

건축구조물에서 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기의 최적설계

Optimal Design of Viscoelastic Dampers in Building Frames by Eigenvalue Assignment

손 동 인* 이 상 현** 박 지 훈** 김 진 구***
Son, Dong In Lee, Sang Hyun Park, Ji Hun Kim, Jin Koo

국문요약

고유진동수와 감쇠비는 지진이나 바람과 같은 동적 횡하중에 대해 구조물의 응답을 결정하는 주요한 특성이다. 본 연구는 지진하중에 대하여 목표응답 수준을 만족하는 구조물의 고유진동수와 감쇠비를 지정하고, 이 값을 실현하는 점탄성 감쇠기 파라미터의 최적분포를 구하는 최적 설계 방법을 제안한다. 여기서 지정할 고유진동수와 감쇠비는 목표응답 수준을 만족하는 여러 조합 중 설계조건과 원래 건물의 특성에 따라 결정될 수 있다.

제안한 설계 방법은 점탄성 감쇠기의 강성과 점성 파라미터를 고유값의 기울기 정보를 바탕으로 분포시키므로 최적 위치와 크기에 대한 정보를 동시에 제공한다. 예제로서 평면 10층 전단 건물을 대상으로 최적설계를 수행하여 지정된 고유값을 실현하는 파라미터의 최적분포를 구하고 이를 통해 제안한 최적설계의 특성을 확인하였다. 또한 더 나아가 3차원 일방향 비대칭 전단건물에 제안된 최적설계를 수행하여 그에 대한 적용가능성을 확인하였다.

주요어 : 점탄성 감쇠기, 최적 설계, 고유진동수, 감쇠비

ABSTRACT

Natural frequency and damping ratio are the main properties of a structure which determine the response of the structure for lateral dynamic load. In this study, the method has been proposed to determine the optimal parameters for viscoelastic damper(VED) that produce the natural frequency and damping ratio, which are prescribed using convex model. The natural frequency and the damping ratio were chosen considering the design objectives and the dynamic characteristics of the structure among the values that satisfy the given performance limits. The proposed method determines both optimal parameters and location of VEDs simultaneously, based on the gradient of the eigenvalues. As an example, the proposed method has been applied to a 10-story shear building for optimal parameter distribution and to the asymmetric-plan structure to check its applicability to mitigate the torsional responses.

Key words : viscoelastic damper, optimal design, natural frequency, damping ratio

1. 서 론

지진이나 바람과 같은 동적 횡하중에 대하여 건물을 설계하거나 기존 건물을 보강하고자 할 때 에너지 소산장치로서 점탄성 감쇠기(viscoelastic damper), 점성 감쇠기(viscous damper), 마찰 감쇠기(friction damper), 항복 장치(yield device) 등의 다양한 수동형 감쇠기를 설치하는 방법이 근래에 연구되어 왔다. 횡변위에 대한 수동형 감쇠기를 사용한 제어는 능동제어와 비교하여 복잡한 제어 알고리즘이 필요 없고 안정적이며 간단한 감쇠장치를 설치함으로써 쉽게 이용할 수 있다는 장점을 갖는다.

특히 그 중 점탄성 감쇠기(VED)는 많은 실험과 연구를 통하여 수학적인 모델링 작업이 충분히 이루어지고 물성도 거의 파악되어 있어 현재 수동제어 장치로서 건물에 다양하게 적용되고 있다.

점탄성 감쇠기의 최적위치와 관련된 최근의 연구⁽¹⁾에서는 층간 변위를 줄이고자 하는 목적함수로 두고 일정한 크기의

감쇠기를 순차적으로 층간 변위가 가장 큰 층에 설치하는 방법으로 최적위치를 찾았다. 그러나 그러한 방법은 감쇠기 설치 전에 층간 변위가 최대가 되는 층에 설치한다는 점에서 감쇠기 설치 후 구조물의 응답을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 또한 가정된 크기의 감쇠기의 최적 위치만을 구할 수 있어 점탄성 감쇠기의 적정 크기와 손실비를 산정하는 과정이 제시되어야 하지만 이를 위해 제시된 방법도 최적의 감쇠기의 파라미터를 정하는 데에는 한계가 있다. 그 외의 다른 기존의 연구들도 목적함수에 관계없이 기본적으로 순차적인 방법을 바탕으로 하기 때문에 언급한 바와 같이 점탄성 감쇠기 파라미터 관점에서의 최적설계는 될 수 없었다.

본 연구에서는 건물의 지진응답을 원하는 수준으로 줄이기 위한 건물의 고유진동수와 감쇠비를 먼저 정하고 이를 실현할 수 있는 점탄성 감쇠기의 강성과 점성 파라미터의 최적분포를 구하는 방식의 최적설계를 제안하였다. 이는 가정된 수학적 모델과 정해진 크기와 손실비를 갖는 점탄성 감쇠기를 건물이 원하는 지진응답 수준에 이르기까지 순차적으로 설치하는 지금까지의 연구와는 반대의 접근 방법이라 할 수 있다. 제안한 최적 설계는 크게 두 가지 장점을 갖는다. 첫째, 점탄성 감쇠기의 강성과 점성 파라미터를 서로 독립적으로 보고 이를 고유값의 기울기에 따라 자유롭게 분

* 서울대학교 건축학과, 석사과정

** 서울대학교 건축학과, 박사수료(대표저자 : lshyun00@hanmail.net)

*** 성균관대학교 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

포시키므로 점탄성 감쇠기의 최적 위치와 크기에 대한 정보를 동시에 제공한다. 둘째, 원래 건물의 특성에 따라 다른 고유진동수와 감쇠비를 지정함으로써 대상 건물에 따라 더 효율적인 최적 설계를 이룰 수 있다.

점탄성 감쇠기는 건물의 고유한 동적 특성인 고유진동수와 감쇠비를 변화시키는 원리로 건물의 응답을 줄인다는 점에 주목하고 본 연구에서는 다음과 같은 구체적인 최적화 과정을 제시한다. 건물의 최대 응답을 원하는 수준으로 줄이는 건물의 고유진동수와 감쇠비의 조합을 구하고 원래 건물의 고유진동수와 감쇠비의 특성과 여러 다른 설계 조건에 따라 그 중 가장 알맞은 조합을 선택한다. 그리고 원래 건물이 이러한 조합의 고유진동수와 감쇠비를 갖도록 하는 점탄성 감쇠기 최적 파라미터 분포를 기울기 정보를 이용한 비선형 프로그래밍 과정에 의해 구한다. 여기서 기울기는 점탄성 감쇠기의 파라미터에 대한 고유진동수와 감쇠기의 기울기를 말하며, 기울기가 큰 곳에 더 많은 점탄성 감쇠기 파라미터를 분포시키는 방법을 통해 최소의 점탄성 감쇠기 물량으로 원하는 고유진동수와 감쇠비를 실현하는 최적 설계를 이루게 된다.

예제 건물모델로 10층의 평면 전단건물을 대상으로 하여 최적설계를 수행하여 그 결과에 따라 실제적으로 점탄성 감쇠기를 설치하는 방법을 연구하고 그 특징과 장점을 확인한다.

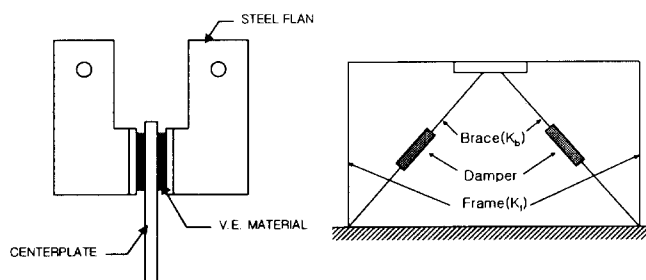
또한 더 나아가 비틀림 자유도를 갖는 3차원 일방향 비대칭 전단 건물에 적용하여 그 적용가능성을 확인한다.

2. 점탄성 감쇠기의 모델링

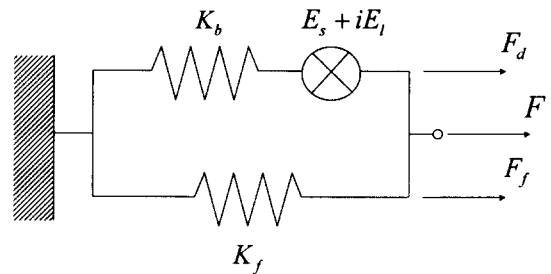
그림 1은 일반적인 점탄성 감쇠기의 형태와 점탄성 감쇠기가 설치된 골조의 형태를 나타낸다. 점탄성 감쇠기는 변형량에 비례하여 에너지를 저장하는 강성부분(또는 저장계수)과 변형 속도에 비례하여 에너지를 소산시키는 점성부분(또는 손실계수)의 조합으로 표현될 수 있다. 그림 2는 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 1개 층을 수학적으로 모델링한 것이다.

식 (1)은 점탄성 감쇠기의 진동수 영역에서 힘-변형 관계를 나타낸다. 여기서, $E_s(\omega)$ 와 $E_l(\omega)$ 는 각각 점탄성 감쇠기의 손실계수와 저장계수를 의미한다.

$$F_d(\omega) = \{E_s(\omega) + E_l(\omega)\} \delta(i\omega) \quad (1)$$



(a) 점탄성 감쇠기 (b) 점탄성 감쇠기가 설치된 건물
그림 1 점탄성 감쇠기와 점탄성 감쇠기가 설치된 건물



K_b : 가새의 강성 K_f : 프레임의 강성
 F_d : 감쇠장치에 걸리는 힘 F_f : 프레임에 걸리는 힘

그림 2 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 수학적 모델링

점탄성 감쇠기가 강성과 점성이 병렬로 연결된 켈빈 모델(Kelvin model)로 모델링되었을 때 저장계수와 손실계수는 다음과 같이 정해질 수 있다.

$$F(i\omega) = (k_d + ic_d\omega) \delta(i\omega) \quad (2)$$

이외에 점탄성 감쇠기의 강성과 점성을 직렬 연결로 모델링한 맥스웰 모델, 그리고 모든 주파수에서 점탄성 감쇠기의 저장계수와 손실계수가 일정한 비를 갖도록 모델링한 선형 이력모델이 최적설계에 사용될 수 있다.⁽¹⁾ 하지만 본 논문에서 제안할 고유값 지정에 의한 최적설계시에는 시간 영역의 상태방정식에서 수학적 표현이 가능한 켈빈모델만을 사용하기로 한다.

