

성능수준 만족을 위한 가새형 소성 감쇠기의 설계

Design of Unbond Braces to Satisfy Given Performance Acceptance Criteria

김진구*
Kim, Jin Koo

김유경**
Kim, Yu Kyung

최현훈***
Choi, Hyun Hoon

국문요약

가새형 소성 감쇠기는 에너지 소산 이력거동을 통해 강한 지진하중을 받는 구조물의 구조적 손상을 방지하거나 감소시킨다. 본 연구에서는 성능수준 만족을 위한 가새형 소성 감쇠기의 직접적인 설계 방법을 개발하였다. 많은 해석 시간이 요구되는 비선형 동적 시간이력해석 대신 비선형 정적해석법인 능력스펙트럼법을 이용하여 주어진 성능을 만족하기 위하여 필요한 유효 감쇠비를 구한 후 이를 이용하여 가새형 소성 감쇠기의 크기를 구하였다. 각 설계변수의 영향을 파악하기 위하여 단자유도계에서 구조물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도의 비, 항복 후 강성비, 가새형 소성 감쇠기의 항복응력 등을 변수로 하여 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 제안된 방법을 5층과 10층 건물에 적용하여 검증하였다. 시간이력해석 결과, 제안된 방법에 따라 설계된 가새형 소성 감쇠기를 설치한 예제 구조물의 최대응답은 주어진 목표변위와 잘 일치하였다.

주요어 : 가새형 소성 감쇠기, 능력스펙트럼법, 성능에 기초한 내진설계

ABSTRACT

Unbond brace hysteretic dampers are generally used to prevent or decrease structural damage in building structures subjected to strong earthquake by its energy dissipating hysteretic behavior. In this study, a straightforward design procedure for unbond brace hysteretic dampers was developed. The required amount of equivalent damping to satisfy given performance acceptance criteria was 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 has been performed for the design variables such as natural period, yield strength, the stiffness after the first yield, yield stress of the unbond brace. The procedure was applied to 5-story and 10-story steel frames for verification of the proposed method. According to the earthquake time history analysis results, the maximum displacement of the model structure with unbond braces supplied in accordance with the proposed method corresponds well with the given target displacement.

Key words : unbond brace, capacity spectrum method, performance-based seismic design

1. 서 론

ATC-40⁽¹⁾ 및 FEMA-273⁽²⁾ 보고서 등은 기존 건물의 내진 성능 목표를 달성하기 위하여 건물의 성능을 향상시키는 방법으로 건물의 강도와 강성을 증가시키는 방법, 건물의 변형 능력을 향상시키는 방법, 면진장치를 설치하거나 에너지 소산장치를 설치하는 방법 등을 제시하고 있다. 그 중에서 수동형 에너지 소산장치는 설치가 쉽고 다른 방법들에 비하여 설치비용에 비하여 효과가 뛰어나기 때문에 그 적용사례가 증가하고 있다. 특히 소성 거동을 하는 부재의 힘-변위 이력에 의한 에너지 소산 능력을 이용하여 구조물에 전달되는 에너지를 소산하는 소성 감쇠기는 반복되는 이력거동 동안에 강성이나 강도에 큰 변화없이 안정적으로 거동하며 에너지 집중 효과가 높고, 외부 환경에 영향을 적게 받는 장점이 있다. 소성 감쇠기의 형태로는 X자형이나 역삼각형 형태의 판들로 구성된 plate형과 압축력을 받을 때 좌굴이 발생하지 않고 안정된 이력거동에 의한 에너지 소산능력을 높이기 위하여 철골부재를 철골 튜브속에 설치하고 그 사이를 콘크리

트로 채운 그림 1과 같은 가새형 감쇠기(unbond brace 또는 buckling restrained brace)가 대표적이다. 이 경우 감쇠 역할을 하는 내부의 부재는 콘크리트와 부착되지 않도록 접촉면에 코팅 등의 방법을 사용하여 강관이나 콘크리트는 좌굴 방지 역할만을 하도록 한다.

가새형 소성 감쇠기는 1988년 Watanabe등에 의하여 제안된 후 주로 일본에서 연구되었으며 특히 1995년 Kobe 지진 이후에 많이 적용되고 있다. 그러나 아직 감쇠기 자체의 구성형식, 재료에 관한 실험과 거동특성 위주로 연구가 진행되고 있으며 감쇠기의 설계 방법이나 감쇠기가 설치된 건물의 거동에 관한 연구는 부족한 상태이다.⁽³⁾

본 연구에서는 성능수준을 만족하는 목표변위 이내로 변위를 제어하기 위하여 필요한 가새형 소성 감쇠기의 크기를 손쉽게 산정할 수 있는 설계방법을 제시하였다. 이를 위하여

