

# 지진응답저감을 위한 마찰감쇠기가 설치된 다층 건물의 등가감쇠비

## Equivalent Damping Ratio of a Multi-Story Building Equipped with a Friction Damper for Seismic Response Mitigation

성지영\* · 박기종\* · 박병철\*\* · 민경원†

Ji-Young Seong, Ki-Jong Park, Byung-Cheol Park, and Kyung-Won Min

### 1. 서 론

최근 동일본 대지진을 비롯한 대규모의 지진이 전 세계적으로 발생하여 막대한 인명 및 재산피해를 야기하였다. 이는 외부 입력에너지를 건물의 비탄성 변형에 의한 소산에너지로 소모하였기 때문에 발생한다. 마찰감쇠기를 설치하여 지진과 같은 외력을 받는 건물의 동적응답을 제어할 수 있다. 기존의 연구에서는 마찰감쇠만 있을 때의 건물의 자유진동에 관한 해석적인 분석과 조화 가진일 때의 전달함수를 유도하였다. 하지만 다층 건물은 층간 속도에 의해 제어력이 연계되어 나타나기 때문에 마찰감쇠의 영향을 파악하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 다층건물에 설치된 마찰감쇠기를 모드해석하여 단자유도계로 치환하였다. 지진은 최대하중과 지속시간, 고유주기 등에 따라 달라지므로 경향파악을 위해 조화하중일 때의 근사해를 도출하였다. 등가의 점성감쇠를 갖는 건물과 한 주기 동안 같은 소산에너지를 갖도록 하여 등가감쇠비를 유도하였다. 등가감쇠비를 이용하면 비선형미분방정식을 선형미분방정식으로 변환할 수 있다.

### 2. 다층건물의 근사동적확대계수

마찰감쇠기가 설치된 다층 건물을 모습은 그림 1과 같고 그 때의 운동방정식은 식 (1)의 형태로 나타난다.

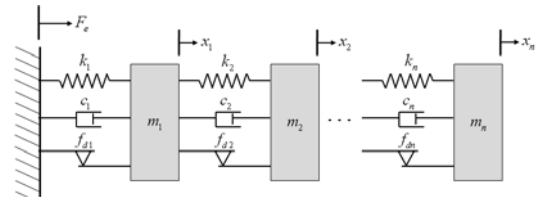


Figure 1 Mechanical model of a multi-story building equipped with a friction damper

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -L_c F_c + L_e F_e \quad (1)$$

여기서  $M, C, K$ 은 각각 질량행렬, 레일리 감쇠행렬, 강성행렬을 나타낸다.  $L_c F_c, L_e F_e$ 는 각각 제어력 위치행렬, 마찰감쇠행렬, 외력의 위치행렬, 외력을 나타내고 다음의 식으로 표현된다.

$$L_c = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F_c = \begin{bmatrix} f_{d1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \\ f_{d2} \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ \vdots \\ f_{dn} \operatorname{sgn}(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (2, 3)$$

$$L_e = [1, 0, \dots, 0]^T, \quad F_e = F_0 \sin \omega t \quad (4, 5)$$

여기서  $F_0$ 는 외력의 가진 진폭을 나타내고  $f_c$ 는 마찰감쇠기의 마찰력을 나타내며 전 층에 동일한 용량의 마찰감쇠기가 설치되는 경우에 대하여 고려하였다. 모드응답을 구하기 위해서 질량정규화한 모드벡터를 사용하여 식 (1)의 응답,  $\{x\}$ 를  $\Phi\{q\}$ 로 치환하면 다음의 식 (6)으로 나타난다.

$$\ddot{q}_n + (2\omega_n \xi_n) \dot{q}_n + (\omega_n^2) q_n = -\Phi^T L_c F_c + |\phi_{n1}| F_0 \sin \omega t \quad (6)$$

† 교신저자; 정회원, 단국대학교 건축공학과

E-mail : kwmin@dankook.ac.kr

Tel : 031-8005-3734, Fax : 031-8005-3755

\* 국립방재연구원 연구원

\*\* 국립방재연구원 시설연구원

전 층에 동일한 용량의 마찰감쇠기가 설치되었을 경우에 대하여 전체의 응답을 1차 모드의 응답으로 근사화하면 단자유도로 변환된 1차 모드 운동방정식을 구할 수 있다. 1차 모드 운동방정식으로부터 다음 식 (7)의 동적확대계수식이 유도된다.

