

# 붕괴하중을 받는 건물에 설치된 마찰감쇠기의 등가감쇠비

## Equivalent damping ratio of a friction damper installed in a structure under collapse load

성 지 영\* · 민 경 원\*\*

Seong, Ji-Young · Min, Kyung-Won

### 요 약

본 논문에서는 마찰감쇠기가 설치된 건물이 붕괴하중을 받을 때의 에너지소산능력을 고려하여 등가감쇠비를 유도하였다. 마찰감쇠기는 주로 지진과 같은 수평하중에 대한 에너지를 소산하기 위해 설치된다. 마찰감쇠기를 대각 가새형으로 설치하면 수평하중에 대한 저항력뿐 만아니라 수직하중에 대한 저항성능도 발휘된다. 건물에 설치된 마찰감쇠기는 외력의 크기에 따라 정지와 운동의 상태를 반복하여 외부 입력에너지를 소산시키기 때문에 외력과 응답관계가 비선형이다. 건물은 고유의 점성감쇠를 가지므로 마찰감쇠기가 설치된 건물은 마찰과 점성감쇠를 동시에 고려해야하므로 해석적인 정해를 구하기가 어렵다. 에너지 평형을 이용하여 등가감쇠비를 구하고 운동방정식을 등가선형화하면 쉽게 저항 성능을 파악할 수 있다. 우선 건물에 영향을 미치는 것은 감쇠이므로 감쇠의 영향력을 마찰력비,  $\gamma_c$ 로 나타내었다. 둘째, 정해를 마찰력비로 표현하여 유도하고 응답특성을 파악하였다. 셋째, 에너지 균형식을 통해 등가감쇠비를 산정하였다. 마지막으로 등가감쇠비를 검증하기 위하여 등가감쇠비를 이용하여 등가선형화한 응답과 실제 마찰감쇠기를 설치하여 비선형 수치해석한 결과와 비교, 검증하였다.

**keywords** : 마찰감쇠기, 마찰 및 점성감쇠, 단순모델 정해, 붕괴하중, 에너지 소산, 등가감쇠비

### 1. 서 론

구조부재의 국부적인 파괴가 결국 건물 전체 또는 큰 영역의 파괴로 이어지는 것이 연쇄붕괴이다. The U.S. general service administration(GSA, 2003)과 the U.S. department of defense(DoD, 2005)에서는 대체경로법을 사용한 연쇄붕괴 방지에 관한 해석 및 설계지침을 제시하고 있다. 기존의 연구는 건물이 가진 부재력을 변화시키면서 연쇄붕괴에 대한 저항성능을 평가하는 데 초점을 맞춰왔다(Breen, 1976). 일반적으로 지진 등의 외력을 받는 구조물의 에너지를 소산시켜주기 위해서 소산에너지가 큰 마찰감쇠기가 주로 사용된다. 본 연구에서는 지진 등의 수평하중에 저항하기 위해 설치된 마찰감쇠기를 이용하여 붕괴하중과 같은 수직하중에 대한 저항 성능을 파악하고자 하였다. 이와 유사한 기존연구로 김진구 등(2010)이 점성감쇠기를 설치한 건물의 연쇄붕괴 저항성능평가가 있다. 하지만 마찰감쇠기는 외력이 바뀔 때마다 작용 방향이 변화하므로 비선형성이 강해 저항성능을 파악하기가 어렵다. 에너지 평형을 이용한 등가감쇠비를 활용하여 운동방정식을 등가선형화하면 저감효과를 쉽게 파악할 수 있다.

\* 단국대학교 건축공학과 석사과정 sjy5512@dankook.ac.kr

\*\* 정희원 · 단국대학교 건축공학과 교수 kwmin@dankook.ac.kr

## 2. 단순모델의 정해

붕괴하중을 받는 건물은 그림 1(a)와 같이 보 부재에 적용한 DL(Dead Load)+0.25LL(Live Load)의 하중조합과 기둥이 원래 받던 부재력을 가력하여 구조물의 안정 상태를 구현한다. 그림 1(a)와 같이 구조물이 안정 상태를 유지한 후 반력을 순간적으로 제거하여 그림 1(b)와 같이 기둥제거의 효과를 구현한다.

