

점탄성 감쇠기를 이용한 비대칭 건물의 진동제어

Vibration Control of Asymmetric Buildings Using Viscoelastic Dampers

김진구*
Kim, Jin Koo

방성혁**
Bang, Sung Hyuk

이진수**
Lee, Jin Soo

국문요약

본 연구에서는 진동제어를 목적으로 강성이 비대칭적으로 분포된 구조물에 점탄성감쇠기를 설치할 경우 비틀림 응답을 줄이기 위한 감쇠기의 효과적인 배치방법에 관하여 연구하였다. 비대칭 구조물의 응답에 미치는 점탄성 감쇠기의 효과를 알아보기 위하여 비대칭 비비례감쇠시스템의 특성방정식을 유도하고, 고유치해석을 통해 감쇠기가 설치된 비틀림 건물의 거동특성을 파악하였다. 이를 바탕으로 강성 편심 및 진동수비에 따른 최적 감쇠 편심을 찾아 이를 3차원 그래프로 나타내었다. 이를 이용하여 비대칭건물에 감쇠기를 설치했을 때 같은 양의 감쇠기를 대칭으로 설치하였을 때 보다 그 효과가 더욱 향상되는 것으로 나타났다. 또한 비대칭건물의 비틀림 제어면에서 점탄성 감쇠기가 점성 감쇠기보다 우수한 것으로 나타났다.

주요어 : 비대칭건물, 점탄성감쇠기, 강성 편심, 최적 감쇠 편심

ABSTRACT

In this study, the determination of an appropriate location of viscoelastic dampers to improve the torsional responses of an asymmetric buildings is investigated when they are required to mitigate the earthquake-induced dynamic excitation. The modal characteristic equation of an asymmetric structure with added viscoelastic dampers were derived using the complex modal analysis method. Parametric study has been performed based on the modal characteristics, and the appropriate condition for compensating the stiffness eccentricity was plotted in a three-dimensional graph as a function of stiffness eccentricity and frequency ratio. The results indicate that the torsional response of the asymmetric buildings can be improved significantly following the proposed method, and that the viscoelastic dampers turn out to be more effective than viscous dampers in controlling torsional response of an asymmetric building.

Key words : asymmetric buildings, viscoelastic dampers, stiffness eccentricity, optimum damping eccentricity

1. 서 론

점탄성감쇠기에 관한 기존의 연구는 주로 대칭구조물을 대상으로 하고 있다. 그러나 실제로 대부분의 구조물은 강성이나 질량이 수직 또는 수평적으로 어느 정도 비대칭적인 분포를 보이고 있다. 특히 건물평면이 비대칭일 경우 횡방향 진동성분이 비틀림방향 진동과 연계되어 거동하므로 그 특성이 복잡해지고 국부적인 응답이 커지게 된다. 이러한 현상은 지진하중을 받을 경우 두드러지게 되며 대칭건물에 비하여 큰 피해를 유발할 수 있다.

최근 Goel⁽¹⁾은 특정한 지진하중을 받는 비대칭 구조물의 진동제어를 위해 점성감쇠기를 이용할 경우, 평면상에서 감쇠기를 적절히 배치하였을 때 효과적인 변위제어가 가능함을 보였다. 또한 Goel⁽²⁾은 점성 감쇠기가 설치된 1층 비대칭 구조물의 조화하중에 대한 동적 계수들과 모드특성의 변화에 관하여 연구하였다. 이러한 기존의 연구결과는 점성감쇠기를 평면상에서 적절히 배치함으로써 구조물의 비대칭거동을 줄일 수 있으며, 또한 모드 특성에 상당한 영향을 미친다는 사실은 보였으나, 주어진 비대칭구조물에 감쇠기를 어떤

식으로 배치해야 하는지, 즉 설계를 위한 효과적인 방안은 제시하지 못하고 있다. 그리고 비틀림에 대한 제어성능에 있어서는 점성만을 제공하는 점성감쇠기 보다 강성까지 보유한 점탄성감쇠기의 효율이 더욱 높을 것으로 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 진동제어의 목적으로 점탄성감쇠기가 요구되는 경우에 있어서, 평면상에서 감쇠기의 설치량을 조절하여 지진하중에 대한 비틀림 응답을 효과적으로 제어하는 방안에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 점탄성감쇠기가 설치된 강성 비대칭 구조물의 동적 특성방정식을 유도하고, 변수분석을 통하여 비대칭성에 영향을 미치는 변수들을 파악하였다. 이를 이용하여 주어진 강성편심, 감쇠비, 진동수비 등에 대한 최적 감쇠편심을 도식화하고 주어진 조건에서 비대칭 효과를 최소화할 수 있는 점탄성감쇠기의 배치 방안을 제시하였다.

