

# 비탄성 지진응답 제어를 위한 ATC-55에 기반한 마찰감쇠기 설계절차

## ATC-55 Based Friction Damper Design Procedure for Controlling Inelastic Seismic Responses

김형섭\*  
Kim, Hyoung-Seop

민경원\*\*  
Min, Kyung-Won

이상현\*\*\*  
Lee, Sang-Hyun

박지훈\*\*\*\*  
Park, Ji-Hun

### 국문요약

본 논문의 목적은 탄성과 비탄성 구조물의 지진응답제어를 위한 마찰감쇠기의 설계절차를 제시하는 것이다. ATC-40과 ATC-55를 이용하여 비탄성 구조물의 등가선형감쇠비와 등가선형주기를 구하였고, 이에 기초하여 목표 성능을 만족하기 위한 마찰감쇠기의 최대마찰력을 결정하는 식을 제시하였다. 이 식은 항복 전후 강성비와 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비, 그리고 구조물의 주기에 따라 비선형 수치해석과 오차가 발생한다. 수식에 의해 산출한 최대마찰력과 비선형 수치 해석에 의해 산출된 값과의 오차를 줄이기 위하여, 최소 제곱법을 사용하여 오차 보정식을 제시하였다. 수치해석결과는 제안된 보정식을 사용하면 탄성 및 비탄성 지진응답제어를 위한 마찰감쇠기의 설계를 합리적으로 수행할 수 있음을 보여준다.

주요어 : 설계절차, 비탄성 응답, 마찰감쇠기, 등가감쇠비, 등가주기

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to present a design procedure of a friction damper for controlling elastic and inelastic responses of building structures under earthquake excitation. The equivalent damping and period increased by the friction damper are estimated using ATC-40 and ATC-55 procedures which provide equivalent linear system for bilinear one, and then a design formula to achieve target performance response level by the friction damper is presented. It is identified that there exists error between the responses obtained by this formula and by performing nonlinear analysis and the features of the error vary according to the hardening ratio, yield strength ratio, and structural period. Equations for compensating the error are proposed based on the least square method, and the results from numerical analysis indicate that the error is significantly reduced. The proposed formula can be used without much error for designing a friction damper for retrofitting a structure showing elastic or inelastic behavior.

**Key words** : design procedure, inelastic responses, friction dampers, equivalent damping, equivalent period

### 1. 서 론

구조물의 지진에 대한 성능은 경제성 및 안전성에 있어서 중요한 문제가 되고 있다. 건물자체의 능력만으로 지진에 대하여 구조물을 저항하게 하는 것은 비효율적이며, 최근 들어 추가적으로 제어성능을 가지는 감쇠기를 설치하여 구조물의 안전성을 증가시키는 것을 자주 볼 수 있다. 그 중 마찰감쇠기는 오랫동안 생산되고 발전되어 왔으며, 많은 분야에 적용되고 있다. 최초의 적용은 건축이 아닌 Bogie 트럭의 레일에 사용되었고, 1980년대 중반 이후부터 건축 및 토목구조물의 내진성능을 개선하기 위해 적용되기 시작하였다. Pall 등<sup>(1)</sup>은 구조물의 지진응답을 감소시키기 위하여 마찰감쇠기를 사용하였다. 또한 새로운 형태의 마찰감쇠기를 구조물에 적용하기 위한 연구가 계속 진행 중이다. Roik 등<sup>(2)</sup>은 3단계로 지배되는 마찰요소를 통하여 구조물의 응답을 제어하려는 시도를 하였고, Mualla 와 Belev<sup>(3)</sup>은 정교한 마찰감쇠기가 설치

된 단자유도의 철골 프레임에 대하여 조화하중에 대한 응답제어를 시도하였다. 이러한 마찰감쇠기는 비선형 감쇠기로서 제어성능을 쉽게 예측하기 어렵고, 하중 및 건물의 특성에 따라서도 제어성능에 큰 차이를 보인다. 특히 건물이 비탄성거동을 할 때는 더욱 예측하기 어렵다. Lin 등<sup>(4)</sup>은 성능에 기초한 설계법의 하나인 직접변위 설계법을 적용하여 다양한 형태의 수동형 감쇠기 설계를 수행하였다. Li와 Reinhorn<sup>(5)</sup>은 능력스펙트럼법 (Capacity Spectrum Method : CSM)을 사용하여 마찰감쇠기가 설치된 건물의 내진보강법을 제시하고, 이를 실험으로 검증하였다. 그러나, 감쇠장치가 설치된 후의 성능점을 제시할 뿐, 설치되기 전의 응답을 평가하고, 정해진 목표변위를 달성할 수 있도록 마찰감쇠기를 설계할 수 있는 절차는 제시하지 못하였다. 민경원과 김형섭<sup>(6)</sup>은 ATC-40방법을 사용하여 주어진 목표성능을 달성하기 위해 요구되는 마찰감쇠기의 용량을 산정하는 절차를 제시하였다. 그러나 이 방법은 ATC-40이 내재하고 있는 주기의 변화에 따라 오차의 경향이 변하고 오차의 표준편차가 커서 지진하중에 따라 정확도가 달라진다는 문제점들을 가지고 있다.