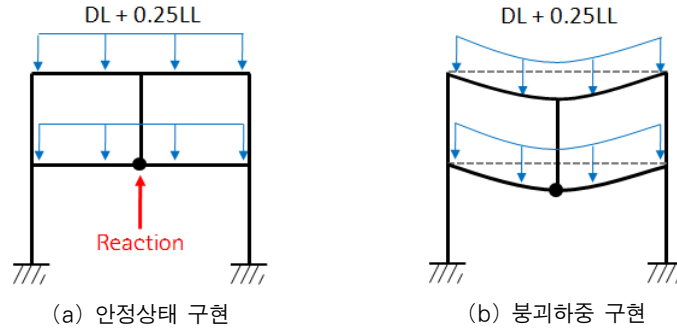


그림1. 동적해석을 위한 하중 조합방법

등가감쇠비를 파악하기 위해서 우선 간단한 단순모델을 통해 정해응답을 유도하였다. 마찰감쇠기는 그림 2(a)와 같이 대각가새형으로 설치된다. 대각가새에 의한 제어력을 고려하여 간단한 단순모델로 표현하면 그림 2(b)와 같다.

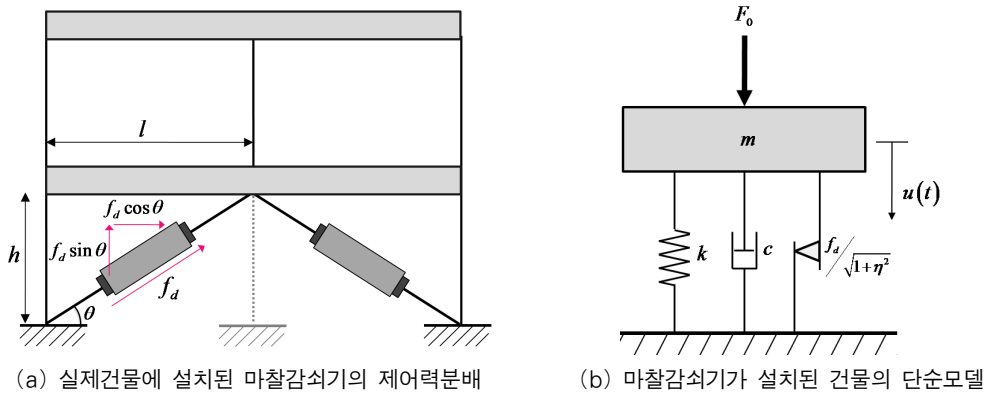


그림2. 마찰감쇠기가 설치된 건물의 모델

여기서  $m$ 은 질량,  $k$ 는 강성,  $c$ 는 점성감쇠,  $f_d$ 는 마찰감쇠기,  $F_0$ 는 외력을 나타내고,  $\eta = l/h$ 로 경간대 층고비이다. 그림 2(b)의 단순 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku + \frac{f_d}{\sqrt{1+\eta^2}} \text{sgn}(\dot{u}) = F_0 \quad (1)$$

붕괴하중을 받는 식 (1)의 운동방정식은 건물의 속도에 따라 제어 방향이 바뀌는 비선형 운동방정식이다. 제어방향은 반주기마다 바뀌므로 각 반주기의 정해를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_D} \text{일 때,} \quad \frac{u(t)}{u_{st}} = \left[ \frac{u_0}{u_{st}} - 1 + \gamma_c \right] e^{-\xi\omega_n(t-t_0)} [\cos\omega_D(t-t_0) + \alpha\sin\omega_D(t-t_0)] + 1 - \gamma_c \quad (2)$$

$$\frac{\pi}{\omega_D} \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega_D} \text{ 일 때, } \frac{u(t)}{u_{st}} = \left[ \frac{u_1}{u_{st}} - 1 - \gamma_c \right] e^{-\xi\omega_n(t-t_1)} [\cos\omega_D(t-t_1) + \alpha\sin\omega_D(t-t_1)] + 1 + \gamma_c \quad (3)$$

