

## 유효감쇠비를 이용한 점탄성 감쇠기의 설계 Design of Viscoelastic Dampers Using Effective Damping Ratio

최현훈\*  
Choi, Hyunhoon

김진구\*\*  
Kim, Jinkoo

### ABSTRACT

To enhance seismic performance of a structure ATC-40 and FEMA-273 propose technical strategies such as increasing strength, altering stiffness, and reducing demand by employing base isolation and energy dissipation devices. Specifically the energy dissipation devices directly increase the ability of the structure to dampen earthquake response. However nonlinear dynamic time history analysis of a structure with energy dissipation devices is complicated and time consuming. In this study a simple and straightforward procedure is developed using effective damping ratio to obtain the required amount of viscoelastic dampers in order to meet given performance objectives. Parametric study has been performed for the period of the structure, yield strength, and the stiffness after the first yield. According to the analysis results, earthquake demand and required damping ratio were reduced by installing viscoelastic dampers. The results also shows that with the addition of the supplemental damping evaluated by the proposed method the performance of the model structures are well restrained within the target point.

### 1. 서 론

최근 내진공학분야에서는 건물의 사용 연한 동안 발생할 수 있는 여러 단계의 지진하중에 대하여 목표 성능수준을 만족하도록 설계하는 성능에 기초한 내진설계에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 지반운동 수준에 따른 성능목표를 만족하도록 설계하기 위해서는 먼저 구조물의 보유 능력을 평가하는 작업이 수행되어야 한다. 구조물의 내진성능을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method 이하 CSM)은 구조물의 능력을 파악할 수 있는 가장 간단하고 실용적인 방법으로 횡하중에 대한 구조물의 저항능력과 구조물에 작용하는 지진의 요구를 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 내진성능을 평가하는 방법이다.

ATC-40<sup>(1)</sup>과 FEMA-273<sup>(2)</sup>보고서에 따르면 기존 건물과 새로운 건물의 내진성능을 평가한 후 성능목표를 달성하도록 건물의 성능을 향상시키는 방법에는 건물의 강도와 강성을 증가시키는 방법, 건물의 변형능력을 향상시키는 방법, 면진장치를 설치하거나 에너지 소산장치를 설치하는 방법 등이 있다. 그 중에서 점탄성 감쇠기, 점성 감쇠기, 소성 감쇠기, 마찰 감쇠기 등과 같은 수동형 에너지 소산장치는 설치가 쉽고 다른 방법들 보다 설치비용에 비하여 효과가 뛰어나기 때문에 적용사례가 많다. 그러나 이런 수동형 에너지 소산장치가 설치된 경우 건물의 성능을 평가하기 위한 시간이력해석이 복잡해지고, 따라서 목표 성능수준까지 향상시

\* 성균관대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원

\*\* 성균관대학교 건축공학과 조교수, 정회원

키기 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 정적 비선형 해석법을 이용하여 성능수준을 만족할 수 있는 감쇠기의 양을 구하는 방법에 관하여 연구하였다. 저자들에 의한 최근 연구에 따르면 점성 감쇠기의 경우에는 이와 같은 방법에 따라 설계된 감쇠기를 설치하였을 때 제어목표까지 잘 제어됨을 확인하였다.<sup>(3)</sup> 그러나 점탄성 감쇠기의 경우에는 설치될 구조물의 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 구조물의 응답을 평가하였다. 이 중 목표변위를 만족하지 못한 구조물에 대하여 유효감쇠비를 구한 후 이 값을 이용하여 성능수준을 만족시키기 위하여 필요한 감쇠기의 양을 산정하였다.

## 2. CSM에 의한 내진성능평가

CSM은 구조물의 횡하중에 대한 저항능력을 나타내는 능력스펙트럼과 구조물에 작용하는 지진의 요구를 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)형식의 요구스펙트럼으로 변환한 후 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 성능점을 산정하고, 내진성능을 시각적으로 쉽게 평가하는 방법이다.

