

비탄성 설계스펙트럼을 이용한 소성감쇠기의 적정 크기 산정

Calculation of Optimum Size of Hysteretic Dampers Using Inelastic Design Spectrum

최 현 훈* 김 유 경** 김 진 구***
Choi, Hyunhoon Kim, Yukyung Kim, Jinkoo

ABSTRACT

The energy dissipation or damage prevention capability of structure can be greatly enhanced by employing hysteretic dampers. According to recent studies by the authors, the ratio of hysteretic damper stiffness to structural story stiffness has been identified as one of the most important parameters for characterizing the performance of this damper. In this study the method for determining appropriate properties of hysteretic dampers to satisfy the given performance objectives is developed based on the concept of capacity spectrum method. The comparison with the results from inelastic time history analysis proves that the hysteretic dampers designed from the proposed method restrains the displacement well within the target displacement.

1. 서 론

점탄성감쇠기, 점성감쇠기, 소성감쇠기, 마찰감쇠기 등과 같은 수동형 에너지 소산장치는 설치가 쉽고 다른 방법 내진보강 방법과 비교하여 비용대비 효과가 뛰어나기 때문에 외국에서는 적용사례가 증가하고 있다. 이 중에서 항복응력이 낮고 연성능력이 큰 철골로 제작된 소성감쇠기는 작은 지진에 대해서는 철골 가새와 같이 구조물의 횡방향 강성을 증가시키는 역할을 하고, 규모가 큰 지진에 대해서는 구조부재가 항복하기 전에 먼저 항복하여 구조부재의 소성변형을 줄여준다. 소성감쇠기의 형태로는 X자형이나 역삼각형 형태의 판들로 구성된 ADAS⁽¹⁾나 TADAS⁽²⁾와 같은 plate 형과 압축력을 받을 때 좌굴이 발생하지 않고 안정된 이력거동에 의한 에너지 소산능력을 높이기 위하여 철골부재를 철골 튜브속에 설치하고 그 사이를 콘크리트로 채운 가새형 감쇠기(unbond brace 또는 buckling restrained brace)가 대표적이다.

소성감쇠기에 관한 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⁽³⁾은 소성감쇠기의 강성과 항복강도는 서로 무관하다고 가정하고 감쇠기가 설치된 구조물의 힘과 변위 관계를 이용하여 산정한 유효감쇠비를 최대로 하는 소성감쇠기의 최적 강도비를 구하였다. 최근에는 김진구 등⁽⁴⁾⁽⁵⁾에 의하여 가새형 소성감쇠기의 강도비 및 강성비가 구조물의 지진거동에 미치는 영향

* 성균관대학교 건축공학과 박사과정

** 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수

에 대한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 이용하여 주어진 목표성능수준을 만족할 수 있는 소성감쇠기의 적정 크기를 산정하는 방법에 관하여 연구하였다. 이 방법은 비교적 많은 해석 시간을 필요로 하는 비선형 동적해석을 수행하지 않고 정적해석만으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. Chopra 등⁽⁶⁾과 저자 등⁽⁷⁾에 의한 최근의 연구 결과에 따르면 능력스펙트럼법에서 탄성 응답스펙트럼을 이용하여 해석을 수행할 경우 항복후 강성비(strain hardening ratio)가 작을수록 해석 결과가 시간이력해석 결과와 많은 오차를 보였다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비 등을 변수로 하여 단자유도계에서 완전 탄소성(elasto perfect plastic)이력모델로 작성된 비탄성 설계응답스펙트럼을 이용하여 해석을 수행하였다.

2. 능력스펙트럼법을 이용한 내진성능평가

능력스펙트럼법은 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(Δ_R)와 밀면전단력(V)으로 표현된다. 능력곡선을 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 구조물의 동적특성을 이용하여 Δ_R 과 V 의 능력곡선을 응답변위(S_d)와 응답가속도(S_a)의 능력스펙트럼으로 변환하게 된다. 1차 모드가 지배적인 경우 식(1)에 의하여 Δ_R 과 V 의 능력곡선을 S_d 와 S_a 의 능력스펙트럼으로 변환할 수 있다.

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

이 때 변환식에 이용되는 모드참여계수(Γ_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 응답가속도의 관계로서 표현되지만 능력스펙트럼과 하나의 그래프에 나타내기 위하여 S_d 와 S_a 좌표계의 ADRS형식으로 표현된다. 이 변환에는 식(3)의 관계를 이용한다.

