

# 물리·역학적 특성을 고려한 점탄성 감쇠기 모델에 의한 강뼈대구조물의 지진응답개선

## Seismic Retrofit of Steel Framed Structures Using VE Damper Model Considering Its Physical and Mechanical Characteristics

조 창 근\*                      박 문 호\*\*                      곽 진 순\*\*\*

Cho, Chang-Geun              Park, Moon-Ho              Kwak, Jin-Soon

(논문접수일 : 2000년 1월 3일 ; 심사종료일 : 2001년 5월 29일)

### 요 지

본 연구는 물리·역학적 특성을 고려한 점탄성 감쇠기의 수치모델에 의한 강뼈대구조물의 지진응답개선에 관해서 조사하고자 한다. 온도변화에 의한 감쇠기 이력거동에 미치는 영향을 고려하기 위하여, 점탄성 감쇠기의 모델은 온도-주기 등가원리와 더불어 개선된 분수도함수법에 기초하여 정식화하였다. 본 감쇠기 모델의 알고리즘을 일반화된 강뼈대구조물의 비선형 동적 해석 프로그램에 추가하였다. 강뼈대구조물에 대한 해석 예를 통하여, 제시된 모델에 의한 점탄성 감쇠기의 지진응답개선에 관한 효과를 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 점탄성 감쇠기, 개선된 분수도함수법, 온도주기 등가원리, 비선형 동적 해석, 강뼈대구조물

### Abstract

The present study is to investigate the seismic retrofit of steel framed structures using a numerical model of viscoelastic(VE) damper considering its physical and mechanical characteristics. In order to consider the temperature effects on the damper hysteretic behaviour, the model for VE damper is formulated on the basis of improved fractional derivative terms of stress and strain with the temperature-frequency equivalent principle. This algorithm for VE damper is added to a general nonlinear dynamic analysis program for steel framed structures. In two examples for steel framed structures, Some examples are shown to the seismic response mitigation for steel framed structures using the present model for VE damper.

**Keywords** : *Viscoelastic damper, improved fractional derivative model, temperature-frequency equivalence principle, nonlinear dynamic analysis, steel framed structures*

### 1. 서 론

과거의 내진설계 개념인 구조부재의 내하력 증강에 의한 지진대책은 경비와 현실적인 면에서 많은 한계를

갖고 있으며, 면진구법 및 제진구법 등에 의한 변형에너지 및 감쇠에너지를 이용한 성능설계개념이 현실적으로 적용 가능하게 되었다. 기존구조물의 내진보강법으로서 구조부재의 내하력을 증강하는 방법에 비해, 구

\* 정회원·경북대 방재연구소, 연구원, 공학박사

\*\* 정회원·경북대 토목공학과, 교수, 공학박사

\*\*\* (주)동일기술공사 도로부, 공학석사

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 9월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

조부재간에 점탄성 및 이력형 감쇠기를 설치하여 보강할 경우, 경비와 시공방법 등의 잇점이 있으며, 무엇보다도 성능설계개념의 보강이 가능하여 지진에 대한 보다 효율적인 피해대책을 가능하게 해준다.

본 연구에서는 기존의 강뼈대구조물에 대한 내진 보강책으로서 구조 부재간에 점탄성 감쇠기를 설치하여 보강할 경우를 고려하여, 감쇠기 결정에 필요한 시간이력에 따른 감쇠기의 물리·역학적 거동특성들을 반영한 감쇠기 모델을 적용한 강뼈대구조물에 대한 지진응답개선에 관해서 수치 해석적인 방법으로 검토하고자 한다.

이를 위해서, Maxwell 및 Kelvin 모델과 같은 기존의 단순화된 감쇠기 모델의 단점을 극복하고, 보다 실제적인 구성방정식을 바탕으로 다양한 하중형태, 주기, 및 감쇠기의 주위온도 및 이력거동에 따른 감쇠층의 온도변화와 이에 따른 감쇠능력의 저하현상을 고려한 감쇠기 모델을 제시하였다. 본 모델에 대한 점탄성 감쇠기의 효율성과 우수성을 실제 강뼈대구조물에 대한 해석 예를 통하여 비교·검토하도록 하였다.

## 2. 기존의 점탄성 감쇠기 모델

### 2.1 기본이론

진동특성을 고려한 탄성과 점성으로 구성되어 있는 점탄성 재료에 대한 기본이론을 파악하기 위하여, 탄성 재료와 점성재료의 전형적인 거동특성에 대한 이해를 바탕으로 이를 조합한 선형 점탄성 재료의 거동특성에 대한 개념을 이해할 수 있다. 선형 탄성요소와 선형 점성요소의 응력  $\tau$ 와 변형률  $\gamma$ 의 관계로부터, 그 조합방식에 따라서 직렬방식으로 조합한 Maxwell 모델과 병렬방식으로 조합한 Kelvin 모델이 가장 단순화된 모델로 제시되어 있다(Reinhorn, A.M., et al, 1995, 조창근 외, 2001)<sup>1),2)</sup>. 그리고 이 두 방식을 혼합한 것으로서 3차 매개변수법이 있으며, 그림 1 및 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_2 \tau + c_2 \frac{d\tau}{dt} = G_1 G_2 \gamma + c_2 (G_1 + G_2) \frac{d\gamma}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $G$ 는 스프링상수이며,  $c$ 는 점성재료의 점성계수,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

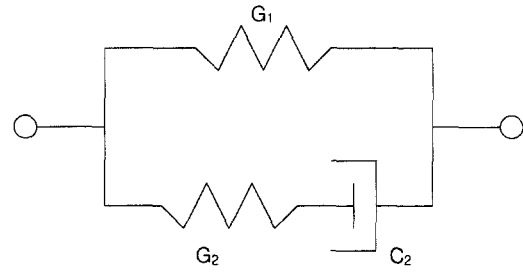


그림 1 3차 매개변수법

일반화된 도함수법은, 선형 탄성요소와 선형 점성요소를 일반화된 형태로 조합한 것으로서, 보다 복잡한 도함수의 식으로서 나타낼 수 있는데, 그에 따른 구성방정식은 다음과 같다(Koeller, R.C., 1984)<sup>3)</sup>.

$$\tau + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{d^n \tau}{dt^n} = G\gamma + G \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{d^n \gamma}{dt^n} \quad (2)$$

여기서,  $a_n$ 과  $b_n$ 은 상수 값을 나타낸다.

