

능력스펙트럼을 이용한 가새형 소성 감쇠기의 설계

Design of Unbond Braces Using Capacity Spectrum Method

최현훈* 김유경** 김진구***
Choi, Hyunhoon Kim, Yukyung Kim, Jinkoo

ABSTRACT

In this study straightforward design procedure for unbond brace hysteretic dampers is developed. The required amount of equivalent damping to satisfy given performance acceptance criteria is obtained conveniently based on the capacity spectrum method without carrying out time-consuming nonlinear dynamic time history analysis. Then the size of the unbond braces is determined from the required equivalent damping. Parametric study is performed for the design variables such as natural period, yield strength, the stiffness after the first yield, yield stress of the unbond brace.

1. 서 론

소성 거동하는 부재의 힘-변위 이력에 의한 에너지 소산 능력을 이용하여 구조물에 전달되는 에너지를 소산하는 소성 감쇠기에 관한 기존 연구는 감쇠기 자체의 물리적 특성을 밝히거나 모델링 방법을 개발하는데 중점을 두어 왔으며 구조물에 설치되었을 때의 구조물 거동의 특성이나 설계방법에 관한 연구는 매우 제한적이었다. 이와 관련하여 Inoue 등⁽¹⁾은 감쇠기가 설치된 구조물의 등가감쇠비를 최대로 하는 플레이트형 소성감쇠기의 최적 강도비를 구하였다. 최근 김진구 등⁽²⁾은 그림 1과 같은 가새형 소성 감쇠기의 강도 및 강성이 구조물의 지진거동에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 플레이트형 감쇠기와 달리 최적 강도비(또는 크기)가 존재하지 않으며, 일반적으로 감쇠기의 크기가 커질수록 구조물의 응답은 작아짐을 발견하였다. 이러한 경우 감쇠기의 크기를 어느 수준에서 결정할 것인가 하는 문제가 중요하게 되는데, 본 연구에서는 성능수준을 만족하는 목표변위 이내로 변위를 제어하기 위하여 필요한 가새형 소성 감쇠기의 최소 크기를 체계적이고 손쉽게 산정할 수 있는 설계방법을 제시하였다.

이를 위하여 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 이용하여 주어진 목표성능수준을 만족하기 위하여 추가되어야 하는 등가감쇠비를 산정하고, 목표변위로 이력거동을 할 때 이러한 양의 등가감쇠비를 제공할 수 있는 가새형 소성감쇠기의 적정 크기를 산정하였다. 이 방법은 경험