2. 점탄성감쇠기의 특성

그림 1과 같은 점탄성 감쇠기에 사용되는 점탄성 재료는 점성과 탄성의 성질을 모두 가지고 있어, 발생한 변형은 탄성으로 회복되며 점성으로 인해 열로써 에너지의 일부를 소산시킨다. 일반적으로 점탄성감쇠기는 탄성 스프링과 점성 dashpot이 병렬로 연결된 Kelvin 모델(그림 2)을 이용하여 해석하며 강성과 감쇠상수는 다음과 같이 구할 수 있다.⁽³⁾

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

** 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

$$k_d = \frac{G'(\bar{\omega})A}{t} \quad c_d = \frac{G''(\bar{\omega})A}{\omega t} \quad (1)$$

여기서 전단 저장 계수 G' 은 한 주기 동안 저장되었다가 다시 회복되는 탄성 에너지를 나타내고, 전단 손실 계수 G'' 은 한 주기 동안 열로써 소산되는 에너지를 나타내는 재료 상수이며, $A, t, \bar{\omega}$ 는 각각 점탄성 재료의 면적, 두께, 감쇠기의 가력 진동수이다.

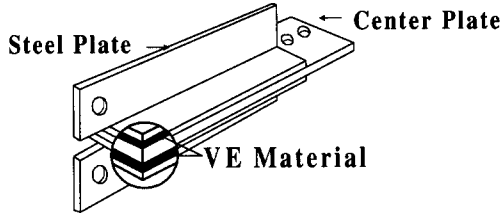


그림 1 점탄성감쇠기의 형상

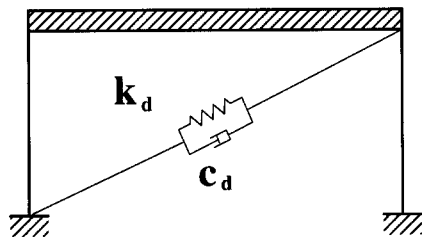


그림 2 점탄성 감쇠기의 모형화

3. 비대칭 비비례감쇠 구조물의 동적특성

3.1 고유치 해석

구조물에 점탄성 감쇠기가 국부적으로 추가되면 구조물의 감쇠행렬은 비비례 감쇠의 형태가 된다. 이러한 구조물은 질량과 강성행렬만으로 구한 모드벡터로는 감쇠행렬의 연계를 풀 수 없으므로, 모드 특성을 구하기 위해서는 감쇠행렬을 포함해서 고유치 해석을 수행하여야 한다. 이를 위하여 식 (2)의 동적 평형방정식을 식 (3)과 같이 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = -\mathbf{M} \mathbf{1} \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{B} \mathbf{z}(t) = \mathbf{R} \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{K} \\ \mathbf{K} & \mathbf{C} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M} \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix}$$

여기서, $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타내고, $\ddot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}$ 는 각각 가속도, 속도, 변위응답 벡터이다. 윗 식을 이용하여 다음 식 (4)와 같은 고유치 방정식을 구성할 수 있으며 켈레 복소수로 나타나는 고유치를 구할 수 있다:

$$(\mathbf{B} + \lambda \mathbf{A}) \boldsymbol{\phi} = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\lambda_n = -\zeta_n \omega_n - j\omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2}$$

$$\lambda_n^* = -\zeta_n \omega_n + j\omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2} \quad (5)$$

여기서, 고유 진동수 ω_n 과 모드 감쇠비 ζ_n 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\text{Re}(\lambda_n)^2 + \text{Im}(\lambda_n)^2}$$

$$\zeta_n = \frac{-\text{Re}(\lambda_n)}{\sqrt{\text{Re}(\lambda_n)^2 + \text{Im}(\lambda_n)^2}} \quad (6)$$

이를 이용하여 구한 복소모드를 모두 중첩시키면 모드들의 켈레 관계로 허수부분이 사라지고 실수로 나타나는 응답을 구할 수 있다.⁽⁶⁾

$$u(t) = 2 \sum_{k=1}^n \text{Re} \left(\frac{\phi_k}{\boldsymbol{\phi}_k^T \mathbf{A} \boldsymbol{\phi}_k} \times \sum_r \phi_{kr} \int_0^t e^{p_k(t-\tau)} Q_r(\tau) d\tau \right) \quad (7)$$

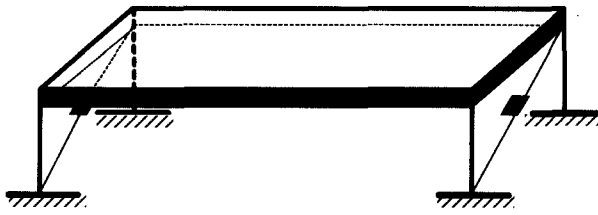
여기서 $\boldsymbol{\phi}_k = \begin{pmatrix} p_k \boldsymbol{\phi}_k \\ \boldsymbol{\phi}_k \end{pmatrix}$, 그리고 $p_k, \boldsymbol{\phi}_k$ 는 각각 복소고유치와 모드벡터를 의미한다. 따라서 비비례감쇠 구조물의 거동 특성을 단일한 모드로 형상화하기는 어려우나 중첩과정에서 허수부분이 소거되므로 실수부분만으로 비틀림응답 특성을 파악하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