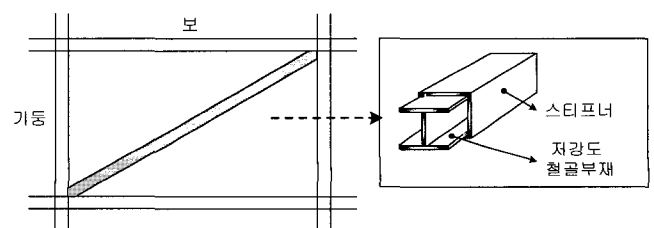


그림 1 가새형 소성 감쇠기의 형태

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

** 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

*** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 9. 24 / 심사종료일 : 2001. 11. 1)

능력스펙트럼법(capacity spectrum method)을 이용하여 주어진 목표성능수준을 만족하기 위하여 추가되어야 하는 등가감쇠비를 산정하고, 이러한 양의 등가감쇠비를 제공할 수 있는 가새형 소성 감쇠기의 적정 크기를 산정하였다. 이 방법은 경험에 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 연구에서 제안된 방법을 이용하여 구조물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비, 항복 후 강성비, 가새형 소성 감쇠기의 항복응력 등을 변수로 하여 단자유도계 모델을 해석하고 결과를 분석하였다. 또한 제안된 방법을 5층과 10층 건물에 적용하여 설계 방법의 정확성을 검증하였다.

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. 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 라고 하면, 전체 시스템의 항복점 F_{y1} 과 F_{y2} 는 식 (1)과 같다.

$$F_{y1} = F'_{by} + K_s \cdot D'_{by}$$

$$F_{y2} = F'_{by} + F_{sy} \tag{1}$$

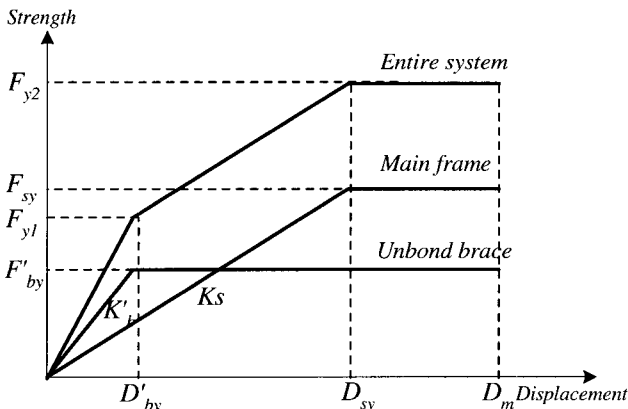


그림 2 감쇠기가 설치된 구조물의 이력거동

또한 강성비(strength ratio, SR)는 식 (2)와 같이 정의한다.

$$SR = \frac{K'_b}{K_s} \tag{2}$$

감쇠기가 구조물에 그림 3과 같이 설치되어 있을 때, 가새와 기둥이 접하는 절점의 횡 변위가 가새의 길이에 비하여 미소하다고 보고 θ 와 θ' 를 같다고 가정하면 가새형 소성 감쇠기의 횡방향에 대한 항복강도와 강성은 식 (3)과 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F'_{by} = F_{by} \cos \theta \tag{3}$$

$$K'_b = K_b \cos^2 \theta \tag{4}$$

축방향 저항하는 부재의 강성과 단면적의 관계와 식(4)를 이용하여 가새의 단면적(A_b)을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_b = \frac{K_b L_b}{E_b} = \frac{K'_b L_b}{E_b \cos^2 \theta} \tag{5}$$

여기서, L_b 와 E_b 는 각각 가새형 소성 감쇠기의 길이와 탄성계수이다.

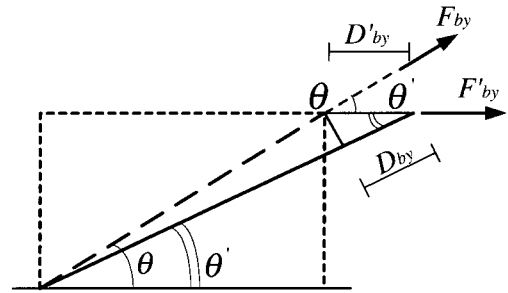


그림 3 가새형 소성 감쇠기의 방향별 힘-변위 관계

3. 능력스펙트럼법을 이용한 가새형 소성 감쇠기의 적정 크기 산정

3.1 능력스펙트럼법

능력스펙트럼법은 구조물의 횡하중에 대한 저항능력을 하중과 변위 곡선으로 표현하고, 고려되는 지진의 요구를 응답스펙트럼 형식으로 나타낸 후, S_d 와 S_a 좌표계의 ADRS (acceleration displacement response spectrum)형식의 능력스펙트럼과 요구스펙트럼으로 변환하여 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 성능점(performance point)을 산정하고, 내진성능을 시각적으로 쉽게 평가하는 방법이다.^{(1),(2)} 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 이용하여 등