본 연구의 목적은 탄성과 비탄성 지진응답제어를 위한 마찰감쇠기의 설계절차를 제시하는 것이다. 이를 위해 ATC-40과 ATC-55에 제시한 CSM법을 이용하였는데,

\* 단국대학교 건축대학 건축공학과, 석사과정

\*\* 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과, 부교수  
(대표저자: kwmin@dankook.ac.kr)

\*\*\* 서울대학교 공학연구소 객원연구원, 공학박사

\*\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과, 연구교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 10. 4 / 심사종료일 : 2004. 12. 28)

ATC-55에 관한 연구는 진행중이어서 아직 최종 식이 나오지 않은 상황이기 때문에 현재 제시된 식<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 그러나, 최종 식의 형태가 본 연구에서 사용한 식과 거의 차이가 없을 것으로 판단되기 때문에, 본 연구에서는 기존의 ATC-40과 현재 진행 중인 ATC-55를 이용하여 각각 구조물의 등가선형감쇠비와 등가선형주기를 구하였고, 이에 기초하여 목표 성능을 만족하기 위한 마찰감쇠기의 최대마찰력을 결정하였다. 또한, 각 방법의 유효성을 비교하기 위하여 ATC-40과 ATC-55에 기반하여 설계된 마찰감쇠기가 설치된 구조물의 20개의 지진에 대한 시간이력해석을 수행하였다. 수치해석결과에 대한 분석을 통해 각 방법이 가지는 오차의 경향을 조사하였으며, 오차를 보정할 수 있는 식을 제안하였다.

## 2. CSM의 등가주기와 등가감쇠비

CSM은 지진하중을 받는 구조물을 해석함에 있어서, 비탄성 동적 수치해석을 수행하지 않고 등가의 선형 정적 해석만을 이용하여 응답을 예측하는 것이다. CSM을 사용하기 위해서는 구조물의 등가주기( $T_{eq}$ ) 및 등가감쇠비( $\xi_{eq}$ )를 산정해야 한다. ATC-40의 CSM은 건물의 연성도( $\mu$ )를 이용하여 식(1)과 (2)와 같이 등가주기와 등가감쇠비를 제시하였다.<sup>(8)</sup>

$$T_{eq} = T_n \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha\mu - \alpha}} \quad (1)$$

$$\xi_{eq} = \frac{2(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\pi \mu (1 + \alpha\mu - \alpha)} \quad (2)$$

여기서,  $T_n$ 은 건물의 고유주기이고,  $\alpha$ 는 항복 전후 강성비이다.

기존의 ATC-40의 CSM은 건물의 특성 및 하중의 특성에 따라서 정확성에 상당한 차이를 보이는 것으로 조사되었다. 따라서 정확성을 좀더 증가시키기 위하여 Iwan과 Gate의 기존연구<sup>(9)</sup>에 기초하여 Cormatin<sup>(7)</sup>은 ATC-55에 CSM을 보고하였다. 그림 1은 ATC-40과 ATC-55에서 제시한 CSM법의 오차를 확률밀도함수로 나타낸 그

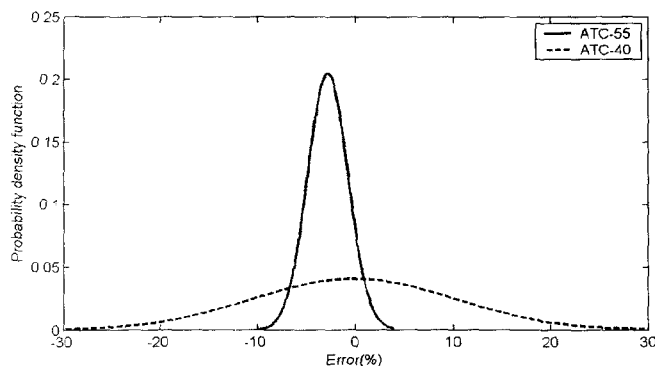


그림 1 가우시안 분포형태로 나타낸 오차의 확률밀도 함수<sup>(11)</sup>

림이다. 평균에 있어서는 ATC-40이 정해를 예측하고 ATC-55는 정해보다 약간 작은 값을 예측하지만, ATC-55의 표준편차의 크기가 ATC-40보다 훨씬 적다. 이것은 ATC-40의 정확성은 지진하중에 따라 크게 달라지나, ATC-55는 지진하중의 특성에 관계없이 일정한 경향을 나타내는 것을 의미한다. 따라서, 하중의 불확실성이 큰 내진설계에 있어서는 ATC-55가 보다 합리적임을 알 수 있다.

ATC-55가 제시하는 구조물의 등가주기와 등가감쇠비는 다음과 같다.<sup>(7)</sup>

$$\mu < 4.0 \text{ 일 때,} \\ T_{eq} = [0.111(\mu - 1)^2 - 0.0167(\mu - 1)^3 + 1] T_n \quad (3)$$

$$\xi_{eq} = 3.19(\mu - 1)^2 - 0.66(\mu - 1)^3 \quad (4)$$

$$\mu > 4.0 \text{ 일 때,} \\ T_{eq} = [0.279 - 0.0892(\mu - 1) + 1] T_n \quad (5)$$

$$\xi_{eq} = 10.6 - 0.116(\mu - 1) \quad (6)$$

여기서,  $\mu$ 는 건물의 연성도이다.