* 성균관대학교 건축공학과 박사과정·학생회원
** 성균관대학교 건축공학과 석사과정
*** 성균관대학교 건축공학과 조교수·정회원

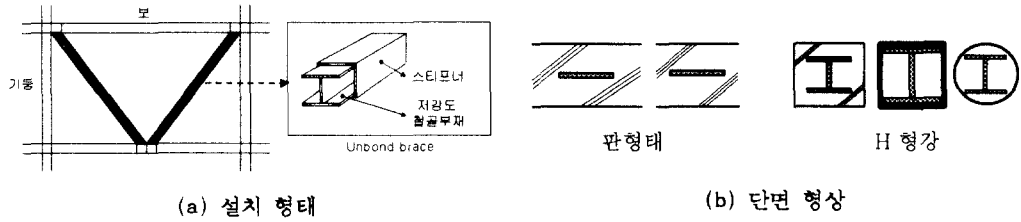


그림 1. 가새형 소성 감쇠기의 형태

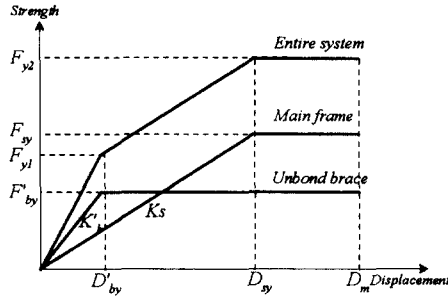


그림 2. 소성 감쇠기가 설치된 구조물의 이력거동

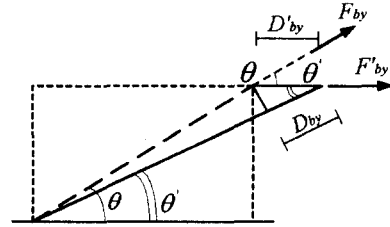


그림 3. 가새형 소성 감쇠기의 방향별 힘-변위 관계

에 의거하여 임의 크기의 감쇠기를 설치하고 응답을 구한 후 목표변위와 비교하여 감쇠기 크기를 조절하고, 목표변위에 도달할 때까지 반복해서 해석하는 일반적인 설계방법에 비하여 더욱 체계적이고 간편하다. 또한 비교적 많은 해석 시간을 필요로 하는 비선형 동적해석을 수행하지 않고, 정적해석만으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 제안된 방법을 이용하여 구조물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비, 항복 후 강성비, 가새형 소성 감쇠기의 항복응력 등을 변수로 하여 단자유도계 모델을 해석하고 결과를 분석하였다.

2. 가새형 소성 감쇠기의 거동 특성

가새형 소성 감쇠기가 설치된 구조물의 힘-변위 관계는 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 서로 다른 강성과 항복강도를 가진 감쇠기와 구조물이 합쳐져 전체 시스템의 거동은 2개의 항복점을 갖는 거동을 나타낸다.⁽¹⁾ 소성 감쇠기는 구조부재가 항복하기 이전에 먼저 소성거동하여 에너지를 흡수하여야 하므로 감쇠기의 항복강도나 항복변위가 구조물의 항복강도나 항복변위보다 작아야 한다. 소성 감쇠기의 성능을 좌우하는 주요 변수는 감쇠기의 항복하중 및 항복변위, 강성비 등이며 이러한 변수들은 소성 감쇠기의 설계 변수로 고려되고 있다. 가새형 소성 감쇠기의 항복강도, 항복변위, 강성을 각각 F_{by} , D_{by} , K_b 로 나타내고, 구조물과 가새형 소성 감쇠기의 횡방향에 대한 항복강도를 F_{sy} , F'_{by} , 항복변위를 D_{sy} , D'_{by} , 그리고 강성을 K_s , K'_b 라 하면, 전체 시스템의 항복점 F_{y1} 과 F_{y2} 는 식(1)과 같다.

$$F_{y1} = F'_{by} + K_s \cdot D'_{by} \qquad F_{y2} = F_{by} + F_{sy} \qquad (1)$$

또한 강성비 (SR)는 식(2)와 같이 정의한다.

$$SR = \frac{K'_b}{K_s} \quad (2)$$

감쇠비가 구조물에 그림 3과 같이 각 θ 를 가지고 설치되어 있을 때 감쇠비의 강성과 단면적의 관계는 식(3)과 같다.

$$A_b = \frac{K_b L_b}{E_b} = \frac{K'_b L_b}{E_b \cos^2 \theta} \quad (3)$$

3. 능력스펙트럼법에 의한 내진성능평가

능력스펙트럼법은 구조물의 횡하중에 대한 저항능력을 하중과 변위 곡선으로 표현하고, 고려되는 지진의 요구를 응답스펙트럼 형식으로 나타낸 후, ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)형식의 능력스펙트럼과 요구스펙트럼으로 변환하여 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 내진성능을 시각적으로 쉽게 평가하는 방법이다.

구조물의 능력은 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 최상층의 횡변위(Δ_R)와 밀면전 단력(V)으로 표현된다. 능력곡선을 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 구조물의 동적특성을 이용하여 Δ_R 과 V 의 능력곡선을 응답가속도(S_a)와 응답변위(S_d)의 능력스펙트럼으로 변환하게 된다. 1차 모드가 지배적인 경우 식(4)에 의하여 Δ_R 과 V 의 능력곡선은 S_d 와 S_a 의 능력스펙트럼으로 변환할 수 있다.

$$S_a = \frac{V}{M_1^*} \quad S_d = \frac{\Delta_R}{\Gamma_1 \varphi_{R1}} \quad (4)$$

변환식에 이용되는 모드참여계수(Γ_1)와 유효모드질량(M_1^*)는 식(5)와 같다.