또한 감쇠기가 설치된 비비례감쇠 구조물의 모드 참여계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

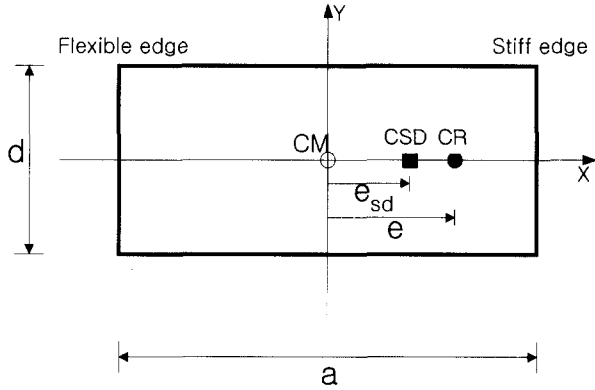
$$\Gamma_k = \frac{(\boldsymbol{\phi}_k^T \mathbf{M} \mathbf{1})^2}{2p_r \boldsymbol{\phi}_k^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_k + \boldsymbol{\phi}_k^T \mathbf{C} \boldsymbol{\phi}_k} \quad (8)$$

3.2 해석 모델

해석모델은 그림 3에 나타난 바와 같이 네 개의 기둥과 슬래브로 구성된 1층 1경간 구조물로, 구조물의 슬래브는 무한한 강성을 가진 것으로 가정하였고 구조물의 평면은 직사각형 형태로 기하 중심(geometric center)과 같은 위치에 질량 중심(CM)을 설정하였다. 또한 한 면의 기둥은 강성이 강한 기둥(stiff edge, 강변)으로, 다른 면은 강성이 약한 기둥(flexible edge, 약변)으로 설계해서 X축 방향으로서는 대칭이나 Y축 방향은 비대칭으로 하였으며, 강성의 중심을 강성중심(CR)으로 설정하였다. 따라서 X축의 횡방향과 비틀림 방향과의 거동은 독립적이나, Y축 방향으로서는 서로 연계되므로 Y축 방향으로 감쇠기를 설치하여 구조물의 내진성능을 높이고 동시에 변위 응답의 비대칭성을 제어하고자 하였다. 질량중심과 강성중심사이의 거리인 강성편심(e)으로 인한 비틀림의 제어를 위해 점탄성 감쇠기를 적절한 감쇠편심(e_{sd})을 갖도록 비대칭적으로 분배하였으며, 수치의 분석적인 면에서 효율을 기하기 위해 강성편심을 슬래브의 폭 a 로 나눈 \bar{e} 로 나타내고, 감쇠편심은 질량중심 CM과 감쇠중심



(a) 감쇠기가 설치된 1층 구조물



(b) 평면형상

그림 3 해석 모델

CSD의 상대 위치의 차이를 폭 a 로 나눈 \bar{e}_{sd} 로 나타내었다.

$$\bar{e} = \frac{e}{a}, \quad \bar{e}_{sd} = \frac{e_{sd}}{a} \quad (9)$$

본 연구의 주안점은 점탄성 감쇠기에 의해 비틀림이 조합된 횡방향 진동의 제어이므로 연계되지 않는 독립적인 X축 방향의 거동은 고려하지 않았다. 따라서 비대칭건물 시스템은 Y축 방향의 지진에 대하여 그림 3에 나타난 바와 같이 Y축 방향의 이동과 수직축을 중심으로 하는 회전 자유도를 가지는 2 자유도 시스템이 된다. 본 연구에서는 편의상 변위벡터를 $U^T = \{u_y, a_{u\theta}\}$ 로 구성하였다.

3.3 특성행렬의 구성

본 연구에서 설정한 모델처럼 그림 3(a)에 나타난 위치에 dashpot이 설치되면 비비례감쇠 시스템으로 간주하여 감쇠행렬을 포함한 모드방정식을 구성할 수 있다. 따라서 변위벡터에 대하여 다음과 같이 시스템 행렬을 구할 수 있다.⁽³⁾

$$\mathbf{M} = m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1+a^2}{12a^2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = 2mw_y \xi_{sd} \begin{bmatrix} 1 & \bar{e}_{sd} \\ \bar{e}_{sd} & \bar{e}_{sd}^2 + \rho^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = mw_y^2 \begin{bmatrix} 1 & \bar{e} \\ \bar{e} & \bar{e}^2 + \frac{1+a^2}{12a^2} \Omega^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 ω_y 는 Y방향의 고유진동수이고, Ω 는 비틀림 고유진동수 ω_θ 를 ω_y 로 나눈 값(ω_θ/ω_y)이다. 변수의 일반화를 위해 그림 3(b)에서 변장비 a/d 를 α 로 나타냈으며, ρ 는 감

쇠기의 설치반경을 슬라브 폭 a 로 나눈 값으로 일반적으로 감쇠기 사이의 거리가 가장 클 때 효과적이므로 본 연구에서는 이에 해당하는 0.5를 사용하였다.

