

점탄성 감쇠기를 설치한 강구조건물의 지진하중에 대한 거동연구

Seismic Behavior of Viscoelastically Damped Steel-Frame Structures

오 순 택*
Oh, Soon-Taek

요 약

본 논문은 에너지 분산장치의 일종인 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 거동에 관한 연구이다. 정상온도에서 뿐만 아니라 높은 주변온도 하에서도 점탄성 감쇠기를 설치한 건물은 이를 설치하지 않은 건물에 비해서 구조 응답이 현저히 감소함을 나타낸다. 감쇠기에 대한 실험에서 얻은 결과를 회귀분석하여 감쇠기의 동적특성을 산정할 수 있는 실험식을 유도한다. 감쇠기를 설치한 건물의 구조감쇠는 모드 변형에너지법과 유도된 실험식을 이용하여 성공적으로 예측할 수 있다. 또한, 점탄성 감쇠된 건물의 지진하중에 의한 동적 구조응답을 예측하기 위하여 수치모형해석을 수행한다. 수치모형해석의 결과는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타나 일반적인 모드해석방법에 의해 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 동적거동을 정확하게 예측할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과를 토대로, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물에 대한 설계방법을 제시한다. 이 설계방법은 일반적인 건물의 설계에 감쇠비라는 설계요소를 추가함으로써 가능해진다.

Abstract

This paper summarizes a study on the application of viscoelastic dampers as an energy dissipation device in the frame structure. It can be concluded that, even at high temperatures, the viscoelastically damped structure can achieve a significant reduction of structural response as compared to the case with no dampers added. Empirical formulae for estimating the dynamic properties of the viscoelastic damper are established based on the regression analysis using data obtained from component tests of the damper. The structural damping with added dampers can be satisfactorily estimated by the modal strain energy method and the derived empirical formulae. Numerical simulations using conventional modal analysis methods are also carried out to predict the dynamic response of viscoelastically damped structures under seismic excitations. Comparison between numerical simulations and test results shows very good agreement. Based on the above studies, a design pro-

* 정희원, 연세대학교 산업기술연구소 토목공학 연구부 연구원

이 논문에 대한 토론을 1993년 9월30일까지 본학회에 보내주시면 1994년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

cedure 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.

1. 서론

최근 수년간 에너지 흡수장치를 이용한 내진구조물의 설계가 주목을 받고 있다. 현재 이용가능한 장치들 중, 점탄성 감쇠기(viscoelastic damper : V.E. damper)는 강한 지진의 지반운동에서 초래되는 에너지를 분산시킬 수 있는 추가 감쇠를 제공한다고 알려져 있다. 점탄성 감쇠기는 일반적으로 직접전단(direct shear) 하에서 입력 동적에너지를 분산하도록 강판 사이에 점탄성층을 부착하여 구성한다. 실험적 연구에 따르면 이 감쇠기를 건물에 설치하면 건물의 지진응답을 감소시키는데 효율적이나, 적절한 설계에 의하여 효율성을 극대화하기 위해서는 가진진동수(excitation frequency) 및 주변온도와 같은 중요한 인자를 고려하여야 한다고 알려져 있다^(1, 2)

본 연구에서는 실험적 방법에 의하여 점탄성 감쇠기의 동적특성을 밝히고, 2/5 축척의 5층 강구조건물을 대상으로 점탄성 감쇠기를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우의 지진하중에 의한 거동을 연구한다. 먼저 독립된 점탄성 감쇠기에 대한 실험결과에 의하여 가진진동수, 주변온도, 변형률 범위 등의 함수로 감쇠기의 동적특성에 대한 실험식을 유도한다. 다음, 이들 식에 근거하여 등가구조감쇠(equivalent structural damping)를 예측하고, 수치모형해석에 의해 건물의 구조응답을 구하여 실험결과와 비교한다.

