

능력스펙트럼법을 이용한 점성 감쇠기의 적정 감쇠비 산정

Calculation of Optimum Damping Ratio of Viscous Dampers Using Capacity Spectrum Method

김진구* 최현훈**
Kim, Jin koo Choi, Hyun Hoon

국문요약

에너지 소산장치가 설치된 건물의 비선형 시간이력해석은 복잡하고 많은 시간이 소모된다. 본 연구에서는 비선형 정적해석법인 능력스펙트럼법을 이용하여 구조물의 주어진 거동한계를 만족할 수 있는 감쇠기의 양을 산정하는 방법에 관하여 연구하였다. 이를 위하여 먼저 능력스펙트럼법을 이용하여 건물의 비선형 정적응답을 구하고 건물의 응답과 목표변위의 차이를 이용하여 유효감쇠비를 구하고 이러한 유효감쇠비를 이용하여 필요한 점성 감쇠기의 양을 구하였다. 본 연구에서는 단자유도계에서 건물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도의 비, 항복 후 강성비 등을 변수로 하여 연구를 수행하였다. 제안된 방법에 따라 설계된 점성 감쇠기를 설치한 예제 구조물의 시간이력 해석에 의한 최대응답은 설계의 초기단계에서 사용한 목표변위와 잘 일치하였다.

주요어 : 점성 감쇠기, 능력스펙트럼법, 유효감쇠비, 성능에 기초한 내진설계

ABSTRACT

Nonlinear dynamic time history analysis of a structure with energy dissipation devices is complicated and time consuming. In this study, a procedure is developed using capacity spectrum method to obtain required amount of viscous dampers to satisfy given performance criteria. To this end the nonlinear static response of a structure was obtained using capacity spectrum method first, and the effective damping ratio required to satisfy the performance objective was computed from the difference between the analysis result and the target displacement. Then the amount of required viscous damping was obtained using the effective damping ratio. Parametric study has been performed for the natural period of the structure, yield strength, and the stiffness after the first yield. According to the earthquake time history analysis results, the maximum displacement of the model structure with viscous dampers designed in accordance with the proposed method corresponds well with the target displacements that was used in the beginning of the design process.

Key words : viscous damper, capacity spectrum method, equivalent viscous damping ratio, performance based seismic design

1. 서 론

성능에 기초한 내진설계(performance based seismic design)는 건물의 사용 연한 동안 발생할 수 있는 지진하중에 대하여 목표로 하는 성능수준을 만족하도록 설계하는 것을 기본 개념으로 한다. 성능에 기초한 내진 설계에서는 지진의 발생 확률을 도입한 여러 단계의 지반운동수준에 대하여 성능목표를 달성하도록 하는 다단계 내진성능수준(multi-level performance level)을 제시하고 있다.

지반운동수준에 따른 성능목표를 만족하도록 설계하기 위해서는 먼저 구조물의 보유 능력을 평가하는 작업이 수행되어야 한다. 구조물의 내진성능을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 현재 내진공학 분야에서 연구가 활발하게 진행되고 있는 비선형 정적해석법(nonlinear static analysis)은 건물의 능력을 파악할 수 있는 가장 간단하고 실용적인 방법이다. 또한 이를 바탕으로 개발된 능력스펙트럼법(capacity spectrum method 이하 CSM)은 구조물의 횡하중에 대한 저항능력(capacity)과 구조물에 작용하는 지진의 요구(demand)

를 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 내진성능을 평가하는 방법이다.

ATC-40 보고서⁽¹⁾에 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 마찰 감쇠기, 소성 감쇠기, 점성 감쇠기, 점탄성 감쇠기 등과 같은 수동형 에너지 소산장치를 설치하는 경우 건물의 성능을 평가하기 위한 비탄형 시간이력해석이 복잡해지고, 따라서 성능수준을 목표로 하는 수준까지 향상시키기 위하여 필요한 에너지 소산장치의 양을 산정 하는 것도 매우 어렵다. 즉 감쇠기의 양을 임의로 설정한 후 비선형 시간이력 해석을 수행하여 응답을 구하고, 목표로 하는 응답의 크기와 비교하여 감쇠기의 양을 조절한 다음 다시 해석을 수행하여, 목표응답에 도달할 때까지 같은 과정을 반복하는 등 상당한 시간과 노력이 필요하게 된다.

본 연구에서는 CSM을 이용하여 반복과정이 없이 목표로 하는 성능수준을 만족할 수 있는 감쇠기의 양을 구하는 방법에 관하여 연구하였다. 구조물의 내진성능수준의 향상을 위하여 점성 감쇠기를 이용하였으며, 단자유도계에서 건물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도의 비, 항복 후

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수(대표저자 : jinkoo@yurim.skku.ac.kr)

** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

강성비(strain hardening ratio) 등을 변수로 하여 구조물의 최대응답을 구한 후 시간이력해석 결과와 비교하였다. 이 중 목표변위를 만족하지 못한 구조물에 대하여 유효감쇠비를 구한 후 이 값을 이용하여 성능수준을 만족시키기 위하여 필요한 감쇠기의 양을 산정하였다.