$$\frac{q_0}{q_{st}} = \frac{-\frac{8}{\pi}\omega_r\xi_1\gamma + \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{4}{\pi}\gamma \right)^2 \right] (1 - \omega_r^2)^2 + (2\omega_r\xi_1)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{(1 - \omega_r^2)^2 + (2\omega_r\xi_1)^2} \quad (7)$$

### 3. 등가감쇠비

동적확대계수식에 영향을 주는 요인은  $\gamma$ ,  $\xi_1$ ,  $\omega_r$  이므로  $\gamma$ ,  $\xi_1$ ,  $\omega_r$ 의 형태로 등가감쇠비를 나타내면 다음과 같다.

$$\xi_{eq} = \frac{2}{\pi} \frac{\gamma}{(q_0/q_{st})\omega_r} \quad (8)$$

여기서  $q_0/q_{st}$ 는 정적응답에 대한 최대동적응답의 비로써 동적확대계수를 나타낸다.

건물의 1차 모드 감쇠비인  $\xi_1$ 는 동적확대계수 안에 포함되어 나타나고 있다. 동적확대계수는 공진에서 응답이 크게 증폭되므로 공진의 동적확대계수를 이용하여 다음의 식 (9)와 같이 근사화 할 수 있다.

$$\xi_{eq,app} = \frac{\gamma}{\frac{\pi}{4} - \gamma} \xi_1 \quad (9)$$

Fig. 2는 마찰력비의 변화에 따른 등가감쇠비의 변화를 고유진동수비에 따라 나타낸 것이다. 마찰력비가 증가량과 등가감쇠비의 증가량이 일정하지 않은 것은 마찰감쇠의 비선형 특성에 의한 것이다.

등가감쇠비를 이용하여 동적확대계수식을  $\xi_1$ 과  $\xi_{eq}$ 로 표현하면 다음의 식 (10)과 같다.

$$\frac{q_0}{q_{st}} = \frac{1}{\left[ (1 - \omega_r^2)^2 + \{ 2(\xi_1 + \xi_{eq})\omega_r \}^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

식 (7)과 식 (10)으로 각각 구한  $\xi_1 = 0.02$ 일 때의

동적확대계수를 fig. 3에 비교하여 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 마찰력비  $\gamma$ 가 적을 때는 근사 동적확대계수가 해석적인 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

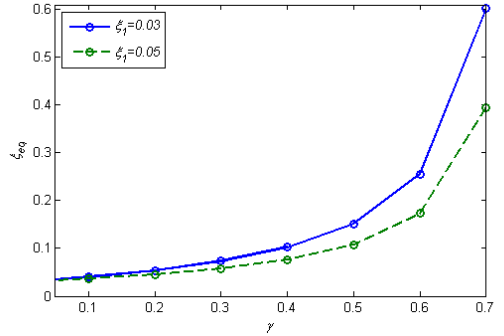


Figure 2 Equivalent damping ratio according to various friction force ratio

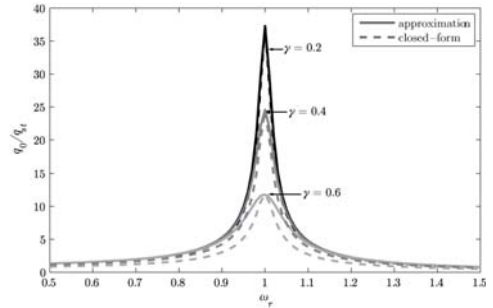


Figure 3 Comparison of closed-form with approximation

### 4. 결론

본 연구에서는 마찰감쇠기가 설치된 다층 건물의 비선형 운동방정식을 파악하기 쉽도록 조화 가진일 때의 등가감쇠비를 제시하였다. 마찰감쇠에 의해 서로 독립되지 않고 연계된 방정식을 풀기 위해 모드해석을 사용하고 다층 건물에서 지배적인 1차모드 응답을 이용하였다. 또한 일반적으로 전층에 동일한 용량의 감쇠기가 설치되므로 감쇠기의 용량은 모두 동일한 것으로 가정하였다. 이를 통해 다층 건물에 설치된 마찰감쇠기의 등가감쇠비를 유도하였다. 등가감쇠비를 검증하기 위해 수치해석을 통한 동적확대계수와 등가감쇠비를 이용한 근사 동적확대계수를 비교하였다. 마찰력비가 적으면 근소한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이를 활용하여 비선형 운동방정식을 쉽게 등가 선형 미분방정식으로 치환할 수 있다.