2. 점탄성 감쇠기의 특성

그림 1과 같이 단면적이 1.5 in²(9.7 cm²), 두께가 0.2 in(0.5cm)인 감쇠기를 6개의 각기 다른 주변온도(21℃, 24℃, 28℃, 32℃, 36℃, 40℃) 하에서 실험하였다. 각 온도에 대하여 6개의 다른 진동수(0.1Hz, 1.0Hz, 2.0Hz, 3.0Hz, 3.5Hz, 4.0Hz)로 재하하였으며, 또한 각 진동수에 대하여 3개의

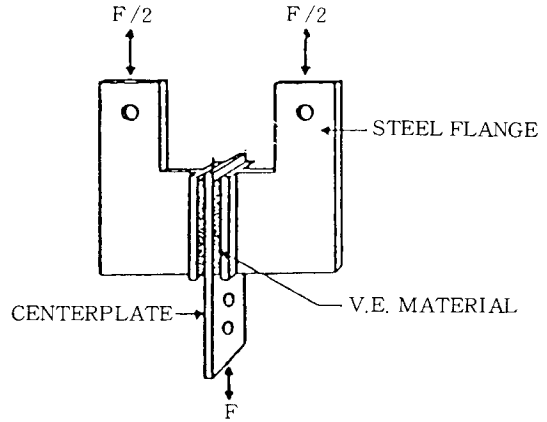


Fig. 1 Viscoelastic Damper

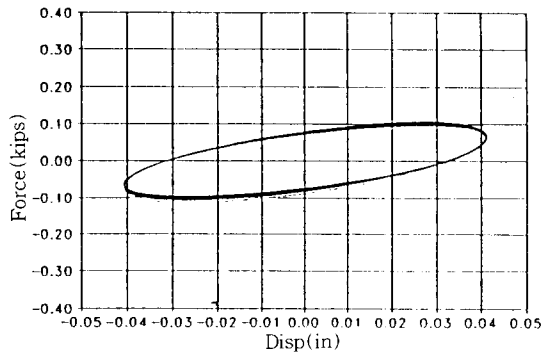


Fig. 2 Force-Deformation Relationship of Viscoelastic Damper (20%, 1.0Hz, 24℃)
(1inch=2.54cm, 1kips=4.45KN)

변형률 범위(5%, 20%, 50%)를 적용하여 최초 20주기까지 실험하였다. 그림 2는 감쇠기의 대표적인 하중-변위 관계로서, 온도 24℃, 변형률 범위 20%, 가진진동수 1.0Hz에 대한 결과를 도시하고 있다.

본 실험의 결과를 분석한 결과⁽³⁾, 점탄성 감쇠기의 동적특성에 가진진동수 및 주변온도가 중요한 영향을 미치는데 반하여, 변형률 범위는 본 실험에서 채택한 50% 이하의 범위 내에서는 상대적

으로 영향이 적은 것으로 나타났다. 따라서 점탄성 감쇠기의 특성에 직접적인 영향을 미치는 인자들을 고려하기 위하여, 실험결과를 회귀분석(regression analysis)하여 감쇠기의 강성과 손실계수(loss factor)에 대한 실험식을 다음과 같이 유도하였다.

$$k = e^{14.78}(\omega)^{0.69}(T)^{-2.26} \quad (1)$$

$$\eta = e^{0.85}(\omega)^{-0.27}(T)^{-0.12} \quad (2)$$

여기서 k는 감쇠기의 강성(kip/in), ω 는 가진 진동수(Hz), T는 감쇠기 주변온도(°C), η 는 감쇠기의 손실계수이다. 상기의 식에서 감쇠기의 변형률은 평균 5%로 가정하였으며, 이는 점탄성 감쇠기를 설치한 건물에 대하여 입력하중으로서 중소 규모의 지진을 고려하는 경우 적합한 것으로 알려졌다⁽⁴⁾. 비교적 큰 규모의 강지진 경우에는 보다 큰 값의 변형률이 사용되어야 한다.

식 (1)과 (2)를 이용하여 구한 감쇠기 강성과

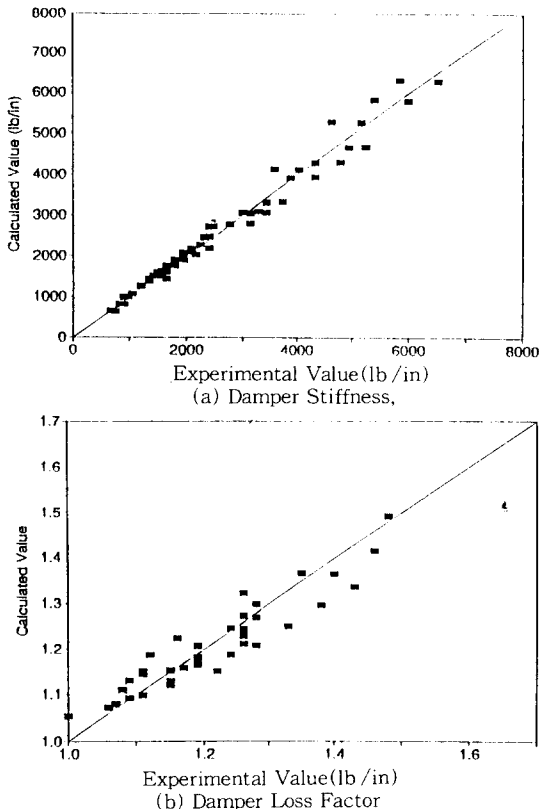


Fig. 3 Correlation between Test Results and Predicted Values of Viscoelastic Damper Properties (1 lb/in = 175.20N/m)