2. 점성 감쇠기의 특성

감쇠기는 중공업과 군사용으로 널리 사용되어 왔으며 최근에는 교량이나 건물의 진동 제어나 내진 보강용으로도 많이 적용되고 있다. 일반적으로 점성 감쇠기는 높은 점성의 유체가 들어있는 실린더에 피스톤이 연결된 형태로 되어 있으며, 그림 1은 점성 유체 감쇠기인 Taylor device의 구조를 나타내고 있다. 점성 감쇠기는 실린더 안쪽에 있는 피스톤이 점성이 높은 유체에서 움직이며 에너지를 소산시킨다.

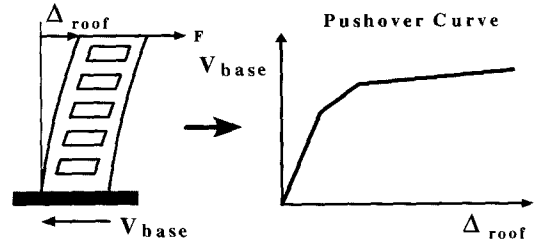
점성 감쇠기는 넓은 진동수범위에서 선형응답을 보이도록 설계되고, 온도의 영향을 적게 받기 때문에 힘과 응답과의 관계가 일정하다. 높은 진동수 영역에서 점성 감쇠기는 점탄성 감쇠기(visco elastic damper)와 같이 강성 및 점성의 특성을 나타내지만, 지진에 의한 지반진동과 같이 낮은 진동수 영역에서는 순수 점성의 성질을 나타낸다.⁽²⁾ 따라서 본 연구에서는 점성 감쇠기의 거동을 그림 2와 같이 선형 dashpot을 이용하여 표현하였다.

3. CSM에 의한 내진성능평가

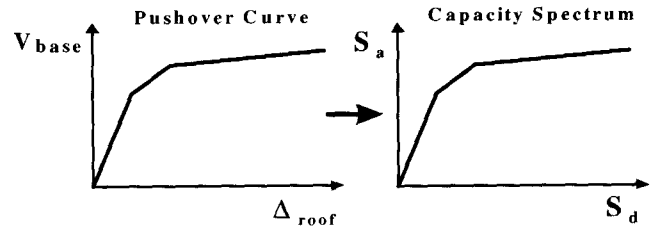
CSM은 구조물의 횡하중에 대한 저항능력을 나타내는 능력스펙트럼과 구조물에 작용하는 지진의 요구를 ADRS(acceleration displacement response spectrum)형식의 요구스펙트럼으로 변환한 후 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 성능점(performance point)을 산정하고, 내진성능을 시각적으로 쉽게 평가하는 방법이다.

3.1 내진성능평가 절차

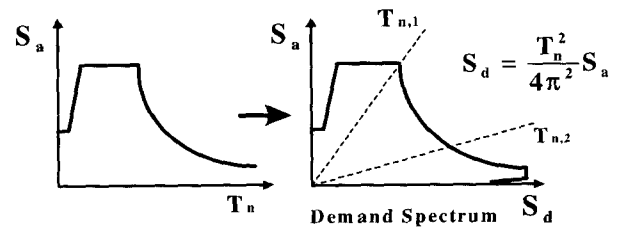
그림 3은 CSM에 의하여 구조물의 응답을 구하는 일반적인 과정을 나타낸 것이다. 그림 3(d)에서 능력곡선과 요구스펙트럼의 교차점은 작용하는 지진에 대한 구조물의 비탄성 응답과 성능수준을 의미한다. CSM은 구조물이 지진하중을 받을 때 어떻게 거동하는지를 시각적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 구조물의 능력은 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 최상층의 횡변위(Δ_R)와 밀면전단력(V)으로 표현된다.



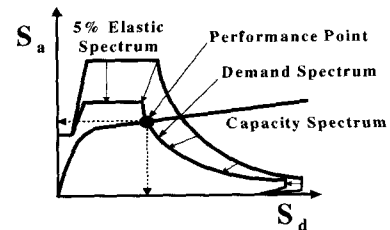
(a) 하중-변위 관계의 산정



(b) 능력스펙트럼으로 변환



(c) 요구스펙트럼의 ADRS형식으로 변환



(d) 비탄성응답과 성능수준

그림 3 CSM을 이용한 내진성능 평가

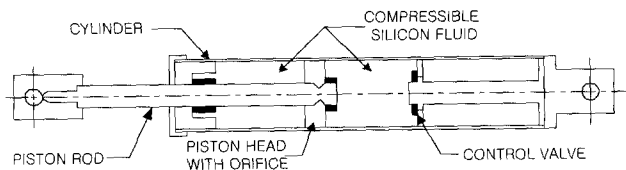


그림 1 실린더형 점성 감쇠기(Taylor device)