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \varphi_{j1}}{\sum_{j=1}^N m_j \varphi_{j1}^2} \quad M_1^* = \frac{(\sum_{j=1}^N m_j \varphi_{j1})^2}{\sum_{j=1}^N m_j \varphi_{j1}^2} \quad (5)$$

요구스펙트럼은 일반적으로 주기에 대한 응답가속도의 관계로 표현되지만 능력스펙트럼과 하나의 그래프에 나타내기 위하여 S_d 와 S_a 좌표계의 ADRS형식으로 표현된다. 이 변환에는 식(6)의 관계를 이용한다.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (6)$$

구조물의 선형탄성응답은 5% 감쇠비의 요구스펙트럼을 이용하여 구하고, 구조물의 비탄성 응답은 감쇠비를 증가시켜 나타낸다. 그림 4에서 점선은 구조물의 능력곡선으로 이것을 등가의 이선형(bilinear) 곡선으로 표현한다. 등가의 이선형 곡선의 이력거동에 의하여 소산된 에너지를 이

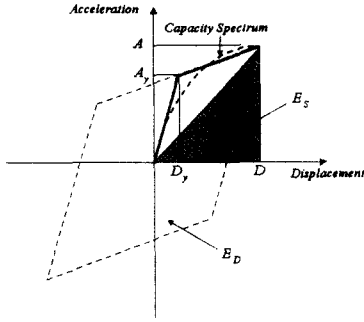


그림 4. 등가점성감쇠비의 산정

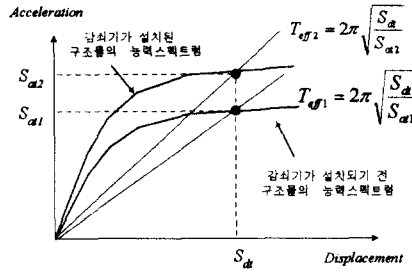


그림 5. 감쇠기가 설치된 구조물의 능력스펙트럼

용하여 등가점성감쇠비(β_{eq})를 구한 후 식(7)과 같이 구조물의 이력특성을 고려하여 유효감쇠비(β_{eff})를 산정한다.⁽³⁾⁽⁴⁾

$$\beta_{eff} = \beta_i + \kappa \beta_{eq} = \beta_i + \kappa \frac{E_D}{4\pi E_S} = \beta_i + \frac{2\kappa(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{\pi S_{ap}S_{dp}} \quad (7)$$

식(7)에서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지, 즉 마름모의 면적을 나타내며, E_S 는 구조물의 최대변형에너지로 빗금친 삼각형의 면적이다. β_i 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다. κ 는 지진하중을 받는 구조물의 이력특성이 그림 4와 같은 이상화된 이력특성을 나타내지 못하는 것을 고려하기 위한 감쇠조정계수(damping modification factor)이다.⁽³⁾⁽⁴⁾

3.1 요구되는 감쇠기의 등가감쇠비 산정

감쇠기가 설치된 경우의 유효감쇠비(β'_{eff})는 식(7)을 이용하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta'_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{DS} + E_{DB}}{E_{SS} + E_{SB}} + \beta_i = \beta_d + \beta_s + \beta_i \quad (8)$$

여기서 E_{DS} , E_{DB} 는 각각 구조물과 감쇠기에 의하여 소산된 에너지이고, E_{SS} , E_{SB} 는 각각 구조물과 감쇠기에 의하여 저장된 에너지이다. β_d 는 감쇠기의 이력거동에 의한 감쇠비를 나타내고, β_s 는 구조물의 이력거동에 의한 감쇠비를 나타내며 식(7)과 그림 5를 이용하여 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_s = \frac{2\kappa(S_{ay}S_{at} - S_{dy}S_{at})}{\pi S_{at}S_{at}} \quad (9)$$

따라서 성능수준을 만족하기 위하여 부가되는 감쇠비는 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_d = \beta'_{eff} - \beta_s - \beta_i \quad (10)$$

3.2 감쇠기의 크기 산정

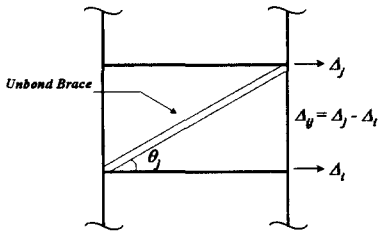


그림 6. 가새형 소성 감쇠기의 상대변위

위와 같은 과정을 통하여 산정한 감쇠기의 등가 감쇠비는 구조물의 각 층에 설치된 감쇠기들의 효과가 결집되어 나타나는 값이다. 구조물의 모든 층에 같은 강성을 갖는 감쇠기가 각 층에 그림 6과 같이 설치되어 있고 구조물이 1차 모드로 변형한다고 가정하면 감쇠기의 등가 감쇠는 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_d = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{DD}}{E_{SD} + E_{SB}} = \frac{\frac{\sigma_{by} K_b}{E_b} \sum_j (\Delta_{ij} \cos \theta_j L_{bj} - \frac{\sigma_{by} L_{bj}^2}{E_b})}{\frac{2\pi^3}{T^2} \sum_j m_j \Delta_j^2 + \frac{\pi \sigma_{by} K_b}{2E_b} \sum_j \cos \theta L_{bj} \Delta_{ij}} \quad (11)$$