구조물의 능력은 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 최상층의 횡변위( $\Delta_R$ )와 밑면전단력( $V$ )으로 표현된다. 능력곡선을 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 구조물의 동적특성을 이용하여  $\Delta_R$ 과  $V$ 의 능력곡선을 응답변위( $S_d$ )와 응답가속도( $S_a$ )의 능력스펙트럼으로 변환하게 된다. 1차 모드가 지배적인 경우  $\Delta_R$ 과  $V$ 의 능력곡선을  $S_d$ 와  $S_a$ 의 능력스펙트럼으로의 변환은 식(1)에 의하여 수행할 수 있다.

$$S_a = \frac{V}{M_1^*} \quad S_d = \frac{\Delta_R}{\Gamma_1 \phi_{R1}} \quad (1)$$

이 때 변환식에 이용되는 모드참여계수( $\Gamma_1$ )와 유효모드질량( $M_1^*$ )은 다음과 같다.

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2} \quad M_1^* = \frac{(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1})^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2} \quad (2)$$

유효주기( $T_{eff}$ )는  $S_a$ 와  $S_d$ 의 관계에서 구해지며 스펙트럼 상에서는 방사의 형태로 나타난다.

요구스펙트럼은 일반적으로 주기에 대한 응답변위, 응답속도, 응답가속도의 관계로서 표현되지만 능력스펙트럼과 하나의 그래프에 나타내기 위하여  $S_d$ 와  $S_a$  좌표계의 ADRS형식으로 표현된다. 이 변환에는 식(3)의 관계를 이용한다.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (3)$$

구조물의 선형탄성응답은 5% 감쇠비의 요구스펙트럼을 이용하여 나타내고 높은 감쇠 요구스펙트럼은 구조물의 비탄성 응답을 나타낸다. 그림 1에서 점선은 구조물의 능력곡선으로 이것을 등가의 이선형(bilinear) 곡선으로 표현한다. 등가 이선형 곡선의 이력거동에 의하여 소산된 에너지를 이용하여 등가점성감쇠비( $\beta_{eq}$ )를 구한 후 구조물의 이력특성을 고려하여 유효감쇠비( $\beta_{eff}$ )를 산정한다. 여기서 등가점성감쇠비와 유효감쇠비는 식(4), 식(5)를 이용하여 산정할 수 있다.<sup>(1)(2)(4)</sup>

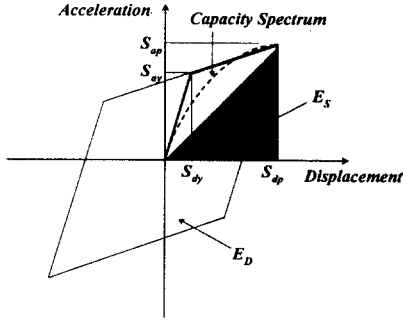


그림 1. 등가점성감쇠비의 산정

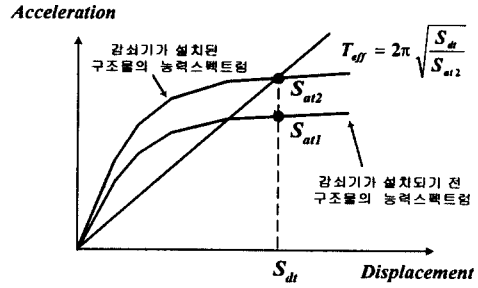


그림 2. 감쇠기가 설치된 구조물의 능력곡선

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

$$\beta_{eff} = \beta + \kappa \beta_{eq} \quad (5)$$

여기서  $E_D$ 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지를 나타내며 마름모의 면적을 말하며,  $E_S$ 는 구조물의 최대변형에너지로 빗금친 삼각형의 면적이다.  $\beta$ 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다. 그러나 지진하중을 받는 구조물은 여러 가지 효과들에 의하여 그림1과 같은 이상화된 이력특성을 나타내지 못한다. 따라서 ATC-40과 FEMA-273에서는 이러한 구조물의 이력특성을 반영하기 위하여 식(5)의 우변과 같이 감쇠조정계수 ( $\kappa$ )를 사용하여 유효감쇠비를 조정한다.

