

비대칭 건물의 거동 개선을 위한 점탄성 감쇠기의 활용에 관한 연구

Effects of Viscoelastic Dampers on the Improvement of Torsional Response of Asymmetric Buildings

김진구* 방성혁** 이진수**
Kim, Jin-Koo Bang, Sung-Hyuk Lee, Jin-Soo

Abstract

The visco-elastic dampers were used to improve the torsional responses of an asymmetric buildings. 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 investigated. According to the results the torsional response of the asymmetric buildings could be improved significantly once the dampers were properly placed.

1. 서 론

건물평면이 비대칭일 경우 횡방향 진동성분이 비틀림방향 진동과 연계해서 거동하므로 그 특성이 복잡해지고 국부적인 응답이 커지게 된다. 이러한 현상은 지진하중을 받을 경우 두드러지게 되며 대칭건물에 비하여 큰 피해를 유발할 수 있다. 진동 감쇠기에 관한 연구에 있어서도 연구의 초점은 대부분 대칭건물에 맞추어져 왔고 비대칭건물에 대한 감쇠기의 역할에 대해서는 아직 초보적인 수준에 머물고 있다. 최근 Goel⁽³⁾⁽⁴⁾은 점성 감쇠기가 설치된 1층 구조물의 조화하중에 대한 변위응답의 특성을 연구하였다. 본 논문에서는 점탄성 감쇠기가 설치된 비대칭 구조물의 특성 행렬과 모드 특성방정식을 유도하고 실제 지진거동에 대한 응답제어 방안에 대하여 연구하였다.

2. 점탄성 감쇠기 및 복소모드중첩법

2.1. 점탄성 감쇠기

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

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

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수
** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

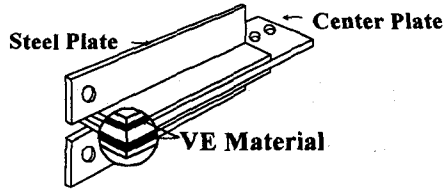


그림 1. 점탄성감쇠기의 형상

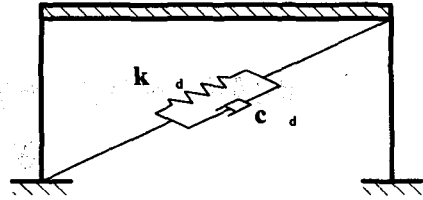


그림 2. 점탄성 감쇠기의 모형화

여기서 전단 저장 계수는 G' 은 한 주기 동안 저장되었다가 다시 회복되는 탄성 에너지를 표현하고, 전단 손실 계수 G'' 은 한 주기 동안 열로써 소산되는 에너지를 나타내는 재료상수이며, A, t, ω 는 각각 점탄성 재료의 면적, 두께, 하중의 진동수이다.

2.2 복소 모드 중첩법

구조물에 점탄성 감쇠기가 국부적으로 추가되면 구조물의 감쇠행렬은 비비례감쇠의 형태가 된다. 이러한 구조물은 질량과 감쇠행렬만으로 구한 모드벡터로는 감쇠행렬의 연계를 풀 수 없으므로, 모드 특성을 구하기 위해서는 감쇠행렬을 포함해서 고유치해석을 수행하여야 한다. 이를 위하여 식 (2)의 동적 평형방정식에 허식을 도입하고, 식 (3)과 같이 상태방정식으로 표현되는 새로운 동적 평형 방정식을 구성할 수 있다.

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

$$Az(t) + Bz(t) = Ru_g(t) \quad (3)$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} -K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & K \\ K & C \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 \\ -Ms \end{bmatrix}$; M, C, K 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타내고, \ddot{u}, \dot{u}, u 는 각각 가속도, 속도, 변위응답 벡터이다. 위 식을 이용하여 다음과 같은 고유치 방정식을 구성할 수 있으며 쥘레 복소수로 나타나는 고유치를 구할 수 있다:

$$(B + \lambda A)\Phi = 0 \quad (4)$$

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

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

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

이를 이용하여 구한 복소모드를 모두 중첩시키면 모드들의 쥘레 관계로 허수부분이 사라지고 실수로 나타나는 응답을 구할 수 있다.