손실계수를 실험에서 얻어진 값들과 비교하였다. 그림 3에서 보이는 바와 같이, 실험식에 의하여 계산된 감쇠기에 관한 특성치들은 실험결과와 전반적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3. 건물의 동적 응답

3.1 실험 대상 건물

실험 대상 건물은 2/5 축척의 5층 강구조건물로서 평면상 52" x 52"(132 cm x 132 cm) 이고, 높이 224"(570 cm)이다. 1층으로부터 4층까지는 각층의 중량이 1.27 kips(576 Kg)이며, 5층은 1.12 kips(508 Kg) 이다(그림 4). 모든 보와 기둥의 접합부는 완전히 용접하여 강결하였다. 이러한 설계 형태는 횡하중에 대하여 집중 질량(lumped mass)을 가진 5 자유도계 구조체(five-degree-of-freedom system)를 이루게 된다. 건물 하단 1층의 각 기둥은 바닥 강판에 용접하였으며, 이는 다시 거대한 콘크리트 보트 모양의 지진모형 실험장

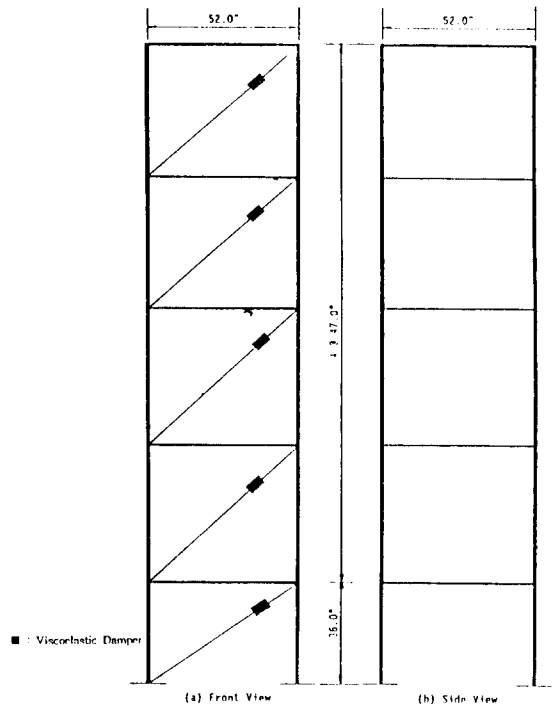


Fig. 4 Five-Story Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers (1inch=2.54cm)

치인 shaking table에 고정되도록 볼트로 고정시켰다. 감쇠기는 건물 내에서 gusset plate에 의하여 보에 연결된 대각 브레이싱 부재의 상단 1/3 지점에 설치하였다.

3.2 실험 프로그램

실험에 있어서 적합한 입력 지진하중을 결정하기 위하여 다음의 두 가지 기준을 사용하였다. (1) 감쇠기를 설치하기 이전의 건물은 손상없이 탄성적으로 거동하여야 한다. (2) 높은 주변온도에서 감쇠기가 손상되는 것을 방지하기 위하여 감쇠기의 최대 변형률은 75% 이하이어야 한다. 감쇠기를 설치하기 전과 설치한 후의 건물에 대한 예비 해석(preliminary analysis)이 다양한 종류와 강도의 지진하중을 이용하여 실시되었다. 해석결과 최대 가속도 0.12g의 Hachinohe(Japan) 지진기록이 위의 두가지 기준을 만족하는 것으로 나타나 이를 지진모형 실험에서 입력하중으로 사용하였다. 지진모형 실험은 감쇠기를 설치하지 않은 경우와 설치 한후의 주변온도 25℃(실험실 정상온도)와 42℃ 경우에 대하여 실시하였고, 주변온도 42℃의 효과를 나타내기 위하여 특별히 고안한 온도 조절장치를 사용하였다.^(3,4) 최대 가속도 0.12g의 wide-band white noise를 입력하여 실험 건물의 동적특성(고유진동수 및 감쇠비)을 파악하였다.