여기서 Δ_i 및 Δ_j 는 i, j 층의 변위이고 Δ_{ij} 는 i 층과 j 층 사이의 층간변위이다. 식(11)을 정리하면 축 방향 강성은 식(12)와 같이 구할 수 있고, 식(3)을 이용하여 감쇠기의 단면적을 구할 수 있다.

$$k_b = \frac{\pi \beta_d \frac{2\pi^2}{T^2} \sum_j m_j \Delta_j^2}{A - B} \quad (12)$$

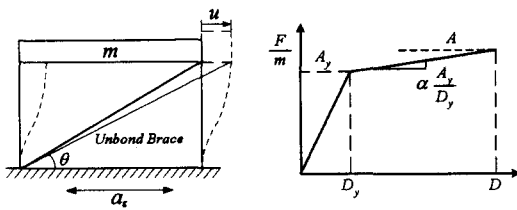
여기서,

$$A = \frac{\sigma_{by}}{E_b} \sum_j (L_{bj} \Delta_{ij} \cos \theta_j - L_{bj}^2 \frac{\sigma_{by}}{E_b}) \quad , \quad B = \frac{\sigma_{by} \pi \beta_d}{2E_b} \sum_j \Delta_{ij} \cos \theta_j$$

4. 단자유도계를 이용한 변수 분석

4.1 예제 구조물 및 지진하중

본 연구에서 해석에 사용한 단자유도계 구조물은 높이 4m, 스패 6m이며, 그림 7(b)와 같이 이선형 이력특성을 가진다. 각 구조물의 특성에 따른 응답의 변화와 본 연구에서 제시하고자 하는 목



(a) 해석모델

(b) 힘-변위 관계

그림 7. 이선형 이력특성을 가진 단자유도계 구조물

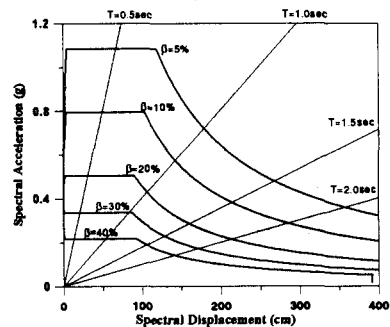


그림 8. Newmark-Hall의 설계응답스펙트럼

표면위에 부합하는 감쇠기의 감쇠비 산정을 위하여 다음과 같은 변수를 가진 구조물에 대하여 해석을 수행하였다.

- (1) 구조물의 탄성주기(T_e) : 0.3초, 0.5초, 1.0초
- (2) 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비(e) : 각 주기의 구조물에 대하여 0.3, 0.5
- (3) 항복 후 강성비(α) : 각 구조물에 대하여 0.03, 0.1, 0.5
- (4) 감쇠기의 항복용력(σ_{by}) : 1000kg/cm², 2400kg/cm², 3300kg/cm²

본 연구에서는 최대지반가속도(peak ground acceleration)를 0.4g로 조정된 그림 8의 Newmark-Hall의 탄성 설계응답스펙트럼⁽⁵⁾을 이용하여 비선형 정적해석을 수행하였다.

4.2 성능점 산정

각 예제 구조물에 대하여 능력스펙트럼법을 이용하여 변위응답(S_{dy}), 가속도응답(S_{ay}), 유효감쇠비를 구하였다. 그림 9와 표 1에는 $T_e=0.5$, $e=0.3$, $\alpha=0.1$ 인 구조물의 응답을 구하는 과정을 나타내었다. 각 감쇠비의 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교차점으로부터 변위와 가속도 응답을 구한 후 식(7)을 이용하여 유효감쇠비를 구하였다. 예제 구조물은 완전한 이선형 이력거동을 하기 때문에 $\kappa=1.0$ 을 사용하였다. 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.