### 2.2 점탄성 재료의 동적거동특성

앞 절에서 선형 점탄성 재료에 관한 기존의 모델에 대해서 고찰하였다. 감쇠기의 동적 거동특성을 표현하기 위하여, 동적 하중에 대해서 점탄성 요소가 어떠한 거동을 나타내는지 이해해야만 한다. 우선 선형 탄성요소와 선형 점성요소에 대해서 각각의 동적거동 양상과 이를 조합했을 때 나타나는 동적 거동특성에 대해서 본 절에서 살펴보도록 한다.

다음 식과 같이 수학적으로 사인주기곡선으로 표현되는 변형률 관계를 고려해 보자.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t \quad (3)$$

여기서,  $\gamma(t)$ 는 시간에 따른 변형률,  $\gamma_0$ 는 최대 변형률값,  $\omega$ 는 주기, 그리고  $t$ 는 시간을 나타낸다. 주기에 따른 변형률이 선형 탄성요소에 일어난다면 이때 발생하는 응력은 변형률에 비례할 것이며, 따라서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau(t) = G\gamma_0 \sin \omega t \quad (4)$$

만일 선형 점성요소에 대해서 이와 동일한 변형률이

생긴다면 응력은 변형률의 속도에 비례할 것이며, 따라서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau(t) = c\gamma_0 \omega \cos \omega t \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 알 수 있듯이, 응력과 변형률 관계에서 탄성요소와 점성요소 사이에는 90°의 위상차가 있음을 알 수 있으며, 이를 조합한 점탄성 요소는 이 두 재료의 중간적인 특성을 나타낼 것이므로 응력과 변형률 관계에서 시간에 따라 탄성요소와 점성요소와는 0°에서 90°사이 내에서의 위상차가 있을 것이다. 이를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau(t) = G\gamma_0 \sin(\omega t + \delta) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (6)$$

여기서,  $\delta$ 는 위상각이며, 식(6)을 저장계수  $G'$ 와 손실계수  $G''$ 를 포함한 식으로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\tau(t) = \gamma_0(G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (7)$$

식(7)은 다음의 식(8)과 같이 정리할 수 있으며, 이는 그림 2와 같이 타원 식으로서 응력-변형률 관계를 나타내는 감쇠기의 이력곡선을 의미한다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \gamma_0(G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \\ &= \gamma_0 G' \sin \omega t + \gamma_0 G'' \cos \omega t \\ &= G' \gamma(t) \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2(1 - \sin^2 \omega t)} \\ &= G' \gamma(t) \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2(t)} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $G'$ 는 복소계수,  $\eta = G''/G'$ 는 손실인자를 나타내며(Clough, R., et al., 1975)<sup>4)</sup>, 그림에서 알 수 있는 것처럼, 이력곡선은 탄성성분인 직선과 소산에너지의 성분인 타원곡선의 조합으로서 표현된다.

### 2.3 복소수 함수를 이용한 경우

점탄성 재료의 거동을 복소수 함수로서 나타낼 경우 보다 더 간편하고 이해하기 쉽게 점탄성 거동을 표현할 수 있는 장점이 있다.  $\gamma_0 \sin \omega t$ 는  $\gamma_0 e^{i\omega t}$ 으로 변환시켜 나타낼 수 있으며, 따라서 감쇠기의 응력과 변형률을 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

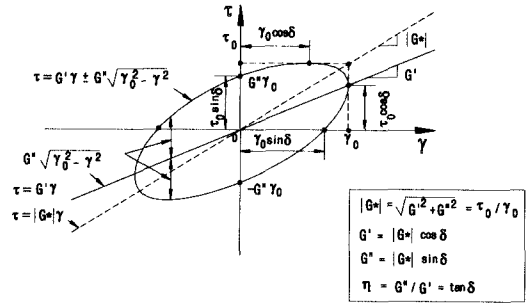


그림 2 이력거동

$$\tau(t) = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)}, \quad \gamma(t) = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (9)$$

여기서,  $\gamma_0$ 는 최대전단변형률,  $\tau_0$ 는 최대전단응력, 그리고  $\omega$ 는 주기이다. 복소수 함수에 의한 응력과 변형률 관계를 이용하여 분수도함수법에 대한 구성방정식이 다음 장에서 정립된다.

## 3. 개선된 분수도함수법

앞에서 점탄성 감쇠기에 대한 기존의 모델들과 거동 특성에 관한 개념에 대해서 살펴보았다. 본 장에서는 감쇠기의 강성과 감쇠효과가 하중, 주기, 및 온도변화에 따라 어떻게 변하는가를 고려하기 위해서 온도-주기 등가원리 및 개선된 분수도함수법에 의한 감쇠기의 구성방정식을 제시하고 정식화하였다.