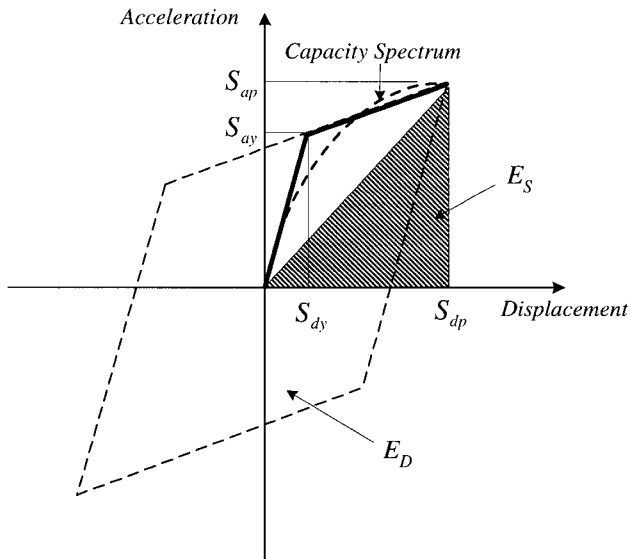


그림 4 등가점성감쇠비의 산정

가점성감쇠비(β_{eq})를 구한 후 구조물의 이력특성을 고려하여 유효감쇠비(β_{eff})를 산정한다. 여기서 등가점성감쇠비와 유효감쇠비는 식 (6)과 식 (7)에 의해서 산정할 수 있다.⁽¹⁾

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{\pi S_{ap}S_{dp}} \quad (6)$$

$$\beta_{eff} = \beta_i + \kappa \beta_{eq} \quad (7)$$

여기서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지, 즉 마름모의 면적을 나타내며, E_S 는 구조물의 최대변형에너지로 빗금친 삼각형의 면적에 해당한다. β_i 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다. κ 는 실제 구조물의 이력특성이 그림 4와 같은 이상화된 이력특성을 나타내지 못하는 것을 고려하기 위한 감쇠조정계수(damping modification factor)이다.

3.2 요구되는 감쇠기의 등가감쇠비 산정

가새형 소성 감쇠기가 설치된 경우 구조물의 능력곡선은 그림 5와 같이 초기강성이 커지고 주기도 변하게 된다. 감쇠기가 설치된 구조물의 유효감쇠비(β'_{eff})는 식 (7)을 이용하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 등가의 점성감쇠비를 나타내고 β_s 는 감쇠기가 설치되지 않은 구조물의 이력거동에 의한 등가의 점성감쇠비를 나타내며 식 (6)과 그림 5를 이용하여 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

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

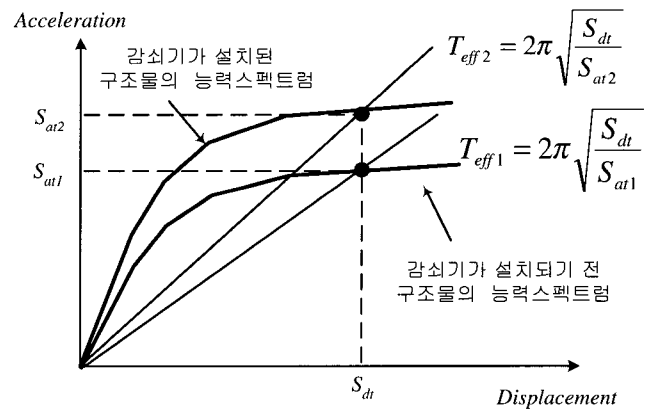


그림 5 감쇠기가 설치된 구조물의 능력스펙트럼

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

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

3.3 감쇠기의 크기 산정

위와 같은 과정을 통하여 산정한 감쇠기의 등가 감쇠비는 구조물의 각 층에 설치된 감쇠기의 효과가 결집되어 나타나는 값이다.

구조물의 모든 층에 같은 강성을 갖는 감쇠기가 그림 6과 같이 설치되어 있고, 구조물이 1차 모드로 변형한다고 가정하면 감쇠기의 등가 감쇠는 식 (3), (4)와 식 (6)을 이용하여 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 Δ_i 및 Δ_j 는 i, j 층의 변위이고 Δ_{ij} 는 i 층과 j 층 사이의 층간변위이다. 또한 σ_{by} 는 감쇠기의 항복응력이고 m_j 는 j 층의 질량이다. 식 (11)을 정리하면 감쇠기의 축 방향 강성은 식 (12)와 같이 구할 수 있고, 식 (5)를 이용하여 감쇠기의 단면적을 구할 수 있다.