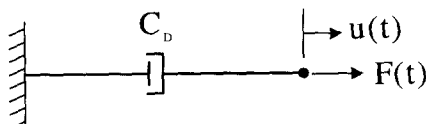


그림 2 점성 감쇠기의 모형화

능력과 성능수준을 의미한다. CSM은 구조물이 지진하중을 받을 때 어떻게 거동하는지를 시각적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 구조물의 능력은 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 최상층의 횡변위(Δ_R)와 밀면전단력(V)으로 표현된다.

능력곡선을 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 구조물의 동적특성을 이용하여 Δ_R 와 V 의 능력곡선을 응답가속도(S_a)와 응답변위(S_d)의 능력스펙트럼으로 변환하게 된다. Δ_R 와 V 의 능력곡선은 식 (1)에 의하여 S_d 와 S_a 의 능력스펙트럼으로 변환할 수 있다.

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

변환식에 이용되는 모드참여계수(Γ_1)와 유효모드질량(M_1^*)는 식 (2)와 같고 유효주기(T_{eff})는 식 (3)과 같다.

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

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a g}} \quad (3)$$

유효주기는 S_a 와 S_d 의 관계에서 구할 수 있으며 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 (4)의 관계를 이용한다.

$$S_d = (T^2 / 4\pi^2) S_a \quad (4)$$

구조물의 선형탄성응답은 5% 감쇠비의 요구스펙트럼을 이용하여 나타내고 높은 감쇠 요구스펙트럼은 구조물의 비탄성 응답을 나타낸다. 그림 4에서 점선은 구조물의 능력곡선으로 이것을 등가의 이선형(bilinear) 곡선으로 표현한다. 등가의 이선형 곡선의 이력거동에 의하여 소산된 에너지를 이용하여 등가점성감쇠비(β_{eq})를 구한 후 구조물의 이력특성을 고려하여 유효감쇠비(β_{eff})를 산정한다. 여기서 등가점성감쇠비와 유효감쇠비는 식 (5), 식 (6)에 의해서 산정할 수 있다.^{(1),(3)}

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(A_y D - D_y A)}{\pi A D} \quad (5)$$

$$\beta_{eff} = \beta + \kappa \beta_{eq} \quad (6)$$

여기서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지, 즉 마름모의 면적을 나타내며, E_S 는 구조물의 최대변형에너지로 빗금친 삼각형의 면적이다. β 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다.

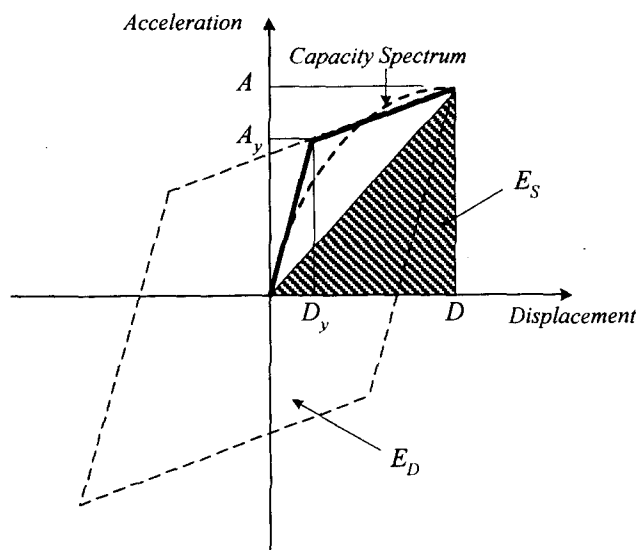


그림 4 등가점성감쇠비의 산정

지진하중을 받는 구조물의 이력특성은 여러 가지 효과들에 의하여 그림 4와 같은 이상화된 이력특성을 나타내지 못한다. ATC-40과 FEMA-273에서는 이러한 구조물의 이력특성을 반영하기 위해 감쇠조정계수(damping modification factor, κ)를 사용하여 유효감쇠비를 조정한다. ATC-40에서 제시하고 있고 감쇠조정계수는 표 1과 같다. 여기서 건물의 이력특성에 따라 세 가지 유형으로 나뉘었는데, Type A는 횡하중에 대한 저항시스템이 설치된 건물로 그림 4와 가장 유사한 이력특성을 나타낸다. Type C에 해당하는 건물은 수평하중에 저항하는 시스템이 없거나 이력거동을 신뢰할 수 없는 경우이다. Type B는 Type A와 Type C의 중간의 경우로 주요 부재가 기존부재와 새로운 부재가 혼합되어 있는 경우이다.