### 3. 점탄성 감쇠기의 적정 감쇠비의 산정

점탄성 감쇠기의 강성과 감쇠는 온도와 작용하는 하중의 진동수에 따라 달라진다. 따라서 감쇠기의 가력시험을 통하여 얻어지는 하중-변위 이력곡선을 이용하여 비선형해석을 하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 방법은 계산과정이 너무 복잡하여 실무에 적용하기 어려운 단점이 있으므로, Soong<sup>(5)</sup> 등은 실험과 해석을 통하여 식(6)과 같은 선형의 등가강성 ( $K_v$ )과 등가감쇠 ( $C_v$ )를 사용하여 비교적 만족스러운 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

$$K_v = \frac{GA}{t} \quad C_v = \frac{G''A}{\omega t} \quad \eta = \frac{G''}{G} \quad (6)$$

여기서  $G$ 은 전단저장계수,  $G''$ 은 전단손실계수이고,  $A$ 와  $t$ 는 각각 감쇠기의 면적과 두께를 나타내며,  $\eta$ 는 손실계수(loss factor)이다.

점탄성 감쇠기가 설치될 경우 구조물의 능력곡선은 그림 2와 같이 구조물의 초기강성이 커지고 주기도 변하게 된다. 이 때 목표변위( $S_{dt}$ )에서의 유효주기는 감쇠기가 설치된 이후의 변위와 가속도응답으로부터 구한다. 일반적으로 감쇠기가 설치된 구조물의 유효감쇠비는 식(5)에 감쇠기에 의한 감쇠를 추가하여 식(7a)와 같이 구할 수 있다.<sup>(2)(6)</sup>

$$\beta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{DS} + E_{DE}}{E_{SD}} + \beta \quad (7a)$$

점탄성 감쇠기의 경우 그림 2 및 식 (4)를 이용하여 위 식을 다음과 같이 바꿀 수 있다:

$$\beta_{eff} = \frac{E_{DE}}{2\pi m S_{at2} S_{dt}} + \frac{2\kappa (S_{ay}S_{dt} - S_{dy}S_{at2})}{\pi S_{at2} S_{dt}} + \beta \quad (7b)$$

식(7)에서  $E_{SD}$ 는 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 최대변형에너지이고,  $E_{DE}$ 는 감쇠기에 의하여 소산된

에너지로 식(8)과 같이 구할 수 있다. 식(8)의 우변의 세 번째와 네 번째 식의 관계를 이용하면 식(9)과 같이 감쇠기의 감쇠비를 구할 수 있다.

$$E_{DE} = \int f_D du = \int_0^{2\pi/\omega} (C_v \dot{u}) \dot{u} dt = \pi C_v \omega u_o^2 = 2\pi\beta_v \frac{\omega}{\omega_n} k u_o^2 \quad (8)$$

$$\beta_v = \frac{C_v T_e}{4\pi m} \quad (9)$$

식(9)를 식(7)에 대입하고  $\beta_v$ 에 대하여 정리하면 감쇠기의 감쇠비는 식(10)과 같다.

$$\beta_v = (\beta_{eff} - \beta - \frac{2\kappa (S_{ay} S_{dt} - S_{dy} S_{at2})}{\pi S_{at2} S_{dt}}) \frac{T_e}{T_{eff}} \quad (10)$$

#### 4. 예제 구조물과 지진하중

예제 구조물은 횡방향 자유도만 가진 단자유도계이며 그림 3과 같이 이선형 이력특성을 가진다. 각 구조물의 특성에 따른 응답의 변화와 본 연구에서 제시하고자 하는 성능목표에 적합한 감쇠기의 감쇠비 산정의 적합성을 검증하기 위하여 다음과 같은 변수를 가진 48개 구조물에 대하여 해석을 수행하였다.