3. 해석모델

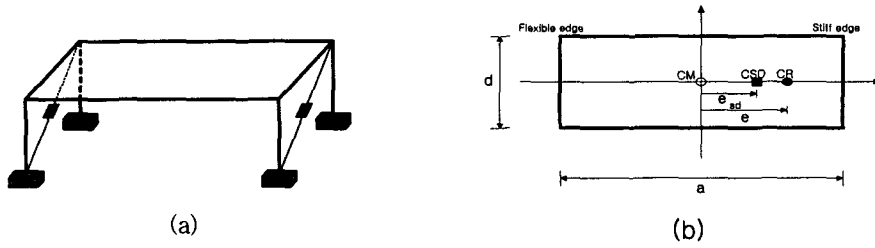


그림 3. 해석 모델

그림 3에 나타난 바와 같이 구조물의 평면은 직사각형 형태로 기하 중심(CG)과 같은 위치에 질량 중심(CM)을 설정하였으며, 한 면의 기둥은 강성이 강한 기둥(Stiff edge)으로, 다른 면은 강성이 약한 기둥(Flexible edge)으로 설계해서 X축 방향으로의 대칭이나 Y축방향은 비대칭으로 하였으며 강성의 중심을 강성중심(CR)으로 설정하였다. 따라서 X축의 횡방향과 비틀림 방향과의 거동은 독립적이거나, y축 방향으로 서로 연계되므로 본 논문에서는 Y축 방향으로 감쇠기를 설치하여 구조물의 내진성능을 높이고 변위 응답의 비대칭성을 제어하고자 하였다. 질량 중심과 강성중심사이의 거리인 강성편심(e)의 효과를 제어하기 위해 점탄성 감쇠기를 적절한 감쇠편심(e_{sd})을 갖도록 비대칭으로 분배하였으며 수치의 분석적인 면에서 효율을 기하기 위해 강성편심을 슬라브의 폭 a 로 나눈 \bar{e} 로 나타내고, 감쇠편심은 질량중심 CM과 감쇠중심 CSD의 상대 위치의 차이를 폭 a 로 나눈 \bar{e}_{sd} 로 나타내었다. 본 논문의 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 나타낸바와 같이 Y축방향의 이동과 수직축을 중심으로 하는 회전 자유도를 가지는 2계 자유도 시스템이 된다. 본 연구에서는 편의상 변위벡터를 $U^T = \{u_y, \alpha_\theta\}$ 로 구성하였다.

4. 시스템행렬의 구성

비대칭 단층 구조물의 일반적인 동적 특성 방정식은 다음과 같다⁽²⁾.

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{\omega_n^2}{\omega_y^2} & \bar{e} \\ \bar{e} & (\Omega^2 - \frac{\omega_n^2}{\omega_y^2}) + \bar{e}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_y \\ \Phi_\theta \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

윗 식을 이용하여 그림 3 (a)와 같은 임의의 위치에 감쇠가 더해진 구조물의 감쇠행렬을 포함하는 특성 방정식은 다음과 같이 유도할 수 있다⁽⁴⁾.

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{\omega_n^2}{\omega_y^2} + \frac{\omega_n}{\omega_y} \xi_{sd} i & \bar{e} + \frac{\omega_n}{\omega_y} \xi_{sd} \bar{e}_{sd} i \\ \bar{e} + \frac{\omega_n}{\omega_y} \xi_{sd} \bar{e}_{sd} i & \frac{1+a^2}{12a^2} \Omega^2 + \bar{e}^2 - \frac{1+a^2}{12a^2} (\frac{\omega_n}{\omega_y})^2 + (\frac{\omega_n}{\omega_y} \xi_{sd} (\bar{e}_{sd}^2 + \rho^2)) i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_y \\ \Phi_\theta \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

여기서 ω_n 은 n 차 모드의 진동수이며 ω_y 는 CM과 CR이 일치할 때, 즉 대칭일 때의 Y방향의 고유진동수이고

Ω 는 비틀림 고유진동수 ω_θ 를 ω_y 로 나눈 값(ω_θ/ω_y)이다. 또한, 그림 3(b)에서 a/d 를 α 로 나타냈으며 ρ 는 감쇠기의 설치반경을 슬라브 폭 a 로 나눈 값으로 Goel⁽³⁾의 연구결과 0.5일 때 그 효과가 가장 큰 것으로 나타나 본 연구에서는 0.5를 사용하였다.