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

ATC-40⁽⁸⁾과 FEMA-273⁽⁹⁾보고서에서는 지진의 요구를 선형 응답스펙트럼을 이용하여 나타낸다. 구조물의 선형탄성응답은 5% 감쇠비의 요구스펙트럼을 이용하여 구하고 구조물의 비탄성 응답은 감쇠비를 증가시켜 나타낸다. 그림 1에서 점선은 구조물의 능력곡선으로 이것을 등가의 이선형(bilinear) 곡선으로 표현한다. 등가 이선형 곡선의 이력거동에 의하여 소산된 에너지를 이용하여 등가점성감쇠비(β_{eq})를 구한 후 구조물의 이력 특성을 고려하여 유효감쇠비(β_{eff})를 산정한다. 여기서 등가점성감쇠비와 유효감쇠비는 식(4)와 식(5)를 이용하여 산정할 수 있다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾

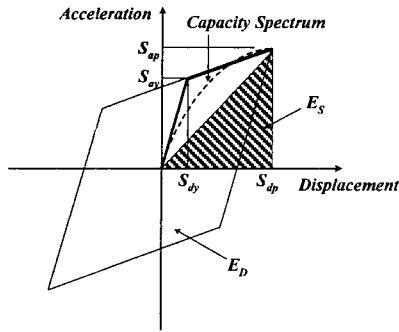


그림 1. 등가점성감쇠비의 산정

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

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

여기서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지를 나타내며 마름모의 면적을 말하며, E_S 는 구조물의 최대변형에너지로 빗금친 삼각형의 면적이다. β 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다. 그러나 지진하중을 받는 구조물은 여러 가지 효과들에 의하여 그림 1과 같은 이상화된 이력특성을 나타내지 못한다. 따라서 ATC-40과 FEMA-273에서는 이러한 구조물의 이력특성을 반영하기 위하여 식(5)의 우변과 같이 감쇠조정계수(κ)를 사용하여 유효감쇠비를 조정한다.

기존의 연구⁽⁶⁾⁽⁷⁾에 따르면 선형 응답스펙트럼을 이용하는 경우 항복 후 강성이 작을수록 시간이력해석 결과와 많은 오차를 보이므로 비선형 이력거동을 하는 구조물의 응답을 좀 더 정확하게 산정하기 위해서는 비탄성 응답스펙트럼을 이용하여야 한다. 그림 2는 대표적인 비탄성 설계응답스펙트럼인 Newmark-Hall의 스펙트럼⁽¹⁰⁾이며, 그림 2에서 $a-b-c-d-e-f$ 의 그래프는 탄성 설계스펙트럼을 나타내고 이 스펙트럼을 주기구간별로 식(6-1)의 R_y 로 나누면 변위연성도(μ)의 $a'-b'-c'-d'-e'-f$ 의 비탄성 설계응답스펙트럼을 작성할 수 있다.

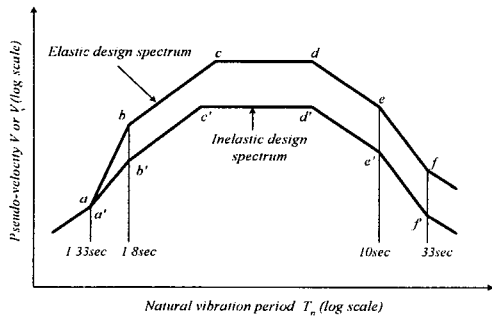


그림 2. Newmark-Hall 비탄성 설계응답스펙트럼

$$\begin{aligned} R_y &= 1 & T_n < T_a \\ &= (2\mu - 1)^{\beta/2} & T_a < T_n < T_b \\ &= \sqrt{2\mu - 1} & T_b < T_n < T_c \\ &= \frac{T_n}{T_c} \mu & T_c < T_n < T_c \\ &= \mu & T_n > T_c \end{aligned} \quad (6-1)$$

