

성능목표를 달성하기 위한 점탄성 감쇠기의 설계

Design of Viscoelastic Dampers to Meet Performance Objectives

김진구† 최현훈*

Kim, Jinkoo Choi, Hyunhoon

(논문접수일 : 2001년 10월 4일 ; 심사종료일 : 2002년 4월 4일)

요 지

본 연구에서는 비선형 정적해석법인 능력스펙트럼법을 이용하여 성능목표를 만족하기 위하여 필요한 점탄성 감쇠기를 설계하는 절차를 제시하였다. 점탄성 감쇠기의 적정 크기를 구하기 위해 목표 변위에서 필요한 유효감쇠비를 구한 다음 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비와 고유감쇠비를 이용하여 필요한 감쇠기의 감쇠를 구하였다. 점탄성 감쇠기를 설치할 경우에는 구조물의 감쇠뿐만 아니라 강성도 변화하기 때문에 반복계산이 필요하게 된다. 본 연구에서는 먼저 단자유도계에서 구조물의 설계변수를 변화시키면서 제안된 방법의 타당성을 검증하였다. 또한 10층의 철골조 건물에 적용하고 지진응답을 구하였다. 제안된 방법에 따라 설계된 감쇠기를 설치하고 수행한 시간이력해석 결과에 의하면 고려된 설계변수에 관계없이 목표변위를 만족하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 점탄성 감쇠기, 능력스펙트럼법, 유효감쇠비, 성능에 기초한 내진설계

Abstract

This research presents a systematic design procedure for supplemental viscoelastic dampers required to satisfy the given performance objectives using capacity spectrum method. To obtain required damper size, the amount of supplemental damping was computed from effective damping minus equivalent damping and inherent damping of structure. In the case of viscoelastic damper, iterative procedure is required because of the inherent stiffness of the damper. To verify the design method proposed in this study, parametric studies were performed for single degree of freedom systems with design variables. The method was also applied to a 10-story steel framed structure and the earthquake responses were obtained. According to time history analysis result the controlled displacements turned out to be close to the target displacement regardless of the design parameters.

Keywords : viscoelastic damper, capacity spectrum method, effective damping ratio, performance based seismic design

1. 서 론

지진하중에 대하여 건물이 부여된 성능수준을 만족하도록 설계 또는 보강하기 위해서는 건물 자체의 강성

이나 연성능력으로 조정하는 방법과 감쇠기 혹은 진동 제어장치를 설치함으로써 건물에 부가적인 강성, 감쇠 또는 연성을 적절히 부여하여 건물에 미치는 외력의 영향을 감쇠기의 에너지 소산으로 변화시켜 건물의 구

† 책임저자, 성균관대학교 건축공학과 조교수
전화: 031-290-7563; Fax: 031-290-7570
E-mail: jinkoo@yurim.skku.ac.kr

* 성균관대학교 건축공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

조적인 성능을 보존하는 방법 등 크게 두 가지로 나눌 수 있다.^{1),2)}

그 중에서 부가적인 에너지 소산장치는 건물의 감쇠비를 증가시킴으로써 지진에 의한 진동에너지 열에너지를 소산시켜 건물에 발생하는 동적 응답을 효과적으로 저감시키며, 비교적 설치가 간편하고 상대적으로 소요비용이 적어 미국과 일본 등에서는 신축 건물뿐 아니라 기존 건물의 내진성능 향상을 위하여 많이 적용되고 있다. 그러나 이런 수동형 에너지 소산장치가 설치된 경우 건물의 성능을 평가하기 위한 시간이력해석이 복잡해지고, 따라서 목표 성능수준까지 향상시키기 위하여 필요한 에너지 소산장치의 양을 산정하는 것도 매우 어렵다. 즉 감쇠기의 양을 임의로 설정한 후 시간이력해석을 수행하여 응답을 구하고, 목표응답의 크기와 비교하여 감쇠기의 양을 조절한 다음 다시 해석을 수행하여, 목표응답에 도달할 때까지 같은 과정을 반복하는 등 상당한 시간과 노력이 필요하게 된다.

본 연구에서는 비선형 정적해석법인 능력스펙트럼법(capacity spectrum method)을 이용하여 성능수준을 만족할 수 있는 점탄성 감쇠기(viscoelastic damper)의 양을 구하는 방법에 관하여 연구하였다. 저자들에게 의한 최근 연구^{3),4)}에 따르면 점성 감쇠기의 경우에는 이와 같은 방법에 따라 설계된 감쇠기를 설치하였을 때 제어목표까지 잘 제어됨을 확인하였다. 그러나 점탄성 감쇠기의 경우에는 설치될 건물의 감쇠뿐만 아니라 강성도 변화하므로 점성 감쇠기의 경우에 비해 더 복잡해진다. 본 연구에서는 먼저 단자유도계에서 건물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도의 비, 항복 후 강성비(strain hardening ratio) 등을 변수로 하여 본 연구에서 제시한 방법에 의하여 설계된 감쇠기의 적합성 여부를 평가하였다. 또한 10층의 예제 건물에 적용하여 등가의 단자유도계에서 산정된 감쇠기의 강성과 감쇠의 분배에 대한 연구를 수행하였다.