- (1) 구조물의 탄성주기 ( $T_e$ ) : 0.1초, 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 ( $\alpha$ ) :

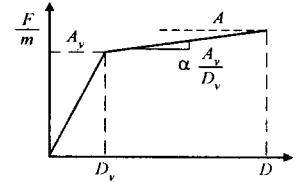


그림 3. 구조물의 이력특성

각 주기의 구조물의 각  $e$ 에 대하여 항복 후 강성비가 0.1, 0.15, 0.3, 0.5

본 논문에서는 해석을 위하여 10개 지반 가속도 기록을 사용하였다. 각 지진의 두 개의 수평방향 성분의 목록은 표 1에 나타나 있다. 이 목록은  $S_D$ 지반(단단한 토사지반)에서 계속된 지진기록으로 규모 6.5이상, 최대지반가속도가 0.2g이상으로 ATC-40에서 제시하고 있다. 그림 4는 표 1의 20개 지진성분의 10% 감쇠비에 대한 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 지반운동의 특성이 다양함을 알 수 있다. 이런 평균 응답스펙트럼을 조정하면 그림 5와 같이  $C_a = 0.4$ ,  $C_v = 0.6$ 인 설계스펙트럼에 잘 부합된다.

#### 5. 성능점 산정

각 예제 구조물에 대하여 먼저 CSM을 이용하여 변위응답( $D_C$ ), 가속도응답( $A_C$ ), 유효감쇠비를 구하였다. 그림 6과 표 2는  $T_e = 0.5$ ,  $e = 0.3$ ,  $\alpha = 0.5$ 인 구조물의 응답을 구하는 과정을 나타내었다. 각 감쇠비의 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교차점으로부터 변위와 가속도 응답을 구한 후 식(5)를 이용하여 유효감쇠비를

표 1. 지진기록 목록

Earthquake (Year)	Station	M	Comp.	PGA cm/sec <sup>2</sup>	PGV cm/sec	Earthquake (Year)	Station	M	Comp.	PGA cm/sec <sup>2</sup>	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

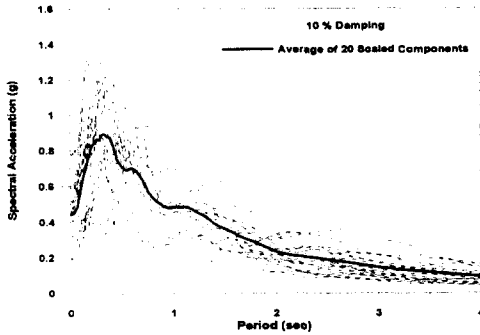


그림 4. 20개 지진기록의 응답스펙트럼

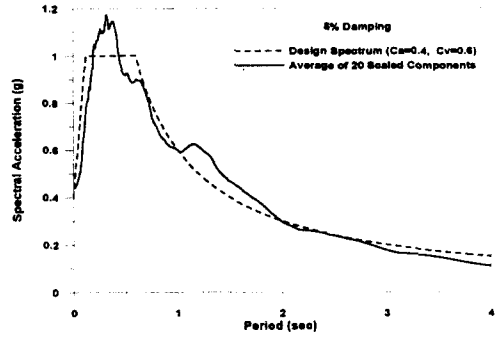


그림 5. 설계스펙트럼과 평균 응답스펙트럼

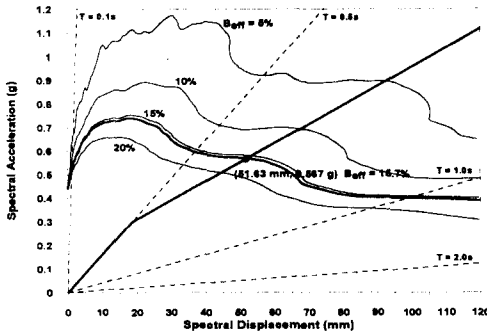


그림 6. CSM에 의한 응답산정

표 2. 성능점의 산정 단위:mm

감쇠비	$D_y$	$A_y$	$D_i$	$A_i$	$\beta_{eff} (\%)$
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

구하였다. 예제 구조물은 완전한 이선형 이력거동을 하기 때문에  $\kappa = 1.0$ 이다. 이렇게 구한 유효감쇠비를 이용하여 다시 요구스펙트럼을 작성하고 능력스펙트럼과의 교점에서 새로운 응답을 구하였다. 산정한 유효감쇠비가 요구스펙트럼의 감쇠비와 같을 때까지 감쇠비를 변화시켜 가면서 계산을 반복 수행하였다.