하지만 점탄성감쇠기가 설치될 경우 그 강성으로 인하여 전체 구조물의 고유 특성이 변화하여 식 (10)의 강성행렬의 변수가 모두 달라진다. 따라서 본 연구에서는 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 모드특성방정식을 유도하기 위해 감쇠기 설치 후의 강성 k_y 를 다음과 같이 구하고 이를 바탕으로 변화된 변수들을 유도 하였다.

우선, 감쇠기의 고유값인 저장계수(G')와 소실계수(G'')의 비(G'/G'')를 γ 라 하고 감쇠비를 ξ 라 할 때 식 (1)로부터 G', G'' 는 다음의 식 (11)를 이용하여 식 (12)와 같이 각각 표현된다.

$$\xi = \frac{c_d}{2mw_y} \quad (11)$$

$$G' = \frac{2mt\xi w_y^2}{A}, \quad G'' = \frac{2mt\xi w_y^2}{A} \gamma \quad (12)$$

여기서 가력 진동수 $\bar{\omega}$ 는 구조물의 고유진동수 ω_y 를 사용하였다. 식 (12)로부터 감쇠기의 저장계수에 의한 강성을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_d = \frac{G'A}{t} = 2m\xi w_y^2 \gamma = 2\xi k_y \gamma \quad (13)$$

여기서 $k_y = k_{y0} + k_d$ (k_y : 감쇠기 설치 후의 구조물 강성, k_{y0} : 구조물 초기 강성, k_d : 감쇠기의 수평성분의 강성)이고 w_y 는 감쇠기 설치 후의 강성으로 인한 진동수를 의미한다. 따라서 식 (13)에서 k_d 는 다음 식으로 표현된다.

$$k_d = \frac{2\xi\gamma}{1-2\xi\gamma} k_{y0} \quad (14)$$

식 (14)을 식 (13)식에 대입하고 정리하면 식 (15)와 같이 감쇠기 설치 전후의 강성관계를 간단히 표현할 수 있다.

$$k_y = \mu k_{y0}, \quad \mu = \frac{1}{1-2\xi\gamma} \quad (15)$$

여기서 γ 의 값이 0이면 점성감쇠기를 의미하게 되는데 이때 감쇠기 설치전후의 강성관계를 나타내는 μ 를 강성변환계수라 명명하기로 한다.

다음으로 변수를 줄이기 위해 주어진 1층 모델에 있어서 Ω 를 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Omega = \frac{\omega_\theta}{\omega_y} = \sqrt{\frac{k_\theta m}{m_\theta k_y}} = \sqrt{\frac{3\lambda^2 + 3\alpha^2}{a^2 + 1}} \quad (16)$$

여기서 $m_\theta = \frac{m(a^2 + b^2)}{12}$, $k_\theta = k_x a^2 + k_y b^2$ 로 각각 표현되고, k_x, k_y 는 각각 x, y 방향의 강성이다. 식 (16)의

관계식을 이용하면 변장비 $\alpha=a/d$ 를 x, y 방향 진동수비 $\lambda = w_x/w_y$ 및 회전방향과 횡방향의 진동수 비 Ω 로 표현할 수 있다.

$$a^2 = \frac{3\lambda^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - 3} \quad (17)$$

윗 식의 좌변은 항상 0보다 크므로 다음의 제한조건이 성립하게 된다.

$$\begin{aligned} \lambda > 1 \text{ 이면 : } \sqrt{3} < \Omega < \sqrt{3}\lambda \\ \lambda < 1 \text{ 이면 : } \sqrt{3}\lambda < \Omega < \sqrt{3} \\ \lambda = 1 \text{ 이면 : } \Omega = \sqrt{3} \end{aligned}$$

이는 Ω 와 λ 의 범위가 유한함을 나타낸다. 일반적으로 편심거리는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{e} = \frac{k_{sy} - k_{fy}}{2(k_{sy} + k_{fy})} = \frac{k_{sy} - k_{fy}}{2\omega_y^2 m} \quad (18)$$

여기서 k_{sy}, k_{fy} 는 강변과 약변의 y 방향의 강성을 의미한다. 식 (18)에서 점탄성감쇠기가 설치된 시스템의 $k_{sy} - k_{fy}$ 는 감쇠기의 강성과 구조물의 강성을 각각 따로 더하여 구할 수 있다. 즉,

$$k_{sy} - k_{fy} = 2e_s \omega_{yo}^2 m + 2e_d \omega_d^2 m \quad (19)$$

여기서 ω_{yo}, e_s 는 감쇠기 설치전의 y 방향 진동수와 강성 편심을 의미하고 ω_d, e_d 는 감쇠기의 강성으로 인한 진동수와 강성편심을 의미한다. 따라서 감쇠기 설치 후의 감쇠편심은 다음과 같다.