### 3.1 일반화된 분수도함수법

일반화된 도함수로 표현된 구성 방정식인 식(2)는 완전 도함수의 항으로 구성되어 있는데, 이 식을 분수도함수의 연산자를 이용하여 일반화된 분수도함수에 의한 구성방정식으로 변형시킬 수 있으며 다음과 같다 (Oldham, K.B. et al, 1974)<sup>5)</sup>.

$$\tau(t) + a_1 D^\alpha \tau(t) = G\gamma(t) + Gb_1 D^\beta \gamma(t) \quad (10)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 값은 순수한 탄성(0값)의 재료에서 순수한 점성(1값)의 재료 사이의 점탄성 재료를 나타내는 값으로 0과 1사이의 값을 갖는다. 분수 도함수의 연산자  $D^\alpha$ 는 Riemann-Liouville의 적분에 의해 ( $0 < \alpha < 1$ ) 구간에 대해 다음과 같은 형태로 정의되며, 연산자  $D^\beta$

역시  $\beta$ 를 사용하면 동일한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D^\alpha \tau(t) &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{\tau(\xi)}{(t-\xi)^\alpha} d\xi \\ &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \left[ -\frac{\tau(0)}{t^\alpha} + \int_0^t \frac{\tau(t-\xi)}{(\xi)^\alpha} d\xi \right] \\ &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \left[ \int_0^t \frac{\tau(t-\xi)}{(\xi)^\alpha} d\xi \right] \quad (11) \end{aligned}$$

여기서,  $\Gamma$ 는 감마함수이며, 식(11)은 다시 수학적인 수치해석법으로 다음과 같이 바꿀 수 있다(Koh, C.G., et al., 1991)<sup>6)</sup>.

$$\begin{aligned} D^\alpha \tau(t) &= \frac{1}{(\Delta t)^\alpha} [w^{(0)} \tau^{(0)} \\ &\quad + \sum_{j=1}^{n-1} w^{(j)} \tau^{(n-j)} + w^{(n)} \tau^{(n)}] \\ &= \frac{1}{(\Delta t)^\alpha} \sum_{j=0}^n w^{(j)} \tau^{(j)} \quad (12) \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} w^{(0)} &= \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} [(n-1)^{1-\alpha} - n^{1-\alpha} \\ &\quad + (1-\alpha)n^{-\alpha}] \\ w^{(n)} &= \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} \\ w^{(n-j)} &= \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} [(j+1)^{1-\alpha} - 2j^{1-\alpha} \\ &\quad + (j-1)^{1-\alpha}] \end{aligned}$$

이며,  $w$ 는 임의단계에서의 지진하중 가중치,  $n$ 은 시간증분  $\Delta t$ 에 의해서 결정되는 전 시간단계를 나타낸다.

### 3.2 개선된 분수도함수법

식(10)에 나타난 일반화된 분수도함수의 구성방정식으로부터 기존의 연구에서는 단지  $b_1$ 항만을 포함한 분수도함수연산자를 이용하였기 때문에 응력에 관한 분수도함수( $a_1$ 항)는 존재하지 않는 3-매개변수를 갖는 분수도함수법을 이용하여 구성방정식을 적용하였다(Koh, C.G., et. al, 1991)<sup>6)</sup>. 또는  $b$ 값을 0로 취한 3-매개변수의 분수도함수법으로서 구성방정식을 적용하였다(Makris, N., et. al., 1990)<sup>7)</sup>. 이와 같은

방법은 점탄성 감쇠기의 거동을 제대로 표현하지 못하는 단점이 있었다. 따라서 이를 개선하기 위해 본 논문에서는  $a_1 = a$ ,  $b_1 = b$ ,  $\alpha_1 = \beta_1 = \alpha$ 로 각각 치환하여 이러한 단점을 극복하도록 하였다. 본 방법은 점탄성 감쇠기의 거동을 효과적이고도 매우 정확하게 산출할 수 있으며, 따라서 개선된 분수도함수에 의한 감쇠기의 구성방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\tau(t) + a \frac{d^\alpha \tau(t)}{dt^\alpha} = G[\gamma(t) + b \frac{d^\alpha \gamma(t)}{dt^\alpha}] \quad (13)$$

### 3.3 온도에 의한 감쇠능력저하

실제적으로 이력거동에 의한 점탄성 재료의 소산된 에너지는 열에너지로 치환되어 방출되게 된다. 이때 발생하게 되는 감쇠기의 온도변화는 감쇠기 자체의 강성과 더불어 감쇠특성을 바꾸게 되므로 이와 같은 온도변화에 의한 물리적 변화량을 예측할 수 있다면 보다 실제적으로 감쇠기의 거동특성을 파악하여 설계에 적용할 수 있을 것이다. 반복하중을 받는 점탄성 부재에 관한 온도효과에 관한 기존의 정식화로부터(Huang, N.C., et. al., 1967)<sup>8)</sup>, 점탄성 재료의 이러한 온도변화를 고려하기 위해 제1차 열전도법칙을 적용하면 다음 식과 같다.

$$s\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (14)$$

여기서,  $s$ 는 비열,  $\rho$ 는 밀도, 그리고  $K$ 는 열전도계수이다. 유한요소해석에 있어 열전도계수는 미소하여 무시하므로, 식(14)는 간단하게 정리하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (15)$$

위 식으로부터 감쇠기의 온도변화  $\theta(t)$ 는 다음 식과 같이 얻어진다.