이러한 특성방정식은 점성감쇠기와 같이 감쇠만이 더해질 때 적용할 수 있으며 점탄성 감쇠기가 설치된 모델의 모드 특성을 반영할 수는 없다. 점탄성 감쇠기의 강성으로 인하여 전체 구조물의 고유 특성이 변화하여 식 (8)의 구조물들의 변수가 모두 변하는 복잡한 거동을 하게 된다. 그림 4는 점탄성 감쇠기의 감쇠편심의 조절로 인한 구조물 편심의 회복률을 나타낸다. 여기서 감쇠기 설치후의 강성편심을 $\overline{e_d}$ 라 할 때 편심 회복률은 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{편심 회복률} = \frac{\overline{e - e_d}}{e}$$

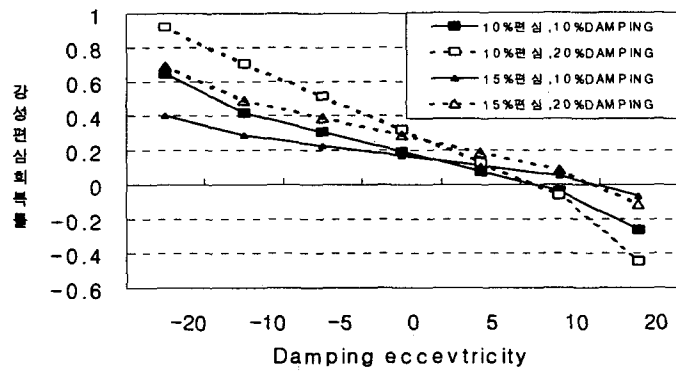


그림 4. 감쇠기로 인한 강성편심 회복률

본 연구에서는 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 모드특성방정식을 유도하기 위해 감쇠기 설치 후의 강성 k_i 를 다음과 같이 수식화하였다.

$$k_i = \mu k_o \quad \mu = \frac{1}{1 - 2\xi \nu} \quad (9)$$

여기서 ν 는 감쇠기의 고유값인 저장계수(G')와 소실계수(G'')의 비를 나타내며 값이 0이면 점성 감쇠기를 의미한다. k_o 는 구조물의 초기 강성이고 μ 를 강성변환계수(stiffness transformation coefficient)라 명명하기로 한다. 여기서 변수의 일반화를 위해 기등 강성관계의 조합으로 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$a^2 = \frac{3\lambda^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - 3} \quad (10)$$

여기서 a 는 a/d 이고 λ 는 CM과 CR이 일치할 때의 w_x/w_y 의 값이다. 위의 관계를 이용하여 System Matrix를 구하면 다음과 같다.

$$M = m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{\lambda^2 - 1}{12\lambda^2 - 4\Omega^2} \end{bmatrix} \quad C = 2m\omega_y \xi \begin{bmatrix} 1 & \overline{e_{sd}} \\ e_{sd} & \overline{e_{sd}^2} + \rho^2 \end{bmatrix}$$

$$K = \frac{mw_y^2}{\mu} \left[\begin{array}{c} 1 \\ (\bar{e} + \overline{e_{sd}} \frac{2\xi\gamma}{\mu})\mu \\ ((\bar{e} + \overline{e_{sd}} \frac{2\xi\gamma}{\mu})\mu)^2 + \frac{(\lambda^2 - 2\lambda^2\xi\gamma - 1)\Omega^2 + 6\lambda^2\xi\gamma}{12\gamma^2 - 4\Omega^2} \end{array} \right] \quad (11)$$

위의 행렬들을 특성방정식에 대입하고 고유치 해석을 수행하면 점탄성 감쇠기가 설치된 비대칭 구조물의 모드특성을 파악할 수 있으며 위의 식에서 점탄성 감쇠기를 설치하였을 때의 모드에 영향을 주는 변수는 \bar{e} , $\overline{e_{sd}}$, Ω , w_y , λ , γ , m , ξ 등임을 알 수 있다.