시간이력 해석은 Mahin과 Lin<sup>(7)</sup>이 개발한 단자유도계의 비선형 시간이력해석 프로그램인 NONSPEC을 이용하였다. 이 구조물의 시간이력해석에 의한 변위( $D_y$ )응답은 51.81mm로 0.3%의 오차를 보였다. CSM에 의한 해석결과는 표 3~6과 같다. 대부분의 경우에 CSM에 의한 응답과 시간이력해석 결과가 비교적 잘 일치한다. 그러나, 항복 후 강성비가 0.15와 0.05인 경우에는 CSM에 의한 응답이 5~30%정도 과소평가 되는 경향이 있음을 알 수 있다.

## 6. 성능수준을 만족하기 위한 감쇠기의 설계

CSM에 의한 해석 결과를 바탕으로 감쇠기의 감쇠비를 산정하기 위하여 먼저 목표변위( $D_T$ )를 정하였다. 목표변위는 FEMA-273에서 제시하고 있는 비선형 정적해석 절차1에 의하여 산정하였다. 그 결과는 표3~6에 나타나 있다. 목표변위를 초과하는 15개 구조물(음영처리)에 대하여 성능향상을 위하여 필요한 감쇠기의 양을 산정하는 해석을 수행하였다. 점탄성 감쇠기를 구조물에 설치하였을 때 감쇠뿐만 아니라 구조물의 강성도 증가하게 된다. 따라서 먼저 감쇠기의 강성( $K_v$ )을 구조물 강성( $K$ )의 0~10%까지 증가시키면서 필요한 감쇠기의 감쇠비( $\beta_v$ )를 구하였다. 여기서  $K_v = 0$ 이면 점성 감쇠기와 같은 거동 특성을 가지게 된다.

목표변위에서 변화된 능력스펙트럼과 요구스펙트럼의 교차점으로부터 유효감쇠비를 구한다. 유효주기와 등가점성감쇠비를 목표변위에서 구하고 식(10)를 이용하면 필요한 감쇠기의 감쇠비는 그림 7~10과 같다.

표 3.  $T_e=0.1$ 초인 구조물의 응답 단위:mm

$e$	$\alpha$	$D_y$	$A_y$	$D_c$	$D_t$	$\beta_{eff}$	$D_T$
0.5	0.5	1.12	0.45	1.69	1.71	13.8	4.47
	0.3			1.78	1.98	19.0	
	0.15			2.02	2.47	26.6	
	0.05			2.57	3.05	37.1	
0.3	0.5	0.67	0.27	2.17	2.11	15.4	4.47
	0.3			3.02	3.08	21.9	
	0.15			<b>5.37</b>	<b>5.29</b>	<b>28.1</b>	
	0.05			<b>11.32</b>	<b>9.12</b>	<b>36.7</b>	
0.1	0.5	0.22	0.09	3.23	3.05	8.8	4.47
	0.3			<b>5.57</b>	<b>5.09</b>	<b>10.2</b>	
	0.15			<b>12.47</b>	<b>11.07</b>	<b>10.8</b>	
	0.05			<b>32.72</b>	<b>28.58</b>	<b>12.3</b>	

표 4.  $T_e=0.3$ 초인 구조물의 응답 단위:mm

$e$	$\alpha$	$D_y$	$A_y$	$D_c$	$D_t$	$\beta_{eff}$	$D_T$
0.5	0.5	11.17	0.5	21.60	23.42	15.5	33.54
	0.3			20.03	23.35	20.9	
	0.15			19.20	24.14	25.4	
	0.05			18.53	25.84	28.3	
0.3	0.5	6.71	0.3	25.91	25.78	14.8	38.01
	0.3			24.61	25.95	23.0	
	0.15			26.41	28.03	33.0	
	0.05			27.21	30.91	44.5	
0.1	0.5	2.24	0.1	37.53	35.08	8.4	42.48
	0.3			<b>44.29</b>	<b>41.13</b>	<b>11.4</b>	
	0.15			<b>65.14</b>	<b>55.73</b>	<b>15.0</b>	
	0.05			<b>91.63</b>	<b>77.47</b>	<b>24.7</b>	

