

탄소성 이력댐퍼를 적용한 초고층 건축물의 변위제어

Drift Control of the Structure Using Elasto-Plastic Hysteretic Dampers in High Rise Buildings

박 지 형* · 박 태 원** · 김 옥 중*** · 이 도 범****

Park, Ji-Hyeong · Park, Tae-Won · Kim, Ook-Jong · Lee, Do-Bum

ABSTRACT

Recently, the matter controlling lateral drift is important in high rise buildings. In particular, seismic control dampers, such as mass damper and hysteretic damper, are emerging in the field of actively reducing drift. But, seismic control dampers have weak points with the lack of quantitative analysis and maintenance of the device. Accordingly, in this study we examine the structural characteristic of Steel Elasto-Plastic Hysteretic Damper, which is needless of maintenance, and then consider the basic conditions in the design and construction of the optimal seismic control effect which uses this device.

Keywords: High rise building, drift control, Elasto-Plastic Hysteretic Damper, Nonlinear time history

1. 서 론

최근 초고층 건축물 시장의 급속한 성장으로 인하여 초고층 구조시스템 분석 및 설계/엔지니어링 능력 확보가 핵심요소기술로 주목받고 있다. 특히, 일반 건축물과 달리 장주기 및 고차모드의 영향으로 인하여 변위 증대 영역에 존재하는 초고층 건축물은 효율적인 횡변위제어 기술이 중요하다고 할 수 있다. 초고층 건축물의 대표적인 횡력 저항구조시스템 중 건축구조설계기준의 개정과 맞물려 적극적으로 변위를 저감시키려는 노력이 확산되면서 mass댐퍼나 이력댐퍼와 같은 각종 제진장치가 도입되고 있다. 그러나 이러한 제진장치는 제진효과의 정량적 분석능력 미비와 유지보수의 문제점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 특별한 유지보수가 필요 없는 강재 탄소성 이력댐퍼를 대상으로 하여 구조적 특성을 파악하고, 이를 이용한 제진설계과정을 통하여 최적의 제진효과를 발휘하기 위한 설계상, 시공 상의 기초적인 제반 조건들에 대하여 검토하였다.

* 정회원 · 대림산업(주) 기술연구소 연구원 Email: dori0911@daelim.co.kr

** 대림산업(주) 건축기술부 과장 Email: ptw500@daelim.co.kr

*** 대림산업(주) 기술연구소 책임 연구원 Email: kimoj@daelim.co.kr

**** 정회원 · 대림산업(주) 기술연구소 팀장 Email: dblee@daelim.co.kr

2. 강재 탄소성 이력댐퍼

2.1 형상

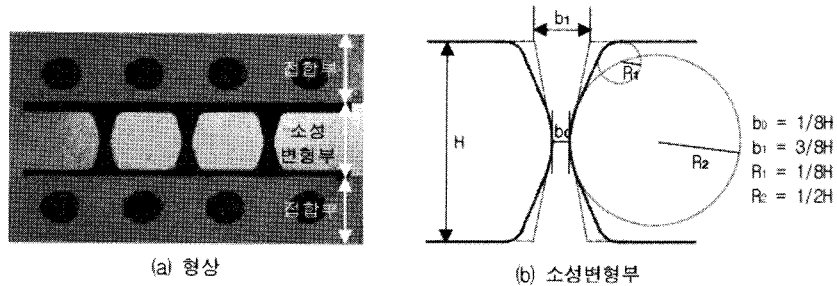


그림 1 강재 탄소성 이력댐퍼

강재 탄소성 이력댐퍼는 그림 1(a)와 같이 소성변형부와 접합부로 구성된다. 소성변형부는 일반적으로 그림 1(b)의 수치비율에 준하여 정하지만 높이 H는 80~260mm, 두께 t는 0.15H이상을 기본으로 하며, 댐퍼 한 장당 소성변형부의 개수 및 간격은 임의로 정한다. 여기서, 소성변형부와 접합부의 전체높이는 D라 한다.

2.2 재료

강재 탄소성 이력댐퍼의 재료는 인장강도가 낮고 변형능력이 뛰어난 저항복점 강재(BT-LYP225K)를 적용하였다. 적용된 저항복점 강재의 기계적 성질은 표 1과 같다.