$$\bar{e}_i = \frac{e_s \omega_{yo}^2 + e_d \omega_d^2}{\omega_y^2} \quad (20)$$

식 (14), (15)를 이용하여 구한 다음의 식 (21)을 식 (20)에 대입하면 식 (22)를 구할 수 있다.

$$\omega_y = \omega_{yo} \sqrt{\frac{1}{1-2\xi\gamma}}, \quad \omega_d = \omega_{yo} \sqrt{\frac{2\xi\gamma}{1-2\xi\gamma}} \quad (21)$$

$$\bar{e}_i = \left(\bar{e} + \bar{e}_{sd} \left(\frac{2\xi\gamma}{1-2\xi\gamma} \right) \right) (1-2\xi\gamma) \quad (22)$$

한편 감쇠기의 설치로 변화된 Ω 는 식 (17)을 이용한 다음의 관계식이 성립함으로써 나타낼 수 있다.

$$\frac{3\lambda^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - 3} = \frac{3\lambda_i^2 - \Omega_i^2}{\Omega_i^2 - 3}$$

여기에 λ_i, Ω_i 는 감쇠기 설치 후의 변화된 λ, Ω 를 의미한다. 식 (15)의 관계에 의해 구한 $\lambda_i^2 = \lambda^2 \frac{1}{\mu}$ 을 대입하고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\Omega_i = \frac{(\lambda^2 - 2\lambda^2 \xi\gamma - 1)\Omega^2 + 6\lambda^2 \xi\gamma}{\lambda^2 - 1} \quad (23)$$

위의 식 (15), (17), (22), (23)을 이용하여 점탄성감쇠기가 설치된 1층 구조물의 시스템 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{\lambda^2 - 1}{12\lambda^2 - 4\Omega^2} \end{bmatrix} & \mathbf{C} &= 2m\omega_y \xi \begin{bmatrix} 1 & \bar{e}_{sd} \\ \bar{e}_{sd} & \bar{e}_{sd}^2 + \rho^2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서

$$\begin{aligned} k_{11} &= m\omega_y^2 \mu \\ k_{12} &= m\omega_y^2 (\bar{e} + \bar{e}_{sd} 2\xi\gamma\mu) \\ k_{21} &= m\omega_y^2 (\bar{e} + \bar{e}_{sd} 2\xi\gamma\mu) \\ k_{22} &= m\omega_y^2 \mu \times \left(\left(\bar{e} + \bar{e}_{sd} 2\xi\gamma\mu \right) \frac{1}{\mu} \right)^2 \\ &\quad + \frac{(\lambda^2 - 2\lambda^2 \xi\gamma - 1)\Omega^2 + 6\lambda^2 \xi\gamma}{12\lambda^2 - 4\Omega^2} \end{aligned}$$

식 (24)의 시스템 행렬들을 식 (10)에 대입하면 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 모드특성 방정식을 유도할 수 있으며 고유치 해석을 통하여 점탄성감쇠기가 설치된 비대칭 구조물의 모드특성을 파악할 수 있다. 위의 식에서 점탄성감쇠기를 설치하였을 때의 모드에 영향을 주는 변수는 $\bar{e}, \bar{e}_{sd}, \Omega, \omega_y, \lambda, \gamma, m, \xi$ 등임을 알 수 있다.

4. 모드분석

4.1 비감쇠시스템의 모드 특성

표 1, 2는 주어진 해석모델에 감쇠기가 설치되지 않았을 때의 모드특성을 나타낸다. 표에서 편심이 없는 비연계모드에서 비틀림과 변위는 각각 독립적으로 나타나지만 편심이 있는 연계모드에서는 각각의 모드에서 두 성분이 함께 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 편심이 증가해도 횡방향 모드 성분의 크기에는 크게 영향이 없으나 비틀림 성분의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 비틀림으로 인해 강변에서의 변위는 감소하지만 약변에서의 변위가 증가함을 의미한다. 민경원 등⁽⁵⁾은 이러한 두 성질을 가진 모드의 연계성을 정량적으로 표현하기 위하여 R 을 비틀림 모드 성분인 ϕ_θ 와 횡방향 모드 성분인 ϕ_y 의 비 $R = \frac{\phi_\theta}{\phi_y}$ 로 나타내었다. 표 3에서 R 이 0에 가까우면 횡 방향 성분인, ∞ 에 가까우면 비틀림 성분이 지배적임을 알 수 있다. 또한 그림 4와 5에서 볼 수 있듯이 R 의 부호는 비틀림 특성을 나타내는 중요한 역할을 하는데 R 이 음의 부호를 가질 때는 왼쪽이 약하고 (flexible edge) 양의 값을 가지면 오른쪽이 약함을 알 수 있다.