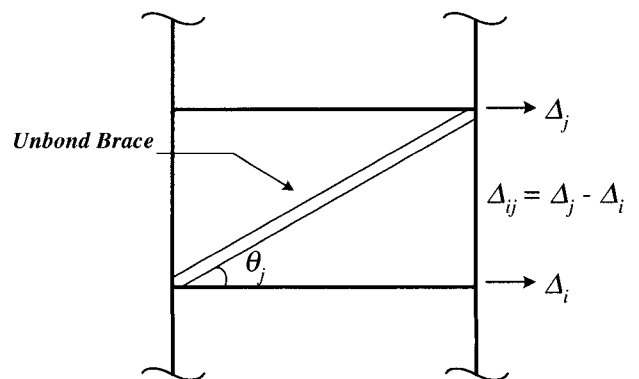


그림 6 가새형 소성 감쇠기의 상대변위

$$k_b = \frac{\beta_d \frac{2\pi^3}{T^2} \sum_j m_j \Delta_j^2}{A - B} \quad (12)$$

여기서,

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

$$B = \frac{\sigma_{by} \pi \beta_d}{2E_b} \sum_j L_{bj} \Delta_{ij} \cos \theta_j$$

4. 단자유도계를 이용한 변수 분석

4.1 예제 구조물 및 지진하중

본 연구에서 해석에 사용한 단자유도계 구조물은 높이 4m, 스패 6m이며, 그림 7과 같은 이선형 이력특성을 가진다. 각 구조물의 특성에 따른 응답의 변화와 본 연구에서 제시하고자 하는 목표변위에 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 항복응력(σ_{by}) : 1,000kgf/cm², 2,400kgf/cm², 3,300kgf/cm²

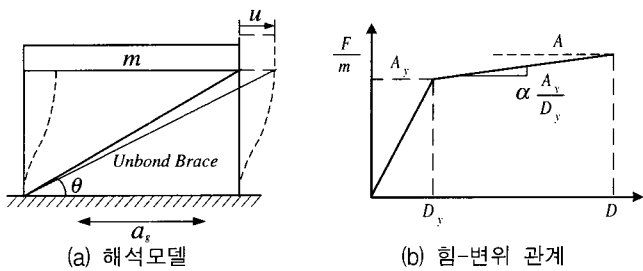


그림 7 이선형 이력특성을 가진 단자유도계 구조물

본 연구에서는 유효최대가속도(effective peak acceleration)를 0.4g로 조정하여 그림 8의 Newmark-Hall의 탄성 설계 응답스펙트럼⁽⁴⁾을 이용하여 비선형 정적해석을 수행하였다.

4.2 성능점 산정

각 예제 구조물에 대하여 능력스펙트럼법을 이용하여 변위 응답(S_{dp}), 가속도응답(S_{ap}), 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 능력스펙

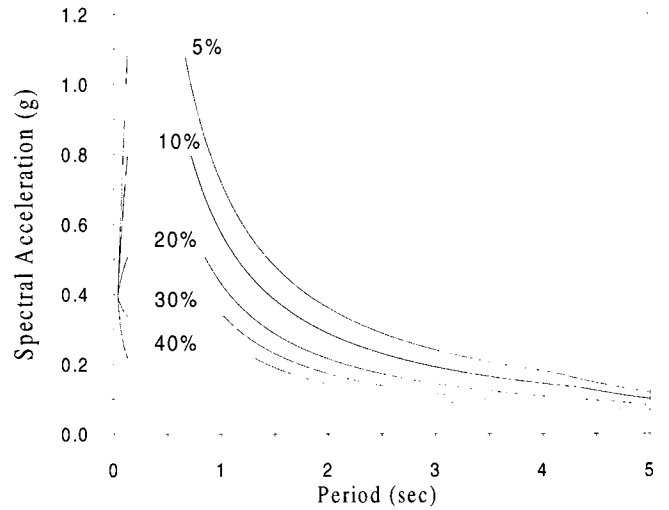


그림 8 Newmark-Hall의 설계응답스펙트럼

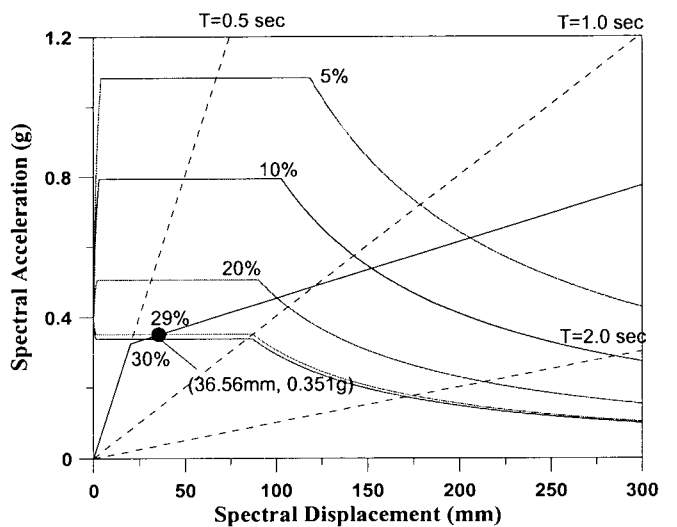


그림 9 능력스펙트럼법에 의한 성능점 산정

표 1 성능점의 산정(단위 : cm, g)

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	29.0

트럼의 교차점으로부터 변위와 가속도 응답을 구한 후 식 (11)을 이용하여 유효감쇠비를 구하였다. 예제 구조물은 완전한 이선형 이력거동을 하는 것으로 가정했기 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. 표 2에 해석 결과를 나타내었다.