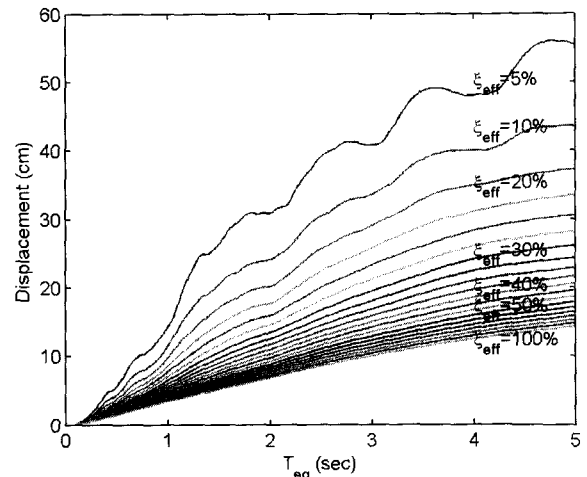


그림 2 유효감쇠비에 따른 평균변위응답스펙트럼

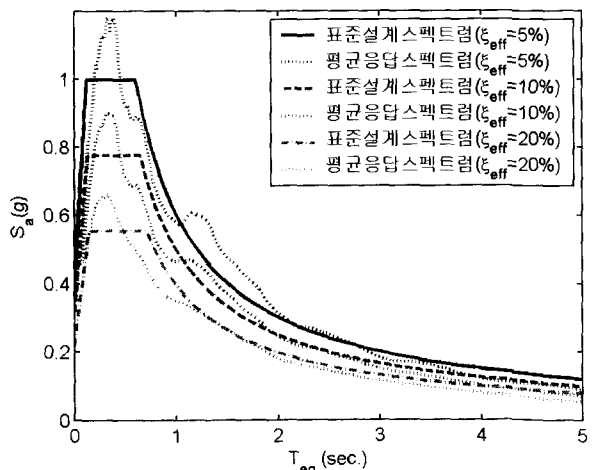


그림 3 표준설계스펙트럼과 평균응답스펙트럼의 비교

### 3. 마찰 감쇠기의 등가감쇠비

#### 3.1 Coulomb 감쇠기

외력으로부터 구조물의 손상을 줄이기 위해 효과적으로 사용된 마찰감쇠기에는 여러 가지가 있다. 그 중 일반적으로 많이 사용되는 것으로는 효과적이면서도 비교적 간단한 기계적 메카니즘이 결합된 Coulomb 마찰감쇠기가 있다. Coulomb 마찰감쇠기에 의해 소산된 에너지( $E_{DF}$ )는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$E_{DF} = 2 \int_{-u_d}^{u_d} F_c du = 4F_c u_d \quad (7)$$

여기서  $u_d$ ,  $F_c$ 는 각각 비선형 시간이력해석에 의한 마찰면의 최대변위와 최대마찰력이다. 최대 마찰력은 구조물의 특성에 따라 달라지기 때문에 다음 식(8)과 같이 구조물의 전단력에 대하여 정규화 하여 나타내었다.

$$\rho = \frac{F_c}{K_s u_s} \quad (8)$$

여기서  $K_s$ 는 구조물의 탄성강성이고,  $u_s$ 는 비제어서 탄성 해석에 의한 구조물의 최대변위이다.

#### 3.2 등가감쇠비

본 연구에서 사용한 하중으로는 FEMA-273에서 제시하는 20개의 지진을 사용하였는데, 그림 2는 20개의 지진 데이터에 중감계수<sup>(11)</sup>를 각각 곱한 지진데이터들을 이용하여 산정한 평균변위응답스펙트럼이다. 여기서  $\xi_{eff}$ 는 구조물의 탄성거동시의 감쇠비이다. 그림 3은 그림 2의 평균변위 응답스펙트럼을 식(9)에 적용하여 산출한 유사가속도( $S_a$ )로 나타낸 평균응답스펙트럼과 표준설계스펙트럼을 비교한 것이다.

$$S_a = \frac{\omega_n^2 D_o}{g} \quad (9)$$

여기서  $\omega_n$ ,  $g$ 는 각각 구조물의 고유진동수, 중력가속도이고,  $D_o$ 는 그림 2에서 산정한 평균변위 응답스펙트럼이다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 20개 지진의 평균응답스펙트럼이 표준설계스펙트럼과 유사한 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 탄성 및 비탄성 거동을 보이는 구조물의 응답제어를 위한 마찰감쇠기를 설계하는 절차를 제시한다. 따라서 마찰감쇠기의 비선형성을 등가의 선형감쇠비로 치환할 필요가 있다. 식(10)은 감쇠기가 설치된 구조물의 유효감쇠비( $\xi_{eff}$ )를 나타낸 것으로서, 구조물의 고유감쇠비( $\xi_o$ )와 비탄성 이력거동에 의한 감쇠비( $\xi_{eq}$ )에 선

형으로 변환된 마찰감쇠기의 감쇠비( $\xi_d$ )가 추가된 형태를 나타낸다.

$$\xi_{eff} = \xi_{eq} + \xi_o + \xi_d \quad (10)$$

$\xi_{eff}$ 는 감쇠기의 설치 목적에 따라 목표변위( $u_t$ ) 산정하면 그림 2에서 산출할 수 있다. 또한 구조물 설계 시 자주 사용하는 그림 3의 표준설계스펙트럼에서도 식(9)의  $D_o$ 에 목표변위를 대입하여 간단히 산출할 수 있다. 즉  $\xi_{eff}$ 는 탄성 구조물이 목표변위로 제어되기 위해 필요한 선형감쇠비이다. 다음으로 마찰감쇠기의 등가감쇠비는 다음과 같다.

$$\xi_d = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{DF}}{E_s} \quad (11)$$

여기서,  $E_s$ 는 구조물의 탄성변형 에너지이며, 다음 식(12)와 같다.