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{1}{s\rho} \int_0^t \tau d\gamma \quad (16)$$

여기서,  $\theta_0$ 는 초기 설정온도이다. 그리고 실험적 결

과를 바탕으로 온도와 주기에 따른 저장계수의 변화에 대한 상관관계는 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G'(cw)_{\theta_{new}} = G'(w)_{\theta_{ref}} \quad (17)$$

여기서,  $\theta_{new}$ 는 임의온도를 나타내며,  $\theta_{ref}$ 는 온도변환 구간에 대한 기준온도이며,  $c$ 는 이에 대응하는 온도-주기의 변환인자이며 아래에서 정의될 것이다. 이와 같은 상관관계를 이용하기 위해 우선적으로 식(13)에서 저장계수의 형태를 도출한 다음, 온도변화가 있어도 저장계수의 변화는 없다는 근거를 토대로 하여  $\theta_{ref}$ 에서의 저장계수와  $\theta_{new}$ 에서의 저장계수가 같다고 보면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$a_{new} = \frac{a}{c^\alpha} \text{ and } b_{new} = \frac{b}{c^\alpha} \quad (18)$$

온도변화에 따라  $a$ 와  $b$ 가 새롭게 정의되어짐으로 점탄성 감쇠기의 온도변화에 의한 영향을 고려할 수 있다.  $c$ 값은 온도-주기 변환 인자인데 점탄성 재료의 실험에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$c = (\theta_{new} / \theta_{ref})^p \quad (19)$$

여기서  $p = 5$ 이다.

개선된 분수도함수의 구성방정식인 식(13)은 분수도함수의 연산자인 식(12)의 수치해석법을 이용하여 나타낼 수 있으며, 최종적으로 개선된 분수도함수 구성방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \tau^{(n)} + \frac{a}{(\Delta t)^\alpha} \sum_{j=0}^n w^{(j)} \tau^{(j)} \\ = G \left[ \gamma^{(n)} + \frac{b}{(\Delta t)^\alpha} \sum_{j=0}^n w^{(j)} \gamma^{(j)} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

#### 4. 해석 프로그램의 작성

앞장에서 제시된 점탄성 감쇠기의 모델을 일반 강뼈대 구조물의 비선형 동적 해석모델에 적용하기 위해, PC-ANSR 프로그램에 (Maison, B.F., 1992)<sup>9)</sup>, 그림 3과 같은 점탄성 브레이스형 감쇠기에 대해서 부재 해석 알고리즘을 작성하여 부프로그램에 추가하도록 하였다. 본

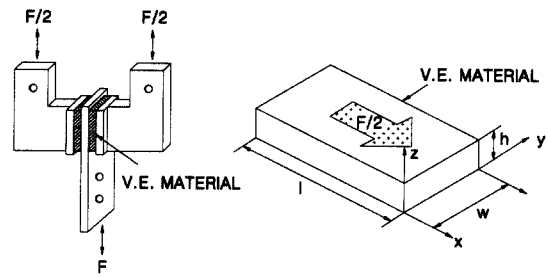


그림 3 점탄성 감쇠기의 형상

해석 프로그램은 강뼈대구조물의 보 및 기둥부재에 대한 비탄성 동적모델을 고려하고 있으며, 구조물이 지진하중을 받는 경우 직접적분법에 의한 시간이력해석이 가능하다.

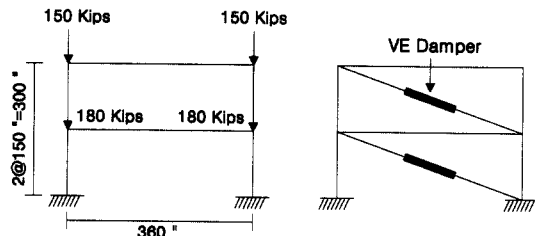
### 5. 해석에 및 고찰

앞장까지 기술한 비선형 동적해석 프로그램을 이용하여 점탄성 감쇠기로 보강된 경우와 보강되지 않은 경우의 강뼈대구조물에 대한 해석 예를 적용하였다. 2층 1경간 및 6층 3경간의 강뼈대구조물을 대상으로 각각 해석 예를 통해 감쇠기의 거동 및 감쇠기를 통한 지진 제어효과에 대해서 비교·검토하도록 하였다.

#### 5.1 2층 1경간 강뼈대구조물

최대 지진가속도가 중력가속도  $g$ 의 0.36배(0.36g)인 El Centro 1940의 수평방향 지진하중을 받는 2층 1경간 강뼈대구조물에 대해서 그림 4와 같이 해석 예를 구성하였다.

보 및 기둥의 재원은 표 1과 같으며, 점탄성 감쇠기의 재원은,  $a = 0.01$ ,  $b = 6.37$ ,  $\alpha = 0.65$ , 전단탄성계수  $G = 13.7 \text{ psi}$ , 비열  $s = 7298.4 \text{ Ibf} \cdot \text{in} / \text{lb}^\circ\text{C}$ , 밀도  $\rho = 0.0386 \text{ lb} / \text{in}^3$ 이며, 기준온도  $\theta_{ref} = 24^\circ\text{C}$ , 초기온



(a) No Viscoelastic Damper (b) Viscoelastic Damper

그림 4 2층 1경간 강뼈대구조물

도  $\theta_0 = 32^\circ\text{C}$ 로 고려하였다. 감쇠기로 보강되지 않은 경우와 감쇠기로 보강된 경우에 대해 각각 해석을 수행하여 비교하였다.

구조해석 결과, 감쇠기를 보강하지 않은 경우와 보강한 경우에 대한 최상층부에서의 시간이력-변위 관계를 그림 5에 나타내었다. 감쇠기를 설치한 경우의 최대 변위가 0.41 in로서 감쇠기가 설치되지 않은 경우의 최대

변위 4.92 in에 비해 변위제어효과가 탁월한 것으로 나타났다. 그림 6에서와 같이 최대층간변위의 비교에서도 감쇠기에 의한 층간변위의 제어효과가 우수함을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 각각 1층 및 2층 감쇠기의 감쇠력과 변위의 이력곡선을 나타내고 있으며, 그림 9와

표 1 보와 기둥의 재료값

Story	Members	Material properties		
		A(in <sup>2</sup> )	I(in <sup>4</sup> )	My (kips-in)
2	Column	51.89	2570.0	12100.0
1	Column	59.9	2940.0	13900.0
2	Beam	11.8	612.0	2820.0
1	Beam	14.4	971.0	3890.0

