

# 점탄성 감쇠기를 설치한 강구조 건물의 강지진 하중에 의한 거동 연구

## Seismic Behavior of Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers under Strong Earthquake Ground Motions

오 순 택\*  
Oh, Soon Taek

### Abstract

This paper summarizes an experimental and analytical study on the application of viscoelastic dampers as energy dissipation devices in structural applications. It can be concluded the viscoelastic dampers are effective in reducing excessive vibrations of structures under strong earthquake ground motions. It is also found that the modal strain energy method can be used to reliably predict the equivalent structural damping, and the seismic response of a viscoelastically damped structure can be accurately estimated by conventional modal analysis techniques. Based on the above studies, a design procedure for viscoelastically damped structures is presented. This design procedure fits naturally into the conventional structural design flow chart by including damping ratio as an additional design parameter.

### 요 지

본 논문은 에너지 분산 장치의 일종인 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 거동에 관한 실험 및 해석적 연구이다. 점탄성 감쇠기는 강지진 하중에 의하여 건물에 발생한 과도한 진동을 감소시키는데 효과적이다. 모드 변형에너지법을 이용하여 감쇠기에 의해 증가된 등가구조감쇠를 성공적으로 예측할 수 있으며, 따라서 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 지진 응답이 일반적인 모드 해석기법을 이용한 수치 모형해석에 의해 정확히 예측된다. 이러한 결과를 토대로, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물에 대한 설계 방법을 제시한다. 이 설계 방법은 일반적인 건물의 설계에 감쇠비라는 설계 요소를 추가함으로써 가능해진다.

### 1. 서 론

점탄성 감쇠기(viscoelastic damper : V.E. damper)는 이미 최근 20여년간 풍하중에 의한 고층건물

의 횡변위를 감소시키는데 사용되어 그 결과가 우수한 것으로 판명되었다.<sup>(1)</sup> 지진 하중에 의한 건물의 응답을 감소시키기 위하여 점탄성 감쇠기를 이용한 연구는 불과 몇년전어야 시작 되었다. 건물에 점탄성 감쇠기를 이용한 해석적 연구가 미국의 미시간 대학

\* 정회원 · 연세 대학교 산업기술연구소 토목공학연구부 선임연구원

(2)과 뉴욕 주립 대학교-버팔로(3)에서 수행되었으며, 연구 결과는 강지진 하중에 의한 건물의 지진 응답(seismic response)은 감쇠기의 설치에 의하여 현저히 감소됨을 보여 주었다.

이후 지진 모형 실험 장치(shaking table)를 이용하여 각각 3층(4)과 9층(5) 강구조 건물을 대상으로 뉴욕 주립 대학교-버팔로와 캘리포니아 주립 대학교-버클리에서 실험이 행해졌으며, 그 결과 또한 점탄성 감쇠기의 설치에 의해 건물에 구조 감쇠 효과(structural damping)가 증가하여 지진 하중에 의한 구조 응답이 상당히 줄어들음을 나타냈다. 이러한 여러 연구에도 불구하고, 점탄성 감쇠기를 이용한 건물의 등가구조감쇠(equivalent structural damping)와 구조 응답을 정확히 예측 할 수 있는 신뢰성 있는 해석 모델이 개발되지 않았으며, 따라서 이러한 건물을 설계하는 적절한 방법도 정립이 되지 않은 상태에 있었다.

최근에 점탄성 감쇠기의 동적 특성(dynamic characteristics)과 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 지진 응답에 대한 실험과 해석적 연구가 2/5축척 5층 강구조 건물을 대상으로 다양한 종류와 강도의 지진 하중을 사용하여 뉴욕 주립 대학교-버팔로에서 수행되었다. 실험 결과에 근거, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 등가구조감쇠는 모드 변형에너지법(modal strain energy method)에 의하여, 건물의 지진 응답은 일반적인 동적 선형 해석방법에 의해 구한다.

본 연구에서는 2/5축척 강구조 건물에 점탄성 감쇠기를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대하여 강지진 하중을 가하여 지진 거동을 관찰하고, 이에 대한 실험과 수치 모형 해석 결과를 소개한다. 또한 내진구조물에 점탄성 감쇠기를 이용하는 간편한 설계 방법도 제시한다.

## 2. 점탄성 감쇠기의 특성

그림 1은 본 연구에서 사용된 점탄성 감쇠기의 모양을 나타내며, 이와 같은 감쇠기의 에너지 분산 능력(energy dissipation capacity)은 shear storage modulus( $G'$ )와 shear loss modulus( $G''$ )에 의해 특성 지어진다.  $G'$ 은 감쇠기의 강성도( $k'$ )를,  $G''$ 와  $G'$ 의 비는 감쇠기 손실계수(loss factor,  $\eta$ )를 결정한다.

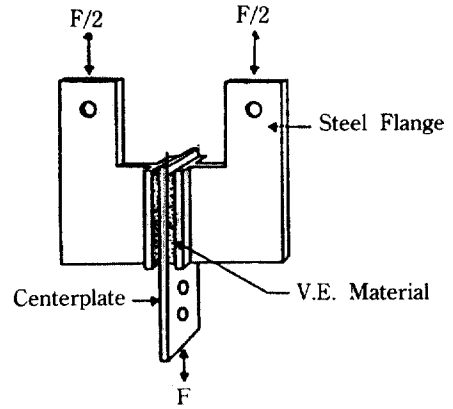


그림 1. Viscoelastic Damper.

$$k' = \frac{G' A}{h} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{G''}{G'} \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 점탄성 재료의 총전단면적,  $h$ 는 점탄성재료층의 두께이며,  $k'$ 과  $\eta$ 는 건물의 감쇠비를 산출하는데 사용된다.