3.3 건물의 동적특성

입력된 white noise와 출력된 구조응답의 신호사이에서의 가속도 전이함수 (acceleration transfer function)를 분석하여 고유진동수, 감쇠비 등 구조물의 중요한 동적특성을 구할 수 있다. 점탄성 감쇠기를 설치하지 않은 경우와 비교하여, 감

쇠기를 설치함으로써 구조감쇠(structural damping)가 상당히 증가하나, 42℃의 주변온도에서는 구조감쇠 및 고유진동수의 증가폭이 다소 감소됨을 알 수 있다(표 1). 이 결과는, 주변온도가 상승하면 점탄성 감쇠기의 강성과 에너지 분산능력이 감소되는 것으로 분석된 감쇠기 자체에 대한 실험결과와 일치한다.

3.4 구조물의 동적 지진응답

그림 5는 감쇠기를 건물에 설치하지 않은 경우와 설치한 경우 2개의 다른 주변온도에 대하여 최대 가속도 0.12g의 Hachinohe 지진에 의한 응답포락선(response envelope)을 도시하였다. 감쇠기를 설치한 건물의 층별 최대 상대 횡변위(maximum relative floor displacement), 최대 층간 횡변위(maximum inter-story drift), 층별 최대 가속도(maximum floor acceleration) 등을 감쇠기를 설치하지 않은 경우에 대한 구조응답의 감소율로 표 2에 정리하였다. 응답 포락선의 값들을 각 층에서 비교하면, 점탄성 감쇠기를 설치함에 따라 지진하중시 건물의 최대 횡변위가 효율적으로 감소됨을 알 수 있다. 감쇠기의 효율성은 주변온도가 상승함에 따라 감소한다. 이는 감쇠기 내부의 점탄성 재료가 연화된 것에 기인한다. 그림에도 불구하고 높은 주변온도(42℃) 하에서도 감쇠기를 설치한 경우, 이를 설치하지 않은 건물에 비해서 구조응답이 상당히 감소될 수 있다.

Table. 1 Structural Dynamic Characteristics

	without Dampers Added	With Dampers Added	
		T=25℃	T=42℃
Natural Frequency (Hz)	3.10	3.64	3.26
Damping Ratio(%)	1.3	14.6	5.1

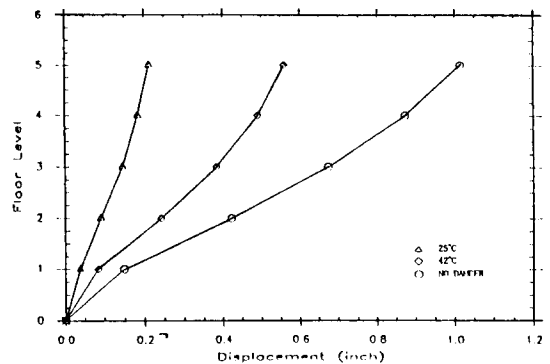


Fig. 5 Envelopes of Structural Response under 0.12g Hachinohe Earthquake(Relative Displacement) (1inch=2.54cm)

4. 수치모형해석

4.1 등가구조감쇠의 추정

점탄성 감쇠기를 설치한 건물은 감쇠기에 의해 발생한 추가적인 감쇠효과에 의하여 입력된 에너지를 분산한다. 이러한 감쇠기의 효율성을 확실하게 하기 위해서는 감쇠기에 의하여 증가된 등가구조감쇠의 양을 예측하는 것이 중요하다. 최근의 연구에 의하면⁽⁵⁾, 감쇠기를 설치한 건물의 i번째 진동 모드에 대한 감쇠비는 비례 감쇠 구조체(proportional damping system)로 가정하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta_i = \frac{E_d^i}{4\pi E^i} \tag{3}$$

여기서 ζ_i 는 i번째 진동 모드에 대한 구조감쇠비, E_d^i 는 i번째 진동 모드에서 감쇠기에 의하여 분산된 에너지, E^i 는 i번째 진동 모드에서 구조물의 최대 변형에너지이다.

식 (3)을 모드 변형에너지(modal strain energy)의 항으로 표현하면 다음과 같이 된다^(4,6,7)

$$\zeta_i = \frac{\eta\phi_i^T K_d \phi_i}{2\phi_i^T K_s \phi_i} \tag{4}$$

여기서 ϕ_i 는 i번째 형상벡터(shape vector), K_d 는 감쇠기만에 의한 강성행렬, K_s 는 감쇠기를 포함한 강성행렬이다.