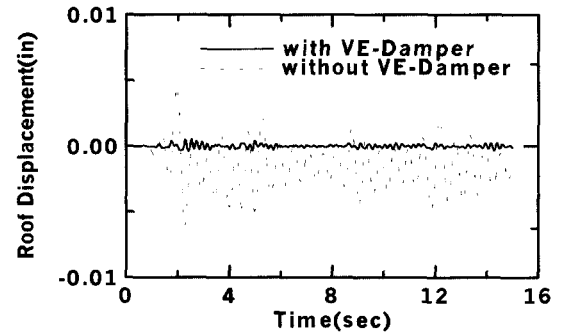


그림 5 최상층의 시간이력-변위

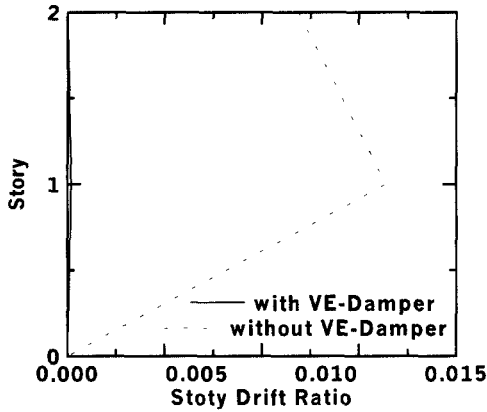


그림 6 층별 최대 층간변위

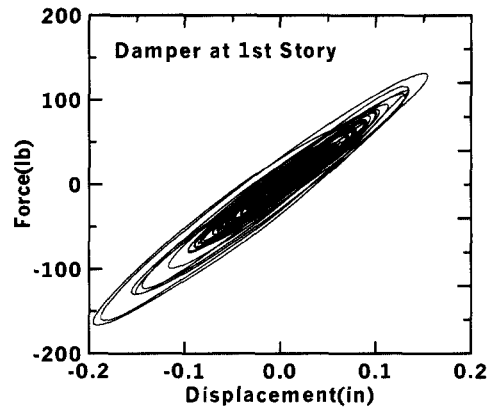


그림 7 1층 감쇠기의 이력곡선

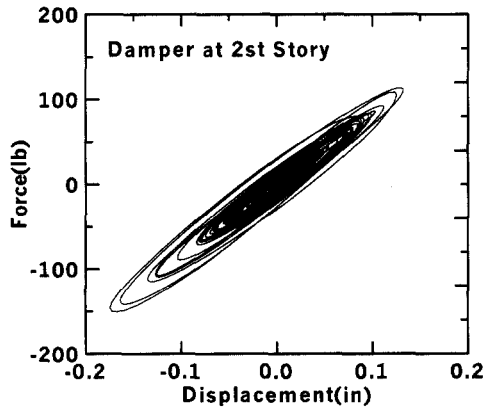


그림 8 2층 감쇠기의 이력곡선

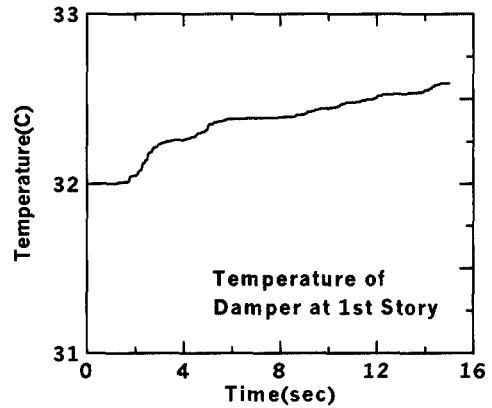


그림 9 1층 감쇠기의 온도변화

그림 10은 각 감쇠기의 시간에 따른 온도변화 추이를 나타내고 있다. 계속된 반복하중으로 인해 점탄성 감쇠층의 온도가 상승하여 감쇠능력이 저하되는 현상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

그림 11은 감쇠기가 설치되지 않은 경우와 설치된 경우의 각 부재별 소성힌지 발생분포 및 최대 소성힌지의 회전량을 나타내고 있다. 감쇠기를 설치한 경우 소성힌지는 발생되지 않았으며, 감쇠기를 설치하지 않은 경우 최대 소성힌지의 회전량이 0.02rad 이상을 보여, 감쇠기를 설치함으로써 전체적으로 소성힌지 발생에 의한 구조물 붕괴를 억제시킬 수 있을 것으로 판단된다.

그림 12에서 그림 16은 보 및 기둥 부재의 층별 최대 모멘트, 최대 전단력, 및 최대 축력을 나타내고 있다. 그림에서처럼, 감쇠기 설치로 인해서 주요 구조부재들의 휨모멘트 및 전단력을 억제하는데 우수한 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 지진하중에 의한 입력에너지를 감쇠기에 의한 감쇠에너지로서 흡수시켜 줌으로서 각 부재가 부담해야할 변형에너지를 감소시켜 주기 때문이다.