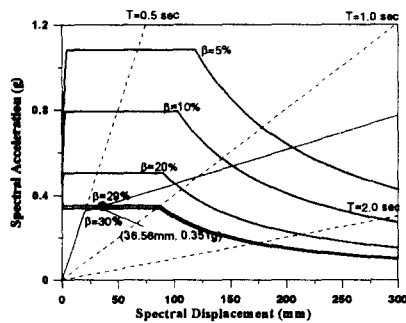


그림 9. 능력스펙트럼법에 의한 성능점 산정

표 1. 성능점의 산정 단위:cm

β	S_{dy}	S_{ay}	S_{di}	S_{ai}	$\beta_{eff}(\%)$
5	2.02	0.33	20.59	0.62	29.6
10			15.23	0.54	31.7
20			10.06	0.46	33.4
30			2.79	0.34	20.4
:			:	:	:
29			3.66	0.35	29

표 2. 각 설계 변수에 따른 구조물의 응답 단위 : cm

(a) $T_e = 0.3$ 초							(b) $T_e = 0.5$ 초							(c) $T_e = 1.0$ 초						
e	α	S_{dy}	S_{ay}	S_{dp}	S_{sp}	β_{eff}	e	α	S_{dy}	S_{ay}	S_{dp}	S_{sp}	β_{eff}	e	α	S_{dy}	S_{ay}	S_{dp}	S_{sp}	β_{eff}
0.3	0.03			1.25	0.33	30.37	0.3	0.03			3.48	0.33	30.37	0.3	0.03			10.78	0.22	35.14
	0.1	0.73	0.33	1.33	0.35	28.96		0.1	2.02	0.33	3.70	0.35	29.00		0.1	5.36	0.22	11.28	0.24	32.07
	0.5			1.97	0.60	15.80		0.5			5.48	0.60	15.80		0.5			14.32	0.40	15.80
0.5	0.03			1.54	0.55	18.14	0.5	0.03			4.28	0.55	18.13	0.5	0.03			12.07	0.36	20.88
	0.1	1.21	0.54	1.57	0.56	17.64		0.1	3.36	0.54	4.35	0.56	17.64		0.1	8.93	0.36	12.26	0.37	20.01
	0.5			1.80	0.67	13.37		0.5			4.99	0.67	15.26		0.5			13.86	0.46	13.87

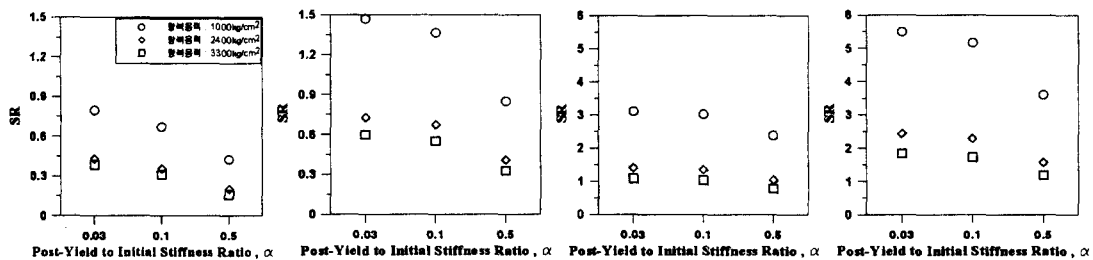
4.3 성능수준을 만족하기 위한 감쇠기의 설계

능력스펙트럼법에 의한 해석 결과를 바탕으로 목표변위(target displacement, δ_t)를 설정하고 이를 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비를 산정하는 해석을 수행하였다. 목표변위는 각 구조물에서 구한 성능점의 20%를 제어하는 것으로 하였으며 그 결과는 표 3에 나타나 있다. 먼저 목표변위에서 구조물의 능력스펙트럼과 교차하는 요구스펙트럼의 유효감쇠비를 구한다. 이렇게 구한 요구스펙트럼의 감쇠비는 새로운 유효감쇠비(β_{eff})가 된다. 이력거동에 의한 구조물의 등가 점성감쇠비를 구하고 식(10)에 이 값들을 대입하고 정리하면 성능목표를 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비(β_d)를 구할 수 있고, 식(12)를 이용하여 이에 따른 가새형 소성 감쇠기의 강성비를 구할 수 있다. 그러나 이 값은 능력스펙트럼을 구할 때 감쇠기의 강성을 고려하지 않았으므로 정확한 값이라 할 수 없다. 따라서 다음 단계로 이러한 강성비를 갖는 감쇠기를 구조물에 설치하고 감쇠기의 강성을 고려하여 능력스펙트럼을 수정한다. 수정된 능력스펙트럼과 목표변위의