5. 모드분석

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 R의 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

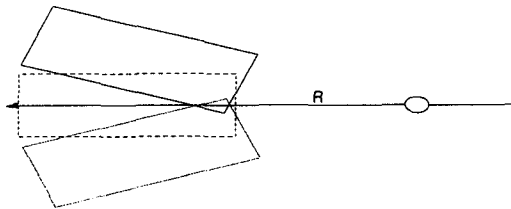


그림 5. $R < 0$ 인 경우

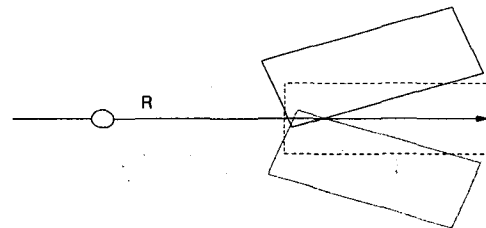


그림 6. $R > 0$ 인 경우

표 1과 2에서 편심이 없는 비연계모드에서 비틀림과 횡변위는 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 Stiff edge에서는 변위가 감소하지만 Flexible edge에서는 변위가 증가함을 의미한다. 본 논문에서는 이러한 두 성질을 가진 모드의 연계성을 정량적으로 표현하기 위하여 비틀림 모드 성분인 Φ_θ 와 횡방향 모드 성분인 Φ_y 의 비를 R

로 나타내기로 한다: $R = \frac{\Phi_\theta}{\Phi_y}$. 여기서 R이 0에 가까우면 횡 방향 성분, ∞ 에 가까우면 비틀림 성분이 지배적임을

알 수 있다. 또한 그림 5와 6에서 볼 수 있듯이 R의 부호는 비틀림 특성을 나타내는 중요한 역할을 하는데 R이 음의 부호를 가질 때는 왼쪽이 Flexible하고 양의 값을 가지면 오른쪽이 Flexible함을 알 수 있다. 여기서 강성과 반대되도록 충분한 양의 감쇠 편심을 증가시키면 R값이 변하게 되고 R=0이 되는 시점을 찾을 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이 시점을 최적 감쇠분배점(point of Optimum Damping Distribution, ODD)로 명명한다.

감쇠기가 설치된 구조물의 모드는 크기를 나타내는 실수부와 위상각을 나타내는 허수부가 존재해서 그 자체로서 모드형상을 표현하기 어렵다. 그러나 응답 해석에서 동일한 ω_n 에 결레 형태의 2개 모드가 항상 짝을 이루어 허수부분이 상쇄되므로 실수부만으로 이러한 비틀림 특성을 표현할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 1차 모드의 참여계수가 2차 모드보다 크므로, 본 연구에서는 주로 1차 모드의 변화양상을 이용하였다.

다음의 그림 7은 그림 3의 비대칭시스템의 시간이력해석 결과 점탄성감쇠기 및 점성감쇠기의 감쇠 편심에 따른 Stiff edge와 Flexible edge의 최대 변위의 분석 결과이다. 지진하중은 EL Centro NS성분을 사용하였고, 강성 편심은 0.2, 감쇠비는 33 %로 하였다. 점탄성감쇠기를 설치할 경우 감쇠 편심이 증가할수록 Stiff edge의 변위는 커지고 Flexible edge의 변위는 작아지다가 결국 두 변위가 같아지고 역전되는 시점이 발생하는데, 모드해석에 의하면 이때 R 값이 0에 근접함을 알 수 있다 (그림 8). 또한 감쇠 편심이 ODD이상이면 비틀림이 역으로 발생한다. 따라서 해석을 수행하기 전에 모드분석을 통하여 적정 ODD를 구할 수 있고, 이때의 ODD를 가장 적절한 감쇠 편심이라 할 수 있다. 이러한 결과는 변위 응답을 근거로 선정한 최적 감쇠 편심이 특정 하중에 따라 달라지는 반면에 모드특성으로 구한 최적 감쇠 편심은 구조물 자체의 특성이므로 보다 일반화된 값이라 할 수 있다. 점성감쇠기는 지진에 대한 내진성능 향상에 효과가 큰 것으로 알려져 있으나 비대칭 회복 성능 효과에서는 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 경제성과 효과를 동시에 고려한 감쇠량을 20-30 %라 할 때 점성감쇠기의 비대칭 회복률은 점탄성 감쇠기에 비해서 그 효과가 매우 미약하고 ODD점이 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 비대칭문제와 변위 제어 문제에서의 효능을 함께 고려할 때 점탄성 감쇠기의 효과가 더욱 뛰어나다고 할 수 있다.