실험에서 얻어진 절대 가속도에 대한 진동수 전이함수를 분석하면, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 경우 첫번째 모드(n=1)를 제외한 그 이상 모드에서의 구조응답은 상대적으로 미미하기 때문에 본 연구에서는 첫번째 모드와 관련된 동적 구조특성만을 사용하여 수치모형해석을 수행한 다.

수치모형해석에서 필요로 하는 점탄성 감쇠기의 특성은 식 (1)과 (2)에 의해 구하였다. 진동수 ω 의 값으로서 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 고유진동수를 사용하여 하나 추정이 용이하지 않으므로, 감쇠기의 강성과 손실계수의 값에는 별 차이가 없는 감쇠기를 설치 하지 않은 건물의 고

유진동수 3.1Hz를 채택하였다.

표 1에서 나타난 바와 같이, 점탄성 감쇠기를 실험 대상 건물에 설치한 경우의 주변온도 25℃와 42℃때의 감쇠비는 실험을 통하여 각각 14.6%와 5.1%를 얻었으며, 식 (3)을 이용한 해석적 결과로서는 각각 14.2%와 4.9%를 구하였다. 이들 두 결과치에 대한 오차는 5% 이내로서 구조응답에 대한 수치모형해석시 해석에 의해 산정한 감쇠비를 사용하여도 구조응답에 미치는 영향은 미미할 것으로 사료된다. 따라서, 점탄성 감쇠기를 설치한 구조물의 등가구조감쇠는 식 (3)에 의한 모드 변형에너지법에 의하여 성공적으로 예측할 수 있다.

4.2 구조응답의 예측

점탄성 감쇠기의 설치에 의하여 증가된 건물의 감쇠비를 산출하는 궁극적인 목적은 기본적인 구조 특성과 함께 사용하여 건물의 구조응답을 예측하는 데 있다. 모드 변형에너지법에 의하여 구한 감쇠비를 이용하여 실험 대상 건물의 수치모형 해석을 수행한다. 해석시, 입력 하중으로서의 지진기록은 실험에 의한 결과와 직접비교를 위하여 지진 모형 실험시 실제로 입력한 최대 가속도 0.12g Hachinohe 지진의 수평 가속도를 그대로 사용한다.

점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 구조응답은 비탄성 평면 구조물의 동적 해석 컴퓨터 프로그램인 DRAIN-2D⁽⁸⁾를 이용한 시간력 해석(time history analysis)에 의해서 구한다. 수치모형해석의 결과 얻어진 건물의 층별 횡변위는 실험결과와 비교하여 정확성을 검증한다.

건물에 설치된 점탄성 감쇠기는 점탄성 재료의 유효 변형률 범위내에서는 선형 기동을 하면서 건물의 감쇠력과 강성의 증가에 기여한다. 따라서, 감쇠기의 양단에 연결된 브레이싱 부재는 트러스 부재로 모델화하여 인장력과 압축력은 감쇠기의 강성에 의하여 정해지도록 한다.

점탄성 감쇠기를 실험 대상 건물에 설치하지 않은 경우와 설치한 경우의 주변온도 25℃와 42℃에 대한 동적 구조응답을 수치모형해석한 결과와 실험에서 얻어진 결과를 그림 6-8에 각각 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이, 건물에서 최대 횡

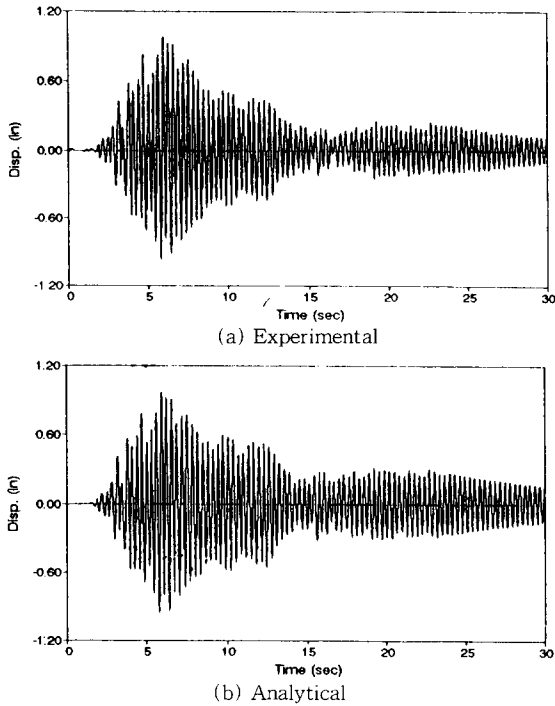


Fig. 6 Experimental vs. Analytical Relative Displacement at Fifth Floor, without Viscoelastic Dampers Added (1inch=2.54cm)