여기서  $u_0, u_{st}, \xi, \omega_n$ 는 각각 초기변위, 정적변위인  $F_0/k$ , 건물의 점성감쇠비, 건물의 고유진동수 이다.  $\alpha$ 는  $\xi_s\omega_n$ 이고  $\omega_D$ 는  $\omega_n\sqrt{1-\xi_s^2}$ 로 감쇠고유진동수이다.  $\gamma_c$ 는 마찰력비로 외력에 대한 마찰력의 비율이다. 마찰감쇠기의 제어력은 마찰력의 절대값이 중요한 것이 아니라 외력에 대한 상대적인 비율이 중요하기 때문이다.  $t_1$ 은  $t_0 + \pi/\omega_D$ 이고  $t_0$ 은 초기시간이다.  $u_1$ 은  $t$ 가  $\pi/\omega_D$ 일 때를 식 (2)에 대입하여 얻은 변위이고  $t_2$ 는  $t_0 + 2\pi/\omega_D$ 이다. 매 반주기의 초기응답은 바로 전 구간의 최종변위응답으로 구할 수 있다. 연역법에 의해 매 반주기 응답을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{u_n}{u_{st}} = (e^{-\alpha\pi} + 1) \left\{ \left[ \frac{(-1)^{n-1}e^{-n\alpha\pi} + 1}{e^{-\alpha\pi} + 1} \right] + \left[ \frac{(-1)^n(e^{-n\alpha\pi} - 1)\gamma_c}{e^{-\alpha\pi} - 1} \right] \right\} \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 몇 번째 반주기인지를 나타내는 반주기 반복횟수로 자연수이다. 매 반주기마다 응답은 그 구간에서의 최대값에 도달하고 속도는 0이 된다. 외력,  $F_0$ 과 각 구간의 최대응답이 갖는 복원력  $u_n k$ 의 차가 마찰력보다 작아지게 될 때 건물은 정지하게 된다. 외력과 건물의 복원력의 관계는 식 (5a)와 같고 이를 정리하면 식 (5b)의 형태가 된다.

$$F_0 - u_n k \leq f_d / \sqrt{1 + \eta^2} \quad (5a) \quad 1 - \frac{u_n}{u_{st}} \leq \gamma_c \quad (5b)$$

식 (4)와 식 (5b)를 이용하면 구조물이 정지할 때까지 반복하는 반주기  $n$ 값을 산정할 수 있다. 식 (5b)에서  $n$ 은 홀수와 짝수의 경우에 대해서 고려되므로 다음과 같은 범위를 갖게 된다.

$$\lambda_c \leq n < \lambda_c \quad (6a) \quad \lambda_c = -\frac{1}{\alpha\pi} \ln \left[ \frac{2\gamma_c}{(1+\gamma_c) - e^{-\alpha\pi}(1-\gamma_c)} \right] \quad (6b)$$

$n$ 은 자연수이므로 식 (6a)의 범위를 만족하는 자연수  $n$ 의 값으로 건물이 정지할 때까지 반복하는 반주기 횟수를 산정할 수 있다. 식 (6b)를 보면 건물의 정지에 영향을 주는 요인은 마찰감쇠기의 마찰력비,  $\gamma_c$ 와 건물의 점성감쇠비의 함수  $\alpha$ 인 것을 알 수 있다.

### 3. 등가감쇠비

일반적으로 비선형성이 강한 마찰감쇠기가 얼마의 감쇠효과를 갖는 지 파악하는 것은 쉽지 않다. 등가감쇠비를 이용하여 붕괴하중에 대한 저항성능을 마찰력비,  $\gamma_c$ 의 변화에 따라 제시하고자 한다. 붕괴하중에 대한 건물의 소산에너지는 매 반주기마다 변화한다. 등가감쇠비는 건물이 정지할 때까지의 소산에너지의 합을 갖게 하는 등가의 점성감쇠 건물로부터 산정할 수 있다. 마찰감쇠기를 설치한 건물의 소산에너지는 식 (7)과 같고 등가의 점성감쇠만 가진 건물의 소산에너지는 식 (8)과 같이 유도된다.