가진 진동수 및 주변 온도는 점탄성 감쇠기의 동적 특성에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로, 가진 진동수가 높으면  $G'$ 과  $G''$ 은 큰 값을 가지나, 주변 온도의 영향은 이와 반대이다. 주변 온도가 상승함에 따라 감쇠기 내부의 점탄성 재료가 연화하여 에너지 분산 능력이 감소하기 때문이다. 손실계수는 가진 진동수와 주변 온도의 영향을 적게 받아 이들 인자의 변화에도 불구하고 거의 일정한 값을 유지한다.

표 1. Damper Properties

Temp. °C	Freq., Hz	Strain, %	$k'$ , lb/in	$G'$ , psi	$G''$ , psi	$\eta$
24	1.0	5	2124	142	193	1.36
24	1.0	20	2082	139	192	1.38
24	3.0	5	4084	272	324	1.19
24	3.0	20	3840	256	306	1.2
36	1.0	5	880	59	67	1.13
36	1.0	20	873	58	65	1.12
36	3.0	5	1626	108	119	1.1
36	3.0	20	1542	103	112	1.09

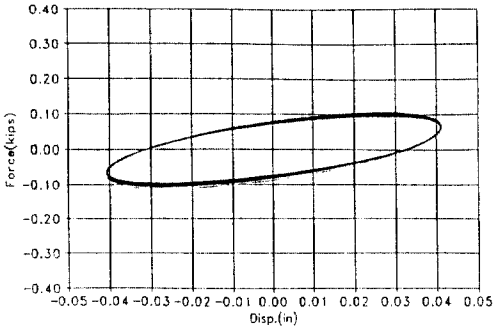


그림 2. Force-Deformation Relationship of V.E. Damper.

표 1은 주변 온도, 가진 진동수, 변형률 등의 인자가 점탄성 감쇠기의 동적 특성에 미치는 영향을 나타낸 실험결과치이며, 그림 2는 감쇠기의 대표적인 하중-변위관계로서 온도 24°C, 변형률 20%, 가진 진동수 1.0Hz에 대한 결과를 도시하고 있다. 감쇠기의 동적 특성은 20%이하의 변형률에서는 주변 온도와 가진 진동수에 영향을 크게 받지 않는다. 그러나 20%이상의 높은 변형률에서는 하중재하시 점탄성 재료의 온도 상승으로 인하여 반복 하중 재하 주기와 변형률 범위에 따라 영향을 받는다. 전형적인 지진의 지반운동시, 최대 가속도(peak acceleration)는 최초 몇주기만에 발생하고 평균 가진 가속도도 일반적으로 최대 가속도보다 훨씬 작다고 볼 수 있다. 따라서 변형률 20%에 해당하는 감쇠기의 동적 특성을 근거로 하여, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 지진 응답을 해석하는 것이 가능하게 된다.

일반적으로 감쇠기의 동적 특성은 가진 진동수, 주변 온도 및 변형률의 영향을 고려한 모델링(modeling)에 의해 추정하는 것이 원칙이나 실무 설계에 있어서는 가진 진동수와 주변 온도 만을 인자로 하여 실시한 실험 결과를 회귀 분석(regression analysis)하여 추정할 수도 있다<sup>6)</sup>.

### 3. 건물의 동적 응답에 관한 실험

실험 대상구조물은 2/5 축척의 5층 강구조 건물로서 평면상 52"×52"(132cm×132cm)이고, 높이 224"(570cm)이다. 1층으로부터 4층까지는 각 층의 중량이 1.27kips(576kg)이며, 5층은 1.12kips(508kg)

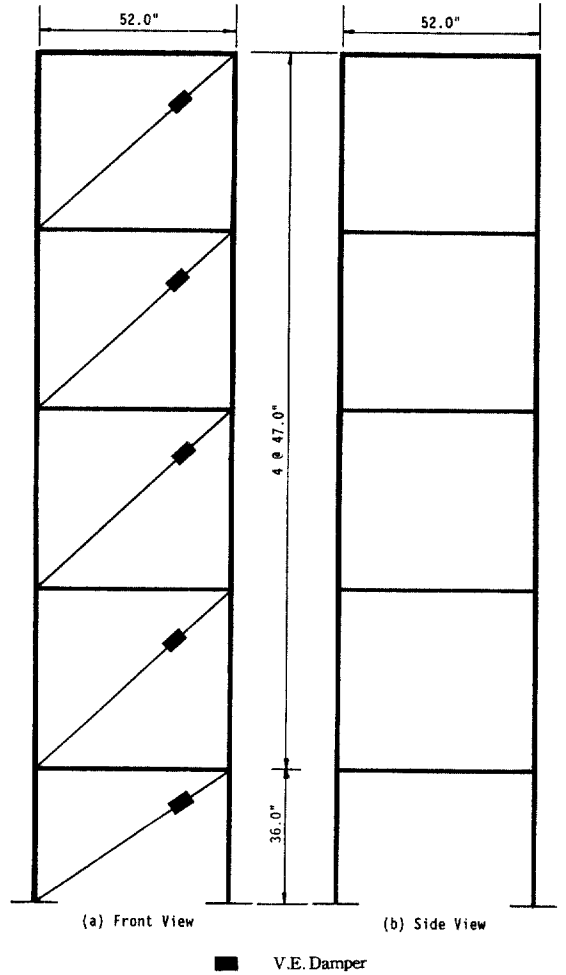


그림 3. Five-Story Steel Frame with Added V.E. Dampers.

