

점탄성 감쇠기가 설치된 고층건물의 효율적인 동적 해석

Efficient Dynamic Analysis of Tall Buildings with Viscoelastic Dampers

김 상 태* 홍 성 일** 이 동 근***
Kim, Sang Tae Hong, Sung Il Lee, Dong Guen

국문요약

본 논문은 점탄성 감쇠기가 설치된 고층건물의 효율적인 동적 해석방법에 대한 연구이다. 점탄성 감쇠기는 건물의 진동을 적절히 제어하기 위하여 사용되고 있으며 이러한 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 동적거동을 예측하기 위하여 적절한 해석방법이 필요하다. 해석의 효율성을 높이기 위해서 강막가정과 행렬의 응축기법을 적용할 수 있는데, 점탄성 감쇠기가 설치된 건물은 강막가정을 고려한 행렬의 응축기법을 쉽게 적용할 수 없다. 따라서 제안된 해석방법에 감쇠행렬의 새로운 응축방법을 사용하였다. 그리고 예제 건물의 해석을 통하여 해석방법의 정확성과 효율성에 대하여 살펴 보았다.

주요어 : 점탄성감쇠기, 동적 해석, 행렬응축기법

ABSTRACT

In this paper, an efficient dynamic analysis method of a building structure with viscoelastic dampers is proposed. Viscoelastic dampers are used for the purpose of controlling vibration of buildings. The matrix condensation technique based on the rigid diaphragm assumption is not readily applicable for building structures with viscoelastic dampers. An improved procedure for damping matrix condensation is employed in the proposed method to increase the efficiency of analysis. Efficiency and accuracy of the proposed method are verified through analysis of an example structure.

Key words : viscoelastic damper, dynamic analysis, matrix condensation technique

1. 서 론

1.1 연구배경

구조물이 고층화됨에 따라 지진이나 바람으로 인한 고층구조물의 진동을 완화시키는 제어기술이 필요하다. 이러한 제어기술은 바람, 또는 약진과 같은 외력에 대해서는 건물의 사용성을 향상시키며 강진과 같은 매우 큰 외력에 대해서는 안전성을 증가시킴으로써 구조물의 기능을 원활하게 수행하게 하는데 그 의의가 있다.

제어기술은 건물의 감쇠력을 증가시킴으로써 구조물의 응답을 감소시키는 것으로 능동제어(active control), 준 능동제어(semi-active control), 수동제어(passive control)등으로 나눌 수 있다.

능동제어는 제어력을 구조물에 가하여 응답을 줄이는 방법으로 복잡한 과정을 거쳐 제어력이 구조물에 전달된다. 준 능동제어는 구조물의 응답에 영향을 미치는 구조요소의 일부를 매 순간마다 변화시킴으로써 응답을 제어하는 방식으로 시스템의 특성 또한 변화된다. 수동제어는 구조물의 에너지를 소산시킴으로써 변위를 줄이는 방법으로서 동조질량 감쇠기(TMD)를 이용한 제어방법과 각 층 또는 접합부에 설치된 마찰 감쇠기(friction damper), 점탄성 감쇠기(viscoelastic damper)를 이용하는 제어방법 등을 예로

* 학생포인 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정
** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정
*** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

들 수 있다.

능동제어는 비용이 많이 들 뿐만 아니라, 지진발생 시에 야기될 수 있는 정전 때문에 신뢰성이 낮아질 수 있는 단점이 있다. 이에 반하여 수동제어는 간단한 장치로써 효과적으로 진동을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 이러한 수동제어방법중에서 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 효율적인 동적 해석방법을 제시하고자 한다.

1.2 연구 내용

과거 몇 년동안 많은 사람들이 에너지 소산장치로서 점탄성 감쇠기를 광범위하게 조사하고 연구하여 왔다. Mahmoodi⁽⁶⁾는 구조물에서 적당한 위치에 있는 점탄성 감쇠기가 고층건물에서 진동을 줄이는데 효과적이라는 것을 보여주었다. 바람에 의한 건물의 진동을 제어하기 위하여 점탄성 감쇠기를 사용한 건물의 몇가지 예는 다음과 같다.