2. 능력스펙트럼법

건물의 내진성능을 비교적 쉽고 빠르게 평가하기 위하여 개발된 능력스펙트럼법은 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 나타내는 능력스펙트럼과 가속도-변위 응답 스펙트럼(acceleration displacement response spectrum)형식의 지진의 요구를 나타내는 요구스펙트럼을 하나의 그래프에서 표현함으로써 건물의 성능

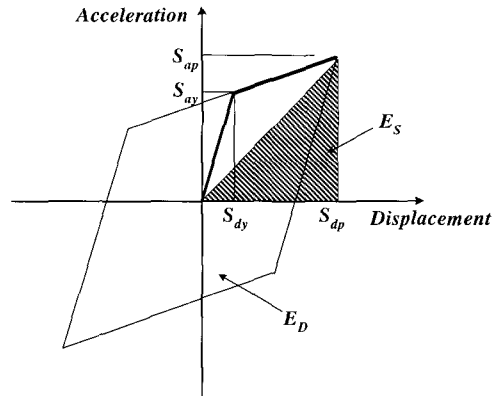


그림 1 등가점성감쇠비의 산정

점을 시각적으로 쉽게 평가하는 방법이다.^{1),2)} 건물의 선형탄성응답은 5% 감쇠비의 요구스펙트럼을 이용하여 나타내고 건물의 비탄성 응답은 높은 감쇠 스펙트럼으로 나타낸다. 그림 1에서 건물의 이선형(bilinear) 이력거동에 의하여 소산된 에너지를 이용하여 등가점성감쇠비(ζ_{eq})를 구한 후 구조물의 이력특성을 고려하여 유효감쇠비(ζ_{eff})를 산정한다. 여기서 등가점성감쇠비와 유효감쇠비는 식(1), 식(2)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{\pi S_{ap}S_{dp}} \quad (1)$$

$$\zeta_{eff} = \kappa \zeta_{eq} + \zeta_i \quad (2)$$

여기서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지를 나타내며 마름모의 면적에 해당하며, E_S 는 건물의 최대변형 에너지로 빗금친 삼각형의 면적에 해당한다. ζ_i 는 건물의 고유감쇠비를 나타낸다. ATC-40¹⁾과 FEMA-273²⁾에서는 실제 구조물의 이력특성을 반영하기 위하여 감쇠조정계수(κ)를 사용하여 유효감쇠비를 조정하는데, 본 연구에서는 구조물의 거동을 이선형 이력거동으로 가정하였으므로 $\kappa=1.0$ 로 한다.

3. 점탄성 감쇠기의 설계

점탄성 감쇠기의 강성과 감쇠는 온도와 작용하는 하중의 진동수에 따라 달라진다. 따라서 감쇠기의 가력시험을 통하여 얻어지는 하중-변위 이력곡선을 이용하여

비선형 해석을 하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 방법은 계산과정이 너무 복잡하여 실무에 적용하기 어려운 단점이 있으므로, Soong⁵⁾ 등은 실험과 해석을 통하여 식(3)과 같은 선형의 등가강성 (K_d)과 등가감쇠 (C_d)를 사용하여 비교적 만족스러운 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

$$K_d = \frac{G'A}{t} \tag{3a}$$

$$C_d = \frac{G''A}{\omega t} \tag{3b}$$

$$\eta = \frac{G''}{G} \tag{3c}$$

여기서 G' 은 전단저장계수, G'' 은 전단손실계수이고, A 와 t 는 각각 감쇠기의 면적과 두께를 나타내며, ω 는 하중의 진동수, η 는 손실계수(loss factor)이다.

3.1 점탄성 감쇠기의 적정 감쇠비 산정

점탄성 감쇠기가 설치될 경우 건물의 능력곡선은 그림 2와 같이 건물의 초기강성이 커지고 주기도 변하게 된다. 이 때 목표변위 (S_{dt})에서의 유효주기 (T_{eff})는 감쇠기가 설치된 이후의 변위와 가속도응답으로부터 구한다.

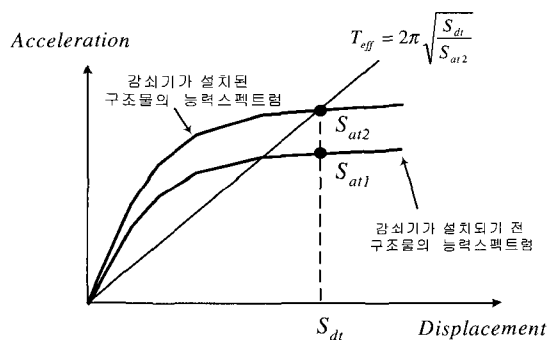


그림 2 감쇠기가 설치된 구조물의 능력곡선

일반적으로 감쇠기가 설치된 건물의 유효감쇠비는 식(2)에 감쇠기에 의한 감쇠를 추가하여 식(4a)와 같이 구할 수 있다.

$$\zeta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{DS} + E_{DE}}{E_{SD}} + \zeta_i \tag{4a}$$

점탄성 감쇠기의 경우 그림 2 및 식(1)을 이용하여 식(4a)를 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\zeta_{eff} = \frac{E_{DE}}{2\pi m S_{at2} S_{dt}} + \frac{2\kappa (S_{ay} S_{dt} - S_{dy} S_{at2})}{\pi S_{at2} S_{dt}} + \zeta_i \tag{4b}$$

식(4a)에서 E_{SD} 는 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 최대변형에너지이고, E_{DE} 는 감쇠기에 의하여 소산된 에너지로 식(5)와 같이 구할 수 있다. 식(5)의 우변의 두 번째와 세 번째 식의 관계를 이용하면 식(6)과 같이 감쇠기의 감쇠비를 구할 수 있다.⁶⁾

$$E_{DE} = \int_0^{2\pi/\omega} (C_d \dot{u}) \dot{u} dt = \pi \omega C_d u^2 = 2\pi \zeta_d \frac{\omega}{\omega_n} k u^2 \tag{5}$$

여기서 ζ_d 는 감쇠기가 부담하는 감쇠비이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta_d = \frac{C_d T_e}{4\pi m} \tag{6}$$

여기서 T_e 는 구조물의 탄성주기이다.