3. 고유값 지정에 의한 최적설계

3.1 고유값의 지정

불확실한 지진특성에 대한 구조물의 최대 응답을 예측하는 방법으로 통계적 방법, 확률적 방법 등과 더불어 지진과의 불확실성을 일정한 함수로 나타내고 그것의 제한 값에 대하여 최대 응답을 예측하는 컨벡스 모델(convex model)⁽²⁾에 의한 방법이 제안된 바 있다. 컨벡스 모델은 지진발생과 건물의 응답에 관계된 매우 제한되고 작은 정보만을 가지고도 구조물의 지진에 대한 최대응답을 예측할 수 있기 때문에 약간 안전측의 예측이 될 가능성은 있지만 지진과 관계된 정보가 크게 부족할 때 매우 유용한 방법으로 알려져 있다. 컨벡스 모델에서 지진의 불확실성을 나타내는 변수로는 다양한 것들이 사용될 수 있으나, 본 연구에는 그 중 일정 지진 지속시간 동안 지진파의 에너지를 변수로 사용한 전역 에너지 제한 컨벡스 모델(global energy-bound(GEB) convex model)를 사용하기로 한다.

다음 식 (3)은 컨벡스 모델에 의한 번째 모드의 최대 변위 응답을 나타낸다.

$$S_{y_i}(T_i, \xi_i) = \frac{\phi_i^T I_o \sqrt{E T_i^{3/2}}}{4\pi \sqrt{2\pi \xi_i}} \quad (3)$$

여기서 T_i , ξ_i , ϕ_i 건물의 i 번째 모드의 고유주기, 감쇠비와 모드형상을 나타내며, E 와 I_o 는 지진파의 총 에너지와 지

진영향 계수이다. 각 모드의 최대 변위응답을 바탕으로 전체 구조물의 최대 변위응답을 SRSS(square root of the sum of squares)방법으로 구하면 다음과 식 (4)과 같다.

$$|x_{\max, i}| \cong \sqrt{\sum_{i=1}^N \phi_{ij}^2 S_y^2(\omega_i, \xi_i)} \quad (4)$$

본 연구에서는 강성의 증가에 의한 고유진동수의 증가량은 크지 않고, 감쇠 고유진동수는 감쇠비에 의해 감소하여 전체적으로 감쇠 고유진동수는 거의 증가하지 않거나 오히려 감소하여 가속도 응답에 큰 영향을 주지 않는다고 가정한다. 또한 지진 응답에 대한 건물의 안전성 문제는 주로 변위 응답이 좌우한다고 볼 수 있기 때문에, 최대 변위응답의 감소에 초점을 맞추어 컨벡스 모델을 통하여 건물의 고유진동수와 감쇠비를 지정하기로 한다.

식 (3)과 다음 식 (5)을 통하여 원하는 최대 변위응답이나 혹은 최대 변위응답 감소비율에 해당하는 건물의 고유주기와 감쇠비 조합을 구할 수 있다.

$$R = \frac{S_{yi}(T_i, \xi_i)}{S_{yio}(T_{io}, \xi_{io})} = \frac{\phi_i^T I_o \sqrt{E}}{\phi_{io}^T I_o} \left(\frac{T_i}{T_{io}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{\xi_{io}}{\xi_i}} \cong \left(\frac{T_i}{T_{io}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{\xi_{io}}{\xi_i}} \quad (5)$$

여기서 T_{io}, ξ_{io} 는 각각 감쇠기 설치전 건물의 고유주기와 감쇠비이다. 식 (5)에서 점탄성 감쇠기의 강성이 일반적으로 건물의 강성에 비해 매우 작고, 최적 설계시 큰 강성이 추가되는 고유주기를 지정하지 않는다는 가정하에 점탄성 감쇠기 설치 전과 설치 후의 건물의 모드형상이 같다고 가정하였다. 따라서 식 (5)을 통해 원하는 건물의 지진응답의 감소비율은 각 모드의 고유주기와 감쇠비만으로써 예측할 수 있다.

한편, 식 (3)의 i 번째 모드의 최대 변위응답을 각각 고유주기와 감쇠비에 대하여 미분하면 다음 식 (6), (7)과 같다.

$$\frac{\partial S_{yi}}{\partial T_i} = \frac{\phi_i^T I_o \sqrt{E}}{4\pi\sqrt{2\pi\xi_i}} \frac{3}{2} T_i^{1/2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial S_{yi}}{\partial \xi_i} = \frac{\phi_i^T I_o \sqrt{E}}{4\pi\sqrt{2\pi}} T_i^{3/2} \cdot -\frac{1}{2} \xi_i^{-3/2} \quad (7)$$

식 (6), (7)의 건물 최대 변위응답의 고유주기와 감쇠비에 대한 변화율은 원하는 응답의 감소량에 해당하는 최적의 고유주기와 감쇠비를 정하는데 사용한다. 만약 건물이 강성이 많이 부족한 경우 식 (6)의 고유주기에 대한 변화율이 더 크고 따라서 고유주기를 감소시키는 것이 감쇠비를 증가시키는 것 보다 효과적이며, 반대로 감쇠가 부족한 경우는 식 (7)의 감쇠비에 대한 변화율이 더 크고, 감쇠비를 증가시키는 것이 최대 변위응답 감소에 효과적이다. 하지만 고유주기를 많이 감소시킬 경우 건물의 강성 증가에 의해 최대 변위응답은 줄어 들지만 최대 가속도응답은 증가하기 때문에 주기를 크게 감소시키는 것은 바람직하지 않다. 또한 본 연구는 최대

변위응답의 감소만을 목적으로 한 고유값과 감쇠비를 지정하고 이 값을 실현하는 점탄성 감쇠기의 최적설계를 수행하기 때문에 고유 주기의 감소는 별로 크지 않다는 가정이 전제되어야 한다. 따라서 위의 식에서 감쇠비에 대한 변화율과 비교하여 고유주기에 대한 변화율은 적절한 계수에 의해 감소되어야 하며 점탄성 감쇠기 설치 후의 고유주기의 감소 비율 역시 일정값을 넘지 못하도록 제한 할 필요가 있다. 즉 γ 라는 계수를 사용하여 식 (6)을 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (9)와 같은 제한 조건이 제시될 수 있다.

$$\frac{\partial S_{yi}}{\partial T_i} = \gamma \left(\frac{\phi_i^T I_o \sqrt{E}}{4\pi\sqrt{2\pi\xi_i}} \frac{3}{2} T_i^{1/2} \right) \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (8)$$

$$\frac{T_i}{T_{io}} \geq x \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (9)$$

또한 실제적으로 설치할 수 있는 점탄성 감쇠기의 강성과 점성 및 손실비 등도 고유진동수와 감쇠비를 지정하는데 영향을 미칠 수 있다. 점탄성 감쇠기는 서로 일정한 비율을 갖는 강성과 점성이 복합된 하나의 물질이기 때문에 감쇠비를 증가시킬 필요에 의해 건물의 점성만을 크게 증가시킬 수는 없으며 점성의 증가에 따라 강성도 비례하여 증가시키게 된다. 또한 강성이 증가하면 가속도 응답이 증가할 수 있다. 그 외 생산되는 점탄성 감쇠기의 손실비, 감쇠기의 적용상의 문제 등도 고려될 수 있다. 결국 건물의 고유진동수와 감쇠비로 표현된, 원하는 성능수준을 달성하기 위한 고유값은 여러 가지 설계변수를 고려하여 최적의 값을 선택하여야 한다. 본 연구에서는 전체 건물에 분포하는 점탄성 감쇠기의 강성과 점성 파라미터의 비가 일반적인 점탄성 감쇠비의 손실비인 1.2~1.4를 갖도록 하는 고유진동수와 감쇠비를 지정하였다.

3.2 고유값에 대한 파라미터 최적분포

본 장에서는 구조물이 원하는 고유진동수와 감쇠비로 이루어진 고유값을 갖도록 하는 제어이득을 구하기 위하여 다음과 같은 비선형 프로그래밍 알고리즘(eigenvalue assignment algorithm via nonlinear programming)⁽⁴⁾을 이용하였다.

컨벡스 모델을 통해 각 모드에 대하여 지정된 고유진동수와 감쇠비를 갖는 구조물의 운동방정식을 상태 방정식으로 표현하면 다음 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \ddot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -K_D & -C_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$K_D = \text{diag}[\omega_{1D}, \omega_{2D}, \dots, \omega_{nD}], \quad C_D = \text{diag}[\xi_{1D}, \xi_{2D}, \dots, \xi_{nD}]$$

ω_{iD} : 지정할 고유 진동수, ξ_{iD} : 지정할 모드 감쇠비

식 (10)의 상태방정식의 고유값은 복소수 형태로 나타나며 건물의 고유진동수, 감쇠비와 다음 식 (11)과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda_{iD} = -\xi_{iD}\omega_{iD} + i\omega_{iD}\sqrt{1-\xi_{iD}^2} \quad (11)$$

한편, 점탄성 감쇠기를 켈빈 모델로 모델링 하였을 때 힘-변형 관계식은 다음 식 (12)과 같다.

$$f(t) = k_d\delta(t) + c_d\dot{\delta}(t) \quad (12)$$

다자유도계 건물에서 각 층 혹은 각 층의 각 위치에서 켈빈 모델 점탄성 감쇠기의 강성과 점성 파라미터는 다음 식 (13)과 같은 파라미터 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p &= [p_1, p_2, p_3, \dots]^T \\ &= [k_{d1}, k_{d2}, \dots, k_{dN}, c_{d1}, c_{d2}, \dots, c_{dN}]^T \end{aligned} \quad (13)$$

또한 상태 피드백 제어 시스템의 상태방정식과 제어력은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (14)$$

$$u = -Gx \quad (15)$$

식 (14), (15)에서 시스템 행렬과 제어력 위치행렬, 제어이득 행렬은 다음 같이 정의할 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} O \\ M^{-1}D \end{bmatrix}, D = I \quad (16)$$

$$G = [G_1 \ G_2] \quad (17)$$

식 (17)에서 G_1 은 점탄성 감쇠기의 강성에 의한 제어이득 행렬이고, G_2 은 점탄성 감쇠기의 점성에 의한 제어이득 행렬이다. 식 (14)와 같은 상태방정식을 갖는 시스템의 고유값은 다음과 같은 특성방정식에 의해 구한다.

$$\lambda_i \phi_i = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}(K + DG_1) & -M^{-1}(C + DG_2) \end{bmatrix} \phi_i \quad (18)$$

$$\lambda_i = -\xi_i \omega_i + i\omega_i \sqrt{1-\xi_i^2} \quad (19)$$

ω_i : 감쇠기 설치 후 고유 진동수
 ξ_i : 감쇠기 설치 후 모드 감쇠비

한편 다음 식 (20)과 같이 현재의 고유값과 지정할 고유값의 차를 고유값 지정함수 f_i 에 의해 정의한다.

$$f_i = \lambda_i(p) - \lambda_{id} \quad (20)$$

$$f = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_{2N}]^T \quad (21)$$

함수 f_i 의 파라미터 p_k 에 대한 기울기는 다음 식 (22)와 같다.

$$\frac{\partial f_i}{\partial p_k} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial p_k} = -\phi_i^T B \frac{\partial G}{\partial p_k} \phi_i \quad (22)$$

업데이트 파라미터량을 구하는 방법으로 최소 놈 보정 알고리즘(minimum norm correction algorithm)을 사용한다.

$$\underline{f}(\underline{p} + \Delta \underline{p}) = \underline{f}(\underline{p}) + \left[\frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}} \right]_{\underline{p}} \Delta \underline{p} + O\left(\frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}}\right) = O \quad (23)$$

$$\Delta \underline{p} = -\left[\frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}} \right]_{\underline{p}}^+ \underline{f}(\underline{p}), \text{ minimize norm } \|\Delta \underline{p}\| \quad (24)$$

$$\underline{p} = \underline{p} + \Delta \underline{p} \quad (25)$$

업데이트된 파라미터에 대하여 고유값 지정함수 f_i 가 0으로 수렴할 때까지 계속하여 기울기를 계산하고 파라미터를 업데이트시켜 나간다.