$$E_s = \frac{1}{2} K_{eq} u_t^2 \quad (12)$$

여기서  $K_{eq}$ 는 구조물의 등가주기( $T_{eq}$ )에 의해 산정된 등가 탄성강성이다. 식(7)과 식(12)를 식(11)에 대입하고, 전개를 하면 식(13)과 같이 나타낼 수 있다. 이 과정에서  $u_d$ 는 제어 후의 변위를 의미하는 것으로써 목표변위,  $u_t$ 와 같다.

$$\xi_d = \frac{2}{\pi K_{eq} u_t} F_c = \frac{2}{\pi K_s u_t} \left( \frac{T_{eq}}{T_n} \right)^2 F_c \quad (13)$$

식(13)을  $F_c$ 에 관하여 정리하면 다음 식(14)와 같이 나타낼 수 있고, 이 식에 의해 산정된 최대마찰력을  $F_c^*$ 이라고 두면 다음과 같다.

$$F_c^* = \frac{\pi}{2} u_t K_s \left( \frac{T_n}{T_{eq}} \right)^2 \xi_d = \frac{\pi}{2} u_t K_s \left( \frac{T_n}{T_{eq}} \right)^2 (\xi_{eff} - \xi_{eq} - \xi_o) \quad (14)$$

이 식에서 알 수 있듯이 임의의 구조물에 대해 탄성강성, 고유주기 그리고 고유감쇠비는 고정값이므로 목표변위를 설정하고 비탄성 정적해석법인 CSM법을 사용하여 목표변위에서의 등가감쇠비와 등가주기를 산정하면 마찰감쇠기를 설계하기 위해 필요로 하는 최대마찰력을 산정할 수 있다. 따라서 반복과정을 거치지 않고 필요로 하는 마찰감쇠기를 설계할 수 있다.

### 4. 최대 마찰력 산정

#### 4.1 CSM에 따른 산정된 마찰력의 오차

CSM에 의한 등가주기 및 등가감쇠비의 정확성은 구조

물의 특성 및 하중에 따라 오차를 보인다. 따라서 식(14)에서 산정된  $F_c$ 는 목표변위를 만족하기 위해 반복 비선형 수치해석에 의한 실제의 마찰력,  $F$ 와 오차를 보인다. 이러한 두 수치,  $F_c$ 와  $F$ 의 비를 식(15)와 같이 나타내었다.

$$E_{ratio} = \frac{F_c}{F} \quad (15)$$

구조물에 설치된 감쇠기의 제어성능은 구조물의 고유주기에 따라서 달라진다. 또한 가속도 민감구역과 속도민

감구역으로 구분되는 주기 0.5초를 기준으로 구조물의 탄성과 비탄성의 관계가 뚜렷하게 변한다.<sup>(12)</sup> 따라서 본 연구에서는 0.5초를 기준으로 단주기와 장주기로 구분하여 해석을 수행하였다. ATC-40에 나타난 CSM의 등가주기와 등가감쇠비를 이용하여 해석을 수행한 후 정규화된 마찰력에 따른 오차를 그림 4에 나타내었고, 구조물의 고유주기에 따른 오차를 그림 5에 나타내었다. 그리고 ATC-55에 제시된 CSM의 등가주기와 등가감쇠비를 이용하여 해석을 수행한 후 정규화된 마찰력과 구조물의 고유주기에 따른 오차를 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그

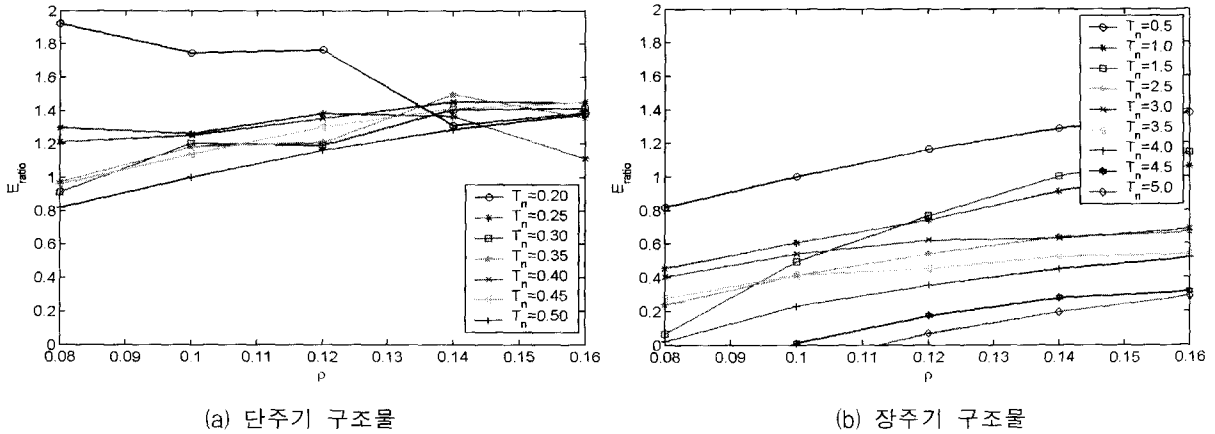


그림 4 ATC-40에 의한 구조물의 주기에 대한 정규화된 마찰력의 변화에 따른 오차 ( $\alpha=0.1, e=0.4$ )