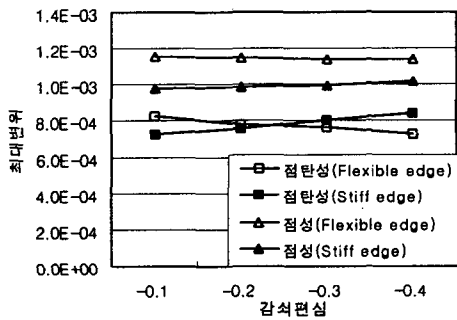


그림 7. Stiff edge와 Flexible edge의 변위

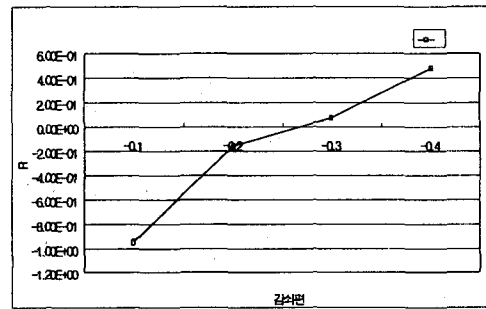


그림 8 감쇠편심에 따른 R의 변화

6. 모드 특성방정식을 이용한 변수분석

\bar{e} , \bar{e}_{sd} 은 구조물 자체의 강성 편심과 감쇠기에 의한 감쇠 편심이다. 위의 그림에서 감쇠 편심의 증가에 따른 변위와 R 값의 변화를 알 수 있다. 그리고 ν 은 감쇠기가 가지고 있는 고유한 특성이다. 또한 식 10에서 λ 와 Ω 간에 다음 조건이 성립함을 알 수 있다.

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

윗 식의 세번째 조건에서는 시스템 행렬이 불능이 되므로 특별해로 간주하고, 그 이외의 Ω 에 대하여 λ 가 유한한 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 9는 주어진 Ω 에서 유한하게 존재하는 λ 에 대한 ODD를 나타내는데, ω_0 성분의 영향으로 Ω 값이 증가할수록 ODD도 증가하는 경향이 있지만, λ 는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

단, 특별해 부근에서 그 값이 특별해로 근접하는 것을 볼 수 있고 ODD도 증가하는 것을 알 수 있다.

일반적인 지진하중 스펙트럼에서 구조물의 고유진동수 ω_y 는 중요한 역할을 한다. 그러나 그림 10에 의하면 ODD는 고유진동수에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 변위의 크기는 지진의 성분과 고유진동수에 크게 영향을 받지만, 비틀림 개선 문제는 정해진 감쇠량에서 고유진동수에 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

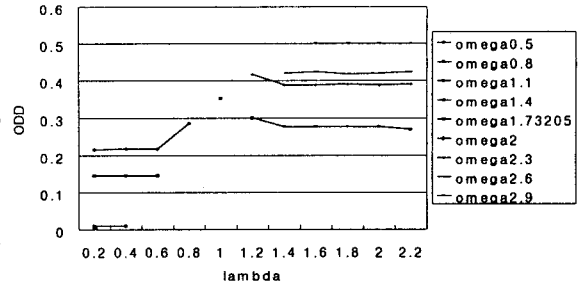


그림 9. λ 에 따른 ODD의 변화

마지막으로 ν , ξ 등의 변수는 감쇠기 고유특성을 나타내는 값과 경제적인 면과 효율적인 면에서 사용자가 선택해야 할 값이다.

따라서 위의 변수 분석결과 ODD와 관련하여 변수 Ω 와 e , e_{sd} 가 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 다음 그림은 이러한 변수를 모두 포함하여 ODD를 표현한 것으로 ODD시점 이하의 값이 유용한 값들이라 할 수 있으며 그 이상의 값은 비경제적이라 할 수 있다.