이다(그림 3). 모든 보와 기둥의 접합부는 완전히 용접하여 강결하였다. 이러한 설계형태는 횡하중에 대하여 집중질량(lumped mass)을 가진 5-자유도계-구조체(five-degree-of-freedom system)를 이루게 된다. 건물 하단 1층의 각 기둥은 바닥강판에 용접하였으며, 이는 다시 거대한 콘크리트 보트 모양의 지진 모형 실험장치인 shaking table에 볼트로 고정시켰다. 감쇠기는 건물내에서 gusset plate에 의하여 보에 연결된 대각 브레이싱부재의 상단 1/3 지점에 설치하였다.

점탄성 감쇠기를 설치한 건물에 최대 가속도 0.6g의 강지진 하중을 가하여 건물의 지진 거동을 관

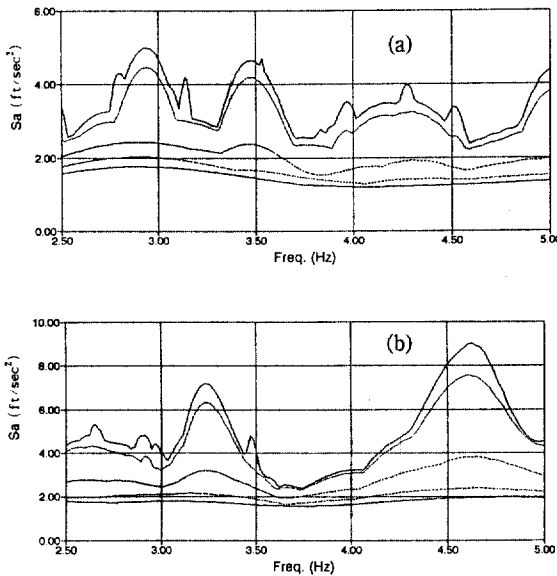
찰하는 실험이 지진 모형 실험 장치를 이용하여 실시되었다. 이때, 적합한 입력 지진 하중을 결정하기 위하여 다음의 두 가지 기준을 고려하였다: ① 감쇠기를 설치하기 이전의 구조물은 손상없이 탄성적으로 거동하여야 한다. ② 높은 주변온도에서 감쇠기가 손상되는 것을 방지하기 위하여 감쇠기의 최대 변형률은 75% 이하이어야 한다.

입력된 white noise와 출력된 구조응답 신호사이에서 가속도 전이함수(acceleration transfer function)를 분석하여 고유진동수, 감쇠비 등 건물의 중요한 동적 특성을 구할 수 있다. 감쇠기를 설치하지 않은 원래 건물의 고유 진동수는 3.1Hz이고, 감쇠기를 설치 한후 건물의 고유 진동수는 입력된 하중의 강도에 따라 3.5Hz에서 3.6Hz 범위의 값을 나타낸다. 점탄성 감쇠기는 일반 실내 온도(약 24°C 전후)에서 실험 건물이 15%의 감쇠비를 가지도록 설계되었다. 그림 4a와 4b는 본 실험에 사용된 두 지진 하중에 대한 각 감쇠비별 응답 스펙트럼을 보여준다. 그림에 의하면, 응답 스펙트럼 상에 골짜기가 많으나 15% 감쇠비의 경우 넓은 범위의 진동수에서 비교적 일

정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 건물에 인위적으로 감쇠력을 증가시키면, 지진발생시 건물의 지진 응답이 감소되고 지진 하중의 진동수에 의한 영향도 줄일 수 있음을 의미한다.

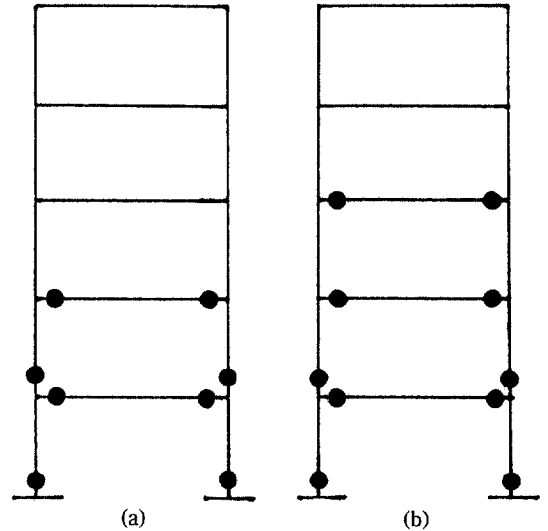
최대 가속도 0.6g로 조절된 El Centro(1940)와 Hachinohe(1968) 지진 기록을 이용하여 실험실내의 평상온도(25°C)에서 점탄성 감쇠기를 설치한 건물에 대한 지진 모형 실험이 행해졌다. 비탄성해석 컴퓨터 프로그램 DRAIN-2D<sup>(7)</sup>과 유한요소 프로그램, SAP IV<sup>(8)</sup>를 이용한 수치 모형 해석 결과, 점탄성 감쇠기를 설치하지 않은 건물의 경우는 이미 언급한 두 가지 지진 하중 하에서 비탄성 변형이 일어났다(그림 5a와 5b). 이러한 해석적 결과는 강지진 하중 하의 점탄성 감쇠기를 설치한 건물에 있어서의 감쇠기의 효율성을 산정 하는데 이용된다.