표 1 감쇠조정계수, κ

건물의 거동유형	$\beta_{eq}(\%)$	κ
Type A	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51(A_y D - D_y A)}{AD}$
Type B	≤ 25	0.67
	> 25	$0.845 - \frac{0.446(A_y D - D_y A)}{AD}$
Type C	모든 감쇠비	0.33

3.2 감쇠기의 적정 감쇠비의 산정

감쇠기가 설치된 경우 유효감쇠비는 식 (6)에 감쇠기에 의한 감쇠를 추가하면 식 (7)과 같다.⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} \beta_{eff} &= \frac{1}{4\pi} \frac{E_{DS} + E_{DE}}{E_S} + \beta \\ &= \frac{E_{DE}}{2\pi m A D} + \frac{2\kappa(A_y D - D_y A)}{\pi A D} + \beta \end{aligned} \quad (7)$$

추가된 첫 번째 항은 감쇠기의 이력거동에 의한 감쇠를 나타내게 된다. 식 (7)에서 E_{DE} 는 감쇠기에 의하여 소산된 에너지로 식 (8)과 같다. 식 (8)의 우변의 세 번째와 네 번째 항의 관계를 이용하면 식 (9)와 같이 감쇠기의 감쇠비를 구할 수 있다.

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

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

식 (9)를 식 (7)에 대입하고 β_v 에 대하여 정리하면 유효감쇠비를 이용한 감쇠기의 감쇠비를 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_v = (\beta_{eff} - \beta - \frac{2\kappa(A_y D - D_y A)}{\pi A D}) \frac{T_e}{T_{eff}} \quad (10)$$

4. 예제 구조물과 지진하중

본 논문에서 사용한 예제 구조물은 1층의 횡방향 자유도만 가진 단자유도계이며 구조물은 그림 5와 같이 이선형 이력 특성을 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. 그림 6은 예제 구조물 중에서 $e=0.3$ 에 해당하는 각 주기의 구조물의 능력스펙트럼을 하나의 그래프에 나타낸 것이다.

- (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(α) : 각 구조물에 대하여 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 2에 나타나 있다. 이 목록은 S_D 지반(단단한 토사지반)에서 계측된 지진기록으로 규모 6.5이상, 최대지반가속도가 0.2g 이상으로 ATC-40에서 제시하고 있다. 각 지진기록은 university of California, Santa Barbara와 pacific earthquake engineering research center의 strong motion database에서 수집한 것으로 S_D 지반에 해당하는 지진계수는 FEMA-222A에 의하면 $C_a=0.4$, $C_v=0.6$ 이다.⁽⁵⁾

각 가속도 기록은 FEMA-273⁽⁶⁾에서 제시하고 있는 다음과 같은 절차에 의하여 증감계수를 구하였다. 각 지진의 지반가속도는 두 방향 성분의 최대지반속도의 SRSS(square root

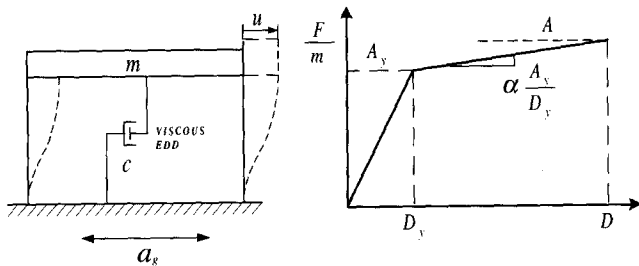


그림 5 이선형 이력특성을 가진 단자유도계 구조물

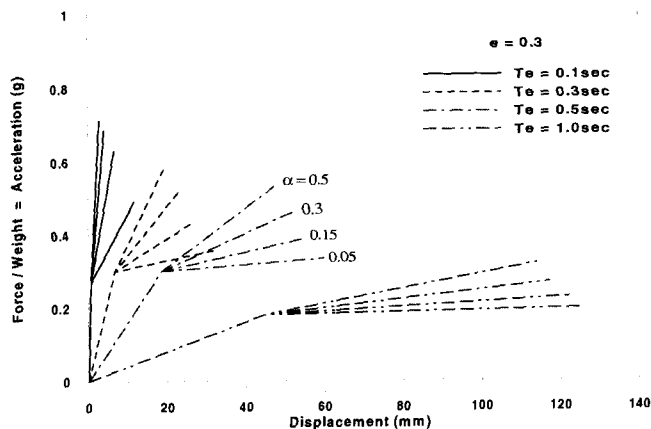


그림 6 예제 구조물의 능력스펙트럼 (e=0.3)

of sum of squares)에 의해 정규화한다. 정규화된 각 방향 가속도 성분의 SRSS스펙트럼을 작성한다. 10개의 SRSS스펙트럼의 평균 스펙트럼을 작성한 다음 주기가 1초인 지점에서 목표 스펙트럼의 1.4배한 값에 일치하도록 하는 스펙트럼 증감계수를 구한다. 구한 스펙트럼 증감계수를 각 지진의 최대지반속도의 SRSS값으로 나누어 각 지진의 증감계수를 구한다. 각 지진의 증감계수는 표 3과 같다. 이러한 조정과정은 평균 응답스펙트럼에 각 지진기록이 균등하게 기여하도록 한다.