- ① Twin World Trade Center Tower(1969)
- New York
- ② Columbia SeaFirst(1982) - Seattle
- ③ Two Union Square(1988) - Seattle
- ④ Chin-Tan railroad station roof(1994)
- Taipei

점탄성 감쇠기의 이점은 몇몇 외국대학에서 수행된 철골, 철근콘크리트 구조물에 대한 지진거동 연구를 통해 발표되었고 점탄성 감쇠기의 적용에 관하여 해석적, 실험적 연구가 활발하게 수행되었다.^{(9), (11)-(15)}

이러한 연구 결과들은 점탄성 감쇠기를 설치한 구조물의 지진 응답이 현저하게 줄어 들 수 있다는 것을 나타내고 있다. 또 가력진동수, 주변온도와 같은 중요계수는 점탄성 감쇠기의 성능에 영향을 준다는 것을 보여준다.⁽¹¹⁾

New York 주립대학의 T.T. Soong 및 K.C. Chang 교수는 실험과 해석을 통하여 구조물의 응답을 줄이는데 점탄성 감쇠기가 매우 효과적임을 보여주었다.

특히, 모드 변형 에너지법(modal strain denegy method)을 사용하여 쉽게 감쇠기가 설치된 건물의 지진응답을 예측할 수 있다고 결론지었다. 그런데 모드 변형 에너지법은 두 가지 이상의 점탄성 재료를 적용하여 해석할 수 없고 점탄성 감쇠기의 위치에 따른 감쇠영향을 제대로 고려할 수 없는 단점이 있다.

점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 해석방법에 있어

서, 기존 건물이 가지고 있는 강성과 감쇠행렬에 점탄성 감쇠기의 강성과 감쇠를 중첩시켜서 직접적분법으로 해석하는 것이 가장 타당성이 있다고 볼 수 있다. 그러나 건물이 고층화, 대형화될수록 자유도가 증가하게 되어 해석이 복잡하게 되고 많은 해석 시간과 컴퓨터 메모리가 필요하게 되므로 비효율적이다.

본 논문의 목적은 해석의 정확성을 높이면서 효율적인 해석방법을 제시하는 것이다. 본 논문에서 제시한 방법은 감쇠기의 강성과 감쇠를 직접 구조물의 강성 및 감쇠행렬에 고려하여 정확성을 높였으며, 해석의 효율성을 위하여 행렬응축기법과 강막가정을 적용하였다. 강막가정과 행렬응축기법을 적용하게 되면 구조물의 자유도 수를 줄일 수 있기 때문에 해석에 필요한 컴퓨터 메모리의 양과 해석에 소요되는 시간을 상당히 단축할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시하는 방법을 사용하면 간단하면서도 정확하게 점탄성 감쇠기가 설치된 건물을 해석할 수 있을 것이라고 생각된다. 그리고 예제 건물의 해석을 통하여 제안된 해석방법의 효율성과 정확성에 대하여 알아보았다.

2. 점탄성 감쇠기의 특성

점탄성 재료의 특성은 두 가지의 요소로 분류될 수 있는데 하나는 재료의 강성능력을 나타내는 G' (storage modulus)이고 다른 하나는 감쇠능력을 나타내는 G'' (loss modulus)이다. 재료에 대한 점성 감쇠의 정도를 나타내는 loss factor (η)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = \frac{G''}{G'} \quad (1)$$

점탄성 재료의 특성을 나타내는 계수들은 다음에 나오는 식들에 의하여 구할 수 있다.⁽¹³⁾

$$G = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} = \frac{(F/A_S)}{(\Delta/t)} \quad (2)$$

$$G'' = \frac{ED}{\pi V \gamma_{\max}^2} \quad (3)$$

$$G' = [(G)^2 - (G'')^2]^{1/2} \quad (4)$$

여기서 t 는 점탄성 재료 패드의 두께, V 는 점탄성 재료 패드의 체적, A_S 는 점탄성 재료의 전단면적, ED 는 하중의 한 사이클 동안 소산된 에너지, F 는 각

사이클마다의 최대 힘, Δ 는 장치의 최대 변위를 나타낸 것이다. 또 τ_{max} 는 점탄성 재료의 최대 전단 응력이고 γ_{max} 는 최대 전단변형도이다.

식 (2), (3), (4)에서 구한 G' , G'' 를 사용하여 감쇠기의 강성과 감쇠값을 구할 수 있다. 감쇠기의 강성과 감쇠값은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_d = \frac{G' A_s}{t}, \quad C_d = \frac{G'' A_s}{4 \pi f t} \quad (5)$$

여기서 K_d 는 감쇠기의 강성을 나타낸 것이고 C_d 는 감쇠기의 감쇠값을 나타낸 것이다. 식 (5)를 이용하여 감쇠기의 강성과 감쇠값을 구할 수 있다.