그림 6a와 6b는 0.6g의 El Centro와 Hachinohe 지진 하중을, 감쇠기를 설치하지 않은 건물에 가했을 때 건물의 최상단인 지붕 지점에서의 횡변위 시간력(time history)을 나타내고 그림 7a와 7b는 같은 건물에 감쇠기를 설치 한 후의 횡변위 시간력을 보여준다. 이로 부터 점탄성 감쇠기는 추가적인 감쇠 효과를 제공, 건물이 탄성 거동을 하도록 하여 지진 응답을 감소시킴을 알 수 있다. 모든 층에서의 층간



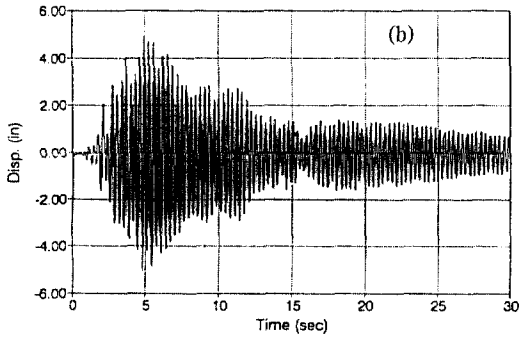
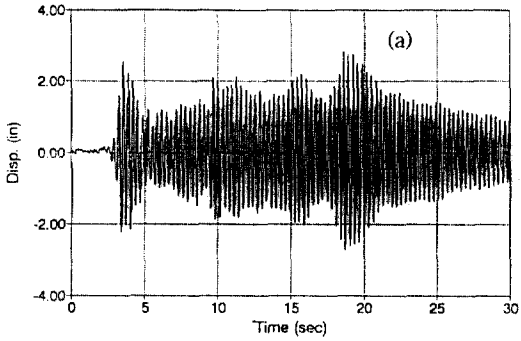
(a) El Centro Earthquake,  
(b) Hachinohe Earthquake

그림 4. Time Scaled Response Spectra with Different Damping Ratios (0.5%, 1.0%, 5.0%, 10%, 15%).



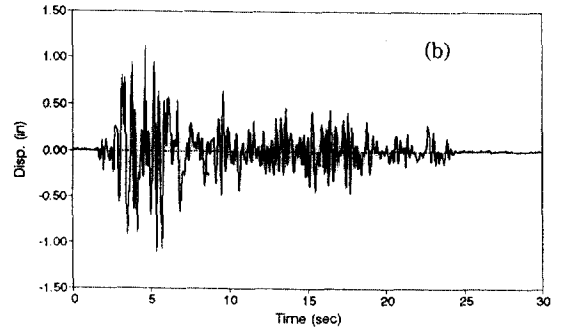
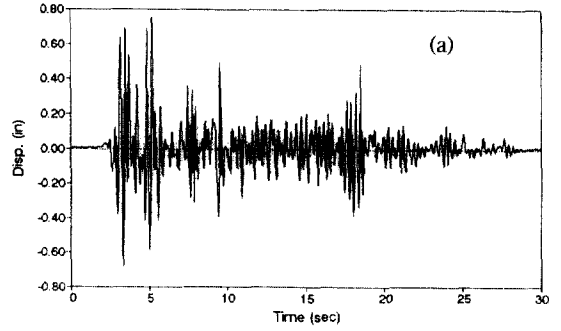
(a) 0.6g El Centro Earthquake,  
(b) 0.6g Hachinohe Earthquake

그림 5. Distribution of Plastic Hinges in Model Structure



(a) 0.6g El Centro Earthquake,  
(b) 0.6g Hachinohe Earthquake

그림 6. Calculated Displacements without Dampers Added.



(a) 0.6g El Centro Earthquake,  
(b) 0.6g Hachinohe Earthquake

그림 7. Measured Displacements with Dampers Added.

횡변위(inter-story drift)와 층가속도도 감소되었다.

그림 8a-8d는 0.6g El Centro 지진 하중에 의한 건물의 층별 횡변위, 층간 횡변위, 누적 층전단력(accumulated story shear) 및 전도 모멘트(overturning moment)를 응답 포락선(response envelope)으로 도시한 것으로, 감쇠기를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우를 비교하여 나타낸다. 표 2를 통하여 이들 응답포락선의 값들을 각층에서 비교하면, 점탄성 감쇠기를 설치함에 따라 횡변형 뿐만 아니라 base shear와 전도 모멘트도 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서, 건물에 설치된 점탄성 감쇠기는 상당량의 입력 지진 에너지를 분산시켜 건물의 비탄성 변형을 방지하는 역할을 한다고 사료된다. 0.6g Hachinohe 지진 하중이 가해진 경우에도 이와 비슷한 결과가 나타났다. 표 3은 이들 두 강지진하중에 의한 동적 응답을 요약한 것으로 감쇠기를 설치하지 않은 건물에 대한 비탄성 해석결과와 감쇠기를 설치한 건

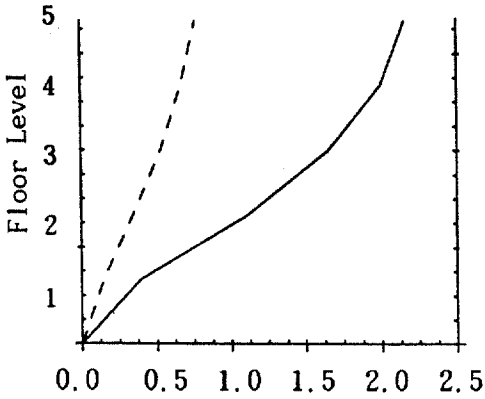
표 2. El Centro-0.06g Test Response Envelopes