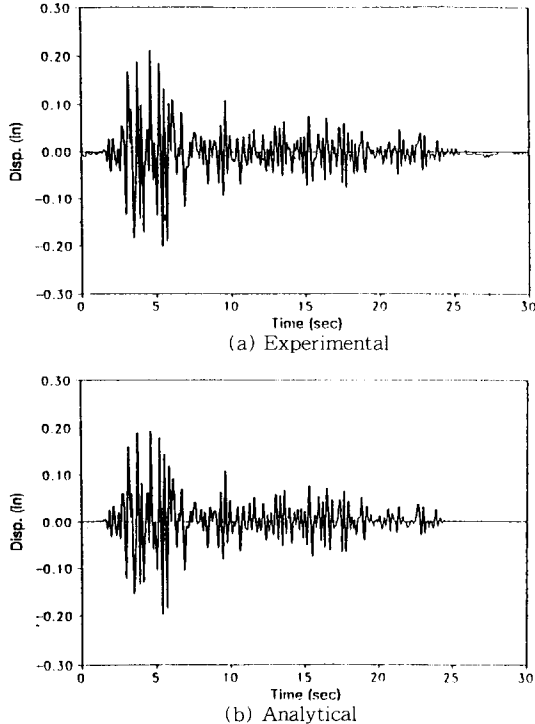


Fig. 7 Experimental vs. Analytical Relative Displacement at Fifth Floor, with Viscoelastic Dampers Added, $T=25^{\circ}\text{C}$ (1inch=2.54cm)

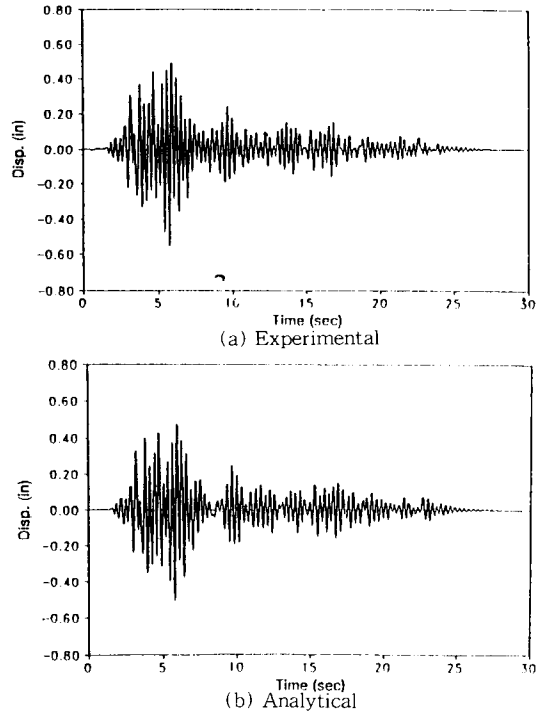


Fig. 8 Experimental vs. Analytical Relative Displacement at Fifth Floor, with Viscoelastic Dampers Added, $T=42^{\circ}\text{C}$ (1inch=2.54cm)

변위가 발생하는 최상단 5층에서의 횡변위에 대한 시간력을 서로 비교해 보면 변위가 발생하는 경향과 최대값이 나타나는 시간, 그때의 최대값 등이 잘 일치하는 것으로 사료되며 최대 횡변위에 대한 오차는 대체적으로 10% 이내의 값을 나타냈다.

5. 설계방법

구조물 설계에 있어서 가장 기본적인 요건은 설계된 구조물의 기동을 주어진 하중 하에서 신뢰성 있게 예측하는 일이다. 또한 설계에 필요한 모든 요소가 갖추어지면 기존의 설계방법에 의해 정확히 구조물을 해석할 수 있다.

점탄성 감쇠기를 설치한 건물을 설계함에 있어서 중요한 요소는 감쇠비에 관련된 사항이다. 점탄성 감쇠기에 의하여 건물에 증가된 감쇠비의 산정이 모드 변형에너지법에 의하여 가능해짐에 따라, 설계 과정에서 이를 적절히 이용하고 감쇠기의 강성을 앞서의 수치모형해석에서와 같이 고려

한다면, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 설계도 쉽게 완성될 수 있다.