식(6)을 식(4b)에 대입하고 ζ_d 에 대하여 정리하면 성능수준을 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비는 식(7)과 같다.

$$\zeta_d = (\zeta_{eff} - \zeta_{eq} - \zeta_i) \frac{T_e}{T_{eff}} \tag{7}$$

여기서 ζ_{eq} 는 이력저동에 의한 등가감쇠비이며 그림 1 및 2를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\zeta_{eq} = \frac{2\kappa (S_{ay} S_{dt} - S_{dy} S_{at2})}{\pi S_{at2} S_{dt}} \tag{8}$$

3.2 점탄성 감쇠기의 분배

식(7)로 나타나는 감쇠기의 감쇠비는 구조물을 등

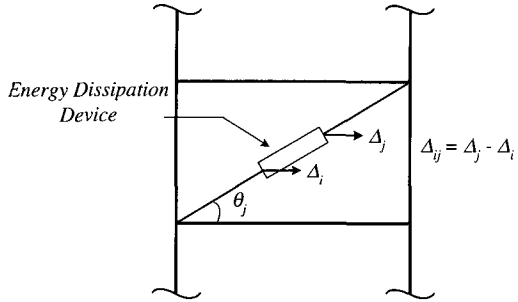


그림 3 에너지 소산장치의 상대변위

가의 단자유도계로 치환하여 구한 값이므로 이것을 원래의 구조물로 치환하여야 한다. 감쇠기가 그림 3과 같이 보와 θ 의 각도로 각 층에 설치되어 있다면 이 때 감쇠기에 의한 등가감쇠비는 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta_d = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{DE}}{E_{SS} + E_{SD}}$$

$$= \frac{1}{4\pi} \frac{\frac{2\pi^2}{T} \sum C_{di} \cos^2 \theta_i \Delta_{ij}^2}{\frac{2\pi^2}{T_e} \sum m_i \Delta_i^2 + \frac{1}{2} \sum K_{di} \cos^2 \theta_i \Delta_{ij}^2} \quad (9)$$

여기서 Δ_i 는 i 층의 변위, Δ_{ij} 는 i 와 j 층의 층간변위를 나타낸다. 식(3)에서 감쇠기의 강성과 감쇠의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$K_d = \frac{G \omega}{G'} C_d \quad (10)$$

모든 층에 같은 크기의 감쇠기가 설치되어 있다고 가정하고, 점탄성 감쇠기의 강성과 감쇠관계인 식(10)을 이용하면 식(9)는 식(11)과 같이 점탄성 감쇠기의 감쇠계수에 대하여 정리할 수 있다.

$$C_d = \frac{4\pi \zeta_d \sum m_i \Delta_i^2}{T_e (1 - 2\zeta_d \frac{G'}{G''}) \sum \cos^2 \theta_i \Delta_{ij}^2} \quad (11)$$

식(11)과 식(3)을 이용하여 감쇠기의 단면적, 두께 등을 결정할 수 있다. 이러한 방법으로 설계된 감쇠기를 구조물에 설치하면 감쇠기 강성의 영향으로 그림 2와

같이 능력스펙트럼이 증가하게 된다. 따라서 능력스펙트럼과 목표변위에서 만나는 요구스펙트럼의 유효감쇠비(ζ_{eff})와 이력거동에 의한 등가감쇠비(ζ_{eq})도 달라지게 되므로 식(7)~(11)을 이용하여 필요한 감쇠비 및 점탄성 감쇠기의 크기를 새롭게 산정할 수 있다. 이러한 과정을 몇 차례 반복하면 점탄성 감쇠기의 수렴된 최종 크기를 산정할 수 있다.

4. 변수 분석

4.1 해석모델 및 설계변수

변수분석을 위한 예제 구조물은 횡방향 자유도만 갖는 단자유도계이며, 그림 4와 같이 이선형 이력특성을 가진다. 각 구조물의 특성에 따른 응답의 변화와, 성능목표에 적합한 점탄성 감쇠기의 강성과 감쇠값의 적합성을 검증하기 위하여, 다음과 같은 변수를 가진 36개 구조물에 대하여 해석을 수행하였다.

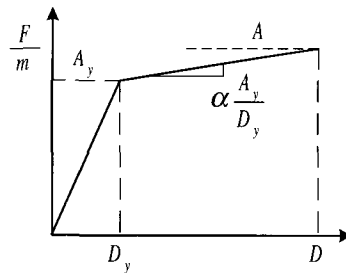


그림 4 구조물의 이력특성

- (1) 구조물의 탄성주기(T_e) : 0.3초, 0.5초, 1.0초
- (2) 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비(e) : 각 주기의 구조물에 대하여 0.1, 0.3, 0.5
- (3) 항복 후 강성비(α) : 구조물의 각 e 에 대하여 0.1, 0.15, 0.3, 0.5

4.2 지진하중

본 논문에서는 지진해석을 위하여 10개의 지반 가속도 기록을 사용하였다. 각 지진의 두 방향의 수평성분의 목록은 표 1에 나타나 있다. 이 목록은 S_D 지반(단단한 토사지반)에서 계측된 규모 6.5이상, 최대 지반가속도가 0.2g이상인 지진기록으로 ATC-40에서

표 1 지진기록 목록

Earthquake (Year)	Station	M	Comp.	PGA cm/sce ²	PGV cm/sec	Earthquake (Year)	Station	M	Comp.	PGA cm/sce ²	PGV cm/sec
W. Washington (1949)	325	7.1	N04W	161.6	21.4	Loma Prieta (1989)	Hollister	7.1	90	-174.5	-30.9
			N86E	-274.6	-17.1				0	361.9	62.8
Eureka (1954)	022	6.5	N11W	164.5	-31.6	Landers (1992)	Yermo	7.5	360	-148.6	29.0
			N79E	-252.7	29.4				270	-240.0	50.8
San Fernando (1971)	241	6.6	N00W	-250.0	-29.8	Landers (1992)	Joshua	7.5	90	278.4	-42.7
			S90W	-131.7	23.8				0	268.3	27.5
San Fernando (1971)	458	6.6	S00W	113.9	31.8	Northridge (1994)	Moorpark	6.7	180	286.2	20.3
			S90W	103.5	-28.6				90	189.3	20.4
Loma Prieta (1989)	Gilroy 2	7.1	90	316.3	-39.2	Northridge (1994)	Century	6.7	90	250.7	21.4
			0	344.2	33.3				360	271.6	25.1