Floor Level	5	4	3	2	1
Lateral Disp.(in)	0.766 (2.150)	0.665 (1.990)	0.529 (1.650)	0.346 (1.110)	0.143 (0.390)
Inter-Story Drift(in)	0.104 (0.207)	0.137 (0.365)	0.187 (0.598)	0.214 (0.721)	0.143 (0.394)
Story Shear(k)	1.113 (1.556)	2.247 (2.836)	3.223 (4.236)	4.001 (6.140)	4.538 (7.604)
Overtyning Moment(k-in)	249.3 (348.5)	450.0 (575.1)	576.9 (757.1)	641.4 (915.1)	660.8 (967.8)

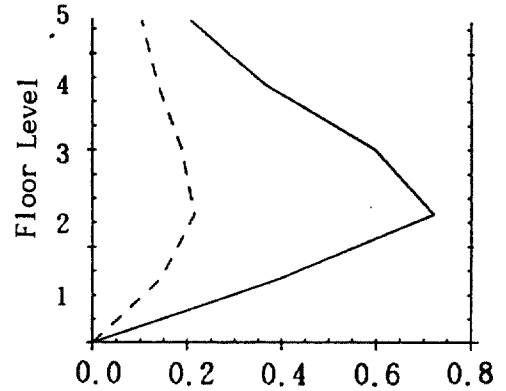
\* Note: ( ) values are from the inelastic analysis on the model structure without added dampers.

물에 대한 실험결과를 비교한 것이다.

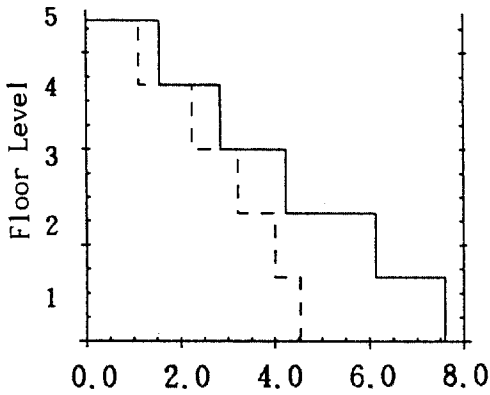
일반적으로 점탄성 감쇠기를 설치하면 이로 인하여 건물의 강성도가 감쇠비와 함께 증가한다. 그림



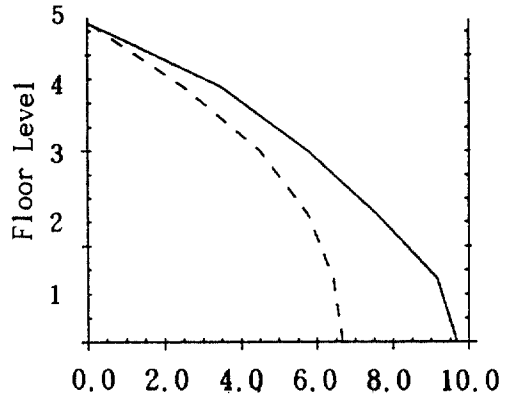
(a) Lateral Disp. (in)



(b) Inter-Story Drift (in)



(c) Story Shear (kips)



(d) Overturning Moment  
( $\times 100$  kip-in)

----- With Dampers,  
 ——— Without Dampers.

그림 8. Envelope Curves.

9는 El Centro 지진하중이 실험건물에 가해졌을 때 증가된 강성도와 감쇠비가 구조응답에 미치는 영향을 보여준다. 그림에서 'stiffened'는 점탄성 감쇠기를 설치하지 않은 건물에 감쇠기의 강성도만 추가하고 증가된 감쇠비는 고려하지 않은 경우의 횡변위를 나타내며, 이 경우 구조응답은 거의 감소하지 않음을 알 수 있다. 따라서 증가된 강성도는 건물의 지진 응답을 감소시키는데 기여하지 못하고, 이 보다는 증가된 감쇠비의 효과에 의해 대부분의 지진응답이 감소된다고 할 수 있다.<sup>(9)</sup>

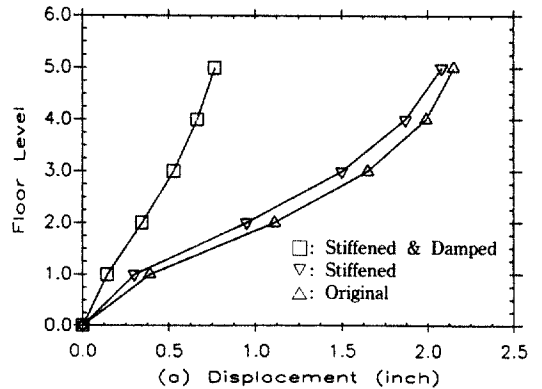


그림 9. Envelopes of Max. Floor Displacement.  
(El Centro-0.60g)