표 1과 표 2에서 볼 수 있는 값들은 1995년 K. C. Chang 등이 실험과 해석에 사용한 감쇠기의 특성치들이다.⁽⁹⁾ 점탄성 감쇠기는 표 1에서 보는 바와 같이 점탄성 재료의 크기에 따라 A, B, C 세가지 종류로 나누었고 온도변화에 따른 각 감쇠기의 특성치들은 표 2에 나타나 있다. A와 B 감쇠기는 3M-ISD110을 점탄성 재료로 사용하였고 C 감쇠기는 3M-ISPI12를 사용하였다.

본 논문에서 해석에 사용한 감쇠기는 A형 감쇠기이고 감쇠기의 특성치들은 온도가 25°C일때의 값들이다.

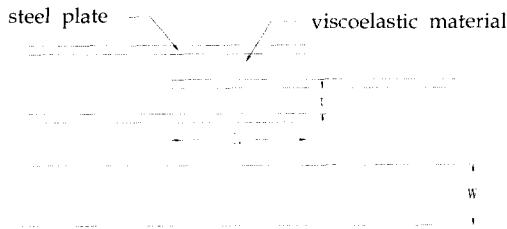


그림 1 점탄성 감쇠기의 형상

표 1 감쇠기에 사용된 점탄성 재료의 치수

감쇠기	L (cm)	W (cm)	t (cm)	V (cm)
A	2.54	3.81	0.51	4.62
B	5.08	3.81	0.76	14.75
C	15.24	7.62	0.38	44.25

표 2 점탄성 감쇠기의 특성

(f = 3.5Hz, $\epsilon = 5\%$)

감쇠기	온도 (°C)	G'	G''	η	K	C
A	25	2.106	2.377	1.13	39.973	1.023
	34	1.116	1.368	1.17	21.182	0.590
	42	0.631	0.635	1.01	11.976	0.274
B	25	1.732	2.079	1.20	44.098	1.203
	34	0.945	1.114	1.18	24.060	0.645
	42	0.620	0.651	1.05	15.786	0.377
C	25	0.195	0.170	0.87	59.593	1.180
	34	0.145	0.104	0.71	44.313	0.723
	42	0.108	0.068	0.62	33.005	0.472

3. 기존 해석방법

기존의 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 해석 방법으로는 모드변형 에너지법을 이용한 해석방법과 감쇠기의 감쇠행렬을 건물의 감쇠행렬에 중첩시키는 방법 등이 있다. 첫 번째 방법은 점탄성감쇠기의 설계를 위하여 많이 사용되어 온 방법으로 각 모드별 감쇠비를 구하여 해석한다. 두 번째 방법은 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 건물의 정확해를 구하는 일반적인 방법이다.

3.1 모드 변형 에너지법을 이용한 해석방법

모드 변형 에너지법을 적용하면 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 각 모드별 감쇠비를 예측할 수 있다. 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 감쇠비를 표현하면 다음과 같다.

$$\xi_i = \left(\frac{\eta}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{\Phi_i^T K_e \Phi_i}{\Phi_i^T K_s \Phi_i}\right) \right] \quad (6)$$

여기서 ξ_i = i 번째 모드에 대한 감쇠비

η = 점탄성 재료의 loss factor

K_e = 점탄성 감쇠기가 없는 구조물의 강성 행렬

K_s = 점탄성 감쇠기가 있는 구조물의 강성 행렬

Φ_i = 감쇠기가 있는 구조물의 i 번째 모드형상

만약 점탄성 감쇠기의 추가로 인한 모드형태의 변화를 무시한다면 식 (6)은 다음과 같이 간단하게 된다.

$$\xi_i = \left(\frac{\eta}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{\omega_i^2}{\omega_{Si}^2}\right)\right] \quad (7)$$

여기서 ω_i = 감쇠기가 설치된 건물의 진동수
 ω_{Si} = 감쇠기가 설치되지 않은 건물의 진동수

식 (6) 또는 식 (7)을 사용하여 구한 감쇠비를 가지고 선형 동적 해석방법으로 건물의 응답을 구할 수 있다. 이 방법은 감쇠기의 감쇠값을 구하지 않고 해석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 여러 가지 종류의 점탄성 재료를 함께 사용할 수 없는 단점이 있다. 그리고 특정 위치에 있는 감쇠기의 영향을 제대로 고려하지 못하고 단순히 감쇠기의 설치유무에 따른 건물의 진동수를 사용하여 모드별 감쇠비를 구하기 때문에 근사적인 해석법이라고 할 수 있다.