그림 7은 표 2의 20개 지진성분의 10% 감쇠비에 대한 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 지반운동의 특성이 다양함을 알 수 있다. 이런 평균 응답스펙트럼을 조정하면 그림 8에 나타난 것과 같이 설계스펙트럼에 잘 부합된다.

5. 성능점 산정

각 예제 구조물에 대하여 먼저 CSM을 이용하여 변위응답(D_c), 가속도응답(A_c), 유효감쇠비를 구하였다. 응답을 구하기 위하여 그림 6과 같은 능력스펙트럼과 그림 9와 같

표 2 지진기록 목록

No.	Earthquake (Year)	Station	M	Comp.	PGA cm/sec ²	PGV cm/sec
1	W.Washington (1949)	325	7.1	N04W	161.6	21.4
				N86E	-274.6	-17.1
2	Eureka (1954)	022	6.5	N11W	164.5	-31.6
				N79E	-252.7	29.4
3	San Fernando (1971)	241	6.6	N00W	-250.0	-29.8
				S90W	-131.7	23.8
4	San Fernando (1971)	458	6.6	S00W	113.9	31.8
				S90W	103.5	-28.6
5	Loma Prieta (1989)	Gilroy 2	7.1	90	316.3	-39.2
				0	344.2	33.3
6	Loma Prieta (1989)	Hollister	7.1	90	-174.5	-30.9
				0	361.9	62.8
7	Landers (1992)	Yermo	7.5	360	-148.6	29.0
				270	-240.0	50.8
8	Landers (1992)	Joshua	7.5	90	278.4	-42.7
				0	268.3	27.5
9	Northridge (1994)	Moorpark	6.7	180	286.2	20.3
				90	189.3	20.4
10	Northridge (1994)	Century	6.7	90	250.7	21.4
				360	217.6	25.1

표 3 가속도 기록의 증감계수

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Scale factor	2.79	1.77	2.00	1.78	1.48	1.09	1.30	1.50	2.65	2.31