일반적인 설계의 경우와 마찬가지로, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 설계가 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 다음의 단계를 거치면서 계속적으로 각 설계 주기마다 구조 특성치를 새로이 결정해 나가야 한다.

- (1) 건물의 구조 특성치를 정하여 구조해석을 수행한다.
- (2) 목표로 하는 감쇠비를 결정한다.
- (3) 건물에 대한 감쇠기 배치를 결정한다.
- (4) 감쇠기의 강성과 손실계수를 정한다.
- (5) 모드 변형에너지법에 의하여 등가구조감쇠비를 계산한다.
- (6) 계산된 감쇠비를 적용하여 감쇠기를 설치한 건물에 대한 구조해석을 실시한다.

단계 (5)와 (6)에서, 목표로 하는 감쇠비와 건물의 설계요건이 만족되었을 때 설계는 완료되나, 그렇지 않은 경우는 구조 특성치, 감쇠기 배치, 감쇠기의 제원과 동적특성을 수정하여 설계를 한다. 전체적인 설계절차를 나타내는 흐름도는 그림 9와 같다. 목표로 하는 감쇠비는 여러 값의 감쇠비에 대한 지진하중 응답 스펙트럼을 작성하여 결정할 수 있다. 또한 감쇠기에 의해 추가되는 강성은 건물 각층에 분배된 총 구조 강성도의 양에 비례한다는 원칙에 의해 결정할 수도 있다. 이는 각층에 대하여 수정된 모드 변형에너지법을 이용해 구해 질 수 있다.

$$k_i' = \frac{2\xi}{\eta - 2\xi} k_i \quad (5)$$

여기서 k_i 는 감쇠기를 설치하지 않은 건물의 i 번째 층의 구조강성, k_i' 는 감쇠기의 설치에 의해 건물 i 번째 층에 분배된 감쇠기의 강성, ξ 는 목표로 하는 감쇠비이다. 설계시, 가진진동수와 주변운도를 예상하여 고유의 G' 와 G'' 값을 가진 점탄성

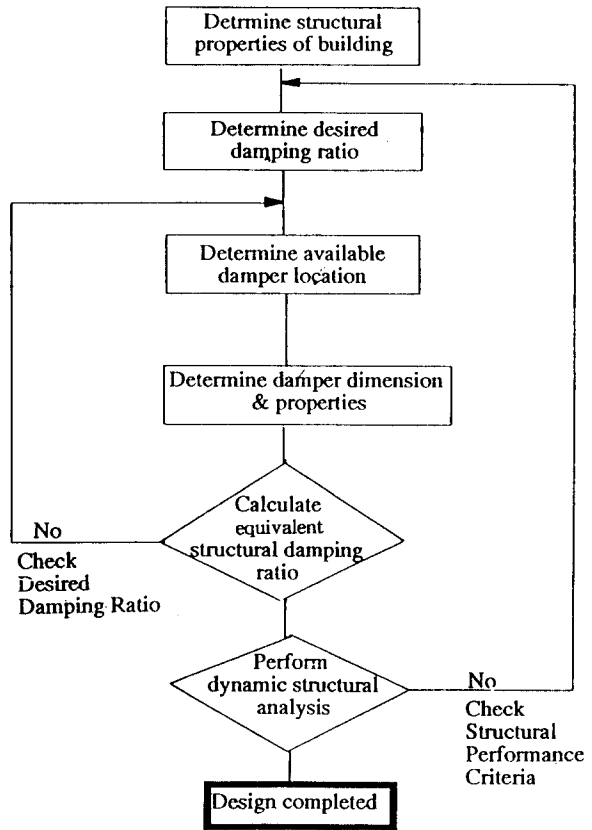


Fig 9. Design Procedure of Structure with Added Viscoelastic Dampers

Table. 2 Summary of Dynamic Response under 0.12g Hachinohe Earthquake Motion

Maximum Response	Floor Level	Without Dampers (Reference)	With Dampers(% Reduction of Without Dampers' Case)	
			T=25°C	T=42°C
Relative Floor Disp. (inch)	5	1.066	80.1	47.6
	4	0.874	79.1	43.9
	3	0.677	78.6	43.4
	2	0.426	78.6	43.2
	1	0.149	73.8	43.6
Inter-story Drift (inch)	5	0.142	76.1	51.4
	4	0.200	81.0	47.0
	3	0.260	79.2	45.4
	2	0.286	79.4	44.8
Maximum Floor Acc. (g's)	5	1.151	78.2	49.9
	4	0.909	74.8	44.1
	3	0.777	74.9	46.0
	2	0.538	69.1	46.8
	1	0.241	43.6	32.0

