

구조물의 내진보강을 위한 부가 감쇠장치의 설계

Design of Supplemental Dampers for Seismic Reinforcement of Structures

김진구*
Kim, Jin-Koo

최현훈**
Choi, Hyun-Hoon

Abstract

A design procedure for velocity-dependent supplemental dampers, such as viscous or viscoelastic dampers, required to meet the desired performance objectives was developed using displacement spectra. The amount of supplemental damping required to satisfy given performance limit state was obtained first from the nonlinear static procedure using displacement spectra, then dampers were appropriately distributed throughout the stories to realize the required damping. The proposed method was applied to multi-story steel frames, and the structures were analyzed by time history analysis to validate the accuracy of the design procedure. According to the analysis results the maximum displacements of the model structures retrofitted by the supplemental dampers turned out to be restrained well within the given target values.

요 지

목표 성능수준을 만족하기 위하여 필요한 점성과 점탄성감쇠기와 같은 속도-의존형 부가 감쇠기의 설계절차를 변위스펙트럼을 이용하여 제시하였다. 주어진 성능 한계상태를 만족하기 위하여 필요한 부가 감쇠량은 변위스펙트럼을 이용한 비선형 정적해석에 의해 산정한 다음 필요 감쇠비를 달성하기 위하여 각 층에 적당하게 분배하였다. 다층 철골조 건물에 제안된 방법을 적용하고 설계절차의 정확성을 검증하기 위하여 시간이력 해석을 수행하였다. 해석결과에 의하면 부가 감쇠기로 보강한 예제 구조물의 최대 변위가 목표변위까지 잘 제어됨을 알 수 있다.

Keywords : Seismic retrofit, Displacement based Seismic design, Supplemental dampers

핵심 용어 : 내진 보강, 변위에 기초한 내진설계, 부가 감쇠장치

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수
** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 박사과정

E-mail : glocal@dreamwiz.com 031-290-7563

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

지진으로 인한 구조물의 응답과 손상을 줄이기 위하여 감쇠능력을 증가시켜 주는 에너지 소산장치를 설치함으로써 구조물의 내진성능을 직접적으로 향상시킬 수 있다. 특히 점성감쇠기, 점탄성감쇠기와 같은 속도-의존형 감쇠장치는 구조물의 감쇠가 증가함에 따라 최대 가속도 응답이 현저하게 줄어드는 주기가 0.5 초~3초인 속도에 민감한 스펙트럼 영역에서 매우 효과적이다.⁽⁸⁾

FEMA-273 보고서에서는 에너지 소산장치가 설치된 구조물의 비선형 정적해석법을 제안하고 있다.⁽¹¹⁾ 구조물의 해석결과 성능수준을 만족하지 않는다면 감쇠기의 양이나 위치를 수정한 다음 다시 해석을 수행한다. 이러한 과정은 성능수준을 만족하는 최종단계에 도달할 때까지 반복하게 된다. 그러나 일련의 시행착오를 통한 방법은 비선형 해석에 많은 계산 시간과 노력이 소요된다. 이러한 문제점 때문에 특히 초기해석과 설계단계에서 보다 간편하지만 신뢰할만한 방법이 필요하다.

이를 위하여 김진구 등은 구조물의 능력곡선과 지진의 요구스펙트럼을 하나의 그래프로 나타낸 ADRS (Acceleration - Displacement Response Spectrum) 형식을 이용하여 구조물의 보유능력을 평가하고 성능수준을 향상시키기 위하여 필요한 감쇠량을 산정한 다음, 다자유도계에서 각 층별로 필요한 감쇠기를 설계하는 방법을 제안하였다.⁽³⁾ 이 방법에서는 하나의 그래프에서 응답을 구하기 위하여 능력곡선과 요구스펙트럼을 가속도-변위의 형태로 변환하여야 하는 과정을 거쳐야 한다. Lin 등은 변위스펙트럼을 이용하여 밀면 전단력을 산정한 다음 선형 정적해석법을 이용하여 각 층별 층지진 하중에 저항할 수 있도록 구조부재(보와 기둥)와 감쇠장치를 설계하는 절차를 제안하였다.⁽⁴⁾ 그러나 이 방법은 초기 설계단계에서 필요한 감쇠비를 가정하여야 하고 목표변위를 만족하기 위하여 필요한 구조부재의 단면을 재설계하여야 한다. 본 연구에서는 직접변위설계법^{(5),(6)}의 기본 개념을 바탕으로, 변위스펙트럼을 이용하여 구조물의 내진성능을 평가하고, 설계목표를 달성하기 위해 필요한 감쇠비를 구한 후, 속

도-의존형 감쇠기의 크기를 결정하는 일련의 설계절차를 제안하였다. 제안된 절차는 내진성능 평가 및 보강 설계 단계에서 변위스펙트럼을 사용함으로써, 일관성을 유지하고 해석 및 설계절차를 간소화할 수 있다는 장점이 있다.

2. 감쇠기의 모델링

본 연구에서 사용한 점성감쇠기와 점탄성감쇠기의 수학적 모델은 Fig. 1과 같다.