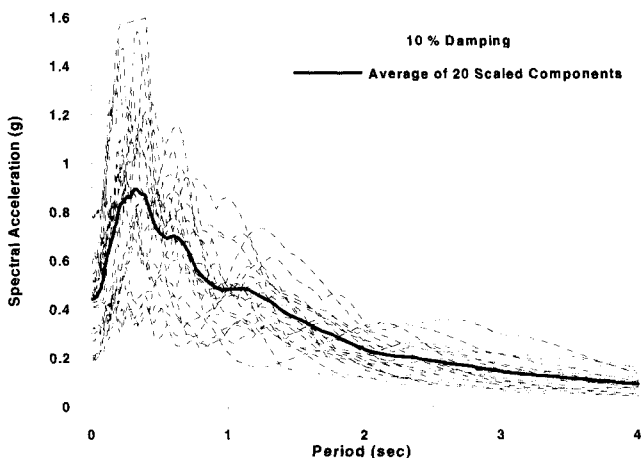


그림 7 20개 지진기록의 응답스펙트럼

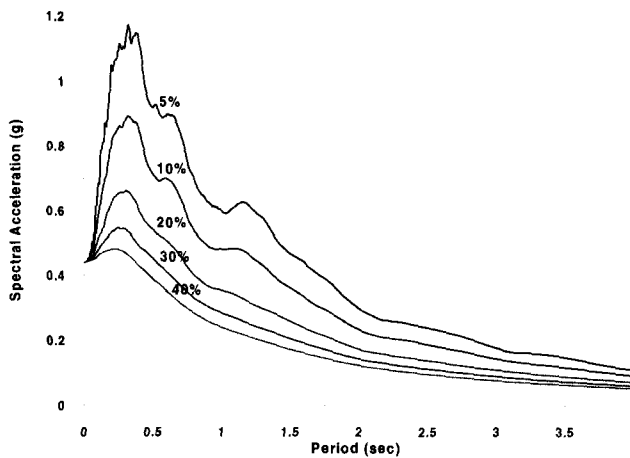


그림 9 주기와 응답가속도의 관계

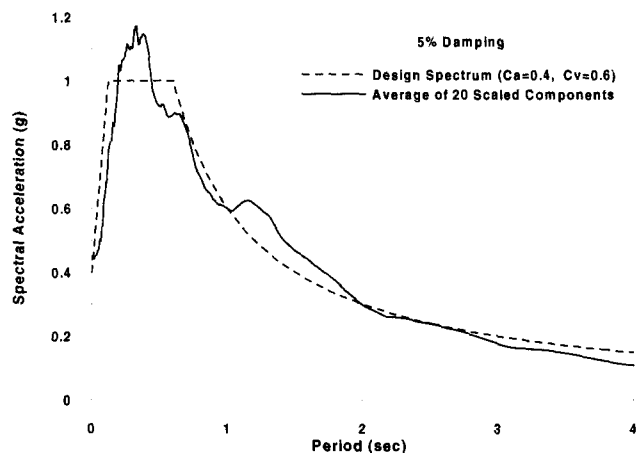


그림 8 설계스펙트럼과 평균 응답스펙트럼

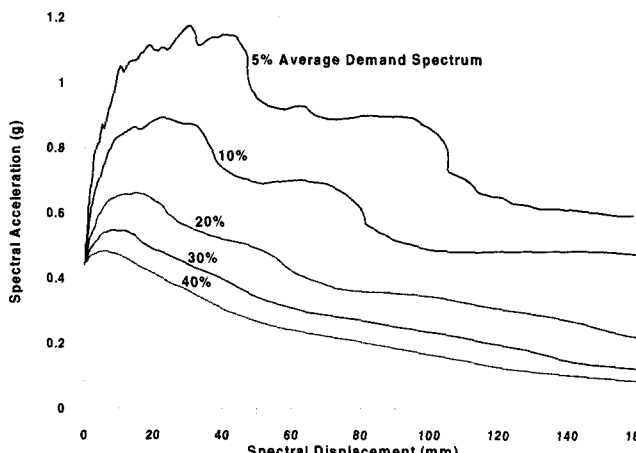


그림 10 응답변위와 응답가속도의 관계

은 주기와 가속도로 표현된 스펙트럼을 ADRS 형식으로 변환한 그림 10과 같은 요구 스펙트럼을 하나의 그래프에 나타내었다. 이 두 스펙트럼을 이용하여 그림 11과 표 4에는 $T_e = 0.5$, $e = 0.3$, $\alpha = 0.5$ 인 구조물에 대하여 응답을 구하는 과정을 나타낸다. 각 감쇠비의 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교차점으로부터 변위와 가속도 응답을 구한 후 식 (6)을 이용하여 유효감쇠비를 구하였다. 예제 구조물은 완전한 이선형 이력거동을 하기 때문에 $\kappa = 1.0$ 이다. 이렇게 구한 유효감쇠비를 이용하여 다시 요구스펙트럼을 작성하고 능력스펙트럼과의 교점에서 새로운 변위와 가속도 응답을 구하였다. 산정한 유효감쇠비가 요구스펙트럼의 감쇠비와 같을 때까지 감쇠비를 변화시켜 가면서 계산을 반복 수행하였다.

시간이력 해석은 Mahin과 Lin(1983)⁽⁷⁾이 개발한단자유도계의 비선형 시간이력해석 프로그램인 NONSPEC을 이용하였다. 이 구조물의 시간이력 해석에 의한 변위(D_T)응답은 51.81mm로 0.3%의 오차를 보였다.

CSM에 의한 해석결과는 표 5~8에 나타나 있다. 대부분의 경우에 CSM에 의한 응답과 시간 이력 해석 결과가 비교적 잘 일치한다. 그러나, 그림 12~15를 보면 알 수 있듯이 항복 후 강성비가 0.15와 0.05인 경우에는 CSM에 의한 응답이 5~30%정도 과소평가 되는 경향이 있음을 알 수 있다.

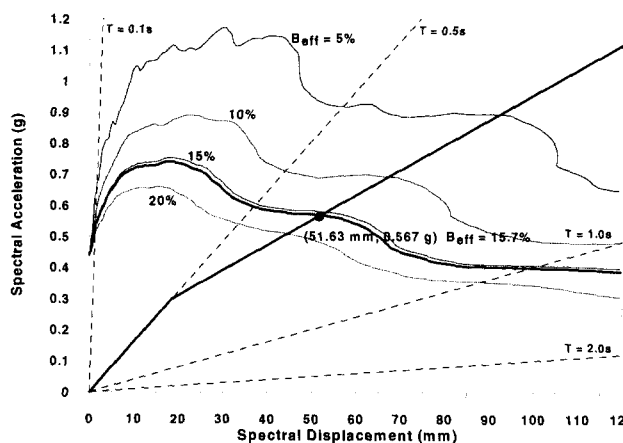


그림 11 CSM에 의한 응답산정

표 4 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

표 5 $T_e=0.1$ 초인 구조물의 응답 (단위 : mm)

e	α	D_y	A_y	D_c	D_T	β_{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			5.37	5.29	28.1	
	0.05			11.32	9.12	36.7	
0.1	0.5	0.22	0.09	3.23	3.05	8.8	4.47
	0.3			5.57	5.09	10.2	
	0.15			12.47	11.07	10.8	
	0.05			32.72	28.58	12.3	