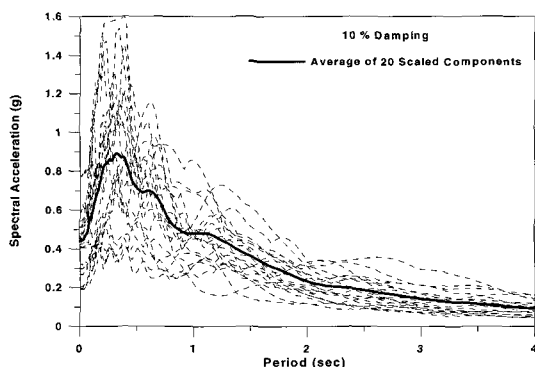


그림 5 20개 지진기록의 응답스펙트럼

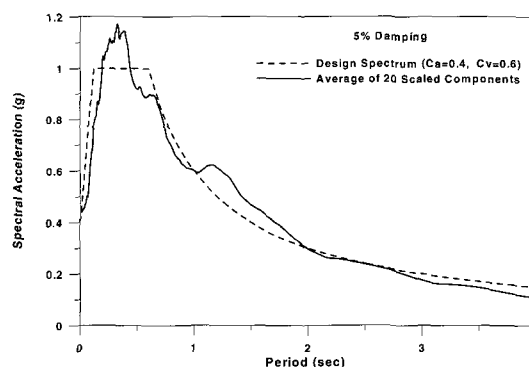


그림 6 설계스펙트럼과 평균 응답스펙트럼

제시하고 있다.¹⁾ 그림 5는 표 1의 20개 지진성분의 10% 감쇠비에 대한 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 실선으로 나타낸 것은 이와 같은 20개 성분을 평균한 응답스펙트럼이다. 이러한 평균 응답스펙트럼에 상수를 곱하여 조정하면 그림 6과 같이 $C_a=0.4$, $C_v=0.6$ 인 설계스펙트럼에 잘 부합된다.

4.3 성능점 산정

각 예제 구조물에 대하여 먼저 능력스펙트럼법을 이용하여 변위응답(S_{dc}), 가속도응답(S_{ac}), 유효감쇠비(ζ_{eff})를 구하였다. 그림 7과 표 2에는 $T_e=0.5$, $e=0.3$, $\alpha=0.5$ 인 구조물의 응답을 구하는 과정을 나타내었다. 각 감쇠비의 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교차점으

로부터 변위와 가속도 응답을 구한 후 식(2)를 이용하여 유효감쇠비를 구하였다. 식(2)에 의한 유효감쇠비(ζ_{eff})와 요구스펙트럼의 감쇠비(ζ)가 같은 점을 반복 계산을 수행하여 찾는다.

능력스펙트럼법에 의한 결과를 검증하기 위하여 단자유도계의 비선형 시간이력해석 프로그램인 NONSPEC⁷⁾을 이용하여 시간이력해석을 수행하였다. 표 3에는 각 설계변수들에 해당하는 응답 중 주어진 목표변위(δ_i)를 초과하는 경우만을 모아서 나타내었다. 목표변위는 편 의상 FEMA-273에서 제시하고 있는 비선형 정적해석 절차1에 의하여 산정하였다. 대부분의 경우에 능력스펙트럼법에 의한 응답과 시간이력해석 결과가 비교적 잘 일치하였다. 그러나, 항복 후 강성비가 작아질수록 능력스펙트럼법에 의한 응답이 과소평가 되는 경향이 있음을 알 수 있다.

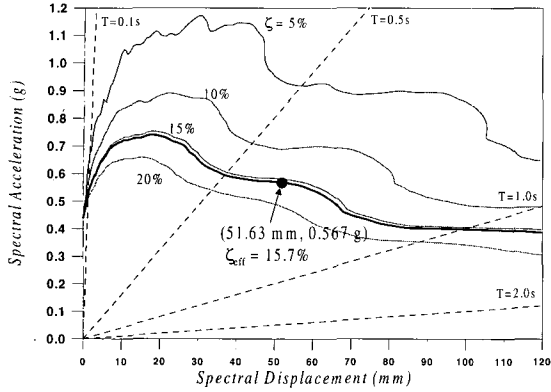


그림 7 능력스펙트럼법에 의한 응답산정

표 2 성능점의 산정(단위: mm, g)

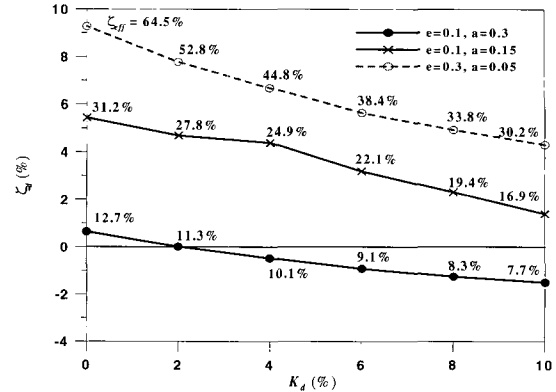
ζ	S_{dy}	S_{ay}	S_{di}	S_{ai}	$\zeta_{eff}(\%)$
5	18.63	0.3	92.43	0.894	13.5
10			67.38	0.682	15.0
15			53.28	0.579	15.7
20			44.63	0.509	15.9
15.7			51.63	0.567	15.7

표 3 목표변위를 초과하는 구조물의 응답(단위: mm, g)