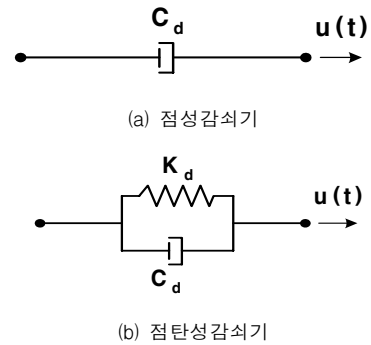


Fig. 1 속도-의존형 감쇠기의 모델링

점성감쇠기의 거동은 선형 dashpot으로 모델링하였다. 이것은 점성감쇠기의 감쇠력은 식(1)과 같이 속도의 α 승에 비례하게 된다.

$$F = C_o \dot{u}^\alpha \quad (1)$$

여기서 C_o 는 감쇠기의 감쇠상수이고, α 가 0.5~2.0의 영역에서는 강성을 갖지 않는다. FEMA-274⁽⁷⁾에서는 초기 설계단계에서 $\alpha=1$ 을 사용할 것을 제안하고 있다.

철판 사이에 부착된 얇은 두께의 점탄성 재료로 구성된 점탄성감쇠기의 동적거동은 병렬로 연결된 강성과 dashpot으로 나타내었다. 감쇠기의 선형 강성과 감쇠는 식(2)와 같이 등가강성과 등가감쇠로 나타낼 수 있다.

$$K_d = \frac{G'(\omega)A}{t}, \quad C_d = \frac{G''(\omega)A}{\omega t} \quad (2)$$

여기서 $G'(\omega)$ 과 $G''(\omega)$ 은 전단저장계수와 전단손실계수이다. A 와 t 는 각각 점탄성감쇠기의 전체 전단면적과 두께를 나타낸다. 그리고 ω 는 하층의 진동수이다. 일반적으로 시간이력해석을 수행할 때 구조물의 기본진동수를 이용한다.

3. 감쇠기의 설계절차

3.1 구조물의 변위응답 산정

기존 내진성능 평가법 중 대표적인 방법인 능력스펙트럼법은 pushover 해석에 의한 최상층 변위-밀면전단력의 pushover 곡선과 주기와 응답(가속도, 속도, 변위)의 형태로 표현되는 요구스펙트럼을 하나의 그래프에 나타내어 응답을 산정하기 위하여 가속도-변위 형식의 능력곡선과 요구곡선을 사용하여 최종 성능점을 산정할 때까지 반복계산을 수행한다. 김진구와 방성혁⁽¹⁾은 기존 직접변위설계법을 역으로 적용함으로써 지진에 의한 변위 요구량과 구조물의 소성변형 능력이 같은 위치에서 성능점을 산정하는 방법을 제안하였다. 제안된 절차는 pushover 곡선과 요구스펙트럼을 ADRS 형식으로 변환하는 과정이 필요 없고 변위응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 응답을 산정할 수 있다. 또한 해석절차에서 사용된 변위응답스펙트럼을 이후 보강설계 과정에서 사용할 수 있기 때문에, 제안된 설계절차와의 일관성을 유지할 수 있는 장점이 있다. 해석절차를 요약하면 다음과 같다.

- Step 1. Pushover 해석을 수행하여 밀면전단력과 최상층변위의 능력곡선을 구한다(Fig. 2).
- Step 2. 능력곡선을 Fig. 3과 같이 등가에너지 개념에 의해 면적 A_1 과 A_2 가 같아지도록 bilinear 곡선으로 나타낸 다음 초기 탄성 강성(K_e), 항복시 밀면전단력(V_y), 항복

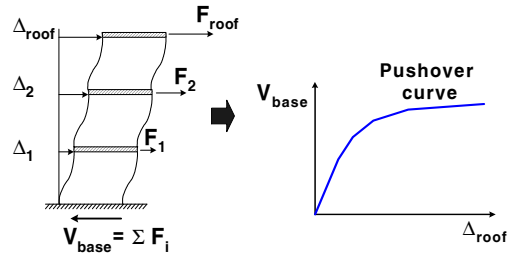


Fig. 2 Pushover 해석에 의한 능력곡선

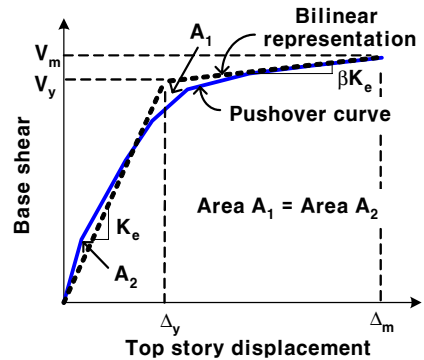


Fig. 3 능력곡선을 bilinear 곡선으로 변환

변위(Δ_y), 항복후 강성비(β)를 산정한다.

- Step 3. 구조물의 최대변위(Δ_m)을 가정한 다음 식(3)을 이용하여 변위연성비(μ), 최대변위에서의 밀면전단력(V_m)을 산정한다. 단자유도계에서 작성된 스펙트럼을 이용하여 응답을 산정하기 위하여 최대변위와 밀면전단력을 식(4)를 이용하여 등가단자유도계의 값으로 변환한 다음 최대변위에서의 유효주기(T_{eff})를 구한다.

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (3)$$

$$S_{dm} = \frac{\Delta_m}{\Gamma \phi_r} \quad (4a)$$

$$S_{am} = \frac{V_m}{M^*} \quad (4b)$$

$$T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{S_{dm}}{S_{am}}} \quad (5)$$

최대변위의 초기값은 주어진 성능목표에 해당하는 목표변위를 사용하는 것이 편리하다. ESDOF 변환식에서 ϕ_r 는 최상층의 모드형상계수이고, I 와 M^* 은 각각 모드참여계수와 유효모드질량이다.