표 1 BT-LYP225K 강판의 기계적 성질

항복점(N/mm ²)	인장강도(N/mm ²)	변형능력(%)	항복비(%)
215~245	300~400	40이상	80이하

2.3 탄소성 복원력 특성

댐퍼의 설계용 탄소성 특성은 국내의 다수의 실험결과에 기초하여 형성되었다. 그에 따라 전단력-변형의 곡선은 Normal Tri-linear형태의 복원력 모델로서 표현되며, 소성변형부 한 개소의 탄소성 특성은 식 1로 정의할 수 있다. 그리고 댐퍼 한 장의 특성은 그 값을 변형부의 개수배하여 산출한다.

$$\text{제1절점 전단력} : Q_1 (\text{kN}) = 0.0005b_0t\sigma_y \quad (1a)$$

$$\text{제2절점 전단력} : Q_2 (\text{kN}) = 1.6Q_1 \quad (1b)$$

$$\text{제1강성} : K_1 (\text{kN/mm}) = 2.94t \quad (1c)$$

$$\text{제2강성} : K_2 (\text{kN/mm}) = K_1/10 \quad (1d)$$

$$\text{제3강성} : K_3 (\text{kN/mm}) = K_1/200 \quad (1e)$$

여기서, b_0 = 댐퍼소성변형부의 최소폭(mm)

t = 댐퍼판두께(mm)

σ_y = 강재의 항복점(N/mm²)

따라서, 제1절점 및 제2절점에 있어서의 댐퍼변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_1(\text{mm}) = Q_1/K_1 = b_0\sigma_v/5.880 \quad (1f)$$


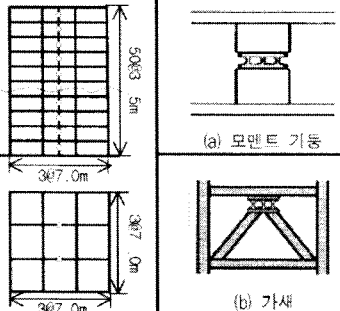
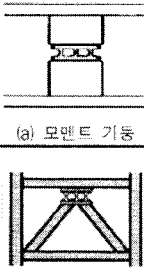
$$\delta_2(\text{mm}) = \delta_1 + \Delta\delta = \delta_1 + (Q_2 - Q_1)/K_2 = \delta_1 + 0.6Q_1/(K_1/10) = \delta_1 + 6\delta_1 = 7\delta_1 \quad (1g)$$

3. 강재 탄소성 이력댐퍼의 성능평가

3.1 해석모델

댐퍼의 성능평가를 위해서 선택한 50층 철근 콘크리트 보통 모멘트골조의 해석모델은 서울에 위치하고, 지반등급 C(매우 조밀한 토사 지반 또는 연암지반)로 가정하였다. 부재는 10개 층씩 5개 그룹으로 나누어 기둥은 800×800~1200×1200, 보는 1100×500~2000×500로 결정하였고 구조물의 바닥하중은 7kN/m², 활하중은 2kN/m², 외벽하중은 2kN/m²로 적용하였다. 댐퍼의 기타 세부적인 해석조건 및 내용은 표 2와 같다.

표 2 해석모델 및 댐퍼의 설정 조건

해석 모델		댐퍼의 설정 조건					
철근 콘크리트 보통 모멘트골조	댐퍼의 설치위치 (전층/부분층)	지지부재 (모멘트 기둥/가새)	충진단력 부담률	사양	복원력 특성		
			5% 10% 15% 20% 30%	D(mm)	275	K ₁ (KN/mm)	47.0
				t(mm)	16	K ₂ (KN/mm)	4.70
				H(mm)	110	K ₃ (KN/mm)	0.24
				b ₂ (mm)	14	Q ₁ (KN)	25.2
				b ₁ (mm)	40	Q ₂ (KN)	40.3
						δ ₁ (mm)	0.54
						δ ₂ (mm)	3.78

해석모델은 내진설계범주 'D'에 해당하므로 본 연구에서는 동적 해석법 중 시간이력 해석법을 선택하였고 지진파는 별도의 스케일링 없이 원파 그대로 'Taft(1952, Taft Lincoln School, 69 Deg)'를 사용하였다.