표 1 강성편심에 따른 1차모드의 변화

\bar{e}	0	0.1	0.2	0.3
ϕ_y	-0.3588	0.3513	0.3415	0.3333
ϕ_θ	0	-0.1417	-0.2547	-0.3315

표 2 강성편심에 따른 2차모드의 변화

\bar{e}	0	0.1	0.2	0.3
ϕ_y	0	-0.0198	-0.0365	-0.0486
ϕ_θ	-0.2628	-0.2602	-0.2527	-0.2443

표 3 강성편심에 따른 R값의 변화

\bar{e}	0	0.1	0.2	0.3
1차	0	-0.4035	-0.7458	-0.9945
2차	∞	13.14	6.9233	2.835

표 4 모드참여계수

모드	모드 응답참여 계수	참여율(%)
1	0.000020237	47.8732
2	0.000020237	47.8732
3	0.000000899	2.126
4	0.000000899	2.126
계	0.0042272	100

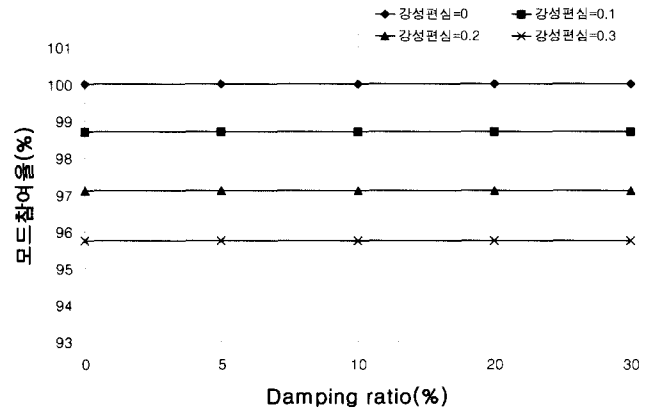


그림 6 강성편심과 감쇠량에 따른 모드 참여율

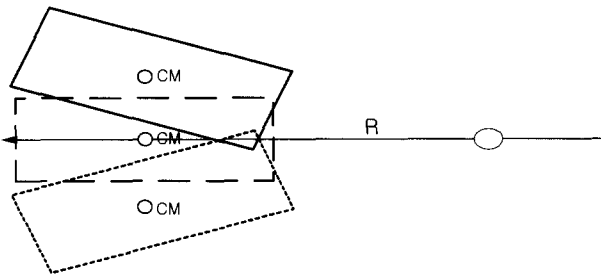


그림 4 $R < 0$ 인 경우

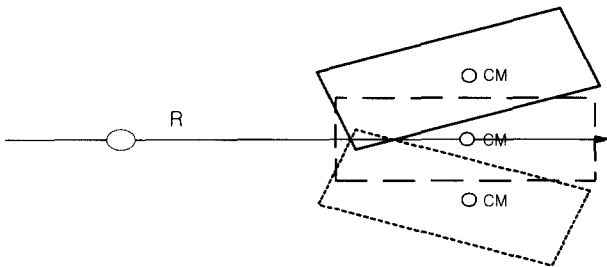


그림 5 $R > 0$ 인 경우

4.2 감쇠시스템의 모드특성

표 4는주어진 해석 모델에 30% 강성편심을 주고 1차 모드에 대한 감쇠비가 20%일 경우의 모드 참여계수를 나타낸다. 상태방정식에 대한 고유치해석으로 구한 1, 2차 모드를 더한 값이 구조물의 기본 모드(fundamental mode)에 해당하므로 기본 모드의 참여율은 95%를 넘는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 6은 이러한 모드참여계수 중에서 기본 모드의 참여계수를 강성편심과 감쇠량에 따라 나타낸 것이다. 강성편심이 커질수록 2차 모드의 영향이 커짐을 알 수 있지만 일반적으로 존재 가능한 강성편심의 범위에서는 1차 모드에 의해서 구조물의 거동이 지배됨을 알 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 감쇠기가 설치된 구조물의 모드특성을 파악하기 위하여 모드성분비 R을 구할 때 1차 모드의 실수부만을 이용하였다.

4.3 최적감쇠분배

4.1 절과 4.2 절을 바탕으로 비대칭구조물에서 강성과 반대되도록 충분한 양의 감쇠 편심을 증가시키면 R값이 변하게 되고 $R=0$ 이 되는 시점을 찾을 수 있다. 본 연구에서는 이 시점을 최적 감쇠분배점 (point of optimum damping distribution, ODD)로 명명하기로 한다. 그림 7은 그림 3의 비대칭시스템의 시간이력 해석 결과로써 감쇠기별 성능을 비교하기 위하여 점탄성감쇠기 및 점성감쇠기의 감쇠 편심에 따른 강변과 약변의 최대변위를 구한 결과이다. 지진하중은 El Centro NS성분을 사용하였고, 강성 편심은 0.2로 하였다. 구조물의 감쇠비를 5%로 가정하고 감쇠기를 설치하여 최종 감쇠비를 33%로 하였다. 점성 및 점탄성감쇠기는 동일한 감쇠비를 갖도록 설정하였다. 점탄성감쇠기를 설치할 경우 감쇠 편심이 증가할수록 강변의 변위는 커지고 약변의 변위는 작아지다가 결국 두 변위가 같아지고 역전되는 시점이 발생하는데, 모드해석에 의하면 이때 R값이 0에 근접함을 알 수 있다(그림 8). 또한 감쇠 편심이 ODD이상이면 비틀림이 역으로 발생한다. 따라서 해석을 수행하기 전에 모드 분석을 통하여 적정 ODD를 구할 수 있고, 이때의 ODD를 가장 적절한 감쇠 편심이라 할 수 있다. 이러한 결과는 변위 응답을 근거로 구한 최적 감쇠 편심이 하중의 특성에 따라 달라지는 반면, 모드특성을 이용하여 구한 최적 감쇠편심은 구조물 자체의 특성이므로 보다 일반적으로 적용할 수 있는 값이라 할 수 있다. 또한 위의 결과에서 볼 수 있듯이 점성 감쇠기는 지진에 대한 내진성능 향상에 효과가 큰 것으로 알려져 있으나, 비대칭 응답의 저감능력은 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉 경제성과 진동제어 효과를 동시에 고려한 감쇠비를