또한 최소한의 점탄성 감쇠기 물량으로 고유값을 지정하기 위해 점탄성 감쇠기의 파라미터 총합을 최소화하기 위한 알고리즘으로 homotopy algorithm⁽⁴⁾을 이용한다. Homotopy 파라미터를 γ 라고 하였을 때 다음과 같은 임시 목적함수를 정의한다.

$$\begin{aligned} \underline{f}_p(\gamma) &= \gamma \underline{f}_o + (1-\gamma) \underline{f}(\underline{p}_{start}) \\ 0 &\leq \gamma \leq 1, \quad (\underline{f}_o)_{2N+1} = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

f_p 는 고유값 및 파라미터 총합의 임시 목적값이며 f_o 는 최종 목표값이다. 따라서 다음 식 (27)과 같은 최소화 함수를 정의한다.

$$H(p(\gamma), \gamma) = \underline{f}_p(\gamma) - \underline{f}(p) \quad (27)$$

$$f_i = \lambda_i(p) - \lambda_{id} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 2N \quad (28)$$

$$f_{2N+1} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (29)$$

$H(p(\gamma), \gamma)$ 는 homotopy map이라고 하며 파라미터 감소량은 다음 식 (30)을 통해 구할 수 있다.

$$\Delta \underline{p} = -\left[\frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}} \right]_{\underline{p}}^+ H(p(\gamma), \gamma) \quad (30)$$

함수 f 가 일정한 반복 횟수 내에 $f_p(\gamma)$ 로 수렴하지 못할 때마다 homotopy 파라미터 γ 를 차츰 감소시켜 나가면서 감쇠기의 파라미터 $\Delta \underline{p}$ 를 업데이트시킨다. γ 가 매우 작아져 일정한 이하가 되면 프로그램을 중지시킨다. 중지되었을 때의 파라미터 벡터 p 는 파라미터가 최소화된 점탄성 감쇠기의 최적 분포이고 f_{2N+1} 은 전체 건물에 사용된 파라미터의 최소 물량이다.

그림 3과 4는 각각 구조물의 고유값을 지정하는 알고리즘과 점탄성 감쇠기 파라미터를 최소화하는 알고리즘이다.

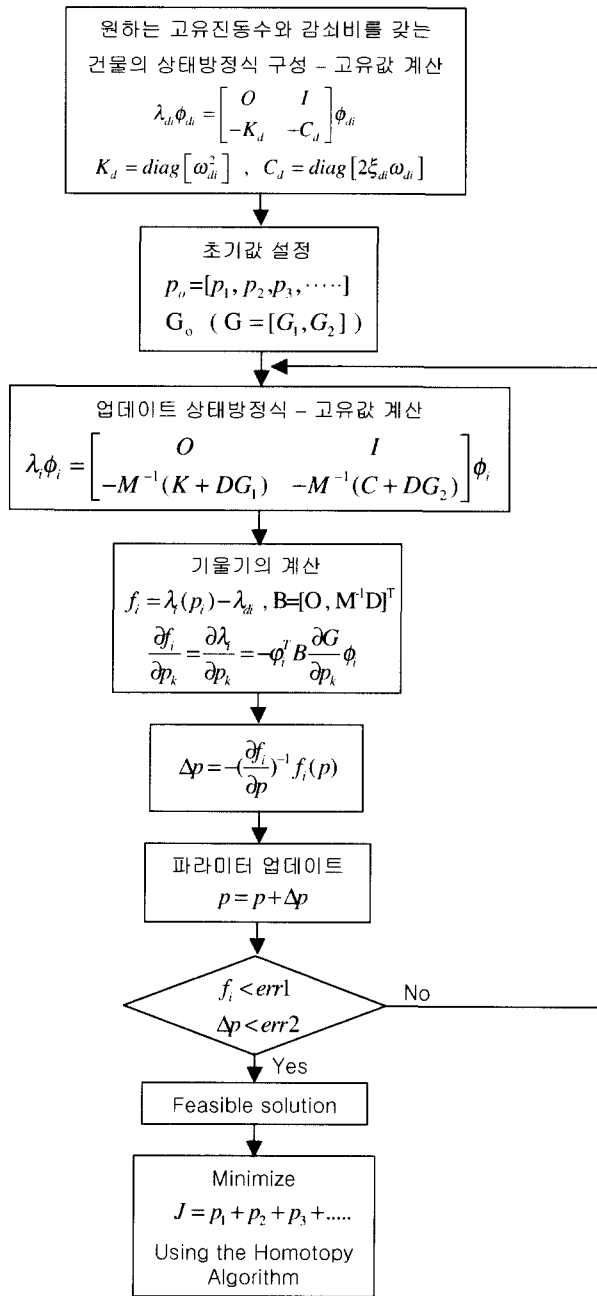


그림 3 고유값 지정 알고리즘

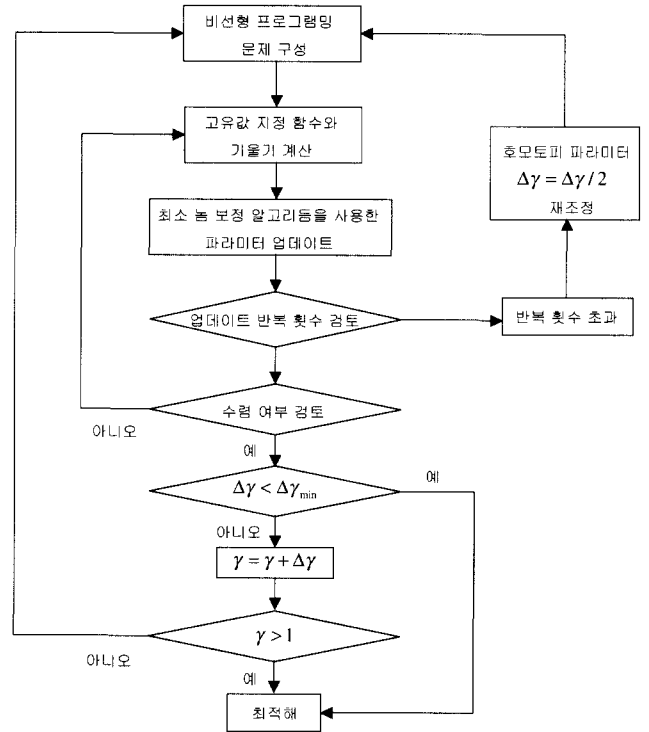


그림 4 점탄성 감쇠기의 파라미터 최소화 알고리즘

표 1 전단건물 사양

층	질량(kg)	층강성(kgf/cm)
1	24300	10000
2	24300	8000
3	24300	8000
4	24300	8000
5	24300	7000
6	24300	7000
7	24300	7000
8	24300	5000
9	24300	5000
10	24300	5000

4. 예 제

4.1 2차원 평면 전단건물

본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 검증하기 위해 각 층마다 횡방향의 자유도만을 갖는 10층 전단 건물모델에 대하여 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기의 최적 설계를 수행하였다.

건물의 각 층 질량과 강성은 표 1과 같으며 각 모드에 대하여 모드 감쇠비는 2%의 Rayleigh 감쇠로 하였다.

그림 5와 같은 모델 건물에 대하여 모드참여율을 계산한 결과, 최상층 응답에 1차모드의 참여율은 94%이며 건물의 모든 층에 대하여 1차모드의 참여율은 80%이상으로 예제 모델은 1차 모드가 지배적인 구조물이라 할 수 있다.

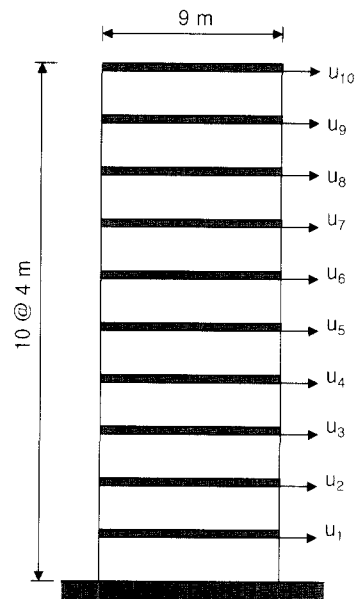


그림 5 전단건물 모델

4.1.1 기울기 정보의 분석

그림 6, 그림 7, 그림 8은 감쇠기 설치 전 건물 모델의 점탄성 감쇠기의 강성과 점성에 대한 건물의 1차모드 고유진동수와 1차 모드 감쇠비의 기울기를 나타낸다.