Step 4. 구조물의 이력특성을 고려한 유효감쇠비 (ζ_{eff})를 산정한다. 유효감쇠비는 식(6)과 같이 고유감쇠비(ζ_i)와 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비(ζ_{eq})의 합으로 나타낼 수 있다. 등가감쇠비는 Step 2와 3에서 산정한 변위연성비(μ)와 항복 후 강성비(β)를 식(7)에 대입하여 산정한다.

$$\zeta_{eff} = \zeta_i + \zeta_{eq} \quad (6)$$

$$\zeta_{eq} = \frac{2(\mu-1)(1-\beta)}{\pi\mu(1+\beta\mu-\beta)} \quad (7)$$

Step 5. 이전 단계에서 구한 유효감쇠비를 이용하여 설계지진의 변위응답스펙트럼을 작성한 다음 유효주기(T_{eff})에 해당하는 최대변위(S'_{dm})를 스펙트럼으로부터 구한다.

Step 6. 산정한 최대변위를 식(4a)를 이용하여 다자도계의 변위로 변환한 다음 pushover 곡선에서 그 변위에 해당하는 밀면전단력을 산정한다. 최대변위가 수렴할 때까지 Step 3에서 Step 5의 과정을 반복 수행한다.

Step 7. 최상층 변위가 Step 6에서 산정된 최종 변위(Δ_m)에 도달할 때까지 pushover 해석을 수행하여 구조물의 응답을 산정한다.

3.2 목표변위에서 요구되는 감쇠비의 산정

본 절에서는 주어진 성능목표를 만족하기 위하여 필요한 부가 감쇠량을 변위스펙트럼을 이용하여 산정한 후, 필요한 감쇠기를 설계할 수 있는 합리적인 절차를 제안하였다.

목표변위(S_{dt})와 유효주기의 교차점을 지나는 변위응답스펙트럼의 감쇠비는 성능목표를 만족하기 위한 구조물의 전체 유효감쇠비에 해당한다. 감쇠장치가 설치된 구조물에 대한 유효감쇠비는 다음과 같이 세 가지 요소로 구성되어 있다: (1) 구조물의 고유감쇠비(ζ_i) (2) 구조부재의 비탄성 변형 때문에 발생하는 등가감쇠비(ζ_{eq}) (3) 감쇠기에 의해 추가되는 감쇠비(ζ_d)

구조물의 등가감쇠비는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 1회의 이력거동에 의하여 소산된 에너지(E_d)와 최대 변형에너지(E_s)의 비로 식(8)과 같다.

점성감쇠기가 설치된 경우 구조물의 감쇠만 증가시키기 때문에 능력곡선은 변하지 않지만 점탄성감쇠기가 설치되면 Fig. 5와 같이 감쇠기에 의해 추가되는 강성 때문에 능력곡선이 변하게 된다.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_d}{E_s} = \frac{S_{av}S_{dt} - S_{dv}S_{at}}{\pi S_{at}S_{dt}} : \text{점성감쇠기} \quad (8a)$$

$$= \frac{S_{avd}S_{dt} - S_{dvd}S_{atd}}{\pi S_{atd}S_{dt}} : \text{점탄성감쇠기} \quad (8b)$$

여기서,

$S_{avd} = S_{av} + K_d S_{dv}$, $S_{atd} = S_{at} + K_d S_{dt}$ 이고 K_d 는 점탄성감쇠기의 등가강성이다. 감쇠기에 의해서 추가되는 감쇠비는 구조물의 비탄성 거동이 증가함에 따라 커지는 감쇠기의 감쇠효과를 고려하기 위하여 탄성거동시 감쇠기의 감쇠비에 유효주기(T_{eff})에 대한 탄성주기(T_e)의 비를 곱해줌으로써 이를 고려할 수 있다.⁽⁹⁾ 따라서 목표성능 수준을 만족하기 위하여 필요한 감쇠비(ζ_d)는 다음 식과 같다.

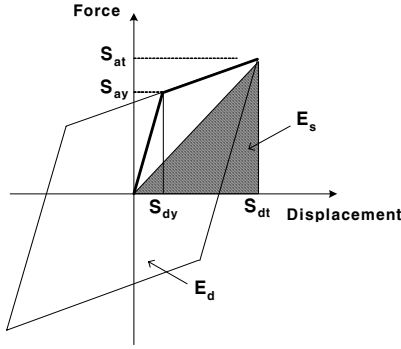


Fig. 4 등가감쇠비의 산정

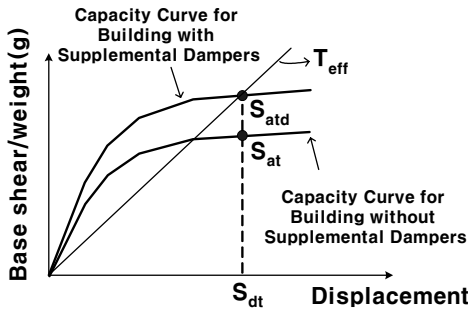


Fig. 5 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 능력곡선

$$\zeta_d = (\zeta_{eff} - \zeta_{eq} - \zeta_i) \frac{T_e}{T_{eff}} \quad (9)$$

여기서 유효감쇠비(ζ_{eff})와 등가감쇠비(ζ_{eq})는 각각 목표변위와 교차하는 변위응답스펙트럼의 감쇠비와 식(8)에서 구할 수 있다.