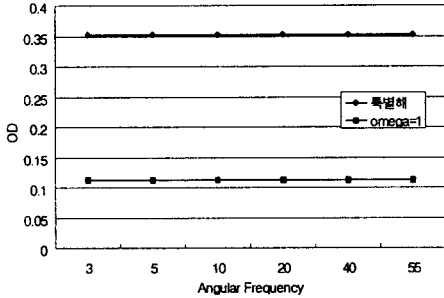


그림 10 ω_y 에 따른 ODD의 변화

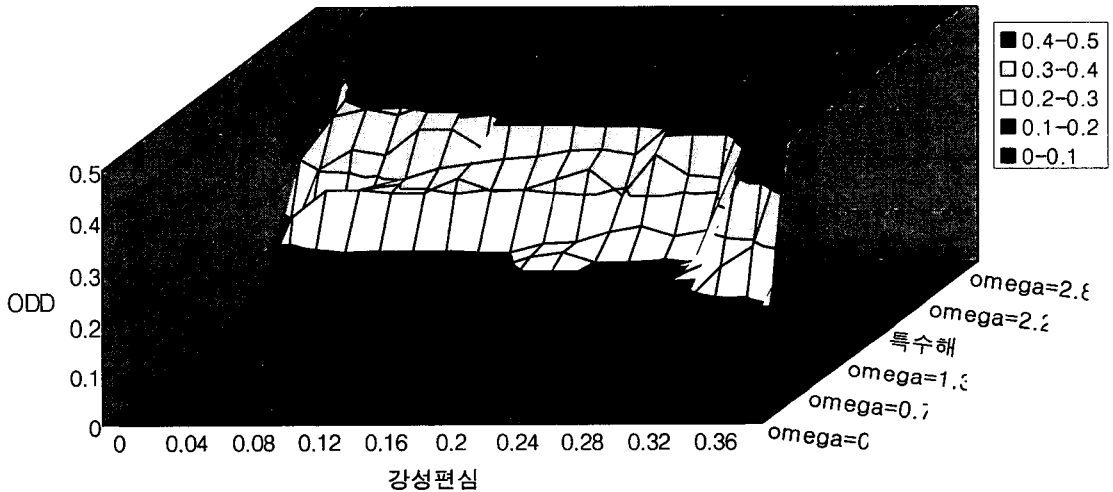


그림 11 주요 변수와 ODD의 관계

위에서 기술한 내용을 검증하기 위하여 그림 3에 나타난 구조물의 Ω , e 의 값을 각각 1.7과 0.2로 하고, ν 가 0.95인 3M사의 점탄성감쇠기를 감쇠비 30%로 설치할 때, 위의 그림에 근거하여 적정 감쇠편심에 해당하는 구간이 대략 0.3-0.35 구간임을 알 수 있다. 이는 감쇠편심 0.3-0.35가 비대칭성의 해소 및 변위제어에서 효과적인 감쇠분배임을 의미한다. 이러한 결론은 다음 그림 12에서 El Centro 지진에 대한 시간이력해석 결과로 확인할 수 있는데 감쇠편심 0.3 부근에서 양변의 최대변위가 일치하여 대칭성이 회복됨을 알 수 있다.

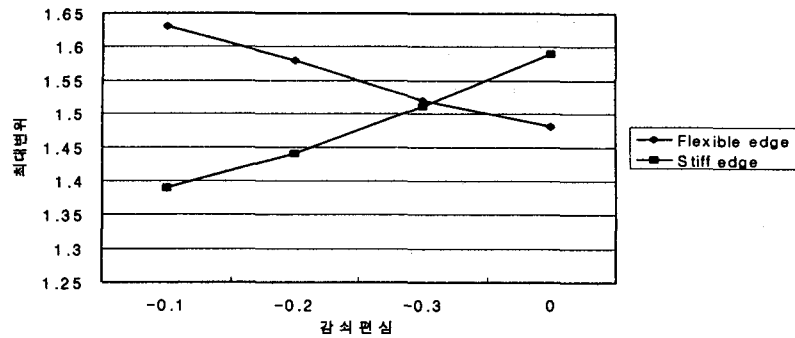


그림 12 ODD에서의 구조물 양변의 최대변위

7. 결론

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

- 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 비틀림모드 특성은 회전방향-횡방향 진동수비 Ω 와 강성편심 및 감쇠편심 e , e_{sd} 에 의해 영향을 받는다.
- 감쇠행렬을 고려한 복소 모드해석에 의한 최적 감쇠분배점 (ODD)을 이용하여 비틀림을 고려한 적절한 감쇠편심을 결정할 수 있다.
- 점성감쇠기보다 점탄성감쇠기가 비틀림제어에서 더욱 효과적인 성능을 나타낸다.

참고문헌

1. Soong, T.T. Dargush, G.F. "Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering", State University of New York at Buffalo, 1996
2. Chopra, A.K. Chopra, "Dynamics of Structures", Prentice Hall, 1995.
3. Goel, R.K. " Effects of Supplemental Damping on Earthquake Response of Asymmetric Buildings", 6th U.S National Conference on earthquake Engineering, Seattle, 1998
4. Goel, R.K. " Seismic Behavior of Asymmetric Buildings with Supplemental Damping ", *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 29, 2000, pp. 461-480.