그림 6에서 강성에 대한 고유진동수의 기울기는 전체적으로는 건물의 저층부에서 크고 고층부로 갈수록 작아지며 건물이 층강성이 감소하는 건물의 2층, 5층, 8층에서는 기울기가 증가하고 있다. 그리고 그림 8의 점성에 대한 감쇠비의 기울기도 이와 거의 같은 분포를 이룬다. 물리적으로 생각해 볼 때 저층부와 2층, 5층, 8층은 층간 변위가 크게 발생하는 층이 되고 건물에서 횡하중에 대하여 취약한 층에 감

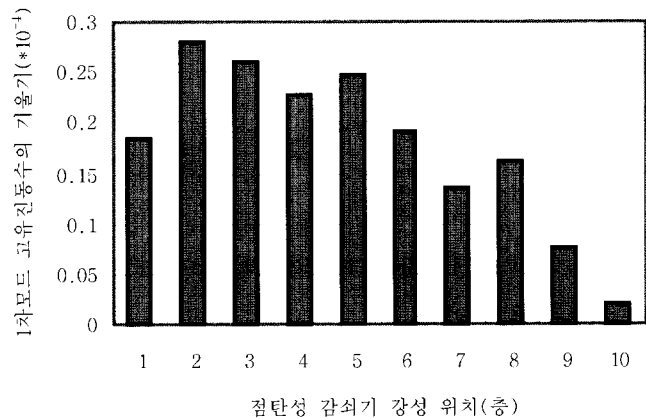


그림 6 각 층 강성에 대한 1차 모드 고유진동수의 기울기

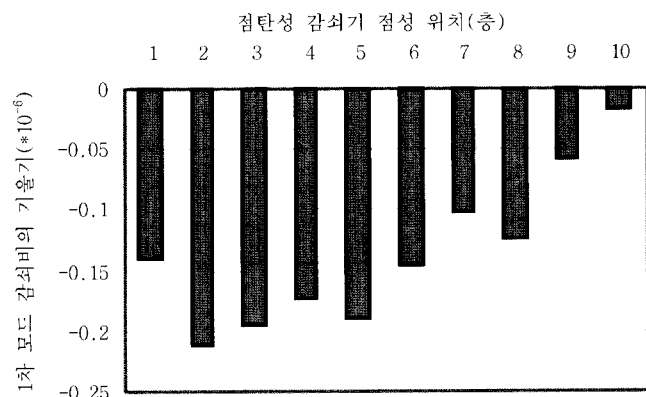


그림 7 각 층 강성에 대한 1차 모드 감쇠비의 기울기

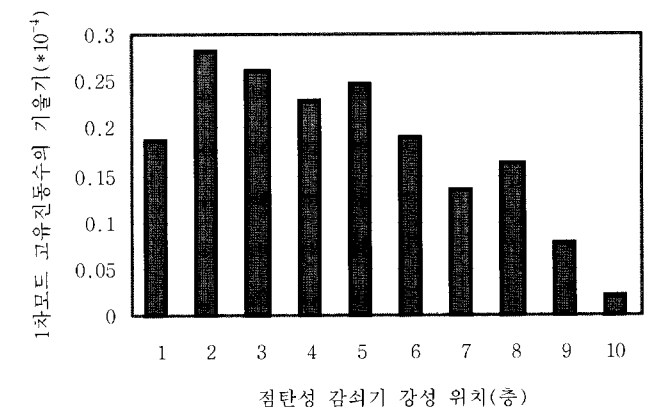


그림 8 각 층 점성에 대한 1차 모드 감쇠비의 기울기

쇠기를 설치하는 것이 효과적인 것은 당연하다. 하지만 위 그림들에서 볼 수 있듯이 이러한 층에서 고유진동수와 감쇠비의 기울기도 또한 크다는 점은 기울기 정보에 의해 점탄성 감쇠기의 파라미터를 설계하는 것도 역시 횡변위를 효과적으로 줄이기 위한 최적설계의 방법이 될 수 있음을 입증한다.

다음 식 (31)와 식 (32)은 모드형상을 가정함으로써 다자유도계를 단자유도계로 치환⁽⁵⁾할 때, 가정된 형상의 모드에 대한 고유진동수와 그 고유진동수의 각 층 강성에 대한 변화율을 나타낸다.

$$\omega_n^2 = \frac{\sum_{j=1}^N k_j (\varphi_j - \varphi_{j-1})^2}{\sum_{j=1}^N m_j \varphi_j^2} \tag{31}$$

$$\frac{\partial \omega_n^2}{\partial k_i} = \frac{(\varphi_i - \varphi_{i-1})^2}{\sum_{j=1}^N m_j \varphi_j^2} \tag{32}$$

식 (32)에서 가정된 모드형상의 이웃한 층의 모드 형상 차이가 가장 큰 층이 강성에 대한 고유진동수의 변화율이 가장 크다.

다시 말해 층간 변위가 가장 큰 층에 강성을 추가하는 것이 고유진동수를 가장 크게 증가시키고 강성에 의한 응답의 감소에 가장 효과적임을 나타낸다. 따라서 그림 6은 식 (32)을 통해 나타난 것처럼 층간 변위가 큰 층이 강성에 대한 고유진동수의 기울기가 크다는 사실과 일치한다.

한편, 그림 7에서 건물의 1차 모드의 감쇠비의 기울기는 건물의 강성에 대해서 음의 값을 갖고 있다. 즉 건물의 강성이 커질수록 모드 감쇠비는 작아짐을 의미한다. 하지만 이는 점탄성 감쇠기의 점성에 대한 모드 감쇠비의 기울기에 비하여 1/100수준이기 때문에 건물의 점탄성 감쇠기의 강성은 감쇠비에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 예상할 수 있다. 다시 말해 점탄성 감쇠기의 강성은 고유진동수에 관계되고 점성은 감쇠비에 관련되어, 점성과 강성은 각각 독립적으로 고유진동수와 감쇠비에 영향을 미친다고 할 수 있다.

4.1.2 최적설계 결과 및 지진응답해석

예제 모델은 1차 모드가 지배적이므로 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비만을 지정하기로 하고 그 타당성 여부는 이후에 판단하기로 한다.

식 (5)에서 건물의 최대 변위응답을 50% 줄이는 1차모드의 고유진동수와 감쇠비로 표 2의 값을 지정한다.

표 2 지정할 1차 모드의 고유값

	원래 건물	지정할 고유값
1차 모드의 고유진동수	0.4238Hz	0.4431Hz
1차 모드의 감쇠비	2%	7%

그림 9는 표 2의 고유값을 구현하기 위하여 기울기 정보에 의해 구한 점탄성 감쇠기의 강성과 점성 파라미터의 최적 분포를 나타낸다.

그림에서 점탄성 감쇠기의 파라미터 분포는 초기 건물 모델에서 감쇠기의 파라미터에 대한 고유값의 기울기 분포와 유사하다. 즉 감쇠기 파라미터들은 초기 건물의 기울기와 똑 같지는 않지만 반복과정에서 매번 구하게 되는 비슷한 기울기 정보에 의해 분포되었음을 확인할 수 있다. 그러나 강성 파라미터는 건물의 모든 층에 분포하고 있지만 점성파라미터는 점성에 대한 1차 모드 감쇠비의 기울기가 큰 2, 3, 4, 5 층에만 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 점탄성 감쇠기의 강성이 원래 건물의 층강성에 비해 작기 때문에 감쇠기 강성에 의한 고유진동수의 증가가 건물의 응답 감소에 미치는 영향은 점탄성 감쇠기의 점성에 의한 감쇠비 증가에 의한 것에 비해 작지만, 위 그림에서 볼 수 있는 것처럼 강성 파라미터 크기의 절대량은 점성과 비슷한 정도의 스케일을 갖기 때문에 파라미터 최소화 과정에서 강성보다는 작은 파라미터의 감소에도 큰 효과를 보이는 점성을 재분포 시키기 때문인 것으로 생각된다.

점탄성 감쇠기는 일정한 강성(저장계수)과 점성(손실계수)의 비인 손실비를 갖고 있으며 실제적으로 이러한 비율관계를 갖는 점탄성 감쇠물질이 설치된다. 따라서 점탄성 감쇠기의 강성만으로 부족할 경우, 층마다 고유값 지정에 의해 구한 파라미터 분포와 같은 강성을 이루기 위해서 추가적인 별도의 가새의 설치를 통하여 원하는 설계 강성을 얻는 방법이 고려되어야 한다.

표 3과 그림 10은 각각 점탄성 감쇠기 설치 전후 건물의 각 모드별 고유값과 1차 모드의 참여율의 변화를 나타낸다.

표 3에서 볼 수 있듯이 본 연구는 1차 모드의 감쇠비만을 지정하므로 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비는 정확히 지정된 값을 갖게 되지만 고차 모드는 고유진동수와 감쇠비는 임의의 값을 갖게 된다. 하지만 감쇠기 설치후 각 모드의 고유진동수는 원래 건물의 고유진동수보다는 크고 고차 모드의 감쇠비는 1차 모드의 감쇠비인 7%보다 큰 것을 볼 수 있다. 본 연구의 고유값 지정에 의한 최적설계 방법에서 점

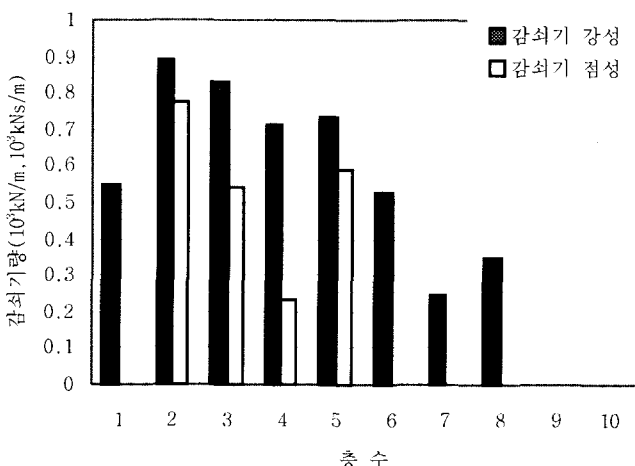


그림 9 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기 최적 파라미터 분포

표 3 점탄성 감쇠기 설치전후 건물의 고유값

모드	고유진동수(Hz)		감쇠비	
	설치전	설치후	설치전	설치후
1	0.4238	0.4431	2.00%	7.00%
2	1.1686	1.9993	2.00%	7.59%
3	1.9208	1.9733	2.00%	15.39%
4	2.6645	2.7254	2.00%	13.10%
5	3.2537	3.3500	2.00%	15.98%
6	3.8572	3.9419	2.00%	28.00%
7	4.2416	4.3403	2.00%	22.70%
8	4.7219	4.8834	2.00%	35.47%
9	5.1402	5.3460	2.00%	65.34%
10	5.5681	5.8344	2.00%	100.00%