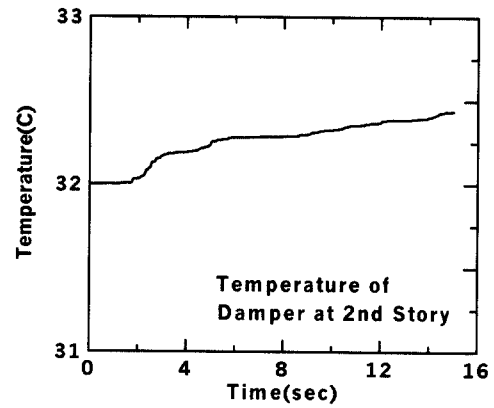


그림 10 2층 감쇠기의 온도변화

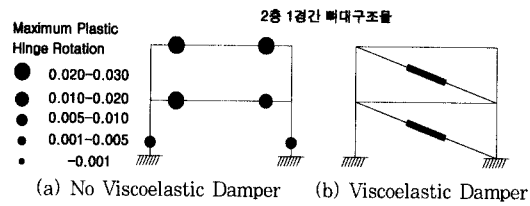


그림 11 소성힌지 발생 및 소성 회전량

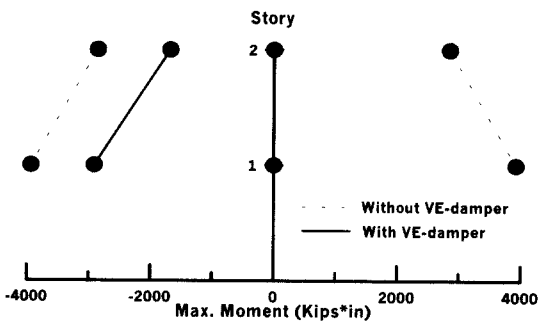


그림 12 보의 최대 모멘트

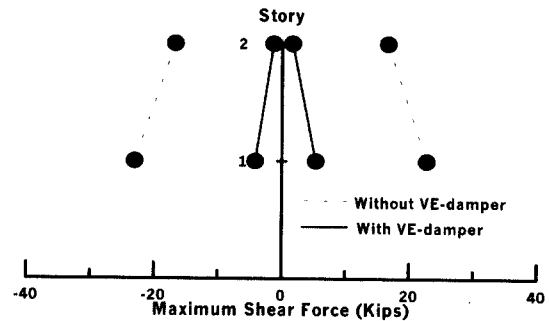


그림 13 보의 최대 전단력

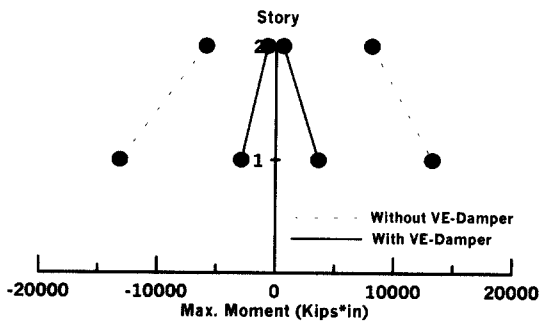


그림 14 기둥의 최대 모멘트

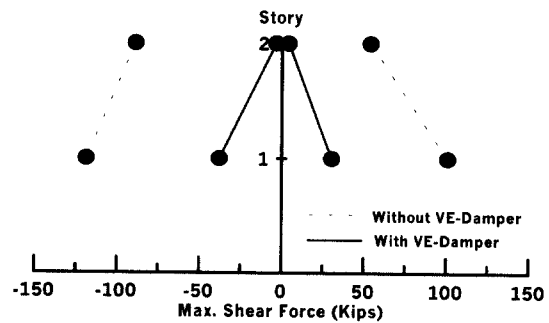


그림 15 기둥의 최대 전단력

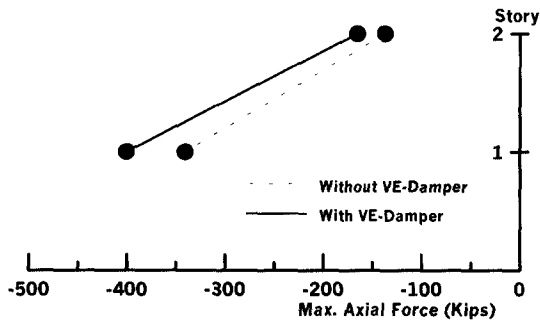
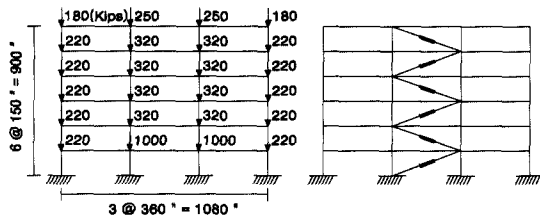


그림 16 기둥의 최대 축력

### 5.2 6층 3경간 강뼈대구조물

다음으로, 그림 17과 같이 6층 3경간 강뼈대구조물에 대해서 해석 예를 구성하여 감쇠기 설치에 따른 거동특성에 대해서 비교·분석하였다. 대상 구조물은 Maison (1992)이 적용한 보와 기둥으로만 구성된 휨 모멘트 저항의 강뼈대구조물로서 이와 동일한 강재의 재원, 하중조건, 및 구조형태를 고려하였다. 지진가속도의 경우 앞 절과 동일하게 고려하였다. 감쇠기가 설치된 경우와



(a) No Viscoelastic Damper (b) Viscoelastic Damper

그림 17 6층 3경간 강뼈대구조물

그렇지 않은 경우에 대해서 해석을 각각 수행하였다. 사용된 감쇠기의 재원은 앞 절의 2층 1경간의 해석 예와 동일하며, 감쇠층의 두께는 3.0in이며, 감쇠층의 단면적은 1층의 경우가 24.0in<sup>2</sup>이고 2층부터 6층까지는 12.0 in<sup>2</sup>를 고려하였다.

감쇠기가 설치되지 않은 경우와 감쇠기가 설치된 경우에 대해 각각 시간이력해석을 수행한 결과, 그림 18과 같이 6층 최상층부에서의 시간이력-변위 관계를 얻었다. 그림 19에서처럼, 감쇠기를 설치한 경우 최대 변위는 약 2.1in 가량이며, 감쇠기를 설치하지 않은 경우의 최대 변위는 약 7.5in 가량으로 나타났다. 그림 20은 각 층별 최대 층간변위 분포를 나타내고 있다. 각 층별 변위와 층간 변위 분포에서 알 수 있듯이 감쇠기를 설치함으로써 구조물의 동적응답에 탁월한 제어효과가 있음을 보여주고 있다.