$$\beta = \frac{\ln(T_n/T_a)}{\ln(T_b/T_a)} \quad (6-2)$$

3. 소성감쇠기의 거동특성

소성감쇠기가 설치된 구조물의 힘-변위 관계는 그림 3과 같이 간단히 표현할 수 있다. 서로 다른 강성과 항복강도를 가진 감쇠기와 구조물이 합쳐져 전체 시스템의 거동은 2개의 항복점을 갖는 거동을 나타낸다.⁽⁸⁾ 소성감쇠기의 성능을 좌우하는 주요 변수는 감쇠기의 항복하중 및 항복변위, 강성비 등이며 이러한 변수들은 소성감쇠기의 설계 변수로 고려되고 있다. 감쇠기의 항복강도, 항복변위, 강성을 각각 F_{by}, D_{by}, K_b 로 나타내고, 구조물의 횡방향에 대한 항복강도, 항복변위, 강성을 F_{sy}, D_{sy}, K_s 라고 하면, 전체 시스템의 항복점 F_{y1} 과 F_{y2} 는 식(7)과 같다. 또한 강성비(SR)와 강도비(β)는 식(8)과 같이 정의한다.

$$F_{y1} = F_{by} + K_s \cdot D_{by} \quad F_{y2} = F_{by} + F_{sy} \quad (7)$$

$$SR = \frac{K_b}{K_s} \quad \beta = \frac{F_{by}}{F_{y2}} \quad (8)$$

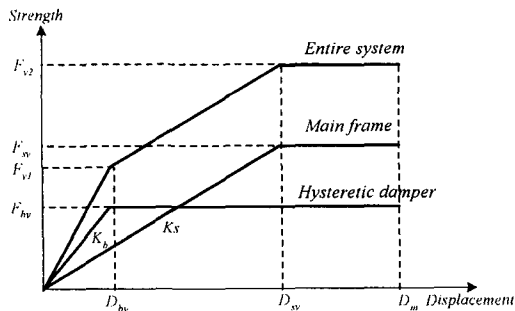


그림 3. 감쇠기가 설치된 구조물의 이력거동

소성감쇠기가 설치된 구조물의 이력거동에 의하여 소산된 에너지를 이용하여 구한 등가점성감쇠비는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$\frac{\pi}{2} \xi_{eq} = 1 - \frac{D_{sy} F_{sy}}{D_m (F_{hy} + F_{sy})} - \frac{D_{by} F_{by}}{D_m (F_{by} + F_{sy})} \quad (9)$$

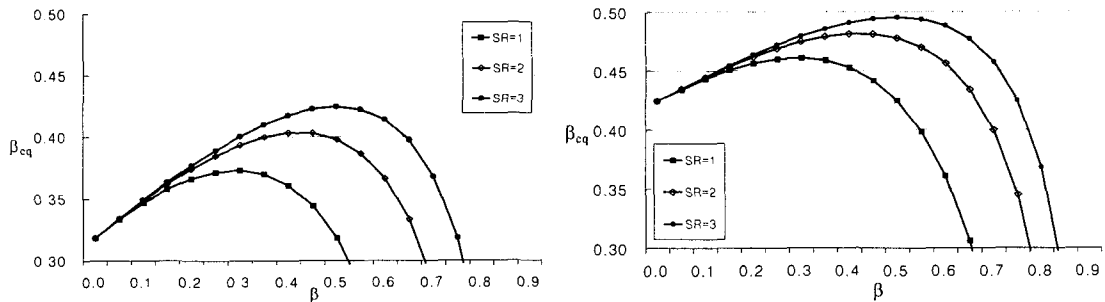
여기서 감쇠기와 구조물의 연성률을 각각 μ_b , μ_s 라고 하면 식(10)과 같은 관계가 성립한다.

$$\mu_b = \frac{D_m}{D_{by}} = \mu_s \frac{D_{sy}}{D_{by}} \quad (10)$$

식(7), 식(8), 식(10)을 이용하면 식(9)를 식(11)과 형태로 정리할 수 있다.

$$\frac{\pi}{2} \xi_{eq} = 1 - \frac{1}{\mu_s} (1 - \beta) - \frac{1}{\mu_s SR} \left(\frac{\beta^2}{1 - \beta} \right) \quad (11)$$

그림 4는 식(11)을 이용하여 구조물의 연성률에 대하여 각 강성비별로 강도비(β)와 등가점성감쇠비(ξ_{eq})의 변화를 보여주고 있다. 여기서 Inoue 등⁽³⁾은 각 강성비에 대하여 등가점성감쇠비가 최대가 되는 강도비를 최적강도비로 산정하였다.



