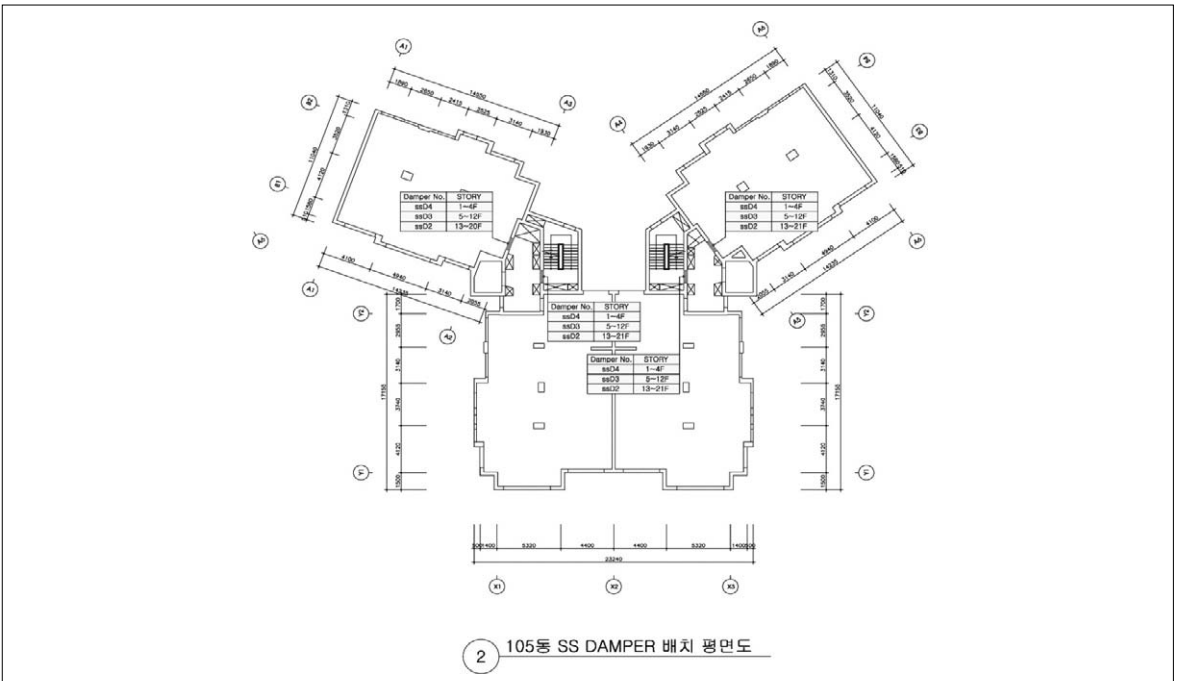
〈표 2〉 별내지구 105동

단 위	단 가 (원/ton)	내진구조		제진구조		
		물 량	금 액	물 량	금 액	
철근공사비	보	1,000,000	170,73	170,728,212	160,44	160,442,635
	기둥	1,000,000	147,00	146,996,464	139,61	139,609,751
	벽체	1,000,000	379,78	379,779,031	277,76	277,761,622
	기초	1,000,000	55,18	55,181,093	45,08	45,083,799
	소 계	-	752,68	752,684,800	622,90	622,897,807
제진비용 (원/ea)	800,000	-	-	83	66,400,000	
총 계	-	-	752,684,800	-	689,297,807	

5 뺏음말

본고에서 소개한 전단항복형 강제댐퍼는 건축 구조물의 내진성능 향상과 장수명 공동주택을 구현하기 위한 기반기술로서 국내 내진 설계 최신 기술인 제진댐퍼를 개발 및 적용하였으며, 연구과정에서 제진댐퍼를 적용하기 위한 설계 및 시공기술도 병행하여 연구되었다.

제진댐퍼를 적용함으로써 부수적으로 얻어지는 물량저감 효과가 목적으로 여겨지기 보다는 더욱더 안전하고 경제적인 건물을 위한 기반기술 확보로 인지되어 국내 건설시장에서 그 활용이 활성화되기를 기대한다. S



〔그림 8〕 105동 전단항복형 강제댐퍼의 배치도