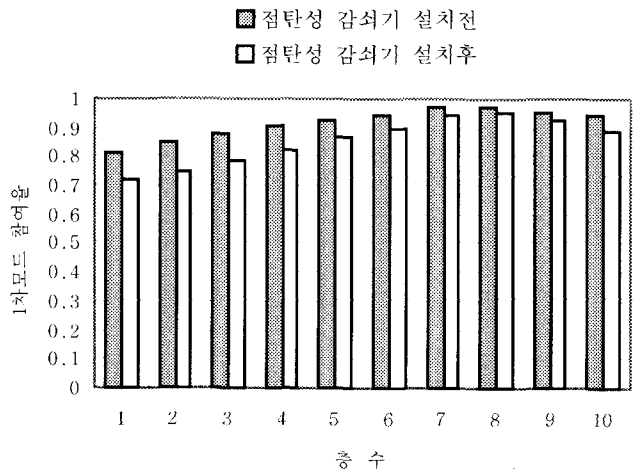


그림 10 점탄성 감쇠기 설치 전후 각층 응답의 1차 모드 참여율

탄성 감쇠기의 점성은 감쇠상수(C)에 의해 정하여지며 이는 점탄성 감쇠기를 진동수에 비례하여 손실계수가 커지는 켈빈 모델로 모델링한 것이므로 감쇠기 설치 후, 고유진동수가 큰 고차 모드의 감쇠비는 1차 모드의 감쇠비인 7%보다 커지게 된다. 따라서 켈빈 모델로 점탄성 감쇠기를 모델링 하였을 때는 켈빈스 모델에 의한 예측값이나 해석에 있어서 고차 모드에 대한 응답은 1차 모드의 감소비율보다 커지게 되고, 결국 1차 모드만을 지정하면 모드 조합에 의한 전체적인 응답 감소는 1차 모드의 감소비율 이상이 될 것이다. 그러나 실제 점탄성 감쇠기는 외부하중의 진동수가 작을 때는 켈빈 모델로 거동한다고 알려졌지만 모든 진동수에 대하여 켈빈 모델로 거동한다고 할 수는 없다. 고유값 지정에 의한 최적설계는 시간 영역에서의 구조물의 운동방정식을 상태방정식 형태로 변환 후 고유값을 지정하는 방식이기 때문에 속도에 비례하는 감쇠상수(C)가 아닌 다른 파라미터로써 점성을 정의하기 곤란하며 따라서 이러한 점에서 고유값 지정에 의한 최적설계는 한계를 갖는다. 따라서 점탄성 감쇠기를 켈빈 모델이 아닌 다른 모델로 모델링할 경우에 대한 앞으로 더 깊은 연구가 필요할 것이다. 하지만 점탄성 감쇠기가 어떠한 모델로 모델링 되든지 기준이 되는 1차 모드의 고유진동수에서의 손실계수는 감쇠기의 물성 측정에 의해 측정된 같은

값을 갖고 그림 10에서 볼 수 있듯이 점탄성 감쇠기 설치 후 각층 응답의 1차 모드의 참여율은 약간 감소하지만 모든 층에서 70%이상의 높은 비율을 유지하기 때문에 이와 같은 점탄성 감쇠기의 최적 설계는 충분한 타당성을 갖는 것으로 판단된다.

그림 11과 그림 12는 점탄성 감쇠기 설치 전후 1차, 2차, 3차 모드의 고유진동수와 감쇠비(표 3 참조)에 의하여 엘센트로 지진 응답 스펙트럼에서 각 모드의 점탄성 감쇠기 설치 전후의 최대 가속도 응답과 최대변위 응답을 나타낸다.

그림 12에서 볼 수 있듯이 컨베스 모델에 의해 50%의 최대 변위응답 감소를 이루는 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비는 엘센트로 지진에 대해서도 대략 50%의 변위응답 감소를 나타내고 있다.

4.1.3. 다양한 고유값에 대한 최적설계 비교

지정할 고유값에 따라 사용되는 점탄성 감쇠기 강성 및

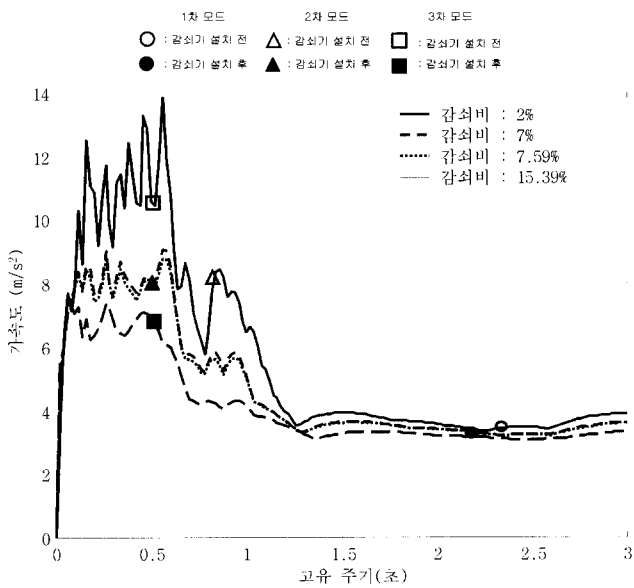


그림 11 엘센트로 지진 응답 스펙트럼에서 주요모드의 최대 가속도응답

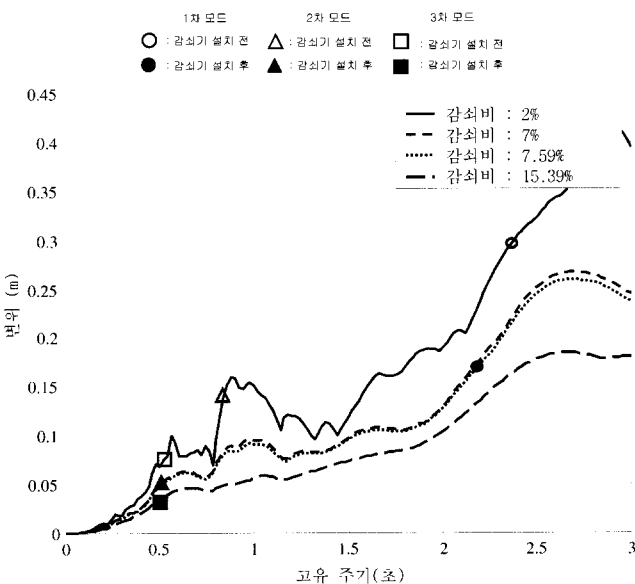


그림 12 엘센트로 지진 응답 스펙트럼에서 주요 모드의 최대 변위응답

점성 파라미터 분포와 총량의 변화를 살펴보기 위해 다음 표 4에서의 경우 1, 2, 3을 비교한다. 세가지 경우 모두 컨베스 모델에서 최대 변위응답을 50% 줄이는 고유값으로 다음과 같은 값을 지정한 후 최적설계를 수행한다.

그림 13에서 볼 수 있듯이 지정한 고유진동수가 클수록 더 많은 강성이 설치되며, 지정한 감쇠비가 클수록 설치되는 점성이 많아진다. 또한 각 경우에 대하여 전체적인 파라미터 분포 형상은 변하지 않고 지정한 고유값에 대하여 사용되는 강성과 점성 파라미터 총량이 변함에 따라 각 층마다 분포

표 4 다양한 고유진동수와 감쇠비 조합

1차모드의 고유값	초기건물	경우 1	경우 2	경우 3
고유진동수	ω_0 0.4238Hz	1.071 ω_0 0.4542Hz	1.046 ω_0 0.4431Hz	1.022 ω_0 0.4330Hz
감쇠비	2.0%	6.5%	7.0%	7.5%

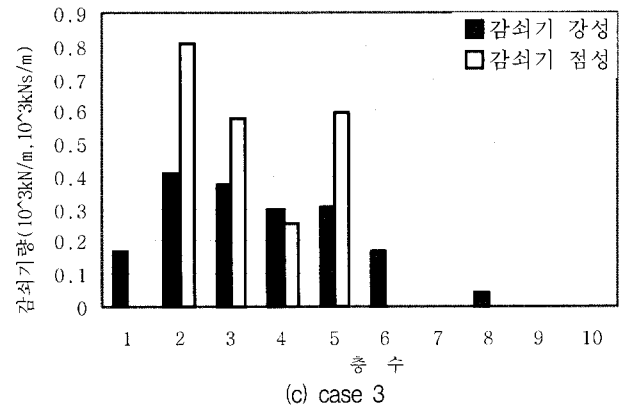
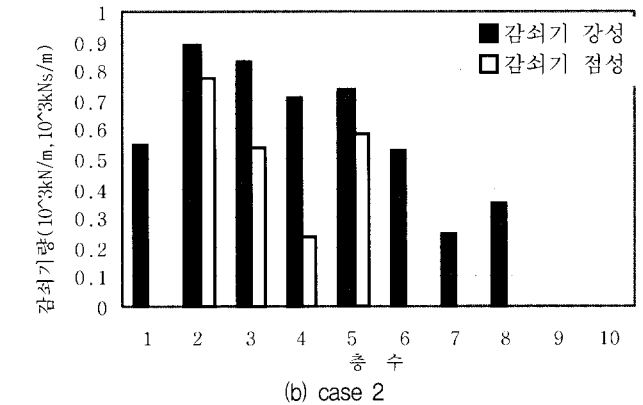
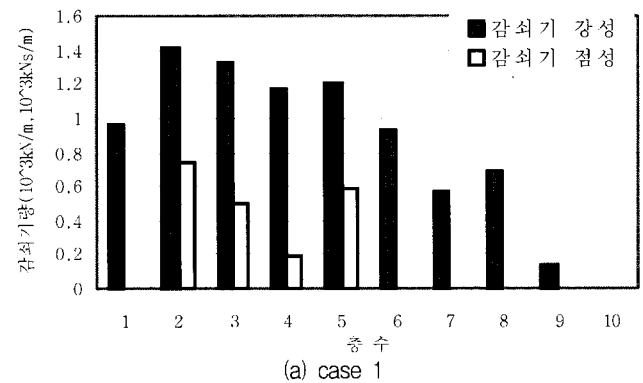


그림 13 각 경우의 고유값에 대한 점탄성 감쇠기의 최적 파라미터 분포

되는 파라미터 양이 일정한 비율로 증가하거나 감소할 뿐이다. 다시 말해 고유값이 변하여도 층마다 분포하는 파라미터의 분포 형상은 원래 건물의 특성에 따라 일정한 형상을 갖으며 단지 고유진동수와 감쇠비에 따라 필요한 강성과 점성 양만이 변화한다고 볼 수 있다.

그러나 사용된 점탄성 감쇠기의 점성의 양은 각 경우에 따라 약간의 증감만이 있는 반면 강성은 지정할 고유진동수의 작은 변화에도 거의 2배 정도의 큰 폭의 변화를 보인다. 이는 바꾸어 말하면 고유진동수는 점탄성 감쇠기의 강성에 따라 크게 변하지 않는다는 사실을 반영한다. 따라서 점탄성 감쇠기의 강성이 작고 고유진동수 역시 강성에 대하여 크게 변화하지 않는다면 점탄성 감쇠기의 점성만을 고려하여 점성 감쇠기로 설계하는 개략적인 최적 설계도 가능할 수 있다. 하지만 엄밀한 설계를 위해서는 점탄성 감쇠기의 강성을 고려하여 다음과 같은 설계를 하여야 한다. 만약 점탄성 감쇠물질의 손실비가 대략 1.2라고 하면, 필요한 점성에 따라 그 감쇠물질의 크기를 정하고 해당하는 점탄성 감쇠기의 강성에 가새의 강성의 크기를 적당히 조절하여 경우 1, 2, 3의 강성값을 맞추는 방법을 통하여 원하는 최적설계를 이룬다. 표 5는 진동수 영역 해석을 통한 최대 층간 변위 RMS값과 최상층 변위의 RMS값^{(1),(7)}을 나타낸다.