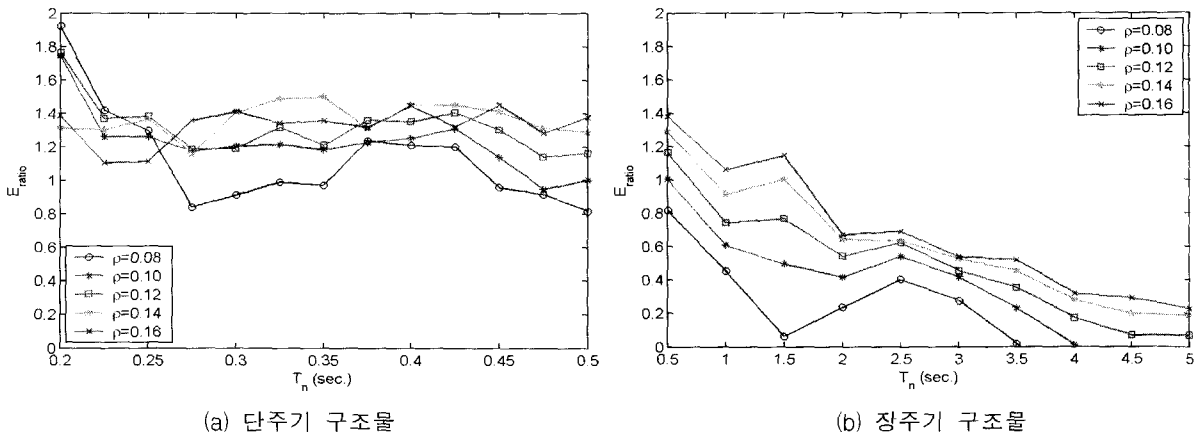


그림 5 ATC-40에 의한 정규화된 마찰력에 대한 구조물의 주기변화에 따른 오차 ( $\alpha=0.1, e=0.4$ )

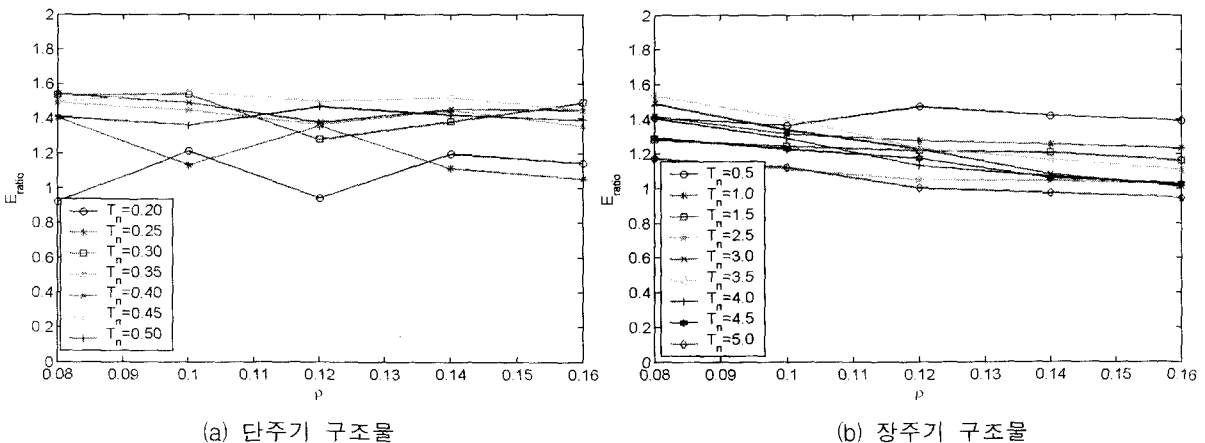


그림 6 ATC-55에 의한 구조물의 주기에 대한 정규화된 마찰력의 변화에 따른 오차 ( $\alpha=0.1, e=0.4$ )

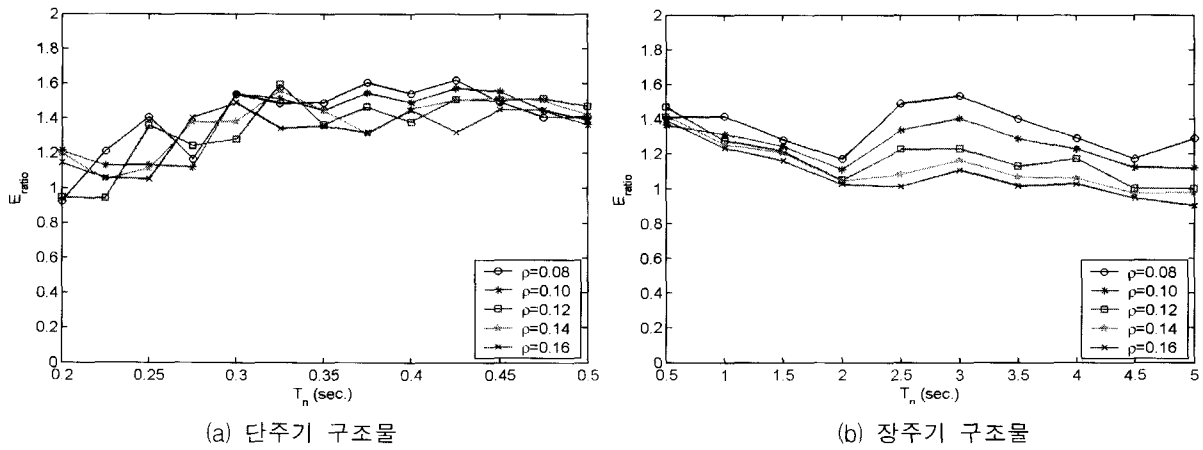


그림 7 ATC-55에 의한 정규화된 마찰력에 대한 구조물의 주기변화에 따른 오차 ( $\alpha=0.1, e=0.4$ )