그림 21과 그림 22는 1층 감쇠기의 이력곡선과 시간에 따른 온도변화 관계를 각각 나타내고 있다. 반복된 하중으로 인해서 감쇠기의 온도가 상승하고 있음을 나타내고 있으며,

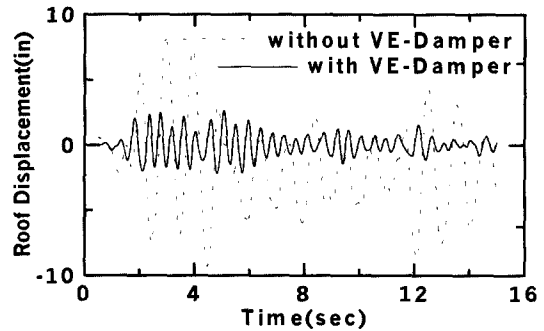


그림 18 최상층부의 시간이력-변위

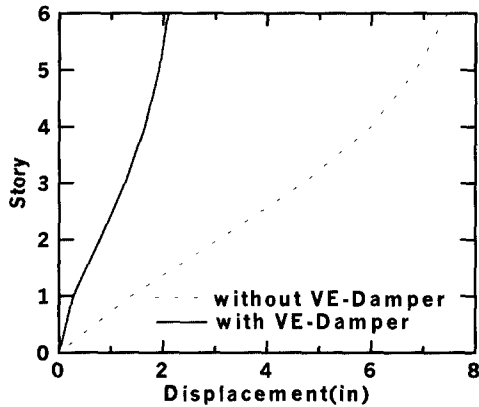


그림 19 층별 최대 변위

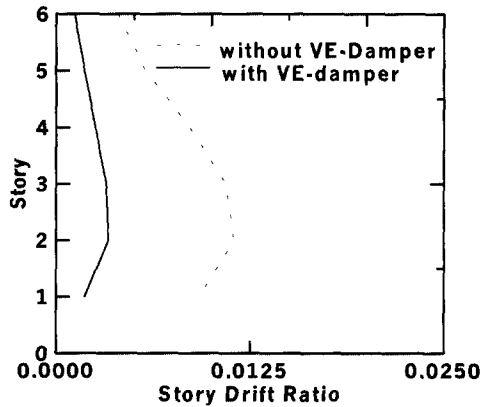


그림 20 층별 최대 층간변위



각 층별 감쇠기의 최대 온도를 그림 23에 나타내고 있다.  
 그림 24는 감쇠기를 설치하지 않은 경우와 감쇠기를 설치한 경우의 소성힌지 발생 및 소성힌지의 회전량을

나타내고 있다. 감쇠기를 설치하지 않은 경우, 보 부재에서 최대 0.01rad 이상과 기둥 부재의 최하층부에서 최대 0.006rad 이상의 소성힌지 발생에 의한 회전량을 나타내어 구조물이 회복불가능할 정도의 붕괴상태로 판단할 수 있다. 이에 비해서, 감쇠기를 설치한 경우, 최하층부의 3번째 기둥에서 약 0.002rad 정도의 소성힌지가 발생하여, 감쇠기 설치로 인해 전체적인 구조 부재의 손상을 억제하는데 효과적인 결과를 나타냈다.