표 5에서 경우 1, 2, 3 모두 감쇠기 설치 후 층간 변위와 최상층 변위는 원래 건물의 변위 응답의 50%정도로 감소하였고 세가지 경우 모두 최대 층가속도를 포함하여 거의 비슷한 응답 결과를 보이고 있다. 하지만 각 경우에 대한 약간의 차이를 분석하면 설치되는 강성이 클수록 변위는 많이 감소하지만 가속도는 덜 감소하며 반대로 점성이 커질수록 변위는 약간 덜 감소지만 가속도는 좀더 많이 감소시킬 수 있다.

위의 주파수 영역해석에 사용된 지반 가속도의 PSDF는 다음 식 (33)과 같다.⁽⁶⁾

$$S_g(\omega) = S_o \left[\frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \right] \times \left[\frac{(\omega/\omega_f)^4}{[1 - (\omega/\omega_f)^2]^2 + 4\xi_f^2(\omega/\omega_f)^2} \right] \quad (33)$$

식 (33)은 Kanai-Tajimi 스펙트럼에 구조물 기초의 전달함수를 곱한 것으로 ω_g, ξ_g 는 지반 조건에 의해 정해지며, ω_f, ξ_f 는 구조물의 기초형식에 따라 정해진다. 또한 그 값은 주파수 대역 특성에 따라 표 6과 같이 정의될 수 있다.⁽¹⁾

표 5 진동수영역 해석 결과

	초기건물	경우 1	경우 2	경우 3
최대 층간 변위(cm)	9.1552	4.3718	4.4255	4.4861
최상층 변위(cm)	69.6710	35.1139	35.2781	35.3961
최대 층가속도(m/s ²)	28.8803	28.5063	28.4999	28.4941

표 5의 결과는 식 (33)에서 $S_o = 100$ 에 대하여 표 4.5의 저주파수 대역에 관하여 해석한 결과이다.

표 6 지반, 기초조건에 따른 지반 가속도의 주파수 특성주파수

주파수	ξ_g	ω_g	ξ_f	ω_f
저주파수 대역	2π	0.40	0.20π	0.40
광역 주파수 대역	10π	0.80	π	0.80

4.2 3차원 일방향 비대칭 전단건물

건물의 강성이 X, Y축에 대하여 비대칭이고, 슬래브 강성이 매우 크다고 가정하면 건물은 각 층마다 X, Y방향의 횡방향 자유도와 비틀림 자유도의 3개의 자유도를 갖도록 모델링 할 수 있다. 본 예제에서는 문제를 단순화 하기 위하여 그림 14에서 X축에 대해서 강성이 대칭적으로 분포하고 지진하중은 비대칭 강성을 갖는 Y축 방향으로 작용하는 일방향 비대칭의 경우를 고려하기로 한다.

다음 표 7은 일방향 비대칭 평면을 갖는 모델건물의 사양이다. 표 7에서 X축 방향의 골조A와 B의 층강성의 합, Y축 방향의 골조C와 D의 층강성의 합은 앞 장의 평면 전단건물 예제의 각층 강성과 같다. 그러나 골조A와 B는 같은

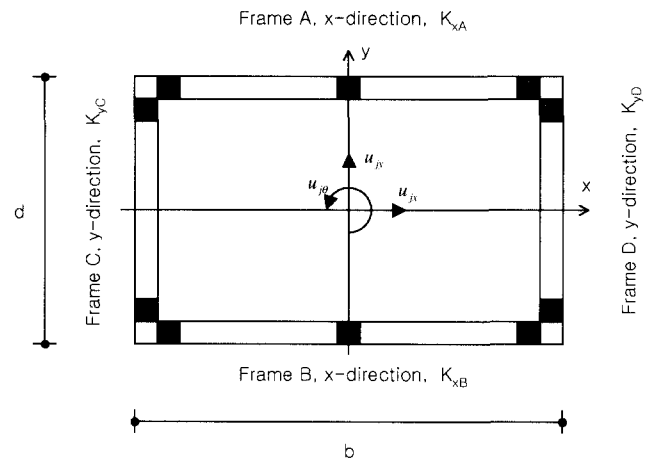


그림 14 비대칭 건물의 평면

표 7 일방향 비대칭 전단건물 사양

층	질량(kg)	골조A, B 층강성(kgf/cm)	골조C 층강성(kgf/cm)	골조D 층강성(kgf/cm)
1	24300	5000	4000	6000
2	24300	4000	3200	4800
3	24300	4000	3200	4800
4	24300	4000	3200	4800
5	24300	3500	2800	4200
6	24300	3500	2800	4200
7	24300	3500	2800	4200
8	24300	2500	2000	3000
9	24300	2500	2000	3000
10	24300	2500	2000	3000

각층 높이 : 4m 각층 너비 : 9m 각층 깊이 : 9m

강성을 갖으며 X축에 대하여 대칭이지만, 골조C와 D는 골조D의 강성이 건물의 모든 층에서 골조C의 강성의 1.5배의 강성을 갖는 비대칭을 이루고 있다. 감쇠비는 모든 모드에 대하여 2%로 한다.

표 8은 모델 건물에서 각 층의 축방향 응답과 비틀림 응답에 대한 1차 모드의 참여율을 보여준다.

표 8에서 각층의 축방향 응답과 비틀림 응답에 있어 1차 모드가 지배적임을 확인할 수 있다. 본 예제서는 먼저 1차 모드의 고유값을 지정한 경우에 대하여 최적 설계를 수행하

표 8 각 층 응답의 1차 모드 참여율

축방향 응답	1차 모드 참여율	2차 모드 참여율	비틀림 응답	1차 모드 참여율	2차 모드 참여율
1층	80.79%	0.38%	1층	61.48%	19.69%
2층	84.22%	0.39%	2층	64.08%	20.53%
3층	87.24%	0.41%	3층	66.38%	21.26%
4층	89.79%	0.42%	4층	68.33%	21.89%
5층	92.44%	0.43%	5층	70.34%	22.53%
6층	94.10%	0.44%	6층	71.61%	22.94%
7층	96.28%	0.45%	7층	73.26%	23.47%
8층	96.71%	0.45%	8층	73.59%	23.57%
9층	95.32%	0.44%	9층	72.53%	23.23%
10층	93.66%	0.44%	10층	71.27%	22.83%

여 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기의 최적 설계의 비대칭 건물에 적용 가능성을 확인하기로 한다.

4.2.1 모드별 기울기 정보

그림 15-17에서 기울기의 크기는 골조C와 골조D에 따라 다르며, 1차 모드의 고유 진동수와 감쇠비의 경우 강성이 약한 골조C에 대한 기울기가 골조D에 대한 기울기 보다 크다. 따라서 같은 층에서는 골조D보다 골조C에 감쇠기를 설치하는 것이 1차 모드의 고유 진동수와 감쇠비를 증가시키는데 효율적임을 나타낸다. 다시 말해 지정된 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비에 대한 점탄성 감쇠기의 파라미터 최적 분포는 초기건물에서 층강성의 비대칭성을 줄이는 방향으로 이루어진다.

하지만 2차 모드의 고유진동수와 감쇠비에 대한 기울기는 반대로 골조D가 골조C보다 크다. 즉 강성이 강한 골조D에 점탄성 감쇠기를 설치하는 것이 2차 모드의 고유진동수와 감쇠비를 더 많이 증가시키며 2차 모드의 고유값에 따라 점탄성 감쇠기를 설치할 경우, 2차 모드의 비틀림 응답은 가장 크게 감소시키지만 건물의 층강성의 비대칭성은 더 커지게 된다. 그러나 건물에 설치되는 전체적인 강성과 점성의 양은 더 커지므로 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비도 증가시키며 1차 모드 응답에 악영향을 끼치는 것은 아니다. 따라서 전체