표 2 각 설계 변수에 따른 구조물의 응답

(a) $T_e=0.3$ 초(단위 : cm, g)

e	α	S_{dy}	S_{ay}	S_{dp}	S_{ap}	$\beta_{eff}(\%)$
0.3	0.03	0.73	0.33	1.25	0.33	30.37
	0.1			1.33	0.35	28.96
	0.5			1.97	0.60	15.80
0.5	0.03	1.21	0.54	1.54	0.55	18.14
	0.1			1.57	0.56	17.64
	0.5			1.80	0.67	13.37

(b) $T_e=0.5$ 초

e	α	S_{dy}	S_{ay}	S_{dp}	S_{ap}	$\beta_{eff}(\%)$
0.3	0.03	2.02	0.33	3.48	0.33	30.37
	0.1			3.70	0.35	29.00
	0.5			5.48	0.60	15.80
0.5	0.03	3.36	0.54	4.28	0.55	18.13
	0.1			4.35	0.56	17.64
	0.5			4.99	0.67	13.37

(c) $T_e=1.0$ 초

e	α	S_{dy}	S_{ay}	S_{dp}	S_{ap}	$\beta_{eff}(\%)$
0.3	0.03	5.36	0.22	10.78	0.22	35.14
	0.1			11.28	0.24	32.07
	0.5			14.32	0.40	15.80
0.5	0.03	8.93	0.36	12.07	0.36	20.88
	0.1			12.26	0.37	20.01
	0.5			13.86	0.46	13.87

4.3 성능수준을 만족하기 위한 감쇠기의 설계

능력스펙트럼법에 의한 해석 결과를 바탕으로 거동한계(performance limit, δ_t)를 설정하고 이를 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비를 산정하는 해석을 수행하였다. 한계변위는 임의로 각 구조물에서 구한 성능점의 80%로 정하였으며 그 결과는 표 3에 나타나 있다. 먼저 구조물의 목표변위와 교차하는 요구스펙트럼의 감쇠비를 구한다. 이렇게 구한 요구스펙트럼의 감쇠비는 새로운 유효감쇠비(β'_{eff})가 된다. 이력거동에 의한 구조물의 등가점성감쇠비를 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 목표 변위의 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 위하여필요한 가새형 소성 감쇠기의 강성비를 표 3과 그림 10에 나타내었다. 주기가 0.3초인 구조물에 항복강도가 2,400kgf/cm², 3,300kgf/cm²인 가새형 소성 감쇠기를 설치할 경우 감쇠기의 항복변위가 구조물의 항복변위보다 커지기 때문에 사용할 수 없었다. 표 3과 그림 10을 통해 알 수 있듯이 주기가 길거나 요구되는 탄성

표 3 감쇠기의 크기 산정

(a) $T_e=0.3$ 초(단위 : kgf, cm)

e	α	σ_{by}	δ_t	β'_{eff}	β_d	SR
0.3	0.03	1000	1.00	25.59	6.92	0.40
		2400		-	-	-
		3300		-	-	-
	0.1	1000	1.06	25.65	6.07	0.34
		2400		-	-	-
		3300		-	-	-
0.5	1000	1.58	18.02	2.86	0.18	
	2400		-	-	-	
	3300		-	-	-	
0.5	0.03	1000	1.23	13.67	7.77	0.66
		2400		-	-	-
		3300		-	-	-
	0.1	1000	1.25	13.92	7.30	0.61
		2400		-	-	-
		3300		-	-	-
0.5	1000	1.44	13.77	4.64	0.37	
	2400		12.14	3.34	0.27	
	3300		-	-	-	

(b) $T_e=0.5$ 초(단위 : kgf, cm)

e	α	σ_{by}	δ_t	β'_{eff}	β_d	SR
0.3	0.03	1000	2.78	26.97	7.51	0.80
		2400		25.95	7.08	0.43
		3300		24.99	6.65	0.39
	0.1	1000	2.96	26.75	6.35	0.67
		2400		25.98	6.06	0.36
		3300		25.25	5.76	0.31
	0.5	1000	4.38	18.25	3.00	0.43
		2400		18.08	2.90	0.20
		3300		17.95	2.82	0.16
0.5	0.03	1000	3.42	14.48	8.55	1.47
		2400		13.87	7.97	0.73
		3300		13.36	7.47	0.60
	0.1	1000	3.48	14.68	8.03	1.37
		2400		14.1	7.51	0.67
		3300		13.64	7.06	0.55
	0.5	1000	3.99	14.16	4.96	0.85
		2400		13.87	4.74	0.41
		3300		13.65	4.54	0.33