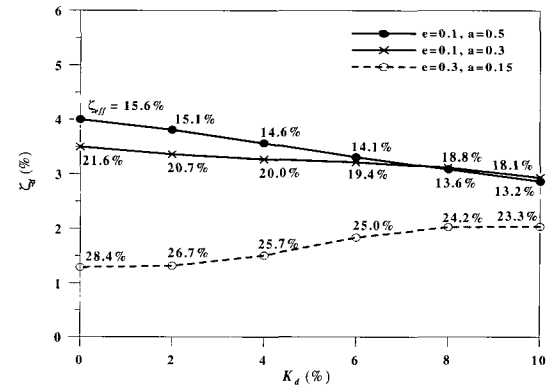
T_e	e	α	δ_t	S_{dy}	S_{ay}	S_{dc}	D_t	ζ_{eff}
0.3	0.1	0.3	42.48	2.24	0.1	44.29	41.13	11.4
		0.15				65.14	55.73	15.0
		0.05				91.63	77.47	24.7
0.5	0.1	0.5	73.28	6.21	0.1	77.26	71.34	9.4
		0.3				78.36	73.75	14.1
		0.15				103.16	88.97	20.2
1.0	0.1	0.05	149.05	14.90	0.06	102.61	94.73	37.0
		0.3				194.40	176.16	9.2
		0.15				184.30	164.79	14.3
						160.80	167.77	24.9

4.4 추가되는 강성에 따른 요구되는 감쇠량의 변화

목표변위를 초과하는 10개 구조물에 대하여 성능향상을 위하여 필요한 감쇠기의 양을 산정하는 해석을 수행하였다. 점탄성 감쇠기를 구조물에 설치하였을 때 감쇠뿐만 아니라 구조물의 강성도 증가하게 된다. 또한 감쇠기의 강성변화에 따라 성능수준을 만족하기 위해



(a) $T_e = 0.3$ 초



(b) $T_e = 1.0$ 초

그림 8 목표변위를 만족하기 위하여 필요한 추가적인 감쇠비

필요한 감쇠비도 변화하게 된다. 이러한 현상을 관찰하기 위하여 먼저 추가되는 강성(K_d)을 구조물 강성(K)의 0~10%까지 증가시키면서 목표변위를 만족하기 위해 요구되는 감쇠비(ζ_d)를 구하였다. 여기서 $K_d=0$ 이면 점성 감쇠기의 경우에 해당한다.

목표변위에서 변화된 능력스펙트럼과 요구스펙트럼의 교차점으로부터 유효감쇠비를 구한다. 유효주기와 등가점성감쇠비를 목표변위에서 구하고 식(7)을 이용하면 필요한 추가적인 감쇠비는 그림 8과 같다. 해석 결과에 따르면 주기가 짧을수록, 항복 후 강성비가 작을수록 강성의 영향을 많이 받을 수 있다. 즉 주기가 0.3초인 구조물의 경우 감쇠기의 강성에 따라 요구되는 유효감쇠비와 필요한 감쇠비의 감쇠비가 급격하게 작아지나, 주기가 1.0초인 구조물은 강성의 변화에 따라 감쇠비는 크게 변하지 않는다. 감쇠기의 특정 강성에 대하여 필요한 감쇠비가 음수가 되는 경우가 있

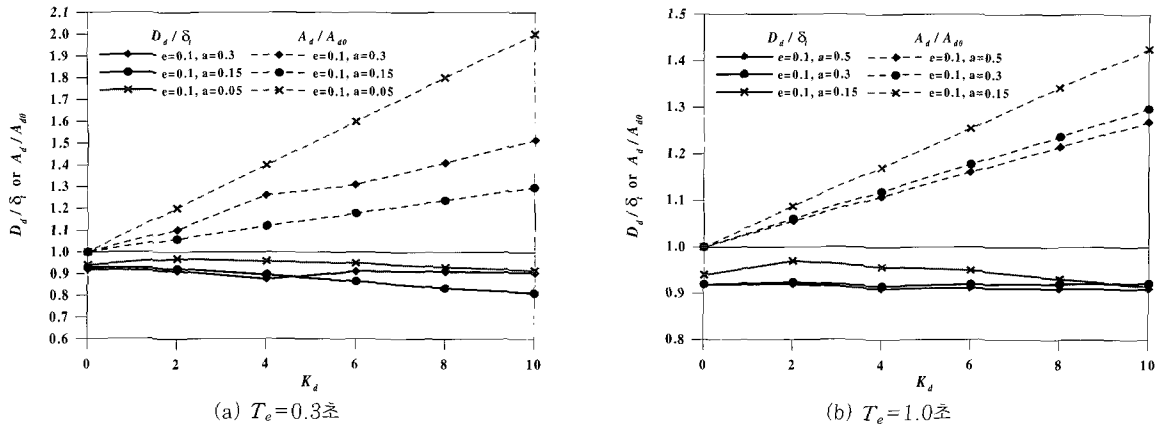


그림 9 추가되는 강성에 따른 변위 및 가속도 응답의 변화

는데 이것은 그림 9에 나타난 변위응답(D_d)과 목표변위와의 비를 살펴보면 추가된 강성만으로도 목표변위보다 다소 과다하게 제어되기 때문이다. 이것은 보다 작은 부가적인 강성만으로도 제어됨을 의미한다. 그러나 그림 9에서 감쇠기가 설치되기 전 목표변위에서 구조물에 발생하는 가속도(A_{d0})에 대한 강성이 부가된 구조물에 발생하는 가속도(A_d)의 비를 살펴보면 구조물에 강성이 추가되면 발생하는 가속도는 강성이 추가되지 않았을 때 보다 최대 2배 정도 커지게 된다. 즉 구조물의 변위는 제어되지만 입력 하중이 커짐으로써 구조부재의 손상을 가져올 수 있다. 이러한 경향은 주기가 짧을수록, 항복 후 강성비가 작을수록 더 크게 나타났다. 따라서 점탄성 감쇠기를 설치할 때는 이러한 측면을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

일반적으로 3M사에서 생산되는 점탄성 재료의 η 값은 1~1.2정도이므로 각 구조물의 성능수준을 만족하기 위하여 적당한 점탄성 감쇠기는 식(3)을 이용하여 구한 η 가 적정범위에 있는지 여부를 통하여 구할 수 있다. 예를 들면 $T_e=0.3$, $e=0.1$, $\alpha=0.15$ 인 구조물에 대하여 식(6)의 K_d , C_d 를 이용한 감쇠기의 각 강성에 대한 η 는 표 4와 같다.