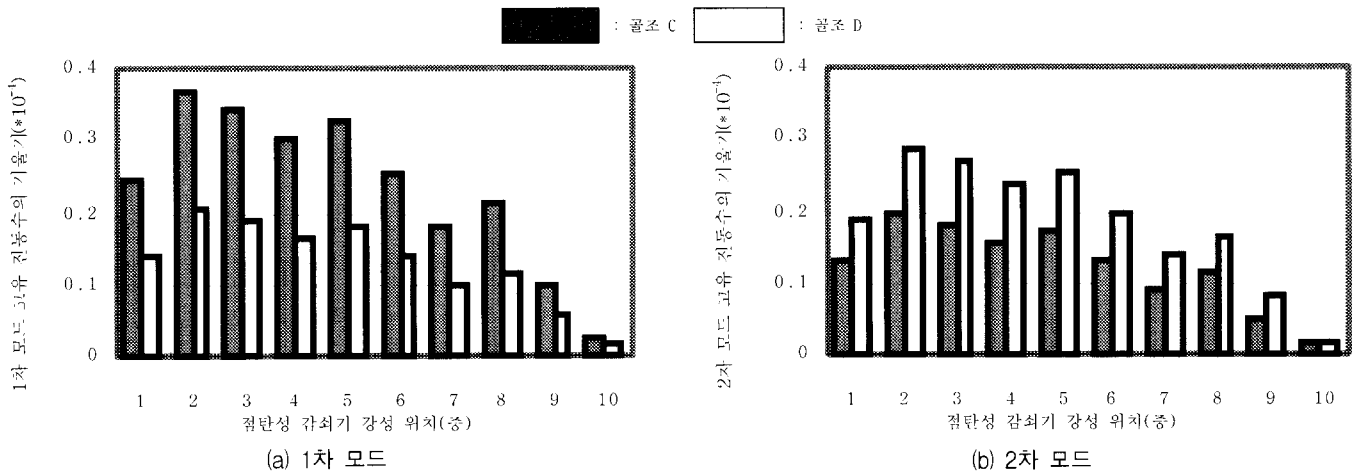


그림 15 점탄성 감쇠기 강성에 대한 고유진동수의 기울기

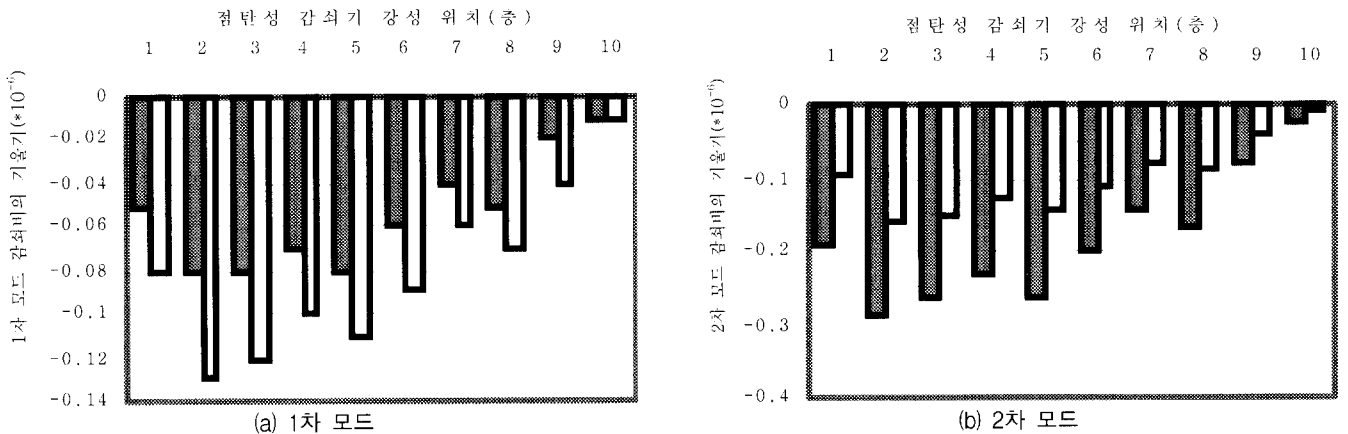


그림 16 점탄성 감쇠기의 강성에 대한 모드 감쇠비의 기울기

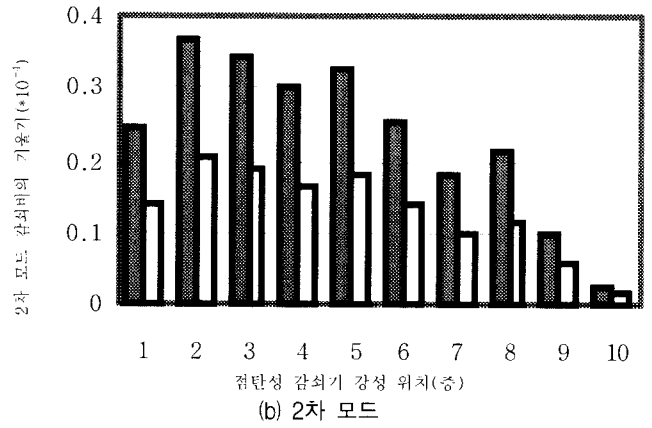
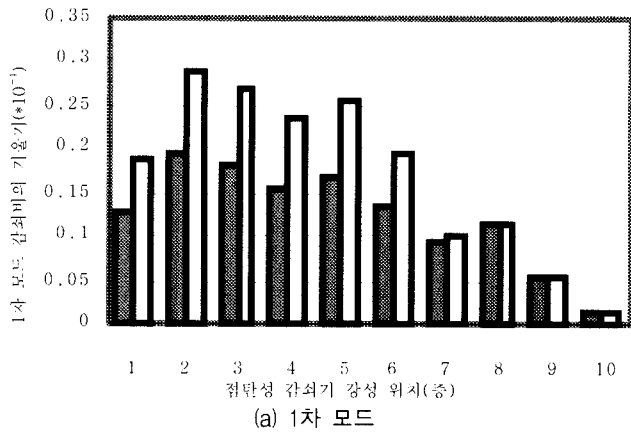


그림 17 점탄성 감쇠기의 점성에 대한 모드 감쇠비의 기울기

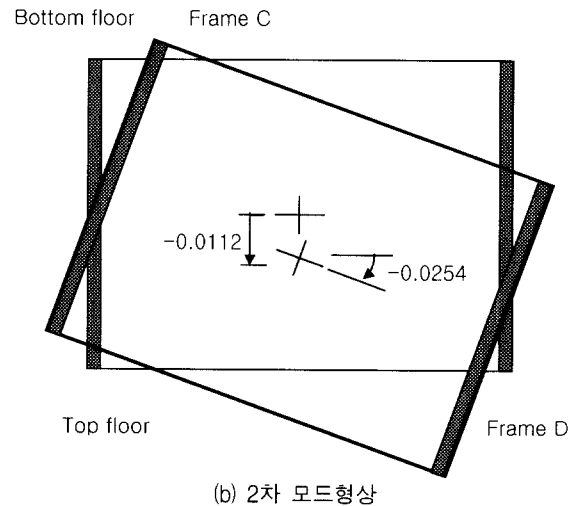
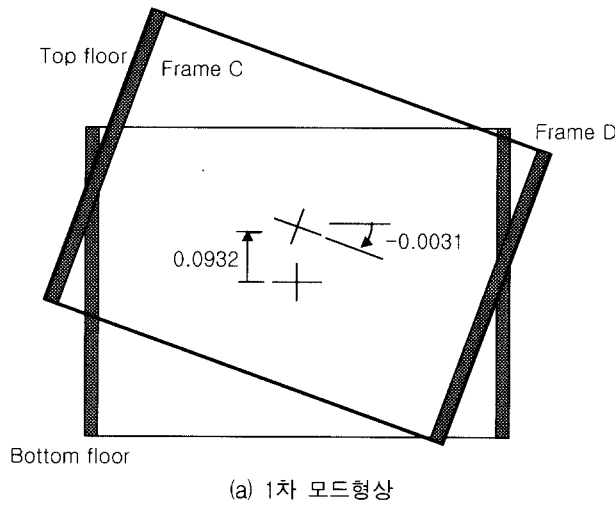


그림 18 1차 모드와 2차 모드의 개략적 형상

적인 건물의 변위응답의 측면에서는 1차 모드와 2차 모드의 고유값에 따른 양단부 골조에서 각각의 파라미터 분포 사이에 최소한의 물량을 갖는 최적 분포가 선택되어야 할 것이다.

그림 18은 건물의 최하층 평면에 대한 최상층 평면의 위치에 의해 예제 모델의 1차 모드와 2차 모드의 형상을 개략적으로 나타낸 것이다.

그림 18에서 1차 모드형상은 Y축 방향모드와 비틀림 모드를 포함하여 골조C가 원래의 위치에 비해 많이 움직이는 형상이며, 2차 모드형상은 골조D가 많이 이동하는 형상이므로 그림 15와 그림 17의 기울기 분포 결과는 물리적으로 볼 때 타당하다고 할 수 있다.

4.2.2 최적설계 결과 및 지진응답 해석

컨벡스 모델에서 각 모드의 변위응답을 원래의 50%로 감소시킬 수 있는 고유진동수와 감쇠비로 표 9의 값을 지정한다.

그림 19, 그림 20은 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비만을 지정하였을 때, 점탄성 감쇠기 강성과 점성의 최적 파라미터 분포이며 그림 21은 그때의 최상층 단부 변위의 전달함수의 크기를 나타낸다.

그림 19와 그림 20에서 볼 수 있듯이 1차 모드의 고유값만을 지정하였을 때는 점탄성 감쇠기의 강성은 초기 건물에서 강성에 대한 약측인 골조C에 골조D보다 2배 정도 많은

표 9 지정할 고유값

고유값	원래 건물	지정할 고유값
1차 모드의 고유진동수	0.4175Hz	0.4365Hz
1차 모드의 감쇠비	2%	7%
2차 모드의 고유진동수	0.7376Hz	0.7712Hz
2차모드의 감쇠비	2%	7%

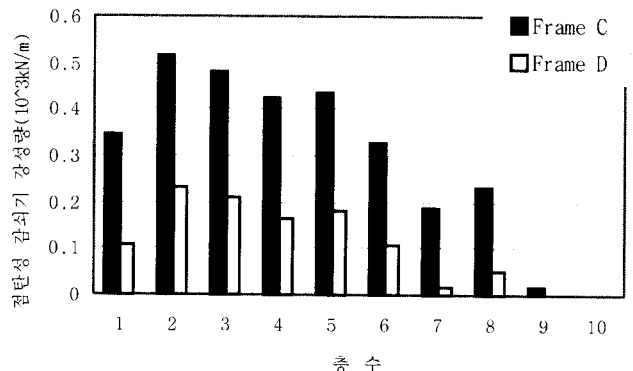


그림 19 1차 모드 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기 강성분포

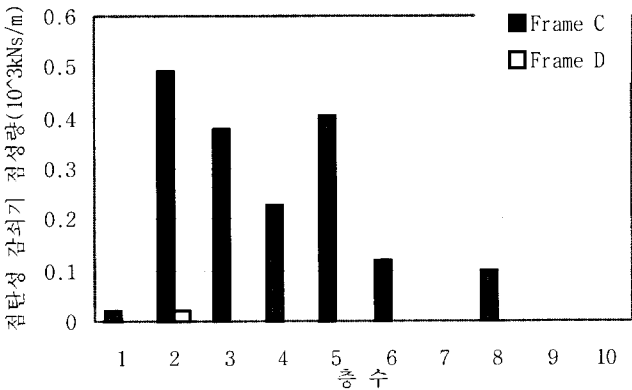


그림 20 1차 모드 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기 점성분포

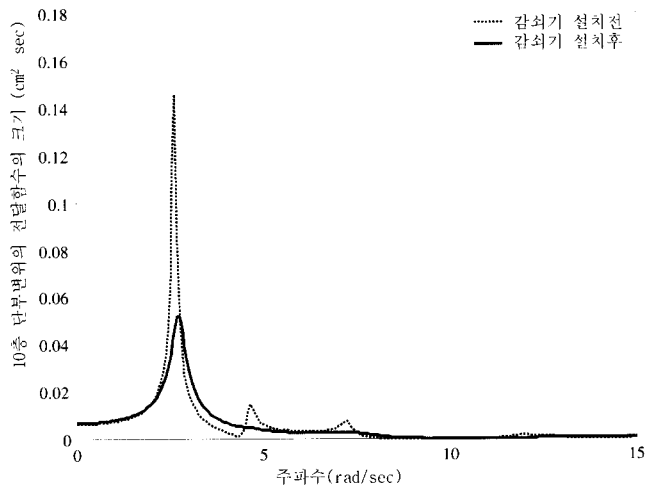


그림 21 최상층 단부 변위의 전달함수의 크기(1차 모드 고유값 지정)

양이 분포하며 점성은 거의 모든 점성이 골조C에 분포하게 된다. 1차 모드만을 지정할 때는 기울기 정보로부터 확인한 바와 같이 파라미터는 주로 골조C에 분포하며 건물의 강성에 있어서의 비대칭을 줄이는 방향으로 배치됨을 의미한다. 다음 그림 22, 그림 23은 1차 모드의 고유값 지정된 최적설계에 의해 파라미터를 분포시킨 후 다시 2차 모드의 고유진동수와 감쇠기 지정하여 최적설계를 수행한 결과이다.