표 7 $T_e=0.5$ 초인 구조물의 응답 (단위 : mm)

e	α	D_y	A_y	D_c	D_T	β_{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	77.26	71.34	9.4	73.28
	0.3			78.36	73.75	14.1	
	0.15			103.16	88.97	20.2	
	0.05			102.61	94.73	37.0	

표 6 $T_e=0.3$ 초인 구조물의 응답 (단위 : mm)

e	α	D_y	A_y	D_c	D_T	β_{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			44.29	41.13	11.4	
	0.15			65.14	55.73	15.0	
	0.05			91.63	77.47	24.7	

표 8 $T_e=1.0$ 초인 구조물의 응답 (단위 : mm)

e	α	D_y	A_y	D_c	D_T	β_{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	194.40	176.16	9.2	149.05
	0.3			184.30	164.79	14.3	
	0.15			160.80	167.77	24.9	
	0.05			148.85	174.33	42.5	

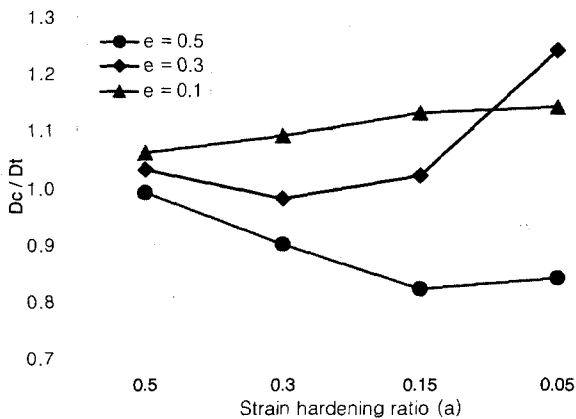


그림 12 $T_e=0.1$ 초인 구조물의 변위응답비

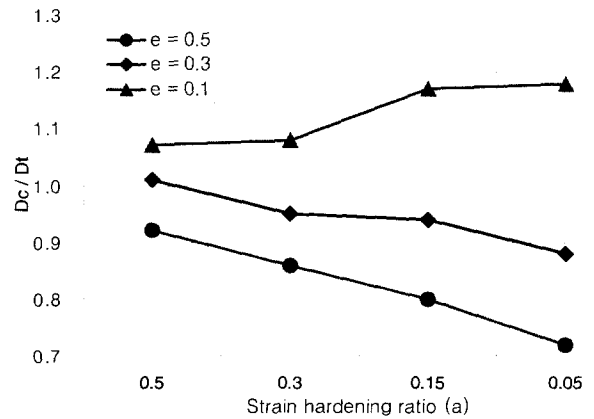


그림 13 $T_e=0.3$ 초인 구조물의 변위응답비

6. 성능수준을 만족하기 위한 감쇠기의 감쇠비 산정

CSM에 의한 해석 결과를 바탕으로 감쇠기의 감쇠비를 산정하기 위하여 먼저 목표변위(target displacement, D_T)를 정하였다. 목표변위는 FEMA-273에서 제시하고 있는 비선형

정적해석 절차1에 의하여 산정하였다. 그 결과는 표 5~8에 나타나 있다. 목표변위를 초과하는 15개 구조물(음영처리)에 대하여 성능향상을 위하여 필요한 감쇠기의 양을 산정하는 해석을 수행하였다. 먼저 구조물의 목표변위와 교차하는 요구스펙트럼의 감쇠비를 찾는다. 여기서 요구스펙트럼의 감