(a) $\mu_s = 2$ 인 경우

(b) $\mu_s = 3$ 인 경우

그림 4. 강도비와 등가점성감쇠비의 관계

4. 예제 구조물과 지진하중

예제 구조물은 횡방향 자유도만 가진 단자유도계이며 항복이후의 강성이 없는 완전 이선형 이력특성을 갖는 것으로 가정하였다. 각 구조물의 특성에 따른 응답의 변화와 본 연구에서 제시하고자 하는 목표변위에 부합되도록 설계된 감쇠기의 적합성을 검증하기 위하여 탄성주기(T)가 0.1초, 0.5초, 1초인 각 구조물에 대하여 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비(e)를 0.3과 0.5로 하여 해석을 수행하였다.

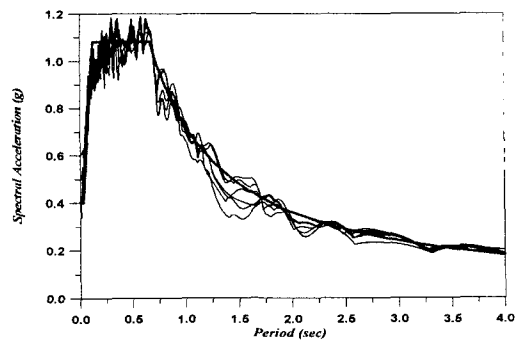


그림 5. 설계스펙트럼과 인공지진의 응답스펙트럼

본 논문에서는 최대지반가속도(peak ground acceleration)를 0.4g로 조정한 Newmark-Hall의 탄성 설계응답스펙트럼⁽¹⁰⁾과 비탄성 설계응답스펙트럼⁽¹⁰⁾을 이용한 비선형 정적해석을 수행하였다. 비선형 정적해석법에 의한 결과를 검토하기 위하여 수행한 비선형 시간이력해석에 필요한 가속도 시간이력은 Newmark-Hall의 설계응답스펙트럼에 부합되도록 생성한 인공지진의 가속도 시간이력을 이용하였다.

인공지진은 Gasparini와Vanmarcke⁽¹¹⁾가 제안한 정현파 중첩을 이용한 프로그램인 SIMQKE를 이용하여 구하였다. 총 6개의 인공지진을 생성하여 각 해설결과를 평균한 값을 시간이력해석의 결과로 이용하였다. 인공지진의 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 비교하면 그림 5와 같고 인공지진의 가속도 시간이력은 그림 6과 같다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 생성된 인공지진은 설계스펙트럼과 잘 부합됨을 알 수 있다.