표 5.  $T_e=0.5$ 초인 구조물의 응답 단위:mm

$e$	$\alpha$	$D_y$	$A_y$	$D_c$	$D_t$	$\beta_{eff}$	$D_T$
0.5	0.5	31.05	0.5	45.95	50.43	13.3	68.31
	0.3			43.90	50.12	16.6	
	0.15			42.65	50.87	18.9	
	0.05			41.70	50.88	20.5	
0.3	0.5	18.63	0.3	51.63	51.81	15.7	70.80
	0.3			47.68	53.51	23.5	
	0.15			44.18	54.80	30.9	
	0.05			42.03	54.79	36.7	
0.1	0.5	6.21	0.1	<b>77.26</b>	<b>71.34</b>	<b>9.4</b>	73.28
	0.3			<b>78.36</b>	<b>73.75</b>	<b>14.1</b>	
	0.15			<b>103.16</b>	<b>88.97</b>	<b>20.2</b>	
	0.05			<b>102.61</b>	<b>94.73</b>	<b>37.0</b>	

표 6.  $T_e=1.0$ 초인 구조물의 응답 단위:mm

$e$	$\alpha$	$D_y$	$A_y$	$D_c$	$D_t$	$\beta_{eff}$	$D_T$
0.5	0.5	74.52	0.3	125.22	132.69	14.6	149.05
	0.3			113.52	129.87	18.2	
	0.15			107.52	128.63	20.6	
	0.05			104.37	133.83	22.0	
0.3	0.5	44.71	0.18	133.76	130.97	15.6	149.05
	0.3			117.01	119.43	23.5	
	0.15			106.06	121.09	31.0	
	0.05			98.81	128.52	36.2	
0.1	0.5	14.90	0.06	<b>194.40</b>	<b>176.16</b>	<b>9.2</b>	149.05
	0.3			<b>184.30</b>	<b>164.79</b>	<b>14.3</b>	
	0.15			<b>160.80</b>	<b>167.77</b>	<b>24.9</b>	
	0.05			148.85	174.33	42.5	

해석 결과에 따르면 주기가 짧을수록, 항복 후 강성비가 작을수록 강성의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 즉 주기가 0.1초와 0.3초인 구조물의 경우 감쇠기의 강성에 따라 요구되는 유효감쇠비와 필요한 감쇠기의 감쇠비가 급격하게 작아지나, 주기가 1.0초인 구조물은 강성의 변화에 따라 감쇠비는 크게 변하지 않는다. 감쇠기의 특정 강성에 대하여 필요한 감쇠비가 음수가 되는 경우가 있는데 이것은 그림 11~14에 나타난 변위 응답( $D_y$ )과 목표변위와의 비를 살펴보면 추가된 강성만으로도 목표변위보다 다소 과다하게 제어됨을 알 수 있다. 이것은 보다 작은 부가적인 강성만으로도 제어됨을 의미한다. 그러나 감쇠기가 설치되기 전 목표변위에서 구조물에 입력되는 가속도( $A_{v0}$ )에 대한 강성이 부가된 구조물에 입력된 가속도( $A_y$ )의 비(그림 11~14)를 살펴보면 구조물에 강성이 추가되면 입력되는 가속도는 점성 감쇠기를 설치 하였을 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  $\eta$ 값은 1~1.2정도이므로 각 구조물의 성능수준을 만족하기 위하여 적당한 감쇠기는 식(6)을 이용하여 구한  $\eta$ 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  $K_v$ ,  $C_v$ 를 이용한 감쇠기의 각 강성에 대한  $\eta$ 는 표 7과 같다. 여기서 감쇠기의 강성이 구조물 강성의 6%에 해당할 때  $\eta$ 는 1.02가 되어 적절한 범위에 해당하므로 적합한 감쇠기가 된다.