3.2 감쇠기의 감쇠행렬을 건물의 감쇠행렬에 중첩시키는 방법

감쇠기가 설치되지 않은 건물의 강성행렬과 감쇠행렬을 구한 후에 감쇠기의 강성행렬과 감쇠행렬을 중첩시켜서 직접적분법을 통하여 해석하면 비교적 정확한 해석결과를 얻을 수 있다.

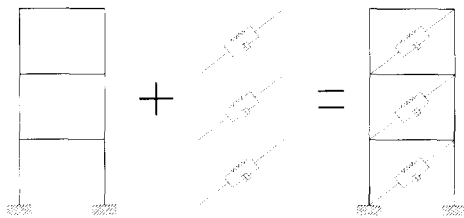


그림 2 감쇠기가 설치된 건물의 모형화

그림 2에서 보는 바와 같이 감쇠기가 설치되지 않은 건물의 강성행렬과 감쇠행렬을 구한 후 트러스 요소인 감쇠기의 강성행렬과 감쇠행렬을 중첩시켜 전체 강성행렬과 감쇠행렬을 구한다.

다자유계의 동적평형방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{D} + C\dot{D} + KD = A \quad (8)$$

식 (8)에서 감쇠기의 강성과 감쇠를 중첩시키면 감쇠행렬 C 와 강성행렬 K 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C = C_s + C_d \quad (9)$$

$$K = K_s + K_d \quad (10)$$

여기서 C_s 는 건물의 감쇠행렬, C_d 는 감쇠기의 감쇠행렬, K_s 는 건물의 강성행렬, K_d 는 감쇠기의 강성행렬이다.

식 (8)에서 구한 동적평형방정식을 직접적분법을 이용하여 해석하면 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 응답을 구할 수 있다. 그러나 실험에 의한 감쇠기의 감쇠값을 직접 구하여야 하고 고층건물과 같이 자유도 수가 많은 경우에는 계산량의 증가로 인하여 해석 시간이 길어지는 단점이 있다.

4. 효율적인 동적 해석방법의 개발

일반적으로 고층건물을 해석하는데 있어서 상용프로그램인 ETABS처럼 강막가정을 포함하여 해석하는 경우가 많다. 따라서 본 논문에서는 강막가정과 행렬의 응축기법을 이용하여 해석하고자 한다.⁽⁴⁾ 그런데 감쇠기가 설치된 건물의 경우 감쇠기의 국부적인 감쇠가 추가되기 때문에 감쇠를 응축된 강성과 질량으로 만들어 내는 것은 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 점탄성감쇠기가 설치된 고층건물의 해석법으로 강막가정을 고려하고, 감쇠기의 감쇠행렬을 동적응축시켜 감쇠기가 설치되지 않은 건물의 응축된 감쇠행렬에 중첩시키는 새로운 방법을 제시한다.

4.1 강막가정에 의한 모형화

일반적인 건물은 각 층마다 슬라브가 배치된다. 각 층의 평면에 배치되는 슬라브는 면내에는 무한한 강성을 가지고 있고, 평면의 법선방향(normal)으로는 유연한 거동을 한다고 가정할 수 있다. 이와같이 강막(rigid diaphragm)과 같은 거동을 보이는 슬라브의 영향을 풀조해석에 고려하는 것이 보다 정확한 해석 방법이라 할 수 있다.

각 부재의 자유도 변환기법을 다음의 그림 3과 같이 전체 구조물에 적용할 수 있다. 평면내에 위치한 절점의 모든 자유도 중에 평면의 이동과 회전을 고려하는 자유도만을 각 층의 대표점의 자유도로 변환할

수 있다(그림 3b). 즉, 그림 3a는 절점당 6개의 자유도를 가지는 보 요소로 이루어진 3차원 골조이다. 각 층의 보와 기둥이 접하는 절점은 한 평면 내에 존재한다. 여기서 각 층의 평면의 이동과 회전에 관한 자유도에 대해서 자유도 변환을 수행하면 그림 3b와 같이 된다.