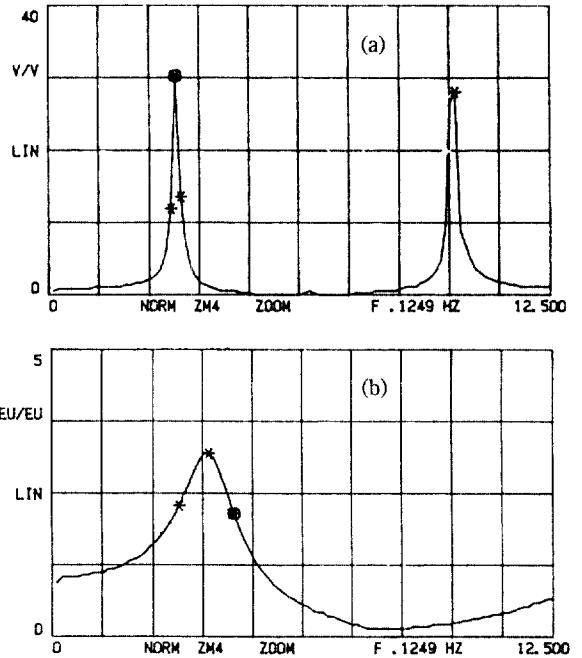
표 3. Summary of Dynamic Responses

Maximum Response	Floor Level	No Damper (Inelastic Analysis)		With Type 'B' Dampers (% Reduction of No Damper Case)	
		El Centro (0.60g)	Hachinohe (0.60g)	El Centro (0.60g)	Hachinohe (0.60g)
Relative Floor	5	2.150	3.490	0.766 (64.4)	0.823 (76.4)
Disp. (inch)	4	1.990	3.240	0.665 (66.6)	0.719 (77.8)
	3	1.650	2.700	0.529 (67.9)	0.579 (78.6)
	2	1.110	1.630	0.346 (68.8)	0.382 (76.6)
	1	0.390	0.470	0.143 (63.3)	0.148 (68.5)
Inter-Story	5-4	0.207	0.310	0.104 (49.8)	0.111 (64.2)
Drift (inch)	4-3	0.365	0.599	0.137 (62.5)	0.146 (75.6)
	3-2	0.598	1.100	0.187 (68.7)	0.201 (81.7)
	2-1	0.721	1.185	0.214 (70.3)	0.234 (80.3)
	1-0	0.394	0.470	0.143 (63.7)	0.148 (68.5)

4. 수치 모형 해석

점탄성 감쇠기를 설치한 건물은 지진 하중 하에서 감쇠기에 의해 증가된 감쇠 효과로 입력된 에너지를 분산시킨다. 이러한 감쇠기의 효율성을 검증하기 위하여 감쇠기에 의해 증가된 등가 구조 감쇠를 산정하는 것은 매우 중요하다. 최근의 연구 결과에 의하면<sup>(3)</sup>, 비례 감쇠 구조체(proportionally damped system)로 가정하여 감쇠기를 설치한 건물의 i번째 모드에서의 감쇠비를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\xi_i = \frac{E_d'}{4\pi E'} \quad (3)$$



(a) Without V.E. Dampers  
(b) With V.E. Dampers

그림 10. Absolute Acceleration Frequency Transfer Function.

여기서,  $\xi_i$ 는 i번째 진동 모드에서의 구조 감쇠비,  $E_d'$ 는 i번째 진동 모드에서 감쇠기에 의해 분산된 에너지이며  $E'$ 는 i번째 진동 모드에서의 건물의 변형 에너지이다. 또한 식 (3)은 다시 모드 변형에너지의 향으로 표현 할 수 있다.<sup>(9,10,11)</sup>

$$\xi = \frac{\eta}{2} \left[ 1 - \frac{\phi_s^T K_c \phi_s}{\phi_s^T K_s \phi_s} \right] \quad (4)$$

여기서  $K_s$ 는 감쇠기를 포함한 건물 전체의 강성도 행렬,  $\phi_s$ 는 모드 형상 벡터 (mode shape vector),  $K_c$ 는 감쇠기를 설치 하기전 건물의 원래 강성도 행렬이다.

실험에서 얻어진 절대가속도에 대한 진동수 전이 함수(그림 10)를 분석하면, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 경우 첫번째 모드(n=1)를 제외한 그 이상 모드에서의 구조 응답은 상대적으로 미미하기 때문에 본 연구에서는 첫번째 모드와 관련된 동적 구조 특성만을 사용하여 수치 모형 해석을 수행한다.

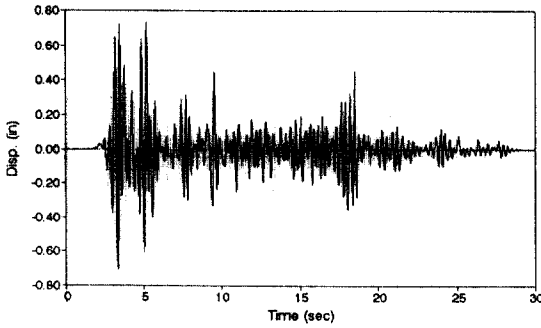


그림 11. Estimated Displacements with Dampers Added ; 0.6g El Centro Earthquake.

표 1에서 나타난 바와 같이, 20% 이하의 변형을 범위에서 점탄성 감쇠기의 동적 특성은 가진 진동수나 주변 온도의 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 유지한다.

주변 온도 25°C에서, 표 1에 나타난 감쇠기의 강성도와 손실계수를 이용하여 감쇠기를 설치한 건물의 모드 감쇠비(modal damping ratio)를 식(4)를 이용한 모드 변형에너지법에 의해 계산한 결과 14.5%의 값이 얻어진다.