$$E_{D, struc} = \frac{u_n}{u_{st}} \left( F_0 - \frac{k}{2} \frac{u_n}{u_{st}} \right) \quad (7) \quad E_{D, eq} = \frac{k u_{st}^2 \omega_n^2 (e^{-2n\beta\pi} - 1)}{-2(\omega_n^2 + 1)} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)이 같다고 놓으면 동일한 소산에너지를 가지는 등가감쇠비를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\xi_{eq} = -\frac{1}{2n\pi} \ln \left[ \frac{u_n}{u_{st}} \left( \frac{u_n}{u_{st}} - 2 \right) \left( 1 + \frac{1}{\omega_n^2} \right) + 1 \right] \quad (9)$$

#### 4. 등가감쇠비 검증

등가감쇠비를 검증하기 위하여 마찰력 대신에 등가감쇠비를 대입하여 등가비선형해석을 수행하였다. 해석에 사용된 건물은 무게  $9,177.4kg$ , 수직방향의 고유진동수  $3.67 Hz$ , 점성감쇠비 3%이다. 마찰력비는 0.05, 0.2, 0.4의 경우에 대하여 해석한 결과 등가감쇠비는 각각 7.80%, 29.94%, 64.39%로 나타난다. 등가감쇠비는 마찰력비와 비례하여 커지지 않는 비선형특성을 보인다.

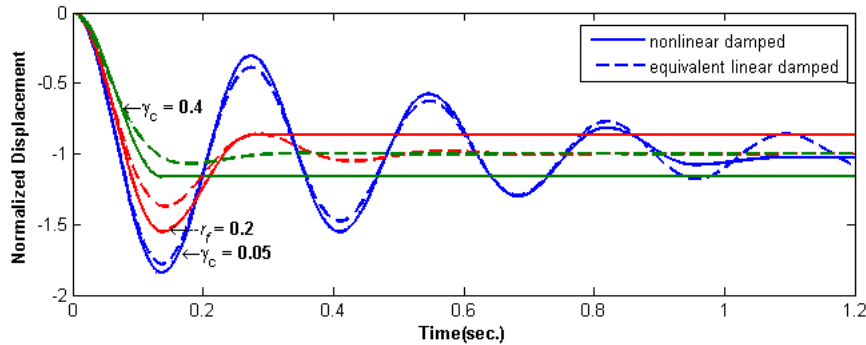


그림 3 마찰감쇠비의 변화에 따른 등가감쇠비 검증

#### 5. 결론

본 연구에서는 마찰감쇠기가 설치된 건물의 비선형운동방정식을 파악하기 쉽도록 붕괴하중을 받을 때의 등가감쇠비를 등가소산에너지를 이용하여 제시하였다. 제안한 등가감쇠비를 검증하기 위해 비선형해석을 통하여 마찰력이 작용한 결과와 등가감쇠비를 사용한 결과를 비교하였다. 마찰력비가 증가할수록 오차가 증가하지만 상용감쇠기를 설치하여 감쇠비 40%이상의 효과를 기대하기 어려우므로 유효한 범위 안에서 등가감쇠비가 유도되었다. 본 연구에서 제시된 등가감쇠비를 이용하면 건물의 응답을 예측하고 감쇠기를 설계하는데 있어서 간편하고 쉬운 절차를 제시하는 데 일조할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 주관으로 수행된 과제(No. 20100016231)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- GSA (2003) Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, The U.S. General Services Administration.
- Unified Facilities Criteria(UFC)-DoD (2005) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Department of Defense.
- Breen, J.E., editor (1976), Research Workshop on Progressive Collapse of Building Structures, Summary Report, HUD-PDR-182, Department of Housing and Urban Development, Washington, D.C.
- 김진구, 이승준, 최현훈 (2010) 점성감쇠기가 설치된 모멘트골조의 연쇄붕괴 저항성능, 한국전산구조공학회 논문집, 23(5), pp.517~524.