표 4 감쇠기의 손실계수

감쇠기의 강성비(%)	K_d	$\xi_d(\%)$	C_d	η
10	43.86	1.40	0.586	0.28
8	35.09	2.31	0.968	0.58
6	26.32	3.19	1.336	1.06
4	17.55	4.39	1.839	2.20
2	8.77	4.69	1.965	4.69

여기서 감쇠기의 강성이 구조물 강성의 6%에 해당할 때 η 는 1.02가 되어 적절한 범위에 해당하므로 적합한 감쇠기가 된다. 이러한 방법에는 과다한 해석과정이 필요하므로 본 연구에서는 적정 감쇠기를 설계하기 위하여 3.2절에서 제안된 설계방법을 사용하였다.

4.5 성능수준을 만족하기 위한 점탄성 감쇠기의 설계

구조물의 성능수준을 만족하기 위하여 필요한 감쇠기를 설계하기 위해서는 다음과 같은 절차를 따른다.

목표변위에서 감쇠기가 설치되지 않은 구조물의 능력스펙트럼과의 교차점에서 식(7)을 이용하여 필요한 감쇠비(ξ_d)를 구한다. 이 감쇠비와 식(6)의 관계에서 감쇠상수(C_d)를 계산하여 감쇠기의 강성과 감쇠상수의 관계인 식(10)을 이용하면 감쇠기의 강성을 얻을 수 있다. 감쇠기의 강성이 구조물에 추가되면 그림 2와 같이 구조물의 목표변위에서의 가속도 응답은 S_{at2} 가 된다. 이 성능점에서 다시 식(7)을 이용하여 필요한 감쇠비를 구한다. 이러한 일련의 과정을 이전 단계의 감쇠기의 강성과 다음 단계의 감쇠기의 강성이 오차범위를 만족할 때까지 반복한다.

목표변위를 만족하지 못한 10개의 구조물에 대하여 제어에 필요한 감쇠기의 최적 강성과 감쇠상수를 위 절차에 따라 구하였다. 표 5는 이 중에서 $T_e=1.0$, $e=0.1$, $\alpha=0.5$ 인 구조물의 필요한 강성과 감쇠를 구하는 과정을 나타내고 있다. 여기서 η 는 1로 가정하였다. 표 6은 제어가 필요한 10개 구조물에 각각 점성 감쇠기와 점탄성 감쇠기를 설치하였을 때 필요한 감쇠비와 강성을 나타낸다. 점탄성 감쇠기의 경우 점성 감쇠기에 비

표 5 감쇠기의 강성과 감쇠상수 산정

No.	T_e	ζ_d (%)	C_d	K_d	오차(%)
1	1.000	4.00	0.502	3.155	100
2	0.962	3.09	0.388	2.536	-24.39
3	0.969	3.26	0.409	2.652	4.34
4	0.968	3.24	0.407	2.639	-0.46

하여 목표변위를 만족하기 위하여 필요한 감쇠비는 줄어들지만 구조물에 추가적인 강성을 부여하는 것을 알 수 있다. 주기가 0.3, 0.5초인 경우 항복후 강성비(α)가 작아질수록 요구되는 점탄성 감쇠기의 크기는 커지지만 주기가 1.0초인 경우 상반된 결과가 나올 수 있다. 각 감쇠기가 설치된 구조물의 시간이력 해석 결과를 보면 모두가 제어목표까지 잘 제어되었다. 여기서 목표변위에 대한 최대 오차는 약 9.5%였다.

5. 예제 해석

단자유도계에서 구조물의 여러 가지 변수를 변화시키면서 본 연구에서 제안한 방법에 의하여 설계된 감쇠기를 설치하였을 때 제어목표까지 잘 제어됨을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 10층의 2차원 철골 건물을 모델로 하여 해석을 수행하였다.

5.1 예제 건물 및 지진하중

해석 모델은 모든 층의 층고가 4m이고 경간이 6m인

3경간 10층의 2차원 철골 프레임으로 건축학회의 강구조계산규준(허용응력설계법, 1983)에 따라 MIDAS-GEN⁸⁾을 이용하여 설계하였다. 고정하중은 540kgf/m², 적재하중은 250kgf/m²로 모든 층에 같은 크기를 적용하였다. 예제 모델은 중력하중 및 풍하중에 대하여 저항하도록 설계하였고 보에는 항복강도 2.4tonf/cm², 기둥에는 3.3tonf/cm²인 철골부재를 사용하였다. 이 건물의 기본 진동주기는 1.41초이고 1차 모드 질량참여율은 77.54%이다. 응답스펙트럼은 「내진설계기준연구 II」⁹⁾에서 제시하는 2400년 재현주기를 갖는 S_E (연약한 토사지반)지반에 대한 표준 설계응답스펙트럼을 이용하였다. 설계된 감쇠기를 설치하였을 때의 변위 응답을 구하기 위하여 SIMQKE¹⁰⁾를 이용하여 설계 스펙트럼으로부터 인공지진을 생성하였다. 인공지진의 가속도 시간이력은 그림 10과 같다.

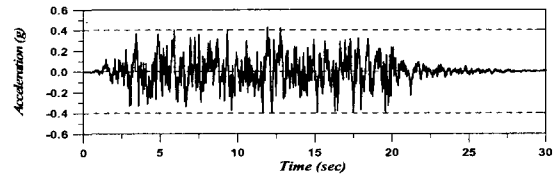


그림 10 인공지진의 가속도 시간이력

5.2 성능점 산정

비선형 해석 프로그램인 Drain 2D+¹¹⁾를 이용하여 예제 건물에 1차 모드 형상에 따라 산정한 층지진 하중을 가하고 pushover 해석에 의하여 구한 최상층 변