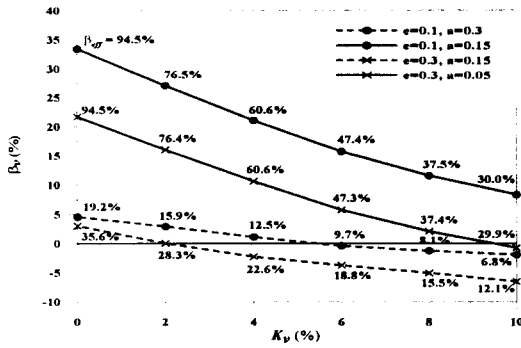


그림 7.  $Te = 0.1$ 초인 경우 감쇠기의 감쇠비

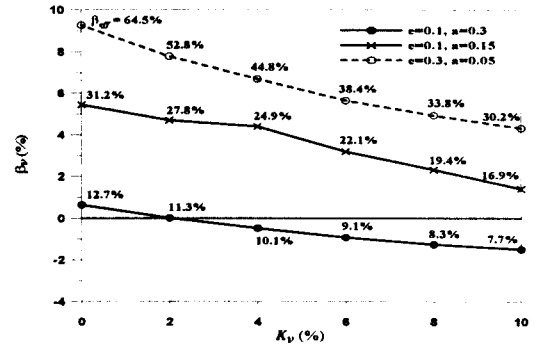


그림 8.  $Te = 0.3$ 초인 경우 감쇠기의 감쇠비

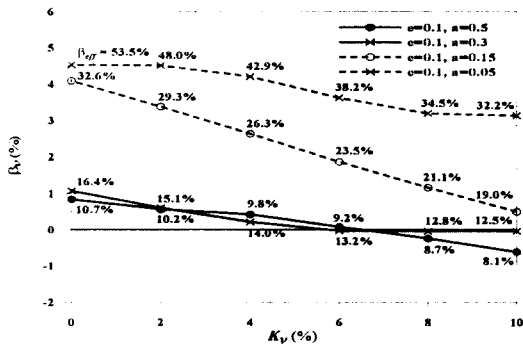


그림 9.  $Te = 0.5$ 초인 경우 감쇠기의 감쇠비

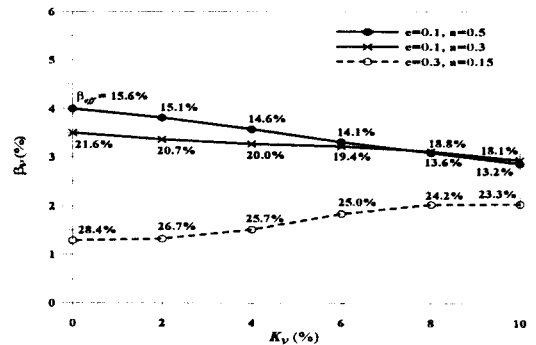


그림 10.  $Te = 1.0$ 초인 경우 감쇠기의 감쇠비

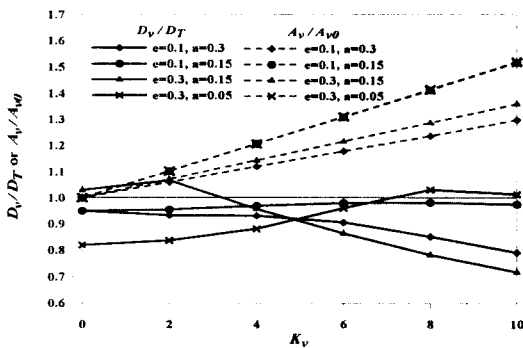


그림 11.  $Te = 0.1$ 초인 경우 변위비와 가속도비

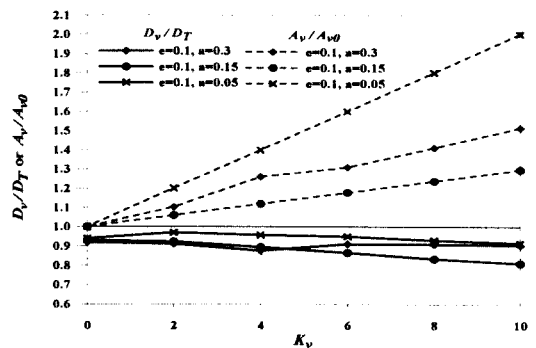


그림 12.  $Te = 0.3$ 초인 경우 변위비와 가속도비

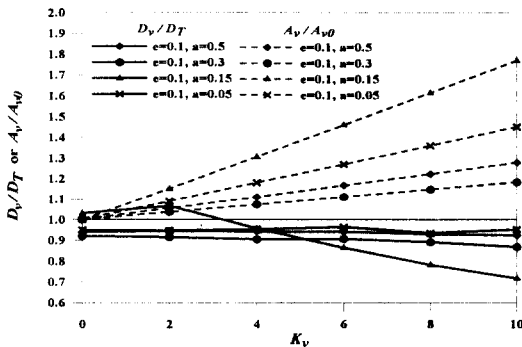


그림 13.  $Te = 0.5$ 초인 경우 변위비와 가속도비

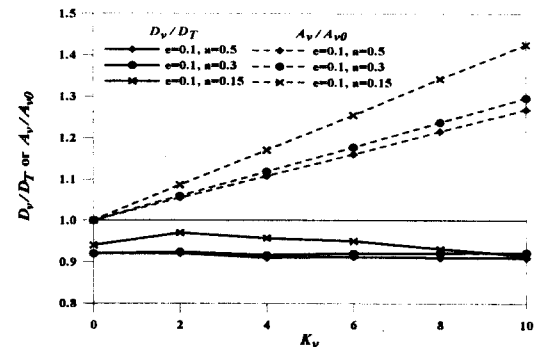


그림 14.  $Te = 1.0$ 초인 경우 변위비와 가속도비

표 7. 감쇠기의 손실계수

$\frac{K_v}{K} \times 100(\%)$	$K_v$	$\beta_v(\%)$	$C_v$	$\eta$
10	43.86	1.4	0.586	0.28
8	35.09	2.31	0.968	0.58
<b>6</b>	<b>26.32</b>	<b>3.19</b>	<b>1.336</b>	<b>1.06</b>
4	17.55	4.39	1.839	2.20
2	8.77	4.69	1.965	4.69

## 7. 결 론

본 연구에서는 CSM을 이용하여 구한 유효감쇠비를 이용하여 목표변위까지 구조물의 변형을 제어하기 위하여 필요한 점탄성 감쇠기의 양을 산정하는 방법을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유효감쇠비를 이용하여 성능목표를 달성하기 위하여 필요한 점탄성 감쇠기의 양을 산정하여 설치한 결과 목표변위까지 잘 제어되는 것으로 나타났다. 