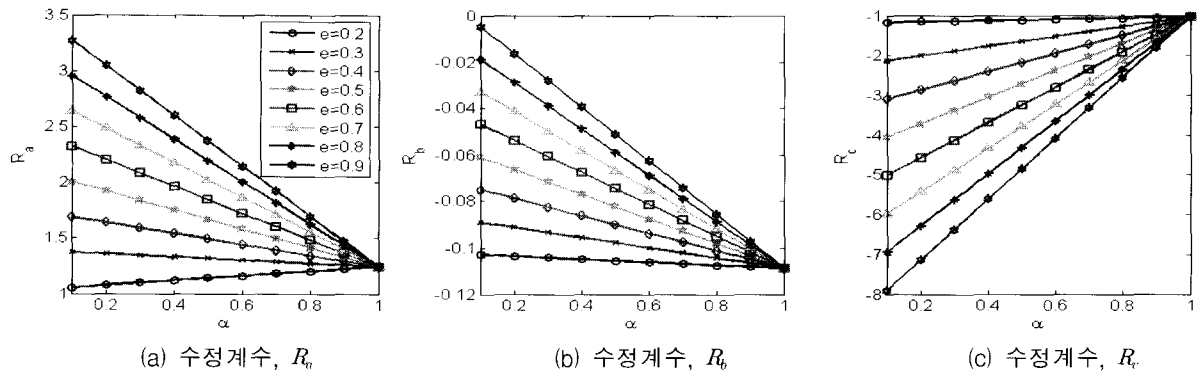


그림 8 항복 전후 강성비( $\alpha$ )와 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비( $e$ )에 따른 수정계수

림 4~7에서 알 수 있듯이 단주기와 장주기 구조물의 그래프 기울어짐 경향이 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 알 수 있고, 정규화 된 마찰력과 구조물의 고유주기에 따른 오차의 경향이 다르다는 것을 알 수 있다. ATC-40에 기초한 방법은 단주기 구조물의 경우에는 대체적으로  $E_{ratio}$ 가 1보다 크기 때문에 과대설계가 되고, 장주기 구조물의 경우에는 이와는 반대로 대체적으로  $E_{ratio}$ 가 1보다 작은 과소 설계가 되는 결과를 가져온다. ATC-55에 기초한 방법은 모든 주기의 구조물에 대하여 과대설계가 되는 경향을 보이고 전체적으로 ATC-40에 기초한 방법 보다는 ATC-55에 기초한 해석이 좀 더 정확하고 오차편차도 적은 것을 알 수 있다. 주기가 0.2초인 구조물의 경우에는 오차의 크기가 20% 이하이나, 주기가 0.25초 이상의 구조물에 대하여서는 실제 요구되는 최대마찰력보다 최대 60% 정도의 과대설계를 가져올 수 있기 때문에 이를 줄일 수 있는 방법이 요구된다.

#### 4.2 산정된 마찰력의 수정

CSM 중 ATC-55가 ATC-40보다 정확하고 그 경향도 뚜렷하기 때문에 ATC-55에 기초하여 산정된 최대마찰력을 수정하였다. 우선 비교적 정확한 값을 보여주는 주기가 0.28초 이하인 경우에는 기존의 식을 그대로 사용하였으며, 주기가 0.28초를 초과하고 0.5초 이하인 경우에는 주기 및  $\rho$ 에 따른 오차의 경향이 뚜렷하지 않고 전체적

으로 과대 설계하는 경향을 보이기 때문에 기존의 값에 일정한 상수를 곱하여 최대마찰력의 크기를 감소시켰다. 그리고 주기가 0.5초 이상인 경우에는 주기와  $\rho$ 에 따른 오차의 경향이 존재하기 때문에 주기와  $\rho$ 의 함수로 다음 식에 의해 주어진 목표변위와 비선형 수치해석에 의해 산정된 평균변위와의 차의 제곱을 최소화 하도록 하였다.

$$E_o = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [u_t(T_{eqi}, \rho_j) - u_d(T_{ni}, \rho_j)]^2 \quad (16)$$

여기서,  $T_{eqi}$ ,  $T_{ni}$  그리고  $\rho_j$ 는 각각 이산화 된  $i$ 번째 구조물의 등가주기, 고유주기, 그리고  $j$ 번째 정규화된 마찰력이다. 또한  $N$ 과  $M$ 은 각각 해석에 사용된 이산화 된 구조물 주기의 개수와 이산화 된 마찰력의 개수이다.

1)  $T_n \leq 0.28$ 인 경우

$$F_c^* = F_c^* \quad (17)$$

2)  $0.28 < T_n \leq 0.5$ 인 경우

$$F_c^* = 0.75 F_c^* \quad (18)$$

3)  $0.5 < T_n \leq 5$ 인 경우

$$F_c^* = \frac{1}{R_u \cdot \exp(R_b \cdot T_n + R_c \cdot \rho)} F_c^* \quad (19)$$

여기서,  $R_u$ ,  $R_b$  그리고  $R_c$ 는 수정계수들로서 그림 8에

서 항복 전후 강성비( $\alpha$ )와 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비( $e$ )에 의해 선택할 수 있다. 식(19)는 결국 구조물이 탄성거동 일 때는 항복 전후 강성비가 1이므로 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$F_c^* = \frac{0.6}{\exp(-0.075T_n - 3.05\rho)} F_c^* \quad (20)$$