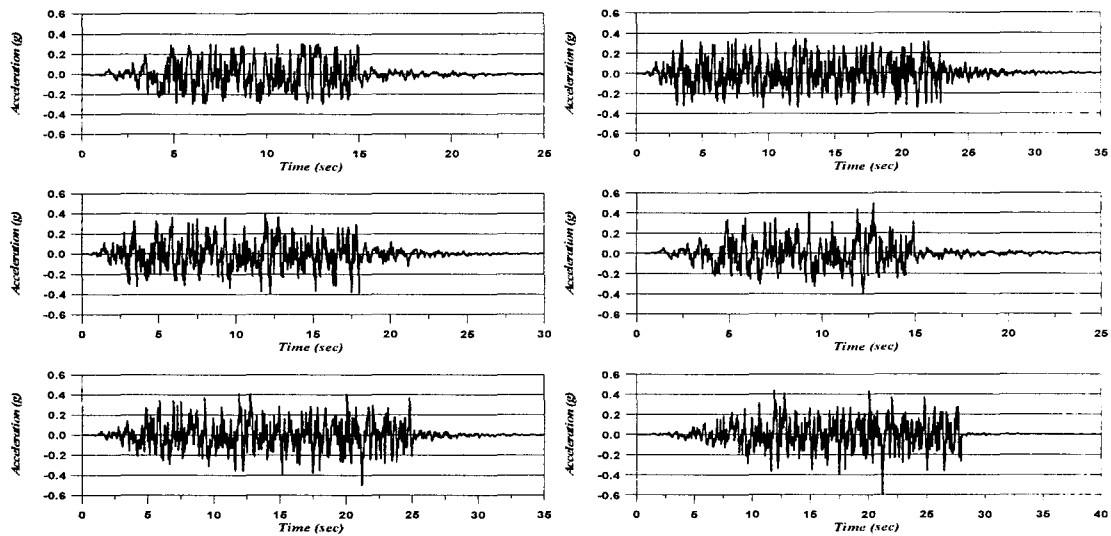


그림 6. 인공지진의 가속도 시간이력

5. 구조물의 성능점과 감쇠기의 적정 크기 산정

탄성 설계스펙트럼과 비탄성 설계스펙트럼을 이용하여 예제 구조물의 변위응답(D_C), 가속도응답(A_C), 유효감쇠비를 구하였다. 그림 7과 표 1은 탄성 설계스펙트럼을 이용하여 $T=0.5$, $e=0.3$ 인 구조물의 응답을 구하는 과정을 나타내었다. 탄성 설계스펙트럼을 이용한 경우는 각 감쇠비의 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교차점으로부터 변위와 가속도 응답을 구한 후 식(5)를 이용하여 유효감쇠비를 구하였다. 감쇠조정계수는 구조물이 완전한 이선형 이력거동을 하는 것으로 가정하였기 때문에 $\kappa=1.0$ 을 적용하였다. 이렇게 구한 유효감쇠비를 이용하여 다시 요구스펙트럼을 작성하고 능력스펙트럼과의 교점에서 새로운 응답을 구하였다. 산정한 유효감쇠비가 요구스펙트럼의 감쇠비와 같을 때까지 감쇠비를 변화시켜 가면서 계산을 반복 수행하였다.

비탄성 설계스펙트럼을 이용한 경우에는 그림 8과 표2에 나타난 것과 같이 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교점에서 구한 변위(D_j)를 구조물의 항복변위(D_y)로 나누어 변위연성도(μ)를 구한다. 산정한 변위연성도가 요구스펙트럼의 연성도와 일치하면 그 때의 변위(D_j)와 가속도(A_j)가 구조물의 성능점이 된다. 두 방법에 의하여 구한 변위는 탄성 설계스펙트럼을 이용한 경우 34.02mm이고 비탄성 설계스펙트럼에 의한 응답은 89.33mm이다. Mahin과 Lin⁽¹²⁾이 개발한 단자유도계의 비선형 시간이력해석 프로그램인 NONSPEC을 이용하여

수행한 시간이력해석에 의한 변위(D)는 89.92mm로 각 방법과는 60%와 0.007%의 오차를 보였다.

각 주기별 해석 결과는 표 3과 표 4와 같다. 해석결과를 살펴보면 탄성 설계스펙트럼을 이용한 경우는 모든 경우에 시간이력해석 결과와 많은 오차를 보였다. 그러나 비탄성 설계스펙트럼을 이용한 경우는 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도의 비(e)가 0.3인 경우에는 다소 오차를 보였지만 대부분 시간이력해석 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

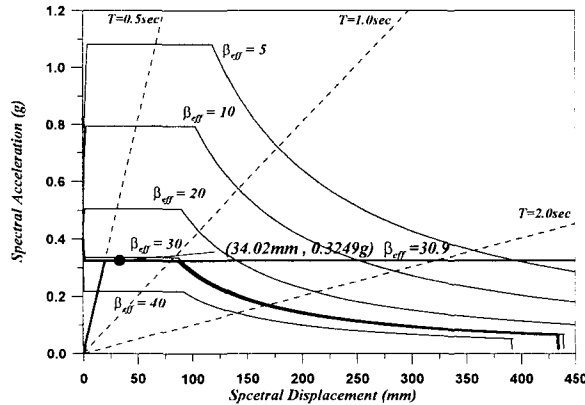


그림 7. 탄성 설계스펙트럼을 이용한 응답산정

표 1. 탄성 설계스펙트럼을 이용한 응답산정

| 감쇠비 | D_y | A_y | D_i | A_i | β_{eff} (%) |
|-------------|-------|-------|--------------|---------------|-------------------|
| 5 | 20.18 | 0.325 | 395.33 | 0.3249 | 65.4 |
| 10 | | | 251.87 | 0.3249 | 63.6 |
| 20 | | | 140.53 | 0.3249 | 59.5 |
| 30 | | | 90.53 | 0.3249 | 54.5 |
| 40 | | | 13.467 | 0.2176 | 4.7 |
| 30.9 | | | 34.02 | 0.3249 | 30.9 |