표 6 점성과 점탄성 감쇠기의 감쇠비와 강성

T_e	α	목표변위	점성 감쇠기			점탄성 감쇠기			
			ζ_{eff} (%)	ζ_d (%)	제어된 변위 (mm)	ζ_{eff} (%)	ζ_d (%)	K_d (%)	제어된 변위 (mm)
0.3	0.3	42.48	12.7	0.64	39.49	12.1	0.38	0.75	38.45
	0.15		31.2	5.44	39.01	21.7	3.06	6.32	38.78
	0.05		64.5	9.27	40.12	31.4	4.55	9.52	38.86
0.5	0.5	73.28	10.7	0.84	67.17	10.4	0.67	1.35	67.08
	0.3		16.4	1.07	69.12	15.5	0.72	1.46	69.18
	0.15		32.6	4.09	69.37	25.2	2.35	4.81	70.17
	0.05		53.5	4.53	73.36	36.2	3.38	6.99	67.44
1.0	0.5	149.05	15.6	4.00	137.1	13.9	3.24	6.99	137.27
	0.3		21.6	3.50	137.1	19.2	3.20	6.60	135.88
	0.15		28.4	1.29	156.9	26.3	1.35	2.74	152.09

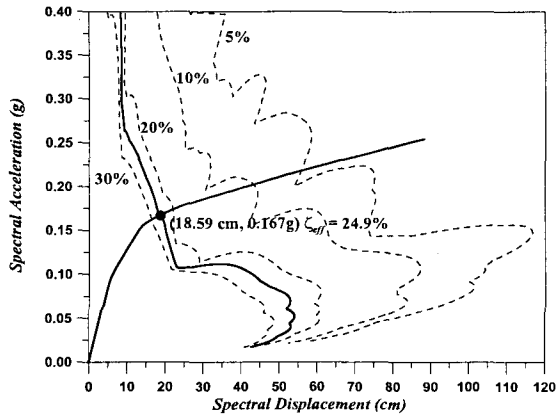


그림 11 성능점의 산정

위와 밀면전단력의 능력곡선을 변위와 가속도의 능력 스펙트럼으로 변환하여 예제 건물의 성능을 평가하였다.

등가의 단자유도계에서 응답은 그림 11과 같이 변위 응답이 18.59cm, 가속도 응답은 0.167g이다. 이것을 다시 다자유도계의 최상층 변위와 밀면전단력으로 변환하면 최상층의 변위가 24.85 cm이고 밀면전단력은 56.7tonf이 된다.

시간이력해석에 의한 변위응답은 25.87cm로 그림 12의 최대 변위와 층간변위를 비교하면 두 가지 해석결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 재현주기 2400년 지진에 대한 성능목표는 건물의 붕괴방지이며, 이 때 허용층간변위는 층고의 2.5%이다. 해석결과 예제 건물은 층간변위가 모두 1.2% 이내로 발생하여 성능수준을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 그림 13(a)와 같이 예제 구조물의 모든 층에 소성힌지가 발생하였다. 따라서 구조물에 좀 더 나은 성능수준을 부여하기 위하여 성능목표를 기능수행수준^{9),12)}인 최상층 변위를 20cm

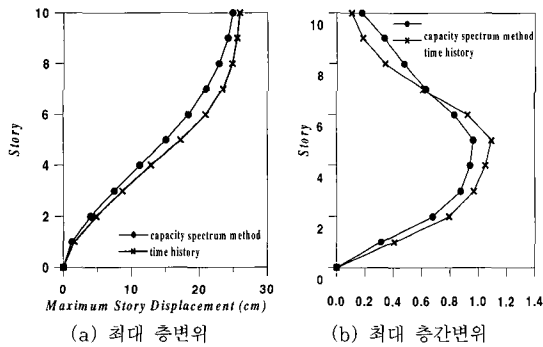
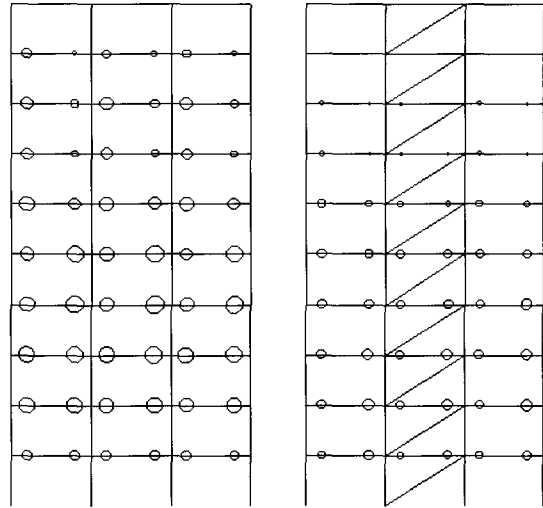


그림 12 제어되지 않은 건물의 응답



(a) 감쇠기 설치 전 (b) 감쇠기 설치 후

그림 13 소성힌지 분포

(건물높이의 0.5%)로 제한하고, 이를 위해 필요한 감쇠기를 설계하였다.

5.3 점탄성 감쇠기의 분배

표 7은 등가의 단자유도계에서 목표변위를 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 강성과 감쇠비를 구하는 과정을 나타내었다.

여기서 등가 주기(T_{eq})는 이력 곡선을 이선형으로 치환하고 점탄성 감쇠기의 강성을 포함한 주기이다. 이 과정을 통하여 구한 감쇠비는 감쇠비 분배식을 이용하여 전체 구조물에 분배하여야 한다.