그림 25에서 그림 28은 각 층별 보와 기둥의 최대

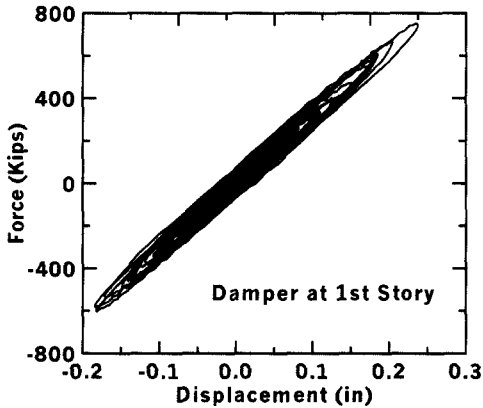


그림 21 1층 감쇠기의 이력곡선

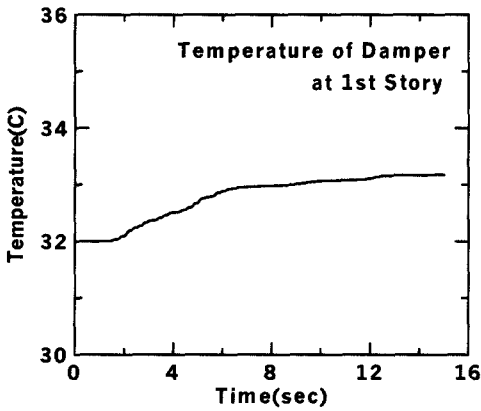


그림 22 1층 감쇠기의 시간이력-온도변화

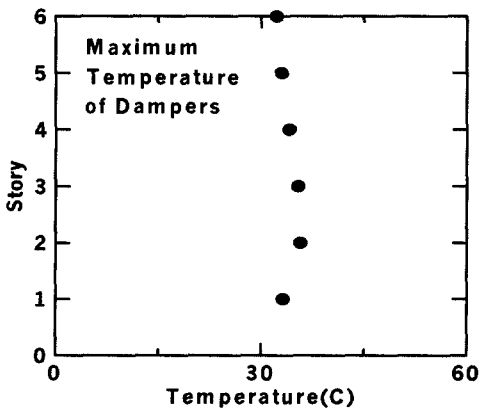


그림 23 감쇠기의 층별 최대온도

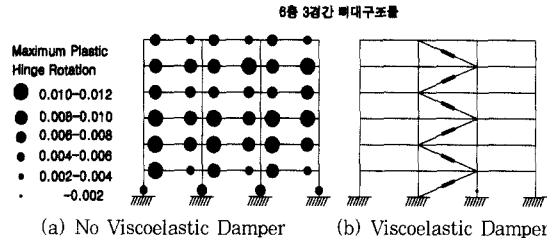


그림 24 소성힌지 발생 및 소성 회전량

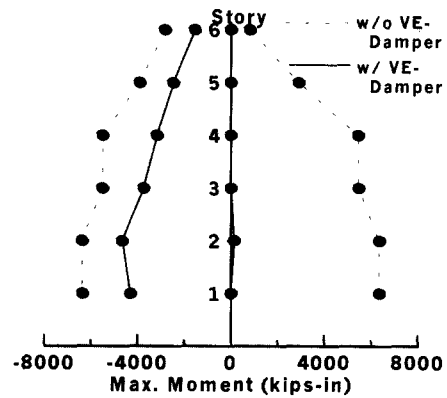


그림 25 내측보의 최대 모멘트

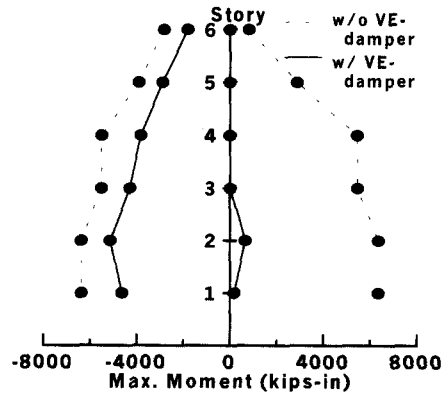


그림 26 외측보의 최대 모멘트

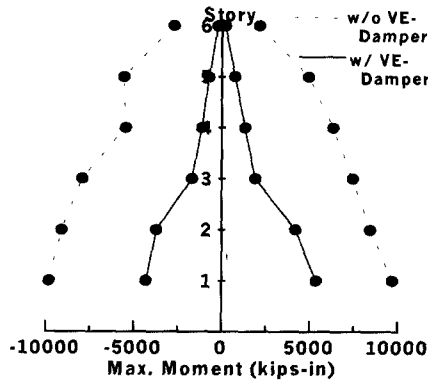


그림 27 내측기둥의 최대 모멘트

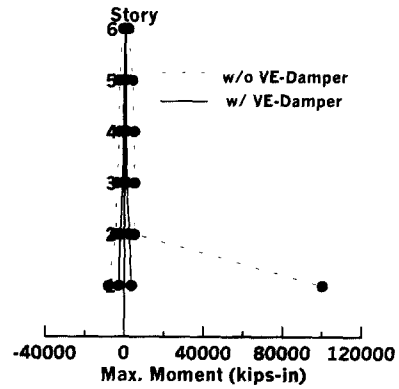


그림 28 외측기둥의 최대 모멘트

모멘트 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 보 및 기둥이 부담해야 할 휨모멘트를 감쇠기가 부담하는 감쇠력으로서 저감시켜 줌으로서 전체 구조물에 대한 구조 부재들의 내력을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

개선된 분수도함수법에 기초하여 시간이력에 따른 감쇠기의 물리·역학적 특성을 고려한 감쇠기 모델을 강뼈대구조물에 적용하여 지진응답개선에 관해서 수치해석적인 방법으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제시된 점탄성 감쇠기 모델을 강뼈대구조물에 적용한 경우는 감쇠기가 설치되지 않은 기존 구조물에 비해서 변위 및 층간 변위를 억제하는데 뛰어난 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 2) 감쇠기 설치로 인해 보 및 기둥 부재의 모멘트와 전단력을 감소시켜 주었으며, 이로 인해 구조물 전체적으로 소성흔치 발생을 억제할 수 있어서 구조 부재의 단면을 줄일 수 있으며, 구조물 붕괴를 제어할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 본 수치모델은 점탄성 감쇠기의 역학적 거동뿐만 아니라 하중주기, 감쇠기 재원, 주위온도 및 감쇠기의 온도변화 관계를 고려하고 있어(박문호 외, 2001)<sup>10)</sup>, 시간이력에 따른 감쇠기의 온도상승으로 인한 감쇠능력의 저하현상을 해석적으로 예측할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Reinhorn, A. M. and Li, C., and Constantinou, M. C., "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping", Report No. NCEER-95-0001, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York, Buffalo, 1995
2. 조창근, 박문호, "수동제어용 유체점성 감쇠기로 보강된 철근콘크리트 뼈대구조물의 비선형 동적해석", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제21권 제1-A호, 2001, pp.21~32
3. Koeller, R. C., "Application of Fractional Calculus to the Theory of Viscoelasticity," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 51, 1984, pp.299~307
4. Clough, R., and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1975
5. Oldham, K. B. and Spanier, J., *The Fractional Calculus*, Academic Press, 1974
6. Koh, C. G. and Kelly, J. M., "Application of Fractional Derivative to Seismic Analysis of Base-isolated Models", *J. of Earthquake Eng. Structural Dynamics*, Vol. 19, 1991, pp.229~241
7. Makris, N. and Constantino, M. C. "Fractional-derivative Maxwell Model for Viscous Dampers", *J. of Structural Eng.*, Vol. 117, No. 9, 1991, pp.2709~2724

8. Huang, N. C. and Lee, E. H., "Thermo-mechanical Coupling Behavior of Viscoelastic Rods Subjected to Cyclic Loading", *J. of Applied Mechanics*, 1967, pp.127~132
9. Maison, B. F., "PC-ANSR : Micro Computer Program for NISEE", University of California, Berkeley, 1992
10. 박문호, 조창근, 광진순, "개선된 분수도함수법을 이용한 점탄성 감쇠기의 수치해석모델", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제21권 제2-A호, 2001, pp.307~316