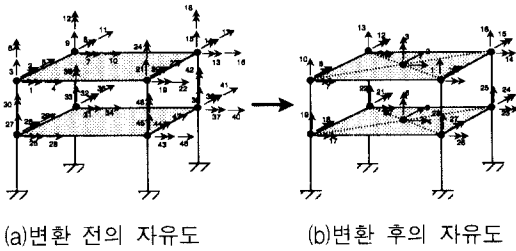


그림 3 강막을 고려한 골조의 자유도 변환

4.2 행렬응축기법의 적용

4.2.1 강성행렬과 질량행렬의 응축

동적평형방정식인 식 (8)을 응축하기 위하여 x, y 방향 이동성분과 z방향 회전성분인 주자유도(F)와 x, y방향 회전성분과 z방향 이동성분인 부자유도(A)로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{AA} & \mathbf{M}_{AF} \\ \mathbf{M}_{FA} & \mathbf{M}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{D}}_A \\ \ddot{\mathbf{D}}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{AA} & \mathbf{C}_{AF} \\ \mathbf{C}_{FA} & \mathbf{C}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{D}}_A \\ \dot{\mathbf{D}}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{AA} & \mathbf{K}_{AF} \\ \mathbf{K}_{FA} & \mathbf{K}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_A \\ \mathbf{D}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_A \\ \mathbf{A}_F \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 부자유도(A)는 응축을 통하여 소거된다.

식 (11)에서 강성행렬은 하중과 변위의 정적 평형 조건에 대해서 응축하는 정적응축을 사용하여 \mathbf{K}_{FF}^* 로 응축할 수 있다.

$$\mathbf{K}_{FF}^* = \mathbf{K}_{FF} - \mathbf{K}_{FA} \mathbf{K}_{AA}^{-1} \mathbf{K}_{AF} \quad (12)$$

질량행렬은 동적응축과정을 통하여 \mathbf{M}_{FF}^* 로 응축할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{FF}^* &= \mathbf{T}_F^T \mathbf{M} \mathbf{T}_F \\ &= \mathbf{M}_{FF} + \mathbf{T}_{AF}^T \mathbf{M}_{AF} + \mathbf{M}_{FA} \mathbf{T}_{AF} \\ &\quad + \mathbf{T}_{AF} \mathbf{M}_{AA} \mathbf{T}_{AF} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 \mathbf{T}_{AF} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_{AF} = -\mathbf{K}_{AA}^{-1} \mathbf{K}_{AF} \quad (14)$$

하중벡터는 정적응축을 사용하여 \mathbf{A}_F^* 로 응축할 수 있다.

$$\mathbf{A}_F^* = \mathbf{A}_F - \mathbf{K}_{FA} \mathbf{K}_{AA}^{-1} \mathbf{A}_A \quad (15)$$

동적응축과정을 통해서 질량행렬을 응축하게 되면 동적응축과정에서 약간의 오차가 발생하게 되지만 비교적 정확한 해석결과를 도출해 낼 수 있다. 행렬의 응축기법을 이용해서 행렬의 크기를 줄이면, 자유도 수를 감소시킬 수 있기 때문에 계산량을 상당히 줄일 수 있고, 해석의 효율성을 높일 수 있다.

4.2.2 감쇠행렬의 응축

강성행렬과 질량행렬을 응축하는 경우에는 감쇠행렬도 응축할 필요가 있다. 강막가정과 행렬의 응축기법을 적용하기 위해서는 자유도 변환행렬을 부재별로 곱해주어야 한다. 그런데 건물의 전체 감쇠행렬을 구한 후에는 부재별로 강막가정과 행렬의 응축기법을 적용하는 것이 불가능하다.

따라서 다음과 같은 방법으로 응축된 전체 감쇠행렬을 구하는 것이 바람직하다. 먼저 감쇠기가 설치되지 않은 건물의 응축된 감쇠행렬을 구한다. 그 다음 감쇠기만의 감쇠행렬을 따로 동적응축하여 감쇠기의 응축된 감쇠행렬을 형성한다. 마지막으로 감쇠기가 설치되지 않은 건물의 응축된 감쇠행렬과 감쇠기의 응축된 감쇠행렬을 중첩시켜 건물의 전체 감쇠행렬을 구한다.

가) 감쇠기가 설치되지 않은 건물의 응축된 감쇠행렬의 형성

건물의 응축된 감쇠행렬(\mathbf{C}_S^*)은 여러 가지 방법을 사용하여 구할 수 있는데, Rayleigh 감쇠를 사용하여 구하는 경우는 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_S^* = \alpha \mathbf{M}_{FF}^* + \beta \mathbf{K}_{FF}^* \quad (16)$$

나) 감쇠기만의 감쇠행렬을 동적응축 시킨

정적응축과정에서 소거시킬 자유도 변위벡터 \mathbf{D}_A 는 변위벡터 \mathbf{D}_F 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$D_A = K_{AA}^{-1} \{ A_A - K_{AF} D_F \} \quad (17)$$

식 (17)에서 변위벡터 D_A 는 변위벡터 D_F 에 종속되어 있다고 가정하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_A = T_{AF} D_F \quad (18)$$

여기서 T_{AF} 는 식 (14)와 같다.