(1inch=2.54cm)

재료를 선택한 다음, 감쇠기의 예상 최대 변형률과 극한 변형률을 고려하여 점탄성 재료의 두께, h 를 결정한다. 또한 감쇠기의 총전단면적, A 는 아래와 같이 계산된다.

$$A = \frac{k \cdot h}{G} \quad (6)$$

점탄성 감쇠기의 경우, 점탄성 재료는 2개의 층으로 이루어져 있으므로 1개층의 면적은 일반적으로 식 (6)에 의해 계산된 값의 절반이 된다.

6. 결 론

본 논문에서는 점탄성 감쇠기의 동적특성을 연구하고, 점탄성 감쇠기를 설치한 2/5 축척의 5층 강구조건물에 대하여 25℃와 42℃ 주변온도 하에서의 지진응답을 구하여 감쇠기를 설치 하지 않은 경우와 비교하였다.

실험결과를 분석한 결과, 점탄성 감쇠기가 지진하중에 의하여 발생한 과도한 진동을 감소시키는데 효과적임을 알 수 있었다. 실험실 평상온도인 25℃에서 감쇠기를 설치한 경우, 지진하중시 구조물의 최대 가속도, 최대 횡변위, 최대 층간 횡변위가 설치 하지 않은 경우에 비하여 최대 80% 까지 감소시킬 수 있음을 보였다. 주변온도가 상승함에 따라 점탄성재료는 연화되고 감쇠기의 효율성이 감소되었다. 그러나, 42℃에서도 감쇠기를 설치한 경우, 이를 설치하지 않은 건물에 비해서 구조응답이 40% 이상 감소됨을 보였다.

또한, 감쇠기에 대한 부분 실험에서 얻은 결과를 회귀분석하여, 본 연구에서 사용한 감쇠기의 강성과 손실계수를 예측할 수 있는 실험식을 유도하였다. 이들 식은 여러 주변온도, 가진진동수, 변형률 상태에서 감쇠기의 동적특성을 정확히 예측하는데 사용될 수 있다. 이들 식과 모드 변형에너지법을 이용하여 구조감쇠를 산정하였다. 수치해석 결과와 실험결과를 비교하여, 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 등가구조감쇠를 모드 변형에너지법에 의하여 성공적으로 예측할 수 있음을 보였다.

점탄성 감쇠된 건물의 지진하중에 대한 동적응

답을 예측하기 위하여, 일반적인 모드 해석법을 이용한 수치모형해석을 수행하였다. 해석결과는 실험결과와 잘 일치하였다. 이러한 해석적 연구의 결과를 기초로 하여, 일반적인 건물의 설계에 감쇠비라는 설계요소를 더 추가 함으로서 점탄성 감쇠기를 설치하는 건물에 대한 설계방법을 제시하였다. 따라서, 본 연구에서 사용한 점탄성 감쇠기의 해석방법은 편리성과 신뢰성을 함께 갖추고 있으므로 실무 설계에 쉽게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Aiken, I. D., Kelly, J. M., and Mahmoodi, P. , "The Application of Viscoelastic Dampers to Seismically Resistant Structures," Proceedings of 4th US National Conference on Earthquake Engineering, Vol.3, pp. 459-468, 1990.
2. Lin, R. C., Liang, Z., Soong, T. T., and Zhang, R. H. , "An Experimental Study of Seismic Structural Response with Added Viscoelastic Dampers," Engineering Structure, Vol.13, pp. 75-84, 1991.
3. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S-T., and Lai, M. L. , "Effect of Ambient Temperature on Seismic Response of a 2/5-Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers." Technical Report NCEER 91-0012, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 1991.
4. 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.
5. 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, pp. 389-396, 1989.
6. 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, CA, 1991.
7. Johnson, C. D. and Kienholz, D. A., "Finite Element Prediction of Damping in Structures with Constrained Viscoelastic Layers," AIAA Journal, Vol. 20, No.9, pp. 1248-1290, 1982.
8. Kanaan, A. E. and Powell, G. H., "DRAIN-2D : A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures," Report No. UCB/EERC 73-06, University of California, Berkeley, CA, 1973.
(접수일자 : 1993. 2. 4)