표 3. 감쇠기의 크기 산정

단위 : cm

(a) Te=0.3초							(b) Te=0.5							(c) Te=1.0초						
e	α	σ_{by}	δ_t	β_{eff}	β_d	SR	e	α	σ_{by}	δ_t	β_{eff}	β_d	SR	e	α	σ_{by}	δ_t	β_{eff}	β_d	SR
0.03	0.03	1000	1.00	25.59	6.92	0.40	0.03	0.03	1000	2.78	26.97	7.51	0.80	0.03	0.03	1000	8.63	35.14	11.53	3.11
		2400							2400							2400				
		3300							3300							3300				
0.3	0.1	1000	1.06	25.65	6.07	0.34	0.3	0.1	1000	2.96	26.75	6.35	0.67	0.3	0.1	1000	9.02	33.74	10.84	3.02
		2400							2400							2400				
		3300							3300							3300				
0.5	0.5	1000	1.58	18.02	2.86	0.18	0.5	0.5	1000	4.38	18.25	3.00	0.43	0.5	0.5	1000	11.46	21.09	6.42	2.38
		2400							2400							2400				
		3300							3300							3300				
0.03	0.03	1000	1.23	13.67	7.77	0.66	0.03	0.03	1000	3.42	14.48	8.55	1.47	0.03	0.03	1000	9.65	21.00	12.33	5.50
		2400							2400							2400				
		3300							3300							3300				
0.5	0.1	1000	1.25	13.92	7.30	0.61	0.5	0.1	1000	3.48	14.1	7.51	0.67	0.5	0.1	1000	9.81	20.78	11.68	5.17
		2400							2400							2400				
		3300							3300							3300				
0.5	0.5	1000	1.44	13.77	4.64	0.37	0.5	0.5	1000	3.99	14.16	4.96	0.85	0.5	0.5	1000	11.09	17.73	7.94	3.61
		2400							2400							2400				
		3300							3300							3300				



(a) Te=0.5초, e=0.3

(b) Te=0.3초, e=0.5

(c) Te=1.0초, e=0.3

(d) Te=1.0초, e=0.5

그림 10. 각 설계변수에 따른 강성비 분포

교차점을 지나는 요구스펙트럼으로부터 새로운 유효감쇠비(β_{eff})를 구한다. 감쇠기의 감쇠비(β_d)가 오차범위 안에 들 때까지 이러한 일련의 과정을 반복한다. 이렇게 구한 최종 감쇠비를 이용하여 구한 성능목표를 만족하기 위하여 필요한 가새형 소성 감쇠기의 강성비를 표 3과 그림 10에 나타내었다. 주기가 0.3초인 구조물에 항복변위가 2400kg/cm^2 , 3300kg/cm^2 인 감쇠기를 설치할 경우 감쇠기의 항복변위가 구조물의 항복변위보다 커지기 때문에 사용할 수 없었다.

표 3과 그림 10을 통해 알 수 있듯이 주기가 길거나 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비(e)가 큰 구조물일수록 성능목표를 만족하기 위하여 강성비가 큰 감쇠기가 필요하였고, 구조물의 항복 후 강성비가 크거나 감쇠기의 항복용력이 클수록 필요한 감쇠기의 강성비는 작았다.

5. 결 론

본 연구에서는 능력스펙트럼법을 이용하여 목표변위까지 구조물의 변형을 제어하기 위하여 필요한 가새형 소성 감쇠기의 크기를 산정하는 방법을 제안하였다. 주기가 길거나 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비(e)가 큰 구조물일수록 성능목표를 만족하기 위하여 강성비가 큰 감쇠기가 필요하였고, 구조물의 항복 후 강성비가 크거나 감쇠기의 항복용력이 클수록 필요한 감쇠기의 강성비는 작았다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. Inoue, K. and Kuwahara, S., "Optimum strength ratio of hysteretic damper," Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 27, No. 6, Jun 1998, pp. 577-588.
2. 김진구, 이강준, "탄소성 부재의 적정강성비 선정에 관한 연구," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 20권 1호, 2000, pp. 43-46.
3. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
4. FEMA, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
5. Chopra, A.K., Dynamics of structures, Prentice Hall, 1995.