3.3 감쇠기의 층별 분배

ESDOF 시스템에서 식(9)를 이용하여 구한 필요 감쇠비(ζ_d)를 다층구조물에 분배하여야 한다. 이를 위하여 등가감쇠비를 나타낸 식(8)을 다시 이용하면 구조물의 이력거동에 의하여 소산된 에너지(E_d) 대신 감쇠기에 의하여 소산된 에너지(E_{dv})를 대입하여 구할 수 있다.

$$\zeta_d = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{dv}}{E_s} \quad (10)$$

감쇠기가 보와 θ 각을 이루고 설치되어 있다면 감쇠기에 의해서 소산되는 에너지(E_{dv})는 다음과 같다.

$$E_{dv} = \frac{2\pi^2}{T_{ed}^2} \sum_{i=1}^N \{C_{di} \cos^2 \theta_i (\Delta_i - \Delta_{i-1})^2\} \quad (11)$$

여기서 T_{ed} 는 감쇠기가 설치된 구조물의 1차모드 주기, C_{di} 와 Δ_i 는 각각 i 층에 설치된 감쇠기의 감쇠상수와 최대 횡방향 변위를 나타낸다. N 은 구조물의 층수를 나타낸다. 다층구조물에서 최대 변형에너지(E_s)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_s = \frac{2\pi^2}{T_{ed}^2} \sum_{i=1}^N m_i \Delta_i^2 \quad (12)$$

여기서 m_i 는 i 층의 질량을 나타낸다. 감쇠기에 의한 감쇠비는 식(11)과 (12)를 식(10)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\zeta_d = \frac{1}{4\pi} \frac{T_{ed}^2 \sum_{i=1}^N C_{di} \cos^2 \theta_i (\Delta_i - \Delta_{i-1})^2}{T_{ed}^2 \sum_{i=1}^N m_i \Delta_i^2} \quad (13)$$

위 식의 좌변은 ESDOF에서 식(9)를 이용하여 구한다. i 층에 설치된 점성감쇠기와 점탄성감쇠기의 감쇠상수(C_{di})는 식(13)을 감쇠상수에 대하여 정리한 식(14)로부터 직접적으로 구할 수 있다. 또한 점탄성 감쇠기의 강성(K_{di})은 식(14)에서 산정한 감쇠상수와 식(15)의 관계로부터 산정할 수 있다.

$$C_{di} = \frac{4\pi\zeta_d \sum_{j=1}^n m_j \Delta_j^2}{T_{ed} \sum_{i=1}^n \gamma_i \cos^2 \theta_i (\Delta_i - \Delta_{i-1})^2} \quad (14)$$

$$K_{di} = \frac{G'}{G''} C_{di} \quad (15)$$

여기서 C_{di} 은 1층에 설치된 감쇠기의 감쇠상수이고 γ_i 는 C_{di} 에 대하여 i 층에 설치된 감쇠기의 감쇠상수비를 나타낸다($C_{di} = \gamma_i C_{d1}$). 그러나 이 상태에서 성능 한계상태에 의해서 결정된 최상층 변위를 제외하고 최대 층변위는 알 수 없다. 따라서 식(13)과 (14)에서 층변위(Δ_i)는 가정하여야 한다. 가장 간단한 형태는 최대 층변위는 1차모드 형태나 pushover 해석에 의한 변형모드에 비례한다고 가정하는 것이다. 또한 층별 감쇠기의 분포형태도 결정하여야 한다.

점탄성감쇠기의 설계절차에서는 감쇠기의 강성 때문에 구조물의 강성이 커지기 때문에 반복해석이 필요하다. 이 경우 구조물의 능력곡선을 감쇠기에 의해 추가된 강성을 고려하여 다시 그려야한다. 이러한 과정을 수렴할 때까지 반복 수행한다.

3.4 설계절차의 요약

목표성능 수준에 부합되도록 구조물의 내진성능을 향상시키기 위하여 본 연구에서 제안한 설계절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- Step 1. 고유치 해석을 수행하여 고유주기와 모드 형상을 구한다. 모드형상을 이용하여 층진진 하중을 산정한 다음 pushover 해석에 의해 밀면전단력-최상층변위 곡선을 구한다. Pushover곡선을 Fig. 3과 같이 bilinear 곡선으로 나타낸 후 항복점을 구한다.
- Step 2. 성능한계 수준에 해당하는 최상층 목표변위를 결정한 다음 목표변위에서 밀면전단력을 산정한다. 식(4)와 (5)를 이용하여 ESDOF 시스템의 변위와 가속도, 유효주

기를 구한다.

- Step 3. 변위응답스펙트럼에서 목표변위와 유효주기의 교차점을 통과하는 스펙트럼의 감쇠비(ζ_{eff})를 구한다.
- Step 4. 능력곡선의 목표변위에서 변위연성비를 구한 다음 이를 식(8)에 대입하여 등가감쇠비를 산정한다.
- Step 5. 부가 감쇠장치의 필요한 감쇠비를 식(9)를 이용하여 산정한다.
- Step 6. 각 층별 감쇠기의 감쇠상수(점성 및 점탄성감쇠기)와 강성(점탄성감쇠기)을 식(14)와 (15)를 이용하여 구한다.
- Step 7. 점탄성감쇠기의 경우 감쇠기가 설치된 구조물의 능력곡선을 다시 작성한 다음, 수렴할 때까지 이러한 과정을 반복한다.