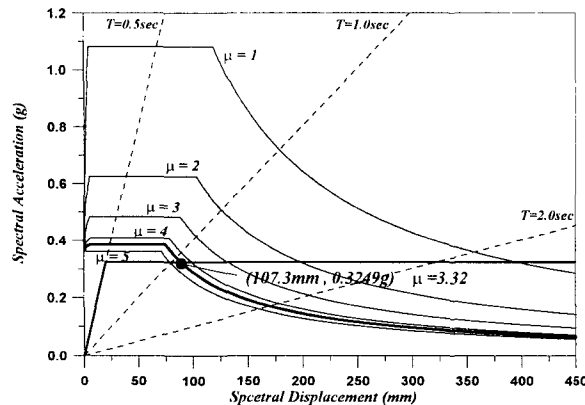


그림 8. 비탄성 설계스펙트럼을 이용한 응답산정

표 2. 비탄성 설계스펙트럼을 이용한 응답산정

| 연성도 | D_y | A_y | D_i | A_i | μ |
|-------------|-------|-------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | 20.18 | 0.325 | 395.33 | 0.3249 | 19.59 |
| 2 | | | 197.87 | 0.3249 | 9.81 |
| 3 | | | 131.73 | 0.3249 | 6.53 |
| 4 | | | 98.8 | 0.3249 | 4.90 |
| 5 | | | 79.07 | 0.3249 | 3.92 |
| 4.43 | | | 89.33 | 0.567 | 4.43 |

표 3. 각 주기별 탄성 설계스펙트럼을 이용한 해석결과 단위: mm

| T | e | D_y | A_y | D_c | D_t | D_c/D_t | β_{eff} (%) |
|-----|-----|--------|-------|---------------|---------------|-----------|-------------------|
| 0.1 | 0.3 | 0.681 | 0.274 | 1.28 | 13.41 | 0.096 | 34.9 |
| | 0.5 | 1.135 | 0.457 | 1.56 | 6.02 | 0.260 | 22.48 |
| 0.5 | 0.3 | 20.178 | 0.325 | 34.02 | 89.92 | 0.378 | 30.9 |
| | 0.5 | 33.629 | 0.542 | 42.56 | 73.39 | 0.580 | 18.36 |
| 1.0 | 0.3 | 53.583 | 0.216 | 105.87 | 251.23 | 0.421 | 36.44 |
| | 0.5 | 89.305 | 0.359 | 119.87 | 176.15 | 0.680 | 21.23 |

표 4. 각 주기별 비탄성 설계스펙트럼을 이용한 해석결과 단위: mm

| T | e | D_y | A_y | D_c | D_t | D_c/D_t | μ |
|-----|-----|--------|-------|---------------|---------------|-----------|-------|
| 0.1 | 0.3 | 0.681 | 0.274 | 6.27 | 13.41 | 0.467 | 9.20 |
| | 0.5 | 1.135 | 0.457 | 3.76 | 6.02 | 0.624 | 3.31 |
| 0.5 | 0.3 | 20.178 | 0.325 | 89.33 | 89.92 | 0.993 | 4.43 |
| | 0.5 | 33.629 | 0.542 | 84.07 | 73.39 | 1.146 | 2.50 |
| 1.0 | 0.3 | 53.583 | 0.216 | 178.4 | 251.23 | 0.71 | 3.33 |
| | 0.5 | 89.305 | 0.359 | 178.53 | 176.15 | 1.014 | 2.00 |

표 5. 감쇠기의 적정 강성비와 강도비

| T | e | D_{target} | SR=1 | | SR=2 | | SR=3 | |
|-----|-----|--------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| | | | β_d | D_t | β_d | D_t | β_d | D_t |
| 0.1 | 0.3 | 5.016 | 0.1 | 8.78 | 0.09 | 8.88 | 0.09 | 8.92 |
| | 0.5 | 3.006 | 0.07 | 3.95 | 0.07 | 3.95 | 0.07 | 3.95 |
| 0.5 | 0.3 | 71.464 | 0.22 | 54.20 | 0.21 | 54.84 | 0.20 | 55.48 |
| | 0.5 | 67.256 | 0.1 | 54.58 | 0.09 | 53.04 | 0.09 | 53.04 |
| 1.0 | 0.3 | 142.720 | 0.33 | 171.17 | 0.29 | 176.15 | 0.26 | 180.87 |
| | 0.5 | 142.824 | 0.31 | 135.23 | 0.27 | 137.03 | 0.26 | 136.95 |