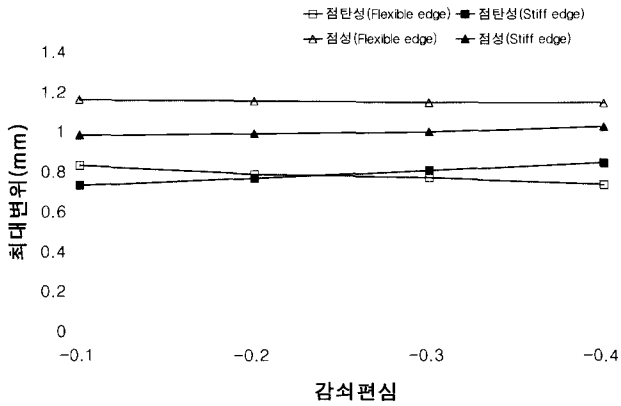


그림 7 감쇠편심에 따른 강변과 약변의 변위

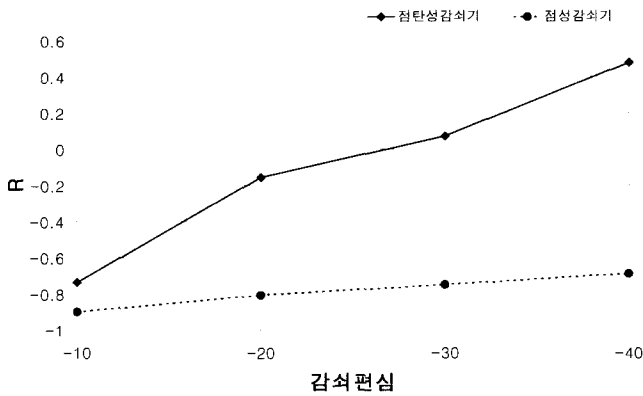


그림 8 감쇠편심에 따른 R의 변화

5%를 포함하여 감쇠비가 30%가 되도록 설치할 경우, 그림 9에 근거하여 case1 일 경우 적정 감쇠편심은 약 0.16, case2 일 경우 약 0.3임을 알 수 있다. 이는 응답의 대칭성을 확보하기 위하여 양쪽에 설치하는 감쇠기의 크기를 각각의 경우에 0.16, 0.3의 편심이 발생하도록 분배하는 것이 효과적인 감쇠 분배임을 의미한다. 이러한 결론은 지진하중에 대한 시간이력해석 결과로 확인할 수 있다. 즉, 그림 10과 11은 각각 El Centro NS성분과 Taft NS성분의 지진에 대한 양변의 변위 응답을 나타낸 것으로, 감쇠편심이 각각 18%, 30%와 17%, 27% 부근에서 양변의 최대변위가 일치하여 변위응답의 대칭성이 확보됨을 알 수 있다. 이 값들은 모드 특성에서 구한 16%, 30%의 감쇠편심과 매우 근접한 값이다.

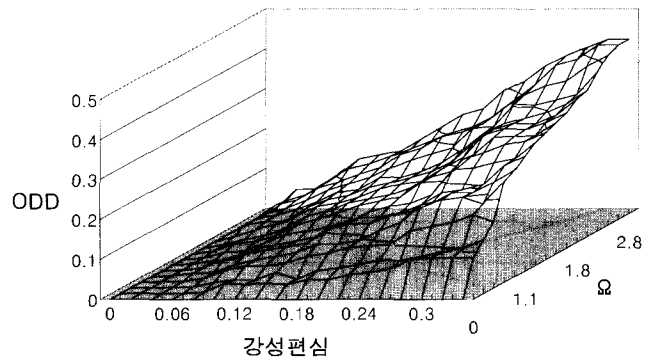


그림 9 주요 변수와 ODD의 관계

20-30%라고 할 때 점성감쇠기의 비대칭 회복률은 점탄성감쇠기에 비해서 그 효과가 미약하고 많은 경우에 ODD점이 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 진동제어와 함께 비대칭문제에서의 효과를 고려할 때 점탄성 감쇠기가 더욱 뛰어나다고 할 수 있다.