4. 다층 구조물에 적용

4.1 예제 구조물과 지진하중

해석을 위하여 Fig. 6과 같은 층고가 4m이고 경간의 길이가 6m인 10층과 20층 철골조 건물을 중력하중과 풍하중을 고려하여 설계하였다. 고정하중과 적재하중은 모든 층에서 일정하고 각각 5.295 kPa과 2.451 kPa이다. 기본설계풍속은 35 m/sec이다. 기둥과 보부재는 항복강도가 각각 323 MPa과 235 MPa인 강재를 사용하여 MIDAS-GEN⁽¹⁰⁾을 이용하여 설계하였다. 예제구조물의 동적특성은 Table 1과 같다.

응답스펙트럼은 「내진설계기준연구 II」⁽²⁾에서 제시하고 있는 2400년 재현주기를 갖는 S_E (연약한 토사지반)지반에 대한 표준 설계응답스펙트럼을 이용하였다. 설계된 감쇠기를 설치한 후 목표성능 수준의 만족여부를 시간이력해석을 통하여 확인하기 위해 SIMQKE⁽¹²⁾를 이용하여 설계스펙트럼에 부합되는 인공지진을 생성하였다(Fig. 7(a)). 인공지진의 응답스펙트럼을 나타낸 Fig. 7(b)를 보면 설계스펙트럼에 잘 부합됨을 알 수 있다.

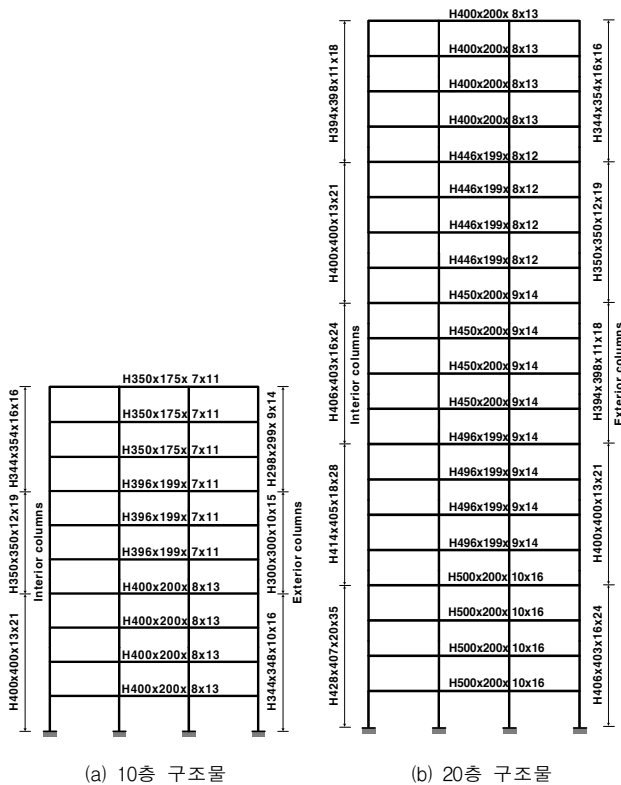
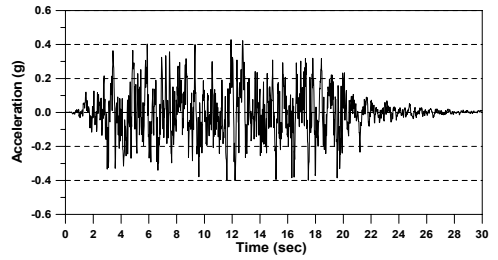
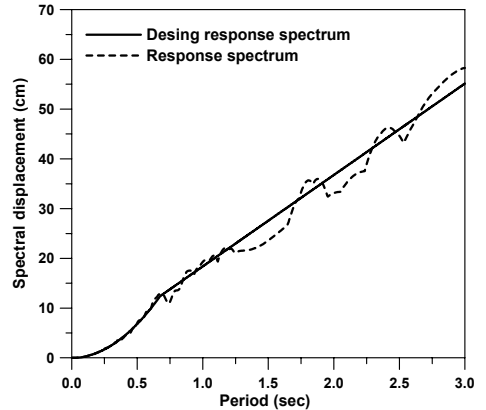


Fig. 6. 예제 구조물의 입면 및 부재 크기



(a) 인공지진의 가속도 시간이력



(b) 변위 설계스펙트럼과 응답스펙트럼
($C_a=0.44, C_v=0.74$)

Fig. 7 사용된 지진하중

Table 1 고유치 해석에 의한 예제 구조물의 동적 특성

구조물	모드	1	2	3
10층	주기(초)	1.41	0.49	0.28
	모드참여계수	1.34	0.51	0.30
	유효질량(%)	77.54	11.68	4.28
20층	주기(초)	3.24	1.12	0.65
	모드참여계수	1.37	0.56	0.32
	유효질량(%)	74.71	13.02	4.24

4.2 성능평가

Pushover 해석을 수행하여 3장에서 제시한 절차에 따라 예제 구조물의 내진성능을 평가하였다. Pushover 해석은 두 가지 형태의 층지진 하중을 이용하여 Drain-2D+(13)를 이용하여 수행하였다.

(i) 1차 모드형상에 비례한 층지진 하중:⁽¹⁴⁾

$$F_i = \frac{m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}} V \quad (16)$$

여기서 F_i , m_i , ϕ_{i1} 는 각각 i 층의 층지진 하중, 질량, 1차모드 모드형상계수이다. V 는 구조물의 밀면전단력이고, N 은 건물의 층수이다.