3.2 해석 결과 및 분석

댐퍼의 충진단력 부담률, 지지부재, 설치위치에 따른 제진효과를 댐퍼의 이력거동 및 구조물의 응답지 감효과를 통해 살펴보았다.

3.2.1 댐퍼에 의한 충진단력

댐퍼의 충진단력 부담률 설정치를 5%~30%로 변화시켰을 때, 지지부재가 모멘트 기둥일 경우는 5%일 때를 제외하고 댐퍼에 임의로 부여한 설정치와 실제로 발생한 결과치의 차이가 발생한 반면에 가새일 경우는 부담률 5%~20%의 경우 계획된 부담률과 근사한 충진단력을 부담하는 것을 알 수 있었다. 충진단력의 부담률이 클수록 같은 크기의 총 항복내력을 가진 댐퍼를 설치한 경우라도 모멘트 기둥보다는 가새를 지지부재로 한 해석에서 댐퍼의 실 부담률이 더 큰 값을 나타냈다. 이 결과로부터 댐퍼의 제진효과를

충분히 기대하기 위해서는 댐퍼의 지지부재를 가새와 같이 외력집중을 보다 원활히 수행할 수 있는 고강성 부재로 구성할수록 유리하다는 점을 알 수 있다.

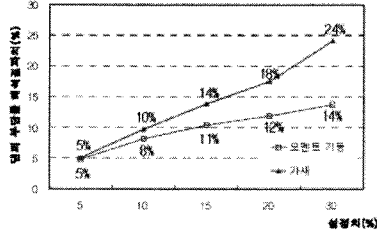


그림 2 댐퍼의 층전단력 부담률

3.2.2 댐퍼에 의한 구조물의 응답저감효과

댐퍼의 층전단력 부담률이 근거한 구조물의 층전단력 및 층간변형각의 저감정도 살펴보면, 지지부재가 모멘트 기둥일 경우에는 5%를 부담시켰을 때 구조물의 응답저감효과가 전 층에 걸쳐 가장 두드러지는 경향을 나타냈으며, 가새일 경우 층전단력 부담률이 설정치 30%인 경우에 차이를 보인 것을 제외하고는 5%~20%에서는 층전단력의 저감효과가 거의 유사한 것으로 나타났다. 이 결과를 통하여 지지부재의 강성 차에 따라 동일한 크기의 총 항복내력을 가진 댐퍼를 설치한 경우라도 구조물의 응답 차가 발생함을 알 수 있다. 또한, 층전단력의 부담률을 다르게 설정하더라도 댐퍼의 이력거동에 따라 유사한 구조물의 거동을 할 수도 있음을 확인할 수 있다.

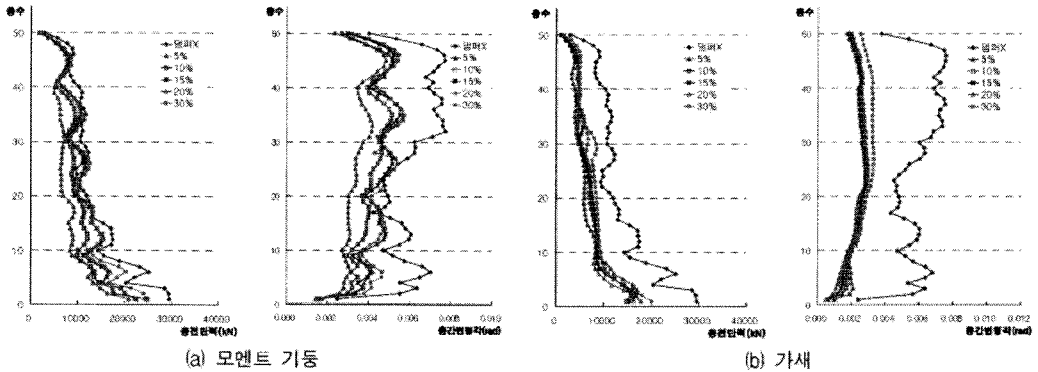
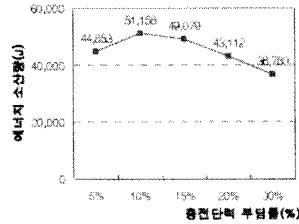
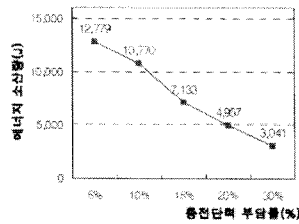


그림 3 구조물의 응답저감 정도

상기의 거동의 원인을 분석하기 위하여 5층 부위에서의 시간이력해석에 따른 에너지 소산량을 그림 4에 정리하여 나타냈다. 그림 4에서 알 수 있듯이 지지부재가 모멘트 기둥일 경우 댐퍼의 에너지 소산량은 해당 댐퍼의 층전단력 부담률과 상관없이 층전단력 부담률이 5%일 때 가장 큰 값을 보여주고 있다.