이러한 결과를 바탕으로 비탄성 스펙트럼을 이용한 해석 결과를 바탕으로 목표변위를 설정하고 이를 만족하기 위하여 필요한 소성감쇠기의 적정 강도비와 강성비를 산정하는 해석을 수행하였다. 목표변위 (D_{target})는 표 4에서 산정한 변위의 20%를 제어하는 것으로 설정하였다. 먼저 소성감쇠기의 강성비 (SR)를 1, 2, 3으로 변화시켜가면서 구조물의 항복강도에 대한 필요한 감쇠기의 항복강도비 (β_d)를 구하였다. 가정된 강성비와 강도비를 가진 감쇠기를 설치한 구조물의 변위연성비와 요구스펙트럼의 변위연성비가 일치하는 값을 구하기 위하여 강도비를 변화시켜가면서 응답을 찾았다. 산정된 강성비와 항복강도를 가진 감쇠기를 설치하고 수행한 시간이력해석 결과 (D_t)를 살펴보면 $T=0.1$ sec 인 경우와 $T=1.0$, $e=0.3$ 인 구조물은 목표변위까지 제어되지 못한 것을 알 수 있다. 이것은 표 4의 해석결과를 살펴보면 시간이력해석에 의한 구조물의 변위보다 비탄성 설계스펙트럼을 이용한 해석 결과가 과소 평가되었는데, 이 결과를 바탕으로 제어를 위하여 필요한 감쇠기의 크기를 산정하였기 때문으로 사료된다. 그러나 다른 구조물의 결과에서 알 수 있듯이 시간이력해석 결과와 비교적 잘 일치된 구조물의 경우에는 설계된 감쇠기를 설치하였을 때 목표변위까지 잘 제어됨을 알 수 있다. 또한 산정된 항복강도비가 0.2이하인 경우에는 강성비에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이것은 그림 4에서 항복강도비가 대략 0.2이하인 경우에는 강성비에 따라 변하지 않는 결과와 일치함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 비탄성 설계스펙트럼을 이용한 능력스펙트럼법을 이용하여 목표변위까지 구조물의 변형을 제어하기 위하여 필요한 소성감쇠기의 강성비와 강도비를 산정하는 방법을 제시하였다. 본 연구에 의하면 항복 후 강성비가 작은 구조물의 경우에는 비탄성 응답스펙트럼을 이용하는 것이 구조물의 비탄성 응답을 좀더 정확하게 산정할 수 있음을 알 수 있었다. 탄성 설계스펙트럼을 이용한 경우 주기가 짧을수록 그 오차가 더욱 커졌다. 또한 본 연구에서 제시한 방법에 의하여 성능수준을 만족하기에 적합한 강성비와 강도비를 가

진 소성감쇠기를 설치하였을 때 제어하고자하는 목표까지 잘 제어됨을 알 수 있다. 그러나 능력스펙트럼법을 이용한 감쇠기의 설계시 제어되기 전 구조물의 초기 응답이 적절하게 평가되지 못하면 이로 인하여 필요한 제어력에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 변위연성도에 따른 강도비가 일정값 이하가 되면 기존의 연구결과에서와 같이 강도비의 변화는 제어력에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Xia, Ch., and Hanson, R. D., "Influence of ADAS element parameter on building seismic response", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, July 1992, pp. 1903-1918.
2. Tsai, K. C., Chen, H.W., Hong, C. P. and Su, Y.F., "Design of steel triangular plate energy absorber for earthquake resistant-Construction," *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Vol. 9, No. 3, August 1993.
3. 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.
4. 김진구, 이강준, "탄소성 부재의 적정강성비 선정에 관한 연구," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 20권 1호, 2000, pp. 43-46.
5. 김진구, 이강준, "가새형 소성변형 감쇠기의 설계 방법에 관한 연구," 한국전산구조공학회 가을 학술발표대회 논문집, 13권 25호, 2000, pp. 265-272.
6. Chopra, A. K., and Goel, R. K., "Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures : SDF Systems," Report No.PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley.
7. 김진구, 최현훈, "능력스펙트럼법을 이용한 점성감쇠기의 적정 감쇠비 산정," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 1호, 2001, pp.45~52.
8. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
9. FEMA, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
10. Chopra, A.K., *Dynamics of structures*, Prentice Hall, 1995.
11. 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
12. Mahin, S.A. and Lin, J., *Inelastic response spectra for single degree of freedom systems*, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1983.