(ii) 고차모드의 영향을 고려하기 위하여 각 모드별 모드형상을 고려한 등가모드에 비례한 층지진 하중:⁽¹⁵⁾

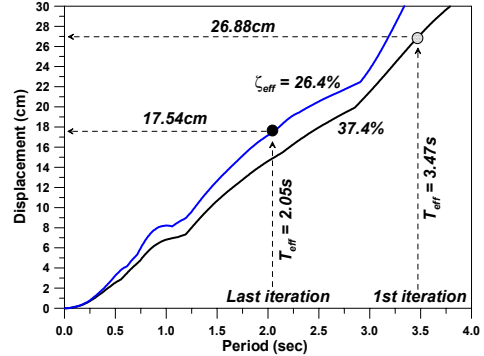
$$F_i = \frac{m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_i} V \quad (17a)$$

$$\overline{\phi}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\phi_{ij} \Gamma_j)^2}, \Gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^2} \quad (17b)$$

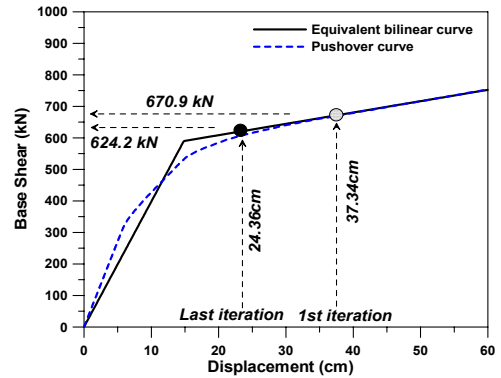
여기서 Γ_j 와 ϕ_{ij} 는 j 모드의 모드참여계수와 i 층의 모드형상계수이다. 등가모드($\overline{\phi}_i$)를 산정하기 위하여 각 구조물별로 5차 모드까지 고려하였다.

Pushover 곡선을 Fig. 3에서와 같이 bilinear 곡선으로 변환한 다음 항복점에서 항복변위와 항복시 밀면전단력을 산정하였다. 초기 성능점은 구조물 전체 높이의 2.5%인 100cm(10층 구조물), 200cm(20층 구조물)로 가정하였다. 등가모드에 의한 층지진 하중 분배법을 이용한 10층 구조물의 성능점 산정과정을 Fig. 8과 Table 2에 나타내었다. 제안된 해석법과 시간이력해석에 의한 최상층 변위를 비교한 Table 3을 보면 제안된 절차에 따라 산정한 결과가 시간이력해석 결과보다 과소평가 되었음을 알 수 있다. 그 오차는 각각 1차 모드를 이용한 경우 9.6%(10층)와 9.5%(20층)였다. 등가 모드를 이용한 경우 10층에서는 6%, 20층에서는 7.6%의 오차가 발생하였다. 층간변위를 나타낸 Fig. 9를 보면 등가모드를 이용한 경우 시간이력해석에 의한 층간변위와 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과

를 종합하면 등가모드를 이용한 경우가 시간이력해석 결과와 비교적 근사한 결과를 보였다.



(a) 변위응답스펙트럼



(b) pushover 곡선

Table 2 10층 구조물의 성능점 산정과정(등가모드)

변위 (cm)	μ	ζ_{eq} (%)	ζ_{eff} (%)	V_m (kN)	T_{eff} (sec)	오차 (%)
100.00	6.74	32.4	37.4	896.3	3.47	-
37.34	2.52	30.7	35.7	670.9	2.45	62.66
25.70	1.73	23.0	28.0	628.9	2.10	31.19
24.25	1.63	21.3	26.3	623.7	2.05	5.64
24.36	1.64	21.4	26.4	624.2	2.05	-0.47

Table 3 층지진 하중 형태에 따른 구조물의 응답

구조물	층지진 하중 형태	다자유도계		유효감쇠비 (%)	시간이력 해석결과 (cm)
		변위 (cm)	밀면전단력 (kN)		
10층	1차모드	23.44	583.5	25.1	25.92
	등가모드	24.36	624.2	26.4	
20층	1차모드	59.83	698.6	22.8	66.11
	등가모드	61.08	738.4	24.9	

Fig. 8 10층 구조물의 성능점 산정과정(등가모드)