이는 댐퍼의 층전단력 부담률을 크게 부담시키면 이와 비례하여 그림 2와 같이 댐퍼의 층전단력 부담률은 커지지만 댐퍼 부착 후의 구조물의 층전단력 분포와 층간변형각은 그림 3(a)와 같이 반비례하는 결과를 나타냈다. 그 이유는 댐퍼의 에너지 소산능력의 차이 때문으로 모멘트 기둥의 경우 5%의 부담률에서 가장 큰 감쇠 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 지지부재가 가새일 경우는 댐퍼의 에너지 소산량이 층전단력 부담률 5%~20%일 때 거의 비슷한 결과를 나타내고 있고 이에 따라 층전단력 및 층간변형각도 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.



(a) 모멘트 기동

(b) 모멘트 기동

그림 4 댐퍼의 에너지 소산능력 (5층)

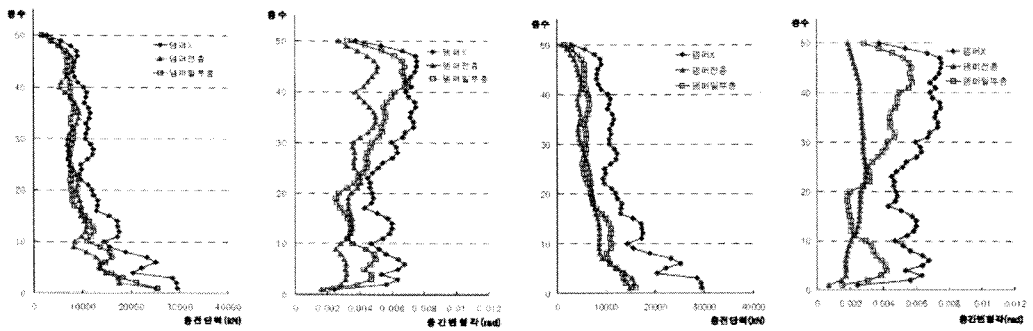
이를 통하여 댐퍼의 충전단력 부담률과 제진효과가 반드시 비례하는 것은 아님을 확인할 수 있다. 따라서 댐퍼가 최적의 응답저감성을 발휘하기 위해서는 산술적인 댐퍼의 충전단력 부담률보다는 외력의 반복재하에 따른 댐퍼의 이력거동 및 에너지 소산능력이 보다 지배적인 요소임을 확인할 수 있다.

앞에서 검토하였듯이 제진효과는 댐퍼의 거동에 따른 에너지 소산량에 비례한다. 에너지 소산량을 증대시키기 위해서는 댐퍼의 소성변형량이나 초기강성 및 항복내력을 증대해야 한다. 그러나 만일 구조물이 변형하는 동안 댐퍼의 초기 강성과 항복강도가 지나치게 높아 댐퍼가 탄성상태로 구조물이 거동을 하게 된다면 댐퍼에 의한 에너지 소산량이 매우 작게 되어 일정 강도를 가진 구조체로서 강성비에 따라 충전단력을 부담하게 될 가능성이 있다. 따라서 댐퍼가 성능을 발휘하기 위해서는 사용상태의 하중을 벗어난 이후에 가급적 조기에 소성상태로 전환되어 에너지 소산량을 극대화하도록 유도하는 것이 필요하다.

한편, 상기의 어느 경우라도 가해진 외력을 최대한 댐퍼에 집중시키는 것이 무엇보다 선행되어야 하므로 댐퍼를 설치하는 지지부재 및 지지부재의 주변 프레임을 고강성으로 구성하는 것이 바람직 할 것이다.