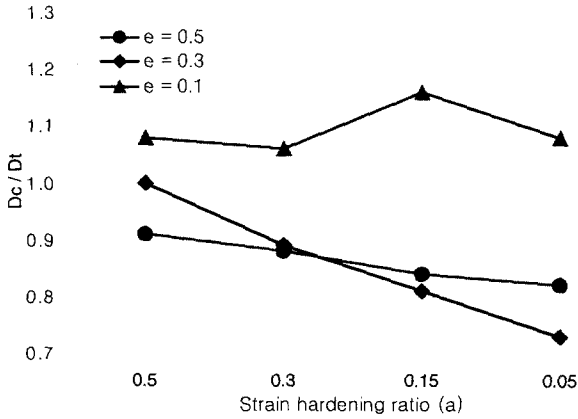


그림 14 $T_e = 0.5$ 초인 구조물의 변위응답비

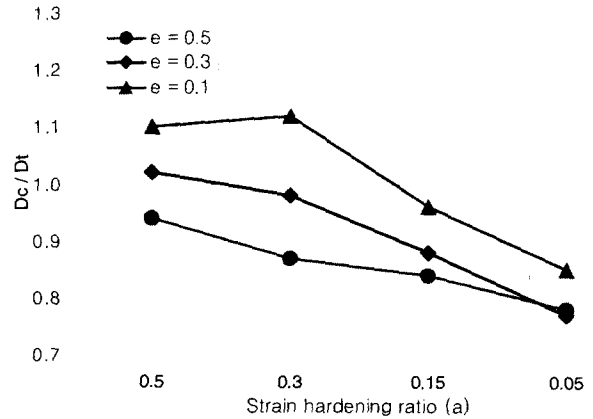


그림 15 $T_e = 1.0$ 초인 구조물의 변위응답비

쇠비는 새로운 유효감쇠비(β_{eff})가 된다. 목표변위에서 유효주기(T_{eff})와 이력거동에 의한 등가점성 감쇠비(β_{eq})를 구하고 식 (10)에 이 값들을 대입하고 정리하면 성능목표를 달성하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비(β_v)를 구할 수 있다. 구한 β_v 를 설치한 구조물을 다시 시간이력해석을 수행하여 얻은 변위응답(D_v)은 표 9에 나타나 있다. $T_e = 0.1$, $e = 0.1$ 이고 $\alpha = 0.05$ 인 구조물의 경우에는 β_{eff} 가 200%를 초과하였다. 이것은 시간이력해석 결과에 의하면 항복 변위에 대한 최대 변위의 비가 127.83으로 과도한 변위가 발생하였기 때문에 이것을 제어하기 위해서는 매우 큰 감쇠가 필요하기 때문인 것으로 판단된다. 이 경우를 제외하고는 대부분의 경우 제어하고자 하는 목표변위까지 제어된 것을 알 수 있다.

7. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 비선형 정적해석법인 CSM을 이용하여 구조물의 내진성능을 평가하고, 성능목표를 달성하기 위하여

수동형 에너지 소산장치 중에서 점성 감쇠기를 이용하였다. 그리고 CSM에서 구한 유효감쇠비를 이용하여 목표변위까지 구조물의 변형을 제어하기 위하여 필요한 감쇠기의 양을 산정하는 방법을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) CSM에 의한 변위응답은 시간이력해석에 의한 응답보다 과소평가되는 경향이 있다. 특히, 항복 후 강성비가 0.15와 0.05인 경우의 응답은 다른 구조물의 응답보다 시간이력해석에 의한 응답보다 다소 큰 오차를 보였다. 이것은 요구스펙트럼은 등가의 선형시스템에 의하여 작성되지만 구조물은 탄성 강성에 비하여 항복 후 강성비가 매우 작기 때문인 것으로 사료된다.
- (2) 비선형 정적해석법에서 구한 유효감쇠비를 이용하여 성능목표를 달성하기 위하여 필요한 감쇠기의 양을 산정하여 설치한 결과 목표변위까지 잘 제어되는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 내진 보강이 필요한 구조물에 감쇠기를 쉽고 빠르게 적용할 수 있는 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서는 단자유도계를 대상으로 연구를 수행하였으며 추후 다자유도계를 등가의 단자유도계로 치환하고, 비선형 정적해석에서 구한 감쇠기의 감쇠비를 다시 다자유도계의 구조물에 분배함으로써 일반적인 다자유도계 구조물에 적용하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

표 9 감쇠기의 양과 감쇠기가 설치된 건물의 변위응답

T_e	e	α	D_T	T_{eff}	β_{eq}	β_{eff}	β_v	D_v	
0.1	0.3	0.15	4.47	0.19	24.9	35.6	3.01	4.59	
		0.05		0.23	40.1	94.5	21.68	3.67	
	0.1	0.3	4.47	0.17	6.3	19.2	4.56	4.23	
		0.15		0.23	13.4	94.5	33.41	4.26	
			0.05		0.32	29.5	-	-	-
	0.3	0.1	0.3	42.48	0.52	6.6	12.7	0.64	39.49
0.15			0.68		13.9	31.2	5.44	39.01	
0.05			0.95		30.2	64.5	9.27	40.12	
0.5	0.1	0.5	73.28	0.68	4.6	10.7	0.84	67.17	
		0.3		0.83	9.6	16.4	1.07	69.12	
		0.15		1.06	18.9	32.6	4.09	69.37	
		0.05		1.38	36.0	53.5	4.53	73.36	
1.0	0.1	0.5	149.05	1.35	5.2	15.6	4.0	137.10	
		0.3		1.64	10.8	21.6	3.50	137.10	
		0.15		2.06	20.7	28.4	1.29	156.90	

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(과제번호:1999-1-310-001-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.

2. Soong, T. T. and Dargush, G. F., "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering," State university of New York at Buffalo, 1996.
3. Chopra, A. K., *Dynamics of structures*, Prentice Hall, 1995.
4. 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.
5. FEMA, "1994 NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings," *FEMA-222A*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1995.
6. FEMA, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," *FEMA-273*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 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.