만일 감쇠기에 의해 추가된 강성도가 원래 건물의 강성도에 비해 미미한 정도라면, 그 건물의 모드 형상은 감쇠기의 설치에 의해서도 크게 변하지 않는다. Rayleigh quotient를 이용하여 식(3)을 표시하면 다음과 같다.

$$\xi = \frac{\eta}{2} \left[ 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_s^2} \right] \quad (5)$$

여기서  $\omega_s$ 와  $\omega_c$ 는 각각 감쇠기를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 건물의 고유 진동수이다. 모드 감쇠비는 감쇠기의 설치에 의하여 증가된 고유 진동수의 함수로 된다. 따라서 원하는 감쇠비를 얻기 위하여는 적절한 손실계수를 가진 감쇠기를 선택함으로써 고유 진동수를 증가시킬 수 있다. 즉 손실계수가 큰 감쇠기를 설치하면 고유 진동수의 증가량은 줄어든다.

그러나 감쇠기를 설치함으로써 인해 건물의 모드 형상이 크게 변하는 경우, 식(5)는 건물의 구조 감쇠를 과대하게 추정할 수도 있으므로 주의하여 사용하여야 한다. 예를 들어, 건물에 설치한 감쇠기 중 어느 부분의 감쇠기 강성도가 상대적으로 지나

치게 커서 건물의 다른 부분에 비해 변형이 매우 작다면 감쇠기에 의한 전체적인 에너지 분산과 구조 감쇠력은 줄어들게 된다. 이 경우 감쇠기의 강성도 추가에도 불구하고 건물의 고유 진동수는 증가하지 않는다.

그림 11은 0.6g El Centro 지진 하중 하에 있는 모델 건물의 횡변위를 수치 모형 해석에 의하여 예측한 것이다. 이 결과는 그림 7a의 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 사료된다.

## 5. 설계 방법

구조물 설계에 있어서 가장 기본적인 요건은 설계된 구조물의 거동을 주어진 하중 하에서 신뢰성 있게 예측하는 일이다. 또한 설계에 필요한 모든 요소가 갖추어지면 엔지니어는 기존의 설계 방법에 의해 정확히 구조물을 해석할 수 있다. 점탄성 감쇠기를 설치한 건물을 설계함에 있어서 중요한 요소는 감쇠비에 관련된 사항이다. 설계 과정에서 모드 변형에너지법을 적절히 사용한다면 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 설계도 쉽게 완성될 수 있다.

일반적인 설계의 경우와 마찬가지로, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 설계도 반복적인 방법으로 이루어진다. 먼저, 점탄성 감쇠기를 설치하기 이전 건물에 대한 구조 해석이 이루어져야 하고, 이어서 감쇠기를 설치함에 따라 목표로 하는 예상 감쇠비가 결정되어야 한다.

설계는 다음에 설명하는 단계를 거치면서 계속적으로 각 설계 주기마다 구조 특성치를 새로이 결정해 나가야 한다.

- (1) 건물의 구조 특성치를 정하여 구조 해석을 행한다.
- (2) 목표로 하는 감쇠비를 결정한다.
- (3) 건물에 대한 감쇠기 배치를 결정한다.
- (4) 감쇠기의 강성도와 손실계수를 정한다.
- (5) 모드 변형 에너지법에 의하여 등가 감쇠비를 계산한다.
- (6) 계산된 감쇠비를 적용하여 감쇠기를 설치한 건물에 대한 구조 해석을 실시한다.

단계 (5)와 (6)에서, 목표로 하는 감쇠비와 건물의 설계 요건이 만족되었을때 설계는 완료되나, 그렇지



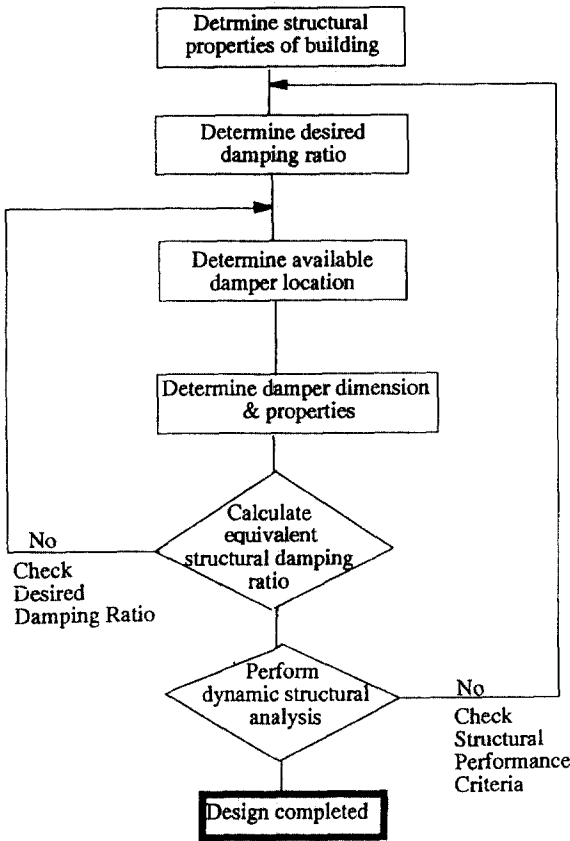


그림 12. Design Flow Chart for Structure with V.E. Dampers

않은 경우는 구조 특성치, 감쇠기 배치, 감쇠기의 제원과 동적 특성을 새로이 하여 다시 설계를 한다. 전체적인 설계 절차를 나타내는 흐름도는 그림 12와 같다. 목표로 하는 감쇠비는 여러 값의 감쇠비에 대한 지진 하중 응답 스펙트럼을 작성하여 결정할 수 있다. 또한 감쇠기에 의해 추가되는 강성도는 건물 각층에 분배된 총 구조 강성도의 양에 비해 한다는 원칙에 의해 결정될 수도 있다. 이는 각층에 대하여 수정된 모드 변형에너지법을 이용해 구해질 수 있다.