표 3 감쇠기의 크기 산정(표 3 계속)

(c) $T_e=1.0$ 초(단위 : kgf, cm)

e	α	σ_{by}	δ_t	β'_{eff}	β_d	SR
0.3	0.03	1000	8.63	35.14	11.53	3.11
		2400		34.75	11.44	1.41
		3300		34.49	11.41	1.08
	0.1	1000	9.02	33.74	10.84	3.02
		2400		33.40	10.74	1.35
		3300		33.15	10.67	1.04
	0.5	1000	11.46	21.09	6.42	2.38
		2400		20.97	6.37	1.05
		3300		20.90	6.33	0.79
0.5	0.03	1000	9.65	21.00	12.33	5.50
		2400		20.75	12.13	2.43
		3300		20.57	11.97	1.84
	0.1	1000	9.81	20.78	11.68	5.17
		2400		20.55	11.50	2.29
		3300		20.39	11.34	1.73
	0.5	1000	11.09	17.73	7.94	3.61
		2400		17.60	7.81	1.57
		3300		17.51	7.76	1.18

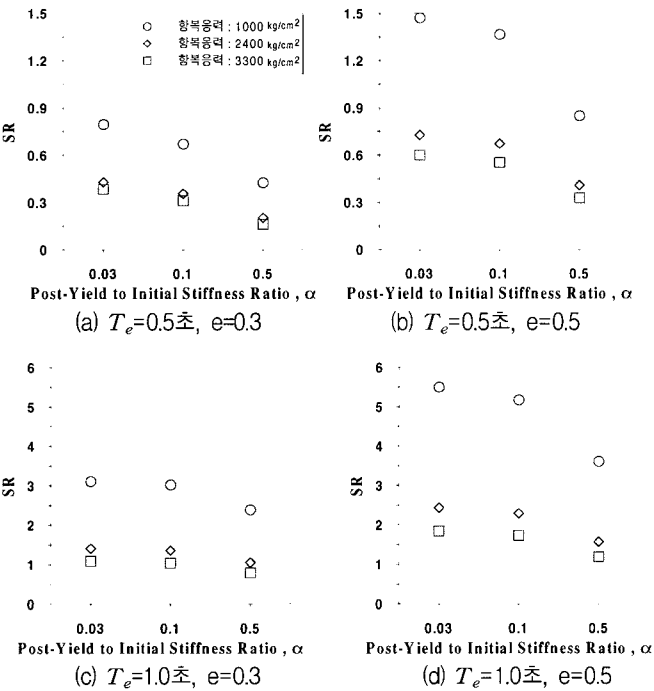


그림 10 각 설계변수에 따른 강성비 분포

강도에 대한 항복강도비(e)가 큰 구조물일수록 성능목표를 만족하기 위하여 단면적이 큰 감쇠기가 필요하였고, 구조물의 항복 후 강성비가 크거나 감쇠기의 항복응력이 클수록 필요한 감쇠기의 크기는 작아짐을 알 수 있다.

5. 예제 해석

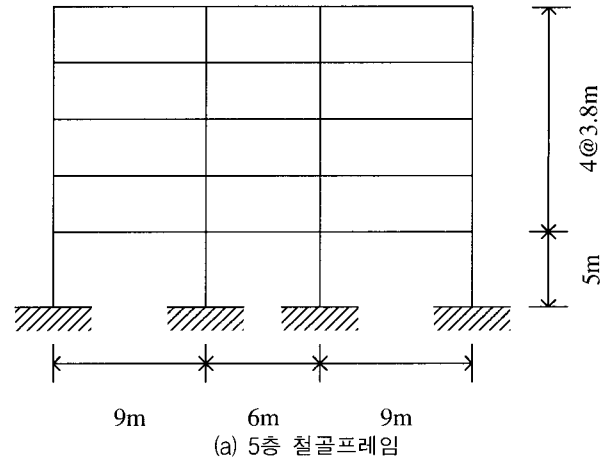
다자유도계에서 횡하중을 1차모드에 따라 분배하고 비선

형 정적해석을 통해 예제 구조물의 능력스펙트럼을 구하고 성능점을 산정하였다. 등가의 단자유도계에서 구한 감쇠기의 감쇠비를 이용하여 성능목표를 만족하기 위해 각 층에 설치되는 가새형 소성 감쇠기의 강성을 구하였다.