따라서 점탄성 감쇠기의 경우 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 감쇠기의 적정 강성과 감쇠를 쉽고 빠르게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 주기가 짧을수록, 항복 후 강성비가 작을수록 감쇠기에 의하여 추가된 강성의 영향을 많이 받는다. 두 가지 경우의 구조물은 강성에 따라 구조물에 요구되는 감쇠비와 성능목표를 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비의 변화폭이 컸다.
- (3) 성능수준을 만족하기에 적합한 점탄성 감쇠기는 본 연구에서 제시한 방법에 의하여 산정한 등가강성과 등가감쇠를 이용한 감쇠기의 손실계수를 이용하여 결정할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단 특정기초연구 과제(과제번호:1999-1-310-001-3)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, "능력스펙트럼법을 이용한 점성 감쇠기의 적정 감쇠비 산정," 한국지진공학회 논문집, 제 5권, 1호, 2001, pp.45~52.
4. Chopra, A.K., *Dynamics of structures*, Prentice Hall, 1995.
5. Soong, T.T., and Dargush, G.F., *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, State university of New York at Buffalo, 1996.
6. Tsopelas, P., Constantinou, M.C., Kircher, C.A. and Whittaker, A.S., "Evaluation of simplified method of analysis for yielding structures", *Technical Report NCEER-97-0012*, National Center for Earthquake Engineering Research, State university of New York at Buffalo, 1997.
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.