5. 예제해석

그림 9는 감쇠비가 30%인 경우 각 강성편심 및 진동수비에 해당하는 최적 감쇠편심 ODD를 구하여 도식화 한 것이다. 이러한 도표를 여러 감쇠비에 대하여 미리 마련하여 놓으면, 임의의 강성 비대칭구조물의 최적 감쇠편심을 도표를 이용하여 쉽게 구할 수 있을 것으로 사료된다. 여기서 감쇠비의 크기는 특정한 지진하중에 대하여 구조물이 요구되는 성능수준을 만족하기 위하여 필요한 값이라 할 수 있다.

위에서 기술한 내용을 검증하기 위하여 그림 3의 예제 구조물에서 기둥으로 H-400×400×13×21을 기본으로 기둥의 강성을 적절히 조절하여 다음의 2가지 구조물을 설계하였다.

case1 : $\Omega = 1.5, \bar{e} = 0.2$

case2 : $\Omega = 2.27, \bar{e} = 0.3$

γ 가 0.95인 3M사의 점탄성감쇠기를 구조물 자체의 감쇠비

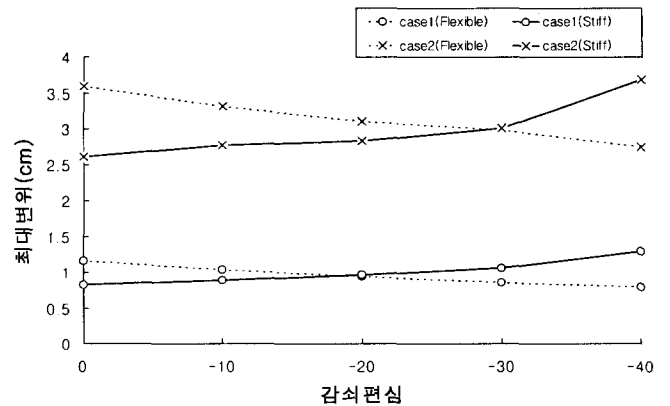


그림 10 감쇠편심에 따른 최대변위의 변화 (El Centro earthquake)

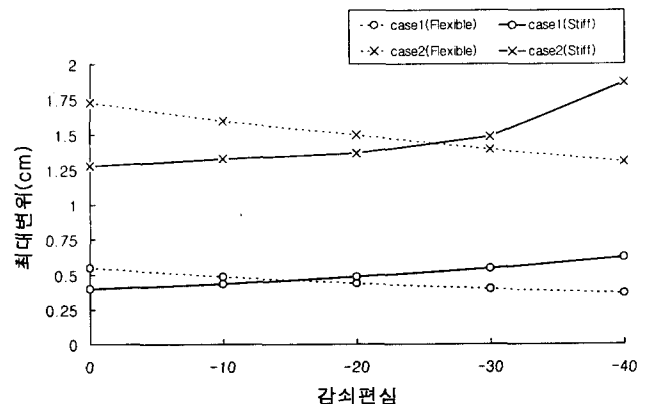


그림 11 감쇠편심에 따른 최대변위의 변화 (Taft earthquake)

6. 결 론

본 논문에서는 비대칭 구조물의 내진성능을 향상시키기 위하여 점탄성감쇠기를 이용할 경우 감쇠기를 비대칭적으로 분배하여 구조물의 강성편심을 해소하는 방안에 관하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 비틀림모드 특성은 회전 방향 - 횡방향 진동수비 Ω 와 강성편심 및 감쇠편심 \bar{e} , \bar{e}_{sd} 등에 의해 영향을 받는다.
- 감쇠행렬을 고려한 모드해석에 의한 최적 감쇠분배점(ODD)을 이용하여 비틀림을 고려한 적절한 감쇠편심을 결정할 수 있다.
- 감쇠값을 적절히 분배함으로써 같은 양의 감쇠기를 사용할 경우 비틀림 제어효과를 증대시킬 수 있다.
- 점성감쇠기보다 점탄성감쇠기가 비틀림제어에 더욱 효과적이다.

감사의 글

본 연구는 성균관대학교 석천연구비 및 한국과학재단 특정기초연구과제(과제번호: 1999-1-310-001-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Goel, R. K., "Effects of supplemental damping on earthquake response of asymmetric buildings," *6th U.S National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, 1998.
2. Goel, R. K., "Seismic behavior of asymmetric buildings with supplemental damping," *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 29, 2000, pp. 461-480.
3. Soong, T. T. and Dargush, G. F., "Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering," State University of New York at Buffalo, 1996.
4. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995.
5. 민경원, 이영욱, "감쇠기가 설치된 비틀림형건물의 자유 진동", 대한건축학회논문집, 제11권, 제12호, 1995.
6. 김진구, 홍성일, 이경아, 이동근 "고층건물의 진동제어를 위한 점탄성감쇠기의 활용", 한국지진공학회논문집, 제4권, 제1호, 2000, pp. 77-88.