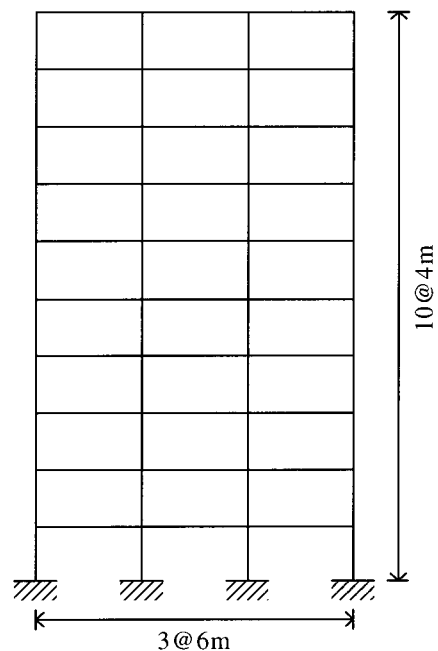
5.1 예제 구조물의 성능점 산정

예제 구조물은 그림 11과 같은 5층과 10층의 2차원 철골 프레임으로 건축학회의 강구조계산규준(허용응력설계법, 1983)에 따라 MIDAS GEN⁽⁵⁾을 이용하여 설계하였다. 고정하중은 540kgf/m², 적재하중은 250kgf/m²로 전 층에 같은 크기를 적용하였다. 예제 모델은 중력하중 및 풍하중에 대하여 저항하도록 설계하였고 보에는 항복강도 2,400kgf/m², 기둥에는 3,300kgf/m²인 철골부재를 사용하였다.

먼저 비선형 시간이력해석 프로그램인 DRAIN2D+⁽⁶⁾를 이용하여 예제 구조물에 대하여 모드해석을 수행하였다. 모드해석의 수행결과를 표 4에 나타나 있다. 능력스펙트럼법에 의한 결과를 검토하기 위하여 수행한 비선형 시간이력해



(a) 5층 철골프레임



(b) 10층 철골프레임

그림 11 예제 구조물

표 4 모드해석결과

(a) 5층 구조물

모드	1	2	3	4	5
주기(sec)	0.82	0.25	0.14	0.09	0.06
모드참여계수	1.27	0.40	0.22	0.12	0.06
질량참여율(%)	87.00	9.33	2.68	0.82	0.56

(b) 10층 구조물

모드	1	2	3	4	5
주기(sec)	1.41	0.49	0.28	0.19	0.14
모드참여계수	1.34	0.51	0.30	0.22	-0.16
질량참여율(%)	77.54	11.68	4.28	2.23	1.53

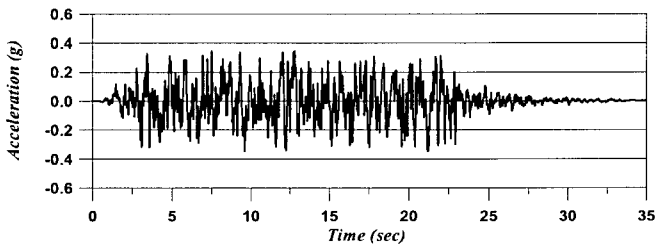


그림 12 인공지진의 가속도 시간이력

석에 필요한 가속도 시간이력은 Newmark-Hall의 설계응답 스펙트럼에 부합되도록 생성한 인공지진의 가속도 시간이력을 이용하였다. 인공지진은 Gasparini와 Vanmarcke가 제안한 정현과 중첩을 이용한 프로그램인 SIMQKE⁽⁷⁾를 이용하였으며 그림 12에 나타내었다.

황하중을 1차 모드에 따라 분배하여 산정된 층지진 하중을 가하고 구조물의 전체 높이의 4%정도까지 변위가 발생하도록 변위제어를 하였다. 능력스펙트럼과 요구스펙트럼을 하나의 그래프로 표현한 다음 두 스펙트럼의 교차점으로부터 성능점을 산정하였다. 이렇게 구한 성능점과 이것을 변환식을 이용하여 다자유도계의 최상층의 변위와 밀면전단력으로 치환한 결과를 표 5에 나타내었다.

시간이력해석 결과와 비교하기 위하여 설계스펙트럼에 부합되도록 생성한 인공지진을 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행한 결과 최상층에서 최대변위가 5층 구조물의 경우 15.60cm, 10층 구조물의 경우 24.02cm 발생하였다. 그림 13과 14에서 예제 구조물의 최대 층변위와 최대 층간변위를 비교하여 나타내었다. 해석결과 최대 층변위는 1차 모드에 의한 방법이 시간이력해석보다 약간 작게 평가되었고, 층간변위는 상부층에서 1차모드에 의한 방법이 시간이력해석보다 약간 크게 평가되었다.