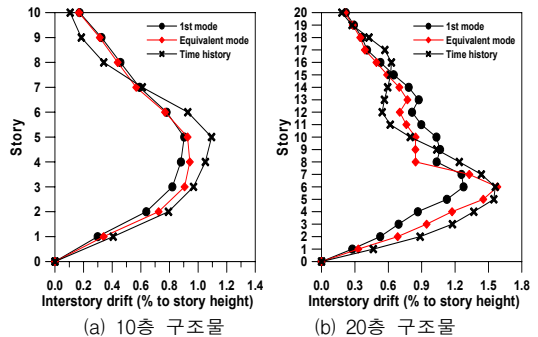


Fig. 9 예제 구조물의 최대층간변위

4.3 필요한 부가 감쇠비의 산정

구조물의 최대변위를 목표변위까지 제어하기 위하여 필요한 부가 감쇠비를 제안된 절차에 따라 산정하였다. 성능목표는 SEACOC Blue Book⁽⁶⁾에서 제시하고 있는 층간변위가 층고의 0.5%인 “기능수행” 수준으로 가정하였다. 보강되기 전 구조물의 층간변위(Fig. 9)를 보면 전체 구조물의 절반 이상의 층에서 목표변위보다 큰 변위가 발생하였음을 알 수 있다. 주어진 성능목표를 만족하기 위하여 10층 구조물(등가모드)에 필요한 점탄성감쇠기의 감쇠비를 산정하는 과정을 Table 4에 나타내었다. 이 경우 다자유도계에서 목표변위는 20cm이고 등가단자유도계의 변위로 치환하면 14.44cm가 된다. 이 변위에서 밀면전단력을 산정하여 식(4b)를 이용하여 단자유도계의 가속도값으로 변환하고 유효주기를 계산한 다음 변위와 유효주기의 교차점을 지나는 스펙트럼의 감쇠비(ζ_{eff})를 구한다. 이 값들을 식(9)에 대입하여 필요한 감쇠비(ζ_d)를 산정한다. 점성감쇠기의 경우 여기서 필요한 감쇠비를 산정하는 과정이 끝나지만 점탄성감쇠기가 설치되는 경우는 추가되는 강성에 의하여 Fig. 5와 같이 능력곡선이 변하기 때문에 일련의 반복 계산과정이 필요하게 된다. 이러한 과정을 통하여 산정한 각 감쇠기별로 필요한 감쇠량은 Table 5와 같다. 산정된 결과를 보면 점탄성감쇠기는 강성을 가지고 있기 때문에 점성감쇠기에서 필요한 감쇠비보다 작음을 알 수 있다.

4.4 부가 감쇠장치의 층별분배

ESDOF에서 산정한 필요 감쇠량을 다자유도계 구조물의 각 층에 분배하여야 한다. 따라서 아래와 같은 세 가지의 분배형태를 식(14)와 (15)에 대입하여 각 층별 감쇠기의 감쇠상수와 강성을 구하였다. 층변위(Δ_i)는 pushover 해석에 의해서 산정한 값을 이용하였다.

- Case 1: 모든 층에 같은 크기의 감쇠기를 설치
- Case 2: 감쇠기의 크기가 pushover 해석에 의한 누적된 층변위에 비례하도록 설치
- Case 3: 층간변위에 비례하도록 감쇠기를 설치

Table 4 점탄성감쇠기의 필요 감쇠비 산정과정 (10층 구조물, 등가모드 사용)

목표 변위 (cm)	S_{atd} (g)	T_{eff} (sec)	T_e (sec)	ζ_{eff} (%)	ζ_d (%)	C_d	K_d	오차 (%)
14.44	0.164	1.89	1.65	34.5	12.98	3.77	14.37	-
	0.220	1.63	1.45	24.4	7.66	2.52	10.93	41.01
	0.207	1.68	1.49	26.6	8.96	2.87	12.11	-17.00
	0.212	1.66	1.48	25.8	8.48	2.75	11.69	5.32
	0.210	1.67	1.48	26.0	8.58	2.77	11.74	-1.12

Table 5 다른 하중형태에 따라 산정된 필요 감쇠비 (a) 점성감쇠기를 이용하여 보강한 구조물

구조물	층지진 하중 형태	T_e (sec)	T_{eff} (sec)	ζ_{eff} (%)	ζ_d (%)
10층	1차모드	1.65	1.88	31.8	10.9
	등가모드	1.65	1.89	34.5	13.0
20층	1차모드	3.44	3.44	31.7	26.7
	등가모드	3.36	3.36	32.4	27.6

(b) 점탄성감쇠기를 이용하여 보강한 구조물

구조물	층지진 하중 형태	T_e (sec)	T_{eff} (sec)	ζ_{eff} (%)	ζ_d (%)
10	1차모드	1.52	1.70	25.1	7.5
	등가모드	1.48	1.67	26.0	8.6
20	1차모드	2.92	2.92	18.3	13.3
	등가모드	2.86	2.86	19.1	14.1

층별 분배방법에 따라 산정된 감쇠상수의 합은 Table 6과 같으며 설계된 감쇠기를 각 층별로 설치하고 수행한 시간이력해석에 의한 최상층 변위는 Fig. 10과 같다. 제안된 절차에 따라 설계된 감쇠기를 각 층별로 설치하고 수행한 해석결과에 따르면 두 감쇠기가 설치된 10층 구조물은 모두 성능목표를 만족하였다. 그러나 점탄성 감쇠기가 설치된 20층 구조물의 경우 15%~21%정도 최상층 변위가 덜 제어되었다. 이것은 고차모드의 영향과 반복계산과정에서 발생한 오차의 누적 때문인 것으로 사료된다. 점성감쇠기의 분배방법에 따라 동일한 목표변위를 만족하기 위하여 필요한 감쇠량의 전체 합을 나타낸 Table 7을 보면 층간변위비에 따라 분배한 경우(Case 3) 전체 감쇠량은

Table 6 층별 분배방법에 따른 감쇠상수의 합

구조물	분배형태	점성감쇠기		점탄성감쇠기	
		1차모드	등가모드	1차모드	등가모드
10층	Case 1	253.0	296.2	179.5	204.0
	Case 2	212.8	253.0	151.0	174.6
	Case 3	229.5	230.5	136.3	158.9
20층	Case 1	2002.5	1931.9	1092.5	1086.6
	Case 2	1690.7	1676.0	922.8	942.4
	Case 3	1540.6	1458.2	840.4	819.8