식 (17)-(19)를 이용하여 그림 6과 7에 나타낸 구조물 ( $\alpha=0.1, e=0.4$ )의 수정된 최대마찰력을 산정하였고 목표변위를 만족하기 위한 실제의 최대 마찰력과의 오차를 다음과 같이 나타내었다.

$$E_{ratio}^* = \frac{F_c^b}{F_c} \quad (21)$$

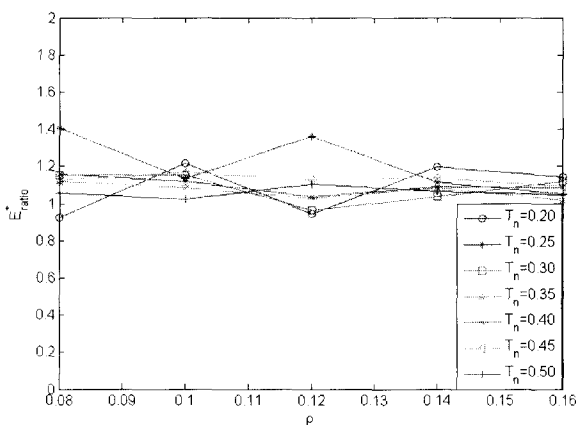
그림 9와 그림 10은 ATC-55에서 제시하는 CSM의 등가주기와 등가감쇠비를 적용하여 산정한 수정된 마찰력과 실제 마찰력과의 비를 나타낸 그래프이다. 그림 9는 정규화된 마찰력의 크기변화에 따른 오차를 나타내었는데 마찰력의 영향이 적은 것으로 나타났다. 또한 수정된 마찰

력과 실제마찰력과의 비가 1에서 1.2사이에 거의 존재하는 것을 알 수 있다. 그림 10(a)는 단주기 구조물의 주기변화에 따른 오차를 나타낸 것으로써 구조물의 주기가 0.25초 전후를 제외하고는 거의 모든 주기대역에서 1과 1.2사이에 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 10(b)에 나타낸 장주기 구조물도 수정된 마찰력과 실제마찰력과의 비가 거의 1에서 1.2사이에 있다. 오차비가 1보다 약간 크게 산정된 것은 안전율을 고려한 결과이다.

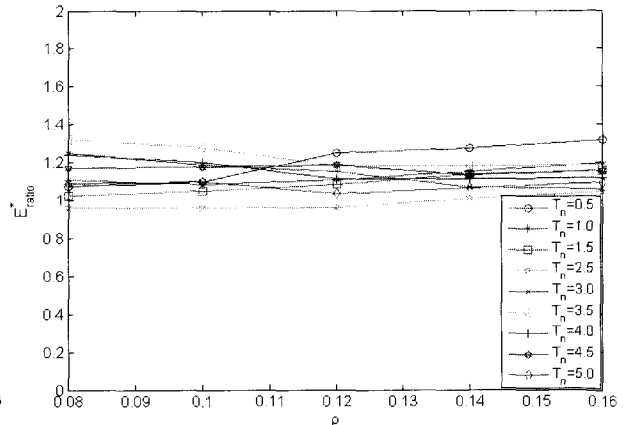
### 5. 설계 절차 및 정확성 검증

다음과 같은 설계절차에 의하여, 지진하중을 받는 단자유도 구조물의 진동제어를 위한 마찰감쇠기의 최대용량을 산정하고, 그 정확성을 검증한다.

- Step 1: 비제어된 구조물에 대한 탄성수치해석 수행 : 시간이력해석 혹은 응답스펙트럼해석을 이용하여, 비제어시의 구조물의 탄성 최대변위를 산정.
- Step 2: 목표성능의 산정 : 구조물의 성능수준에 따라 제어하고자 하는 목표변위를 산정.

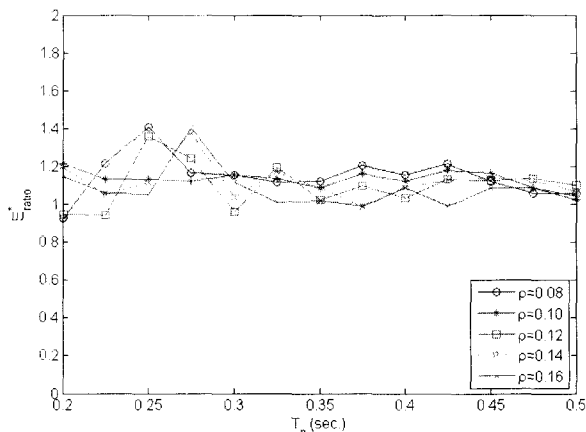


(a) 단주기 구조물

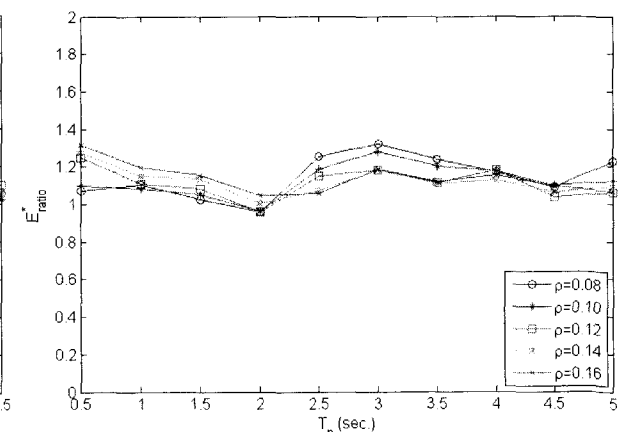


(b) 장주기 구조물

그림 9 ATC-55에 의한 구조물의 주기에 대한 수정된 정규화된 마찰력의 변화에 따른 오차 ( $\alpha=0.1, e=0.4$ )