표 5 예제 구조물의 성능점

예제 구조물	등가단자유도계		다자유도계		유효 감쇠비(%)
	변위(cm)	가속도(g)	변위(cm)	전단력(tonf)	
5층	11.55	0.338	14.64	95.26	23.3
10층	18.20	0.173	24.33	58.76	28.3

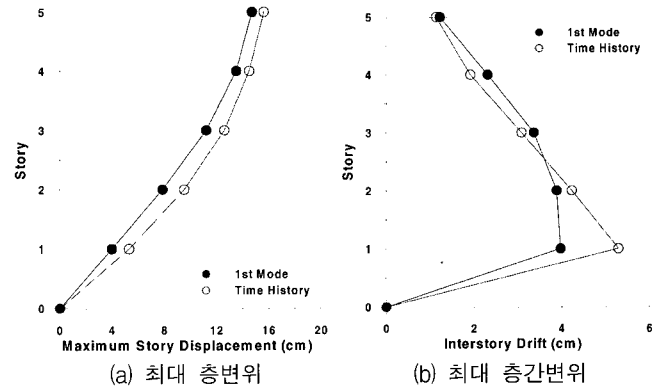


그림 13 5층 구조물의 최대 층변위와 최대 층간변위

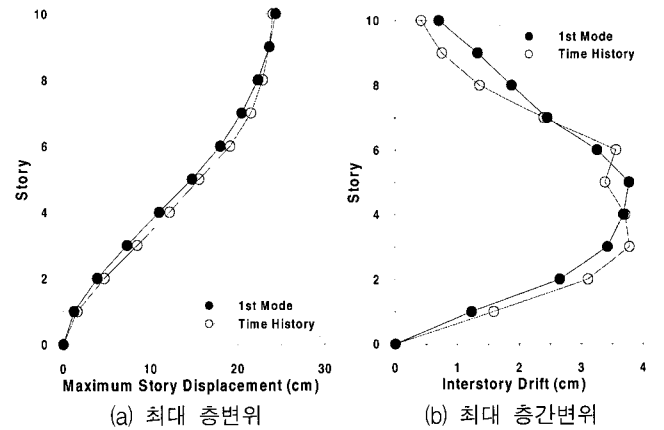


그림 14 10층 구조물의 최대 층변위와 최대 층간변위

5.2 가새형 소성 감쇠기의 설계

예제 구조물의 최상층의 목표변위를 건물 전체 높이의 0.5%로 정하고 필요한 감쇠기의 강성을 구하였다. 목표변위는 5층 구조물의 경우 10.1cm이고 10층 구조물의 경우 20cm이다. 목표변위는 다자유도계의 최상층의 변위이기 때문에 이것을 등가의 단자유도계로 치환하고 목표 성능점에서의 유효감쇠비를 이용하여 구한 목표변위를 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비를 구하였다. 표 6에 목표 성능점과 목표 변위를 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 감쇠비를 나타내었다.

구조물의 전 층에 같은 강성을 갖는 감쇠기가 설치되어 있다고 가정하면 식 (12)와 식 (5)를 이용하여 구조물의 각 층에 설치되는 감쇠기의 강성과 단면적을 구할 수 있다. 이렇게 구한 감쇠기의 강성은 5층 구조물은 64.18tonf/cm, 10층 구조물은 52.05tonf/cm이다. 설계된 감쇠기가 설치된 예제 구조물의 시간이력해석 결과 제어된 최상층의 변위는 5층의 경우 10.64cm로 목표변위인 10.1cm보다 작게 제어되었고, 10

표 6 목표 성능점과 감쇠기의 감쇠비

예제 구조물	등가단자유도계		유효 감쇠비(%)	감쇠기의 감쇠비(%)
	변위(cm)	가속도(g)		
5층	7.97	0.320	23.54	16.29
10층	14.96	0.168	29.40	10.10

층의 경우 19.55cm로 목표변위인 20cm보다 많이 제어되었다. 이것은 5층 구조물은 능력스펙트럼법에 의한 성능점이 시간이력해석결과보다 작게 평가되어 목표변위보다 조금 작게 제어되었고 10층 구조물은 성능점이 시간이력해석보다 크게 평가되어 목표변위보다 조금 많이 제어되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 능력스펙트럼법을 이용하여 목표로 하는 성능수준까지 구조물의 변형을 제어하기 위하여 필요한 가새형 소성 감쇠기의 크기를 산정하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 구한 유효감쇠비를 이용하여 목표로 하는 성능수준을 만족하기 위하여 필요한 감쇠기의 크기를 산정하여 설치한 결과 목표변위까지 잘 제어되었다. 특히 주기가 길거나 항복강도비(e)가 큰 구조물일수록 성능목표를 만족하기 위하여 강성비가 큰 감쇠기가 필요하였고, 구조물의 항복 후 강성비가 크거나 감쇠기의 항복응력이 클수록 필요한 감쇠기의 강성비는 작았다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(과제번호 : 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. Clark, P., Kasai, K., Aiken, I., and Kimura, I., "Evaluation of simplified design approaches for structures with yielding steel braces for energy dissipation," *Proceedings of the 1999 Annual Meeting*, Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, 1997. 5.
4. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995.
5. POSCO Engineering & Construction Co., Ltd., *MIDAS-GEN, Vol. I ~Vol. IV*, 1999.
6. Tsai, K. C. and Li, J. W., "DRAIN2D+, 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.
7. 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.