그림 22와 그림 23에서 볼 수 있듯이 2차 모드의 고유값을 지정하여 설계할 경우는 골조D에 더 많은 파라미터가 분포하게 되어 각각 골조C와 골조D에 설치되는 감쇠기 파라미터량의 차는 1차 모드만을 지정하였을 때보다 작아진다

한편, 그림 21과 그림 24에서 축방향 응답과 비틀림 응답의 합으로 나타나는 단부의 변위응답의 전달함수는 축방향 응답과 비틀림 응답에 모두 가장 지배적인 1차 모드의 고유진동수 부근에서 극대점을 가지며 다음으로 2차 모드의 고유진동수 부근에서 극대점을 갖는다.

표 10은 최적설계 후 건물의 주파수 영역 해석 결과와 동적 특성의 변화를 나타낸다. 표 10에서 두번째 열은 비대칭 방향인 Y축 방향과 강성의 총량은 같지만 축에 대하여 강성이 대칭인 X축 방향에 대한 결과이다. 비대칭일 경우 건물의 1차 모드의 고유진동수는 대칭일 때 보다 작아지며, 최상층 단부의 변위도 비틀림 모드 응답에 의해 69.6710cm에서 86.3001cm로 증가하고 있다. 즉, 비틀림에 의해 약20% 정도의 변위 응답결과에서의 증가가 나타난다.

1차 모드의 고유진동수를 지정하였을 때 최상층의 단부 변위와 층간 변위는 각각 처음 응답의 49.08%와 50.23%로

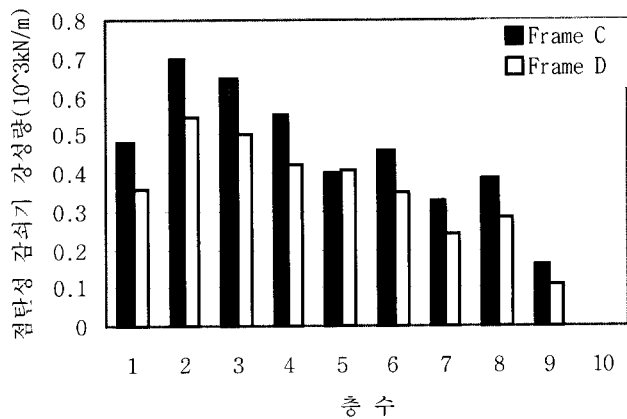


그림 22 1,2차 모드 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기 강성분포

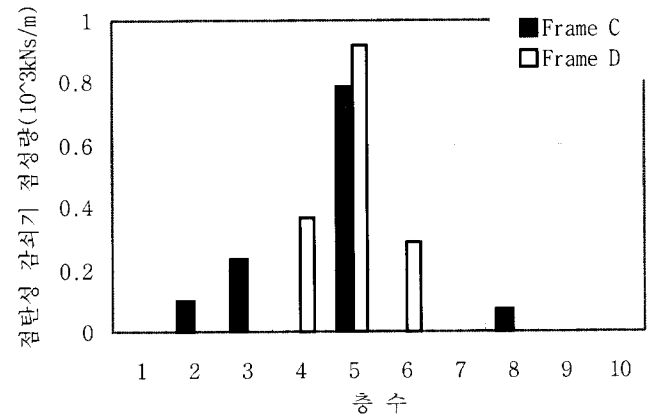


그림 23 1,2차 모드 고유값 지정에 의한 점탄성 감쇠기 점성분포

표 10 점탄성 감쇠기 설치 전후 주파수영역 해석결과 및 건물의 동적특성

건물의 응답 및 특성	초기건물 X축 방향(대칭)	초기건물 Y축 방향(비대칭)	1차모드 지정	1, 2차모드 지정
최대 단부 층간 변위(cm)	9.1552	11.3335	5.5628	5.3246
최상층 단부 변위(cm)	69.6710	86.3001	43.3481	40.6562
1차 모드 고유진동수	0.4238Hz	0.4175Hz	0.4365Hz	0.4507Hz
1차 모드 감쇠비	2%	2%	7.00%	7.31%
2차 모드 고유진동수	.	0.7376Hz	0.7515Hz	0.7712Hz
2차 모드 감쇠비	.	2%	5.01%	7.00%

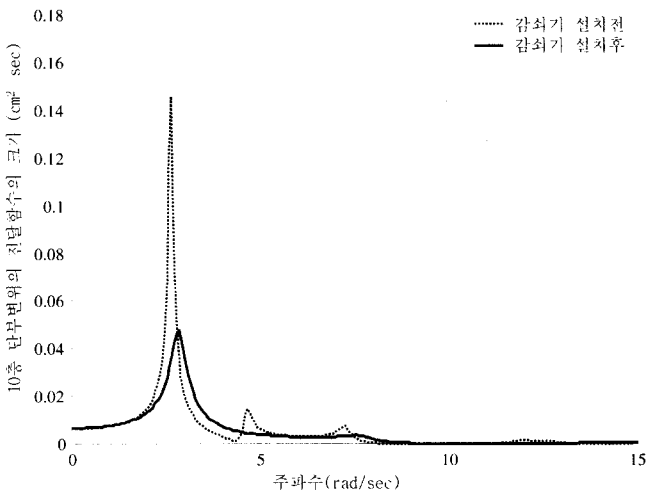


그림 24 최상층 단부 변위의 전달함수의 크기(1,2차 모드 고유값 지정)

감소하였다. 비록 1차 모드의 응답을 50%로 줄이는 고유값만을 지정하였음에도 1차 모드가 지배적이기 때문에 2차 모드의 감쇠비가 5.01%로 7%에 못 미치며 따라서 2차 모드의 응답이 50%까지 감소하지 않을 것임에도 불구하고 전체 응답에서 거의 50%의 감소 결과를 얻었다. 그러나 2차모드의 고유값까지 지정할 경우, 2차 모드의 비틀림 응답 감소와 점탄성 감쇠기의 파라미터를 추가로 설치함으로써 나타나는 1차 모드 응답의 감소의 영향으로 최상층의 단부 변위와 층간 변위는 표의 마지막 열에서 보이듯 원래값의 46.98%, 47.11%로 더 크게 줄일 수 있다. 한편, 1차 모드와 2차 모드의 두개의 모드에 대한 고유값에 대하여 설계할 경우 2차 모드의 고유값이 지정한 값에 이르게 하기 위해 더 많은 감쇠기를 설치하게 되므로 1차 모드의 고유값 역시 1차 모드만을 지정했을 때보다 7.31%로 증가한다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진하중에 대한 건축구조물의 안전성 확보를 위해 사용되는 점탄성 감쇠기의 최적설계를 수행하였으며 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고유값 지정에 의한 최적설계는 기울기 정보를 이용하여 감쇠기의 파라미터를 자유롭게 분포시키므로 층마다 건물의 원하는 응답 수준을 실현하는 최적의 감쇠기의 강성과 점성의 양을 구할 수 있다. 본 설계 방법은 점탄성 감쇠기의 강성과 점성을 서로 독립적인 것으로 생각하고 이를 기울기 크기에 따라 각층에 분포시키므로 점탄성 감쇠기의 파라미터 관점에서 최적 설계라고 할 수 있다.
2. 사용되는 점성과 강성의 총량 사이의 비는 원하는 응답 감소수준에 해당하는 설계 목표 고유진동수와 감쇠비의 조합을 다르게 함으로써 조절할 수 있다. 또한 기울기정보를 통하여 점탄성 감쇠기의 강성과 점성은 각각 건물의 고유진동수와 감쇠비에 독립적으로 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있다. 따라서 주어진 건물의 특성에 따라

목표 고유진동수와 감쇠비의 조합을 정하면 그에 대해 요구되는 점탄성 감쇠기의 강성과 점성의 총량은 각각 고유진동수와 감쇠비에 비례한다.

3. 비대칭의 건물에서 고유값 지정에 의한 최적설계 방법은 비틀림 응답의 개선도 동시에 이룰 수 있다. 비틀림 1차 모드의 고유값의 감쇠기 파라미터에 대한 기울기는 건물의 약축 골조에서 더 크다. 따라서 최적의 점탄성 감쇠기의 파라미터는 주로 건물의 약축 골조에 분포하게 되고 이는 건물의 비틀림 응답과 비대칭성을 동시에 개선시킨다.
4. 비대칭 건물에서는 2차 모드의 비틀림 응답이 전체 응답에 참여하는 비율이 크므로 2차 모드까지 지정하는 것이 바람직하다. 비대칭 건물의 경우 비틀림 모드의 응답은 2차 모드의 영향도 크며 1차 모드와 2차 모드가 위상이 같을 경우 두 모드의 비틀림 응답이 서로 중첩되어 매우 커지므로 비틀림 응답 개선을 위해서는 2차 모드의 고유값도 지정할 필요가 있다.
5. 다양한 건물에 대하여 건물특성과 설계조건에 따라 최적의 고유값을 지정하는 과정에 관한 연구가 필요하며, 선형탄성범위에서만 해석을 수행하였기 때문에 비선형 거동에 대한 추후 연구가 필요하다.
6. 추후 점탄성 감쇠기의 모델링 방법에 따라 고차모드의 감쇠비를 실제 거동과 유사하도록 재평가하는 과정이 포함된 최적설계에 대한 연구가 필요하다. 본 연구의 고유값 지정에 의한 최적 설계는 점탄성 감쇠기의 감쇠가 감쇠계수(C)에 의해서 표현되는 켈빈 모델에 대한 것이므로 해석상의 고차 모드 감쇠비는 실제보다 과대 평가된다. 따라서 추후 점탄성 감쇠기의 모델에 따라 고차모드의 감쇠비를 재평가하고 이를 고유값으로 하여 지정하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제(과제번호:1999-1-310-001-3)의 일환으로 수행되었으며, 과학재단의 연구비 지원에 대해서 감사드립니다.

참고 문헌

1. Wu, B. and Ou, J. P., "Optimal placement of energy dissipation devices for three-dimensional structures," *Engineering Structures* Vol. 19, No. 2, 1997, pp. 113-125.
2. Pantelides, C. P. and Tzan, S. R., "Convex model for seismic design of Structures-I : analysis," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 25, 1996, pp. 927-944.
3. Goel, R. K., "Effects of supplemental viscous damper on seismic response of asymmetric-plan system," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp.

- 125-141.
4. Junkins, J. L. and Kim, Y. D., "Introduction to dynamics and control of flexible structure," AIAA, Inc.
 5. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall.
 6. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw Hill.
 7. 이희현, 채원규, 남순성 共譯, 지진파의 스펙트럼 해석 입문, 大崎順彦, 도서출판 골드.