$$k_i' = \frac{2\xi}{\eta - 2\xi} k_i \quad (6)$$

여기서  $k_i$ 는 감쇠기를 설치하지 않은 건물의  $i$ 번째 층의 구조 강성도,  $k_i'$ 는 감쇠기의 설치에 의해 건물

$i$ 번째 층에 분배된 감쇠기의 강성도,  $\xi$ 는 목표로 하는 감쇠비이다. 설계시, 가진 진동수와 주변 온도를 예상하여 고유의  $G'$ 와  $G''$ 값을 가진 점탄성 재료를 선택한 다음, 감쇠기의 예상 최대 변형률과 극한 변형률을 고려하여 점탄성 재료의 두께,  $h$ 는 결정된다. 또한 감쇠기의 총전단면적,  $A$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$A = \frac{k'h}{G'} \quad (7)$$

일반적으로 점탄성 감쇠기의 경우, 점탄성 재료는 2개의 층으로 이루어져 있으므로 1개층의 면적은 식 (7)에 의해 계산된 값의 절반이 된다.

## 6. 결 론

본 논문은 에너지 분산 장치인 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 강지진 하중에 의한 거동에 관한 실험과 수치 모형 해석에 대하여 다루었다. 지진 모형 실험 장치를 이용하여 감쇠기를 설치한 건물의 구조 응답을 구하고, 이를 감쇠기를 설치하지 않은 건물에 대하여 행해진 비탄성 해석 결과와 비교하였다. 결론적으로 말하면, 점탄성 감쇠기는 지진의 지반 운동에서 초래되는 과도한 진동을 감소시키는데 효과적이다. 예를 들면, 최대 가속도 0.6g의 El Centro 지진 하중의 경우 모델 건물의 횡변위와 층간 횡변위는 감쇠기의 설치에 의하여 각각 최소 60%와 50%의 감소율을 나타냈으며 Hachinohe 지진의 경우는 이보다 다소 높은 감소율을 기록하였다. 일반적으로 점탄성 감쇠기를 건물에 설치함으로써 감쇠비와 강성도가 함께 증가하여 지진 응답을 감소시키는데 기여하나, 대부분은 감쇠기의 역할에 의해 증가된 감쇠비의 영향인 것으로 밝혀졌다. 또한 모드 변형에너지법에 의하여 등가구조감쇠를 성공적으로 산정할 수 있으며, 따라서 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 지진 응답이 일반적인 모드 해석법(modal analysis)을 이용한 수치 모형 해석에 의해 정확히 예측 되었다.

이러한 실험 및 해석 연구의 결과를 기초로 하여, 점탄성 감쇠기를 한 건물에 대한 설계 방법을 제시 하였다. 이 설계 방법은 일반적인 구조물 설계에

감쇠비라는 설계 요소를 더 추가 함으로써 이루어진다.

## 참 고 문 헌

1. Mahmoodi, P., Robertson, L. E., Yontar, M., Moy, C. and Feld, I., "Performance of Viscoelastic Dampers in World Trade Center Towers," *Dynamics of Structures*, Proceedings of the Sessions at Structural Congress '87, Orlando, FL, Aug. 1987, pp. 17-20.
2. Ashour, S. A., *Elastic Seismic Response of Buildings with Supplemental Damping*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 1987.
3. Zhang, R. H., Soong, T. T. and Mahmoodi, P., "Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 389-396.
4. Lin, R. C., Liang, Z., Soong, T. T. and Zhang, R. H., "An Experimental Study on Seismic Behavior of Viscoelastically Damped Structures," *Engineering Structures*, Vol. 13, 1991, pp. 75-84.
5. Aiken, L. D. and Kelly, J. M., "Earthquake Simulator Testing and Analytical Studies of Two Energy-Absorbing Systems for Multistory Structures," *Report No. UCB/EERC-90/03*, University of California, Berkeley, 1990.
6. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S-T. and Lai, M. L., "Effect of Ambient Temperature on Viscoelastically Damped Structure," *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No.7, Jul. 1992, pp. 1955-1973.
7. Kanaan, A. E., and Powell, G. H., "DRAIN-2D. A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures," *UCB/EERC Report No. 73-6*, University of California, Berkeley, 1973.
8. Bathe, K-J., Wilson, E. L. and Peterson, F. E., "SAP IV-A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems," *Report No. UCB/EERC 73-11*, University of California, Berkeley, CA., 1973.
9. Oh, S-T., *Seismic Behavior of A 2/5-Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Damper*, Thesis presented to the State University of New York at Buffalo, New York, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, April 1992.
10. Soong, T. T. and Lai, M. L., "Correlation of Experimental Results with Predictions of Viscoelastic Damping of a Model Structure," *Proceedings of Damping '91*, San Diego, C.A., 1991.
11. Johnson, C. D. and Kienholz, D. A., "Finite Element Prediction of Damping in Structures with Constrained Viscoelastic Layers," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 9, 1982, pp. 1284-1290.

(接受 : 1993. 3. 12)