본 연구에서 사용한 예제 구조물에는 모든 층에 같은 크기의 감쇠기가 사용된다고 가정하고 필요한 감쇠기의 강성과 감쇠를 구하였다. 따라서 식(10)과 식(11)의 관계를 이용하면 필요한 감쇠상수는 2.68tonf·sec/cm 이고 강성은 10.8tonf/cm이다. 이 값은 같은 성능목

표 7 감쇠기의 강성과 감쇠상수 산정

No.	T_{eq}	$\xi_d(\%)$	C_d	K_d	오차(%)
1	1.591	13.49	0.372	1.468	100
2	1.549	9.75	0.276	1.119	-31.75
3	1.565	10.73	0.301	1.207	7.23
4	1.560	10.42	0.293	1.179	-2.34
5	1.560	10.22	0.278	1.157	-1.88

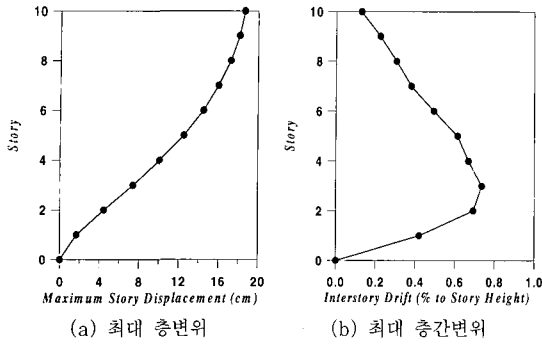


그림 14 제어된 건물의 응답

표를 만족하기 위하여 필요한 점성 감쇠기의 감쇠상수인 $3.19\text{tonf} \cdot \text{sec}/\text{cm}$ 보다 작은 값이다. 이것은 점탄성 감쇠기에 의하여 추가적인 강성이 구조물 강성에 더해지기 때문에, 요구되는 감쇠값은 점성 감쇠기에 비하여 다소 작다. 설계된 점탄성 감쇠기를 설치하고 수행한 시간이력해석 결과에 의하면 그림 14와 같이 최상층의 변위가 18.63cm 였다. 이 값은 목표변위보다 다소 안전하게 제어되었지만 층간변위는 일부층에서 허용층간변위인 층고의 0.5% 보다 다소 크게 발생하였다.

그림 15의 에너지 시간이력을 보면 감쇠기가 설치되기 전에는 구조물의 변형에 의한 이력에너지로 입력된 지진에너지가 많이 소산되었지만, 감쇠기가 설치된 구조물의 경우에는 대부분의 에너지가 감쇠에너지로 소산되고 구조물의 변형에 의한 에너지 소산량은 설치되기 전보다 많이 줄어든 것을 알 수 있다.

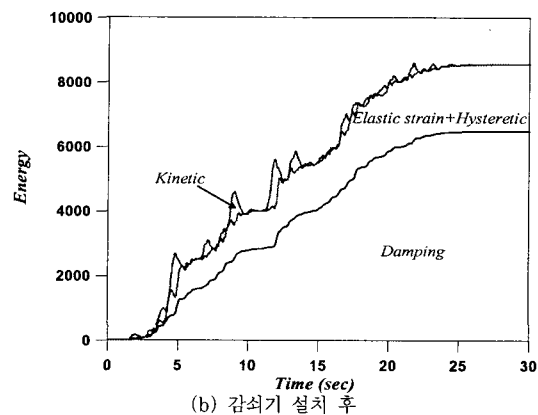
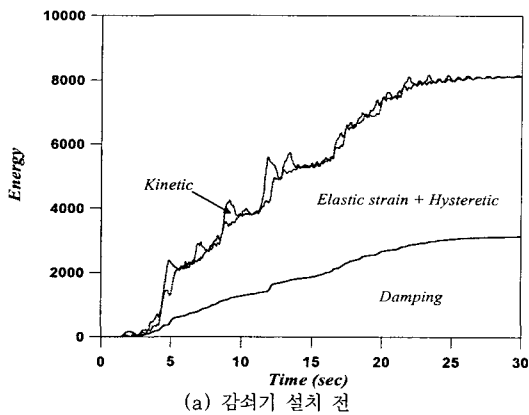


그림 15 에너지 시간이력

6. 결 론

본 연구에서는 목표변위에서의 유효감쇠비를 산정하여 성능목표까지 구조물의 변형을 제어하기 위하여 필요한 점탄성 감쇠기의 양을 산정하는 방법을 제시하였다. 먼저 단자유도계에서 구조물의 설계변수를 달리하면서 설계한 결과, 제안된 방법은 고려된 설계변수의 영향을 크게 받지 않고 목표변위까지 잘 제어되었다. 또한 감쇠기의 강성 변화에 따른 변수분석에서는 구조물의 주기가 짧을수록, 항복 후 강성비가 작을수록 감쇠기에 의하여 추가된 강성의 영향을 많이 받았다.

10층 구조물에 제안된 방법에 따라 설계된 점탄성 감쇠기를 설치하고 시간이력해석 응답과 비교한 결과, 목표변위까지 잘 제어됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법은 성능목표를 만족하기 위하여 필요한 점탄성감쇠기의 양을 비선형 정적해석방법을 이용하여 손쉽게 구할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(R01-1999-00298)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," ATC-40, Applied Technology

- Council, Redwood City, California, 1996
2. FEMA, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997
 3. 김진구, 최현훈, "비탄성 정적해석을 이용한 점성감쇠기의 설계," 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 제13권 제2집, 2000, pp.257~264
 4. 김진구, 최현훈, "Evaluation of proper supplemental damping for a multi-story steel frame using capacity spectrum method," 한국지진공학회 논문집, 제5권2호, 2001, pp.103~111
 5. Soong, T. T., and Dargush, G. F., "Passive energy dissipation systems in structural engineering," State university of New York at Buffalo, 1996
 6. Chopra, A. K., *Dynamics of structures*, Prentice Hall, 1995
 7. Mahin, S. A. and Lin, J., "Inelastic response spectra for single degree of freedom systems," Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1983
 8. POSCO Engineering & Construction Co., Ltd, *MIDAS-GEN*, Vol. I~Vol. IV, 1999
 9. 한국지진공학회, "내진설계기준연구(II)," 건설교통부, 서울, 1997
 10. Vanmarcke, E. H. and Gasparini, D. A., *A program for artificial motion generation, User's manual and documentation*, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976
 11. Tsai, K. C. and Li, J. W., "DRAIN 2D +, A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R86-07, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1997
 12. SEAOC, "Tentative Guidelines for Performance-Based Seismic Engineering," SEAOC Blue Book, Structural Engineers Association of California, 1999