(a) 단주기 구조물



(b) 장주기 구조물

그림 10 ATC-55에 의한 수정된 정규화된 마찰력에 대한 구조물의 주기변화에 따른 오차 ( $\alpha=0.1, e=0.4$ )

- Step 3: 구조물의 비탄성 거동 변수결정: 구조물의 push-over 해석에 의하여 항복 전후 강성비( $\alpha$ )와 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비( $e$ ) 결정.
- Step 4: 등가주기 및 등가감쇠비 산정: ATC-55에 나온 CSM을 사용하여 목표변위에서의 구조물의 연성도,  $\mu$ ,를 산정한 후 식(3)~(6)을 이용하여 구조물의 등가주기 및 등가감쇠비를 산정.
- Step 5: 최대 제어력 산정: 위의 과정에서 구한 변수들을 식(14)에 적용하여 목표변위를 만족하기 위한 마찰감쇠기의 최대 제어력 산정.
- Step 6: 최대 제어력 수정: Step 5에서 산정된 최대 제어력을 식(17)~(19)을 이용하여 수정.
- Step 7: 수치해석: 목표변위와 산정된 최대제어력을 이용하여 비선형 수치해석에 의한 변위를 비교하여 정확성 검증.

## 6. 결 론

본 연구에서는 지진하중 하에서 탄성 및 비탄성 거동을 보이는 구조물의 변위응답제어를 위하여 마찰감쇠기를 설계할 수 있는 절차를 제시하였다. 마찰감쇠기 설계를 위해 구조물의 지진 비탄성응답평가에 현재 많이 사용되고 있는 CSM을 사용하였으며, 기존의 ATC-40과 ATC-55에서 제시된 비선형 구조물의 등가주기와 등가감쇠비를 이용하였다. FEMA-273에서 제시하는 20개의 지진데이터를 이용하여, 구조물의 주기, 항복 후 강성비, 요구 탄성강도에 대한 항복강도비, 그리고 전단력에 대하여 정규화된 최대마찰력의 크기에 따른 해석을 수행하였으며, 해석 결과의 평균을 통해 기존의 CSM을 이용하여 산정된 최대마찰력이 목표변위를 달성하기 위해 요구되는 실제 최대마찰력과 오차를 보이는 사실을 확인하였다. 본 연구에서는 기존의 방법 중 구조물의 주기 및 최대마찰력의 크기에 따른 해석결과의 편차의 크기가 작은 ATC-55 방법을 사용하였으며, 기존의 ATC-55가 전반적으로 마찰감쇠기의 최대마찰력을 과대설계하는 경향을 줄이기 위해 구조물의 주기에 따라 마찰력을 수정할 수 있는 식을 제안하였다. 수정된 최대마찰력은 대체적으로 실제 요구되는 마찰력보다 약 1-1.2배 정도의 값을 가지며, 본 연구에서 제시된 절차를 사용하여 구조물의 지진 비탄성 거동 응답 제어를 위한 마찰감쇠기 설계를 경제적이고 안전하게 수행할 수 있다. 본 연구에서 제시된 절차를 다자유도 구조물에 적용하여 검증하는 연구가 추후에 필요하다.

## 감사의 글

“건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C103A2000010-03A0200-01010)에 의한 것임”

## 참 고 문 헌

- Pall, A. S., Marsh, C., and Fazio, P. "Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures," *Journal of Prestressed Concrete Institution.*, Vol.25, 1980, pp. 38-61.
- Roik, K., Dorka, U., and Dechent, P., "Vibration Control of Structures Under Earthquake Loading by Three-Stage Friction-Grip Elements," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.16, 1988, pp. 501-521.
- Mualla, I. H. and Belev, B, "Performance of Steel Frames with a new Friction Damper Device Under Earthquake Excitation," *Engineering Structures*, Vol.24, 2002, pp. 365-371.
- Lin, Y. Y., Tsai, M. H., Hwang, J. S., and Chang, K. C. "Direct Displacement-Based Design for Building with Passive Energy Dissipation Systems," *Engineering Structures*, Vol.25, 2003, pp. 25-37.
- Li, C. and Reinhorn, A. M. "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II -Friction Devices," State University of New York at Buffalo, Technical Report NCEER-95-0009, 7. 6. 1995.
- 민경원, 김형섭, "지진하중을 받는 구조물의 성능에 기초한 마찰감쇠기 설계," 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호(통권 제34호), 2003, 12월, pp. 17-24.
- Comartin C. D. "A progress report on ATC 55: evaluation and improvement of inelastic seismic analysis procedures," The Fourth U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, October, Toba, Japan, 2002. 10. pp. 31-48.
- Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," Report ATC-40, 1996. 11.
- Iwan W. D. and Gates N. C. (1979) "The effective period and damping of a class of hysteretic structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol.7, 1979, pp. 199-211.
- Iwan W. D. and Guyader A. C. "An improved equivalent linearization procedure for the capacity spectrum method (ATC 55 draft working paper)," California Institute of Technology, Pasadena, California, USA. 2002.

11. Federal Emergency Management Agency, "NERHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of building," FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
12. Chopra A. K. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering 2nd edition*, Prentice Hall. 271pp.