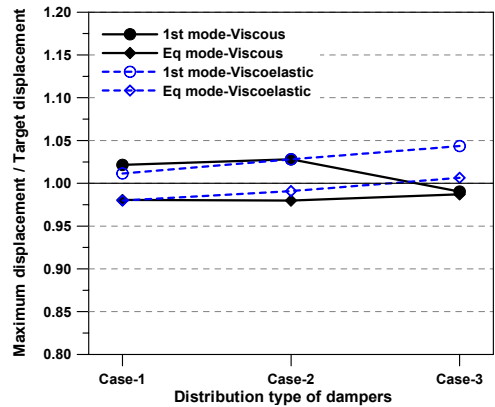
Table 7 점성감쇠기의 분포형태에 따른 효과의 비교

구조물	분배형태	1차모드		등가모드	
		전체 감쇠상수	최상층 변위	전체 감쇠상수	최상층 변위
10층	Case 1	1.00	1.00	1.00	1.00
	Case 2	0.84	1.01	0.85	1.00
	Case 3	0.91	0.97	0.78	1.01
20층	Case 1	1.00	1.00	1.00	1.00
	Case 2	0.84	1.04	0.87	1.03
	Case 3	0.77	1.06	0.75	1.06

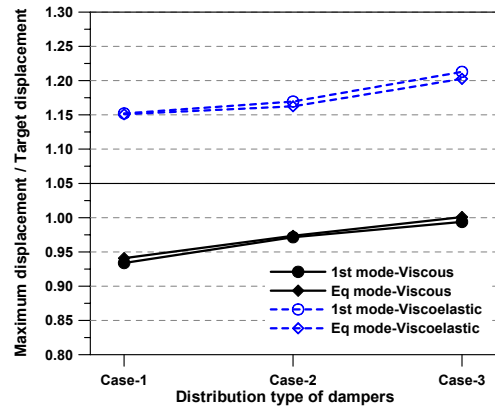
9~25%정도 작았지만 다른 두 경우와 비슷하게 제어되었음을 알 수 있다. 따라서 이 방법이 부가 감쇠장치의 층별 분배를 위한 합리적인 방법이라 할 수 있다. 층진 하중 분배방법에 따른 결과를 비교하면 10층 구조물의 경우 등가모드를 이용한 경우 1차모드에 의한 결과보다 목표변위에 다소 잘 부합되었지만 20층 구조물의 경우는 두 방법의 차이가 그다지 크지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 변위스펙트럼을 이용하여 기존 구조물의 내진성을 평가하고, 원하는 수준까지 보강하기 위한 속도-의존형 감쇠장치의 필요한 양과 층별 분배 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 다자유도계에서 항복점과 목표 성능점의 응답만을 이용함으로써 기존 성능평가 방법인 능력스펙트럼에서 다자유도계의 pushover 곡선과 응답스펙트럼을 등가 단자유도계로 변환하여야 하는 번거로움을 개선하였다.



(a) 10층 구조물



(b) 20층 구조물

Fig. 10 설치된 감쇠기에 따른 최상층변위와 목표변위의 비

제안된 성능평가 방법에 따라 산정된 최상층 변위와 층간변위는 시간이력해석 결과와 잘 일치하였다. 또한 성능목표를 만족하기 위하여 필요한 감쇠량의 산정방법을 이용하여 산정된 감쇠기를 설치하였을 때 점탄성 감쇠기가 설치된 20층 구조물을 제외하고는 목표변위까지 잘 제어되었다. 층별 분배방법은 층간변위를 이용한 경우 필요 감쇠량이 다른 분배방법에 비하여 작았을 뿐만 아니라 목표변위까지 제어되었기 때문에 보다 합리적인 방법으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법은 예비설계단계에서 성능에 기초한 기존 건물의 내진보강 설계방법으로 비교적 쉽게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김진구, 방성혁, “직접 변위설계법을 이용한 구조물의 내진성능평가,” 한국지진공학회 논문집, 6권, 2호, 2002, pp. 1~7.
2. 한국지진공학회, 내진설계기준연구 (II), 1997.
3. Kim, Jinkoo, Choi, Hyunhoon, and Min, Kyung-Won., “Performance-based design of added viscous dampers using capacity spectrum method,” *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 1, 2003, pp. 1~24.
4. Lin, Y.Y., Tasi, M.H., Hwang, J.S., and Chang, K.C., “Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems,” *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 1, 2003, pp. 25~37.
5. Priestley, M.J.N. and Kowalsky, M.J., “Direct displacement-based seismic design of concrete buildings,” *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 33, No. 4, 2000, pp. 421~444.
6. Structural Engineers Association of California, Recommended lateral force requirements and commentary, Appendix I, Sacramento, CA., 1999.
7. FEMA, “NEHRP Commentary on the Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings,” FEMA-274, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
8. Soong, T.T. and Dargush, G.F., *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
9. 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.
10. MIDAS/Gen Program, “MIDAS/Gen-General structure design system,” *MIDAS/Gen Ver.5.7.1 Analysis and Design Manual*, MIDAS Information Technology, Co., Ltd.,
11. FEMA, “NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings,” FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
12. Vanmarcke, E.H. and Gasparini, D.A., “A program for artificial motion generation, Users manual and documentation,” Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976.
13. 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.
14. Applied Technology Council, “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings,” ATC-40, Redwood City, California, 1996.
15. Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C., and Madan, A., “IDARC 2D version 4.0: A computer program for the inelastic damage analysis of buildings,” Technical Report NCEER-96-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1996.

(접수일자 : 2003년 8월 4일)