3.2.3 댐퍼의 부분층 설치에 대한 효과

이전 해석과정에서 전층에 걸쳐 설치한 댐퍼의 이력거동을 살펴보면, 부위에 따라 에너지 소산능력을 잘 발휘하는 댐퍼가 있는 반면에 항복 후 극히 미미한 소성변형을 하거나, 댐퍼의 항복내력에도 도달하지 못하여 댐퍼로서의 기능을 전혀 발휘하지 못하는 부위도 존재하였다. 따라서 부분층 설치에 따른 효과를 규명하기 위하여 부분층에 댐퍼를 설치한 상태에서 구조물의 제진효과 및 주변 층에의 영향 유무를 확인 해보았다. 참고로 해석상의 편의를 위하여 댐퍼의 부분층 설치는 10개층분씩을 그룹화하여 설치하는 것으로 하였다.



(a) 모멘트 기동

(b) 가세

그림 5 부분층(11~20층) 댐퍼 설치에 따른 구조물의 응답저감효과

그 결과, 댐퍼를 부분층에만 설치한 경우라도 설치 부위에 따라 차이가 있으나 제진효과는 전층에 걸쳐 영향이 미치는 것을 알 수 있었다. 이 중 제진효과가 가장 효과적이었던 11~20층에 댐퍼를 설치한 경우에 대하여 응답저감효과를 그림 5에 나타냈다. 그림 5에서 알 수 있듯이 전층에 설치하였을 때보다 지지부재가 모멘트기동일 경우에 4%, 가새인 경우에 18% 정도 층전단력은 다소 증가하였으나, 이 두 경우 모두 댐퍼를 전혀 설치하지 않았을 때 보다는 각각 20%와 42%의 층전단력 저감효과를 보여주는 등 상당한 제진효과를 발휘하였다. 이 결과로부터 댐퍼의 부분층 설치로 인한 효과가 설치 층에서만 효과를 발휘하지 않고 다른 미설치 층에도 영향을 미쳐 건물 전체에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

강재 탄소성 이력댐퍼의 구조적 특성을 분석하고, 간단한 해석모델을 통하여 댐퍼의 최적 제진효과를 발휘하기 위한 제반조건들에 대하여 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제진효과는 댐퍼의 층전단력 부담률이나 여타조건보다는 댐퍼자체의 이력거동에 따른 에너지 소산능력에 지배적인 영향을 받는다. 따라서 에너지 소산능력을 증가시키기 위해서는 댐퍼가 사용상태의 하중을 벗어나 가급적 조기에 소성상태로 전환되도록 유도하는 것이 필요하다.
- 2) 댐퍼를 지지하는 부재의 강성(wall, brace, moment-column)이 크거나 그 댐퍼의 지지부재와 연결된 주변 frame의 강성이 클수록 제진효과가 크다.
- 3) 댐퍼의 부분층 설치로 인한 제진효과는 그 층에만 머무르는 것이 아니라 다른 미설치 층에도 포괄적으로 기여하여 건물 전체에 걸쳐 긍정적인 파급효과를 발휘한다.

참고문헌

- 김중호 (2006) KBC2005 및 그에 따른 구조설계 실무, 쌍용건설기술지, 봄, pp.6~11.
- 김진구 (2004) 건축 구조물의 면진 및 제진 기술, 대한건축학회지, 48(8), pp.85~89.
- 박지형, 박태원, 김육중, 이도범 (2006) 강재 이력댐퍼의 특성과 댐퍼적용효과 평가기법에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, pp.33~36.
- 오상훈 (2001) 강구조 건축물의 제진구조 시스템의 원리 및 국내적용 방안, 한국강구조학회지, 13(2), pp.96~105.
- 이명규 (2006) KBC2005 지진하중규준과 면진 시스템, 유니슨 웹진 기술지, 22, pp.17~19.
- 黒川他 (1995) 弾塑性型ダンパの高層建物への適用に関する研究, 日本建築學會梗概集
- 福元他 (1989) ハニカム開口を有する鋼板ダンパに関する研究(その1), 日本建築學會梗概集
- 高橋他 (1989) ハニカム開口を有する鋼板ダンパに関する研究(その3), 日本建築學會梗概集
- 田中他 (1990) ハニカム開口を有する鋼板ダンパに関する研究(その4), 日本建築學會梗概集