식 (18)을 시간에 대해서 한 번 미분하면 식 (19)가 된다.

$$\dot{D}_A = T_{AF} \dot{D}_F \quad (19)$$

행렬의 응축을 위하여 다음과 같은 변환행렬을 사용한다.

$$T_F = \begin{bmatrix} T_{AF} \\ I_F \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서 I_F 는 K_{FF} 와 크기가 같은 단위행렬이다. 질량행렬을 응축하는 방법을 적용하여 감쇠기의 응축된 감쇠행렬 C_D^* 를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_D^* &= T_F^T C_D T_F \\ &= C_{DF} + T_{AF}^T C_{DAF} + C_{DFA} T_{AF} \\ &\quad + T_{AF}^T C_{DAA} T_{AF} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 C_D 는 응축되지 않은 감쇠기의 감쇠행렬이다.

다) 건물의 전체 감쇠행렬 형성

앞에서 구한 감쇠기의 응축된 감쇠행렬 C_D^* 를 구조물의 응축된 감쇠행렬에 중첩시키면 감쇠기의 영향이 고려된 전체 감쇠행렬이 구하여 진다.

$$C_{FF}^* = C_S^* + C_D^* \quad (22)$$

여기서 C_{FF}^* 는 응축된 전체 감쇠행렬이다.

강성, 질량, 감쇠행렬이 응축된 상태의 동적평형방정식은 다음과 같다.

$$M_{FF}^* \ddot{D}_F + C_{FF}^* \dot{D}_F + K_{FF}^* D_F = A_F^* \quad (23)$$

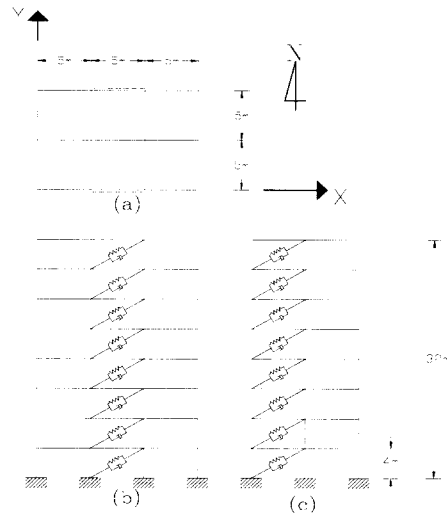
식 (23)의 동적평형방정식을 직접적분법을 사용하여 동적 해석한다. 강막가정과 행렬응축기법을 적용

하므로써 전체 건물의 자유도 수가 줄었기 때문에 직접적분법으로 동적 해석을 하더라도 해석시간과 컴퓨터 메모리를 상당히 절약할 수 있다.

5. 예제 구조물의 해석

5.1 예제 구조물

예제 구조물은 그림 4과 같이 3×2경간의 8층 철골구조물이다. 건물의 층수를 8층으로 한 이유는 기존의 해석방법으로 해석을 수행할 경우 컴퓨터 메모리의 한계와 오랜 해석시간으로 인하여 건물이 고층화 대형화되면 일반 개인용 컴퓨터로는 해석이 곤란하기 때문이다. 비대칭 평면의 건물은 내진 구조계획적 측면에서 볼 때 바람직하지 않으므로 비틀림이 발생하지 않도록 직사각형의 평면으로 하였다.



(a)평면 (b)남측입면도 (c)동측입면도

그림 4 예제구조물

평면은 각 경간당 5m이고 모든 층의 층고는 4m이다. 사용된 부재 중 기둥은 1층에서 4층까지는 H400×400×13×21, 5층에서 8층까지는 H300×300×10×15을 사용하였고 보는 H300×200×10×15 구조용 형강을 사용하였다. 구조물의 탄성계수는 2100 ton/cm², 포와송비는 0.3이고 하중은 1940년 El Centro 남북방향 지진기록을 동적하중으로 사용하였다. 예제해석방법은 해석방법에 따른 결과를 비교하기 위하여 표 3에 제시된 바와 같이 해석하였다. 감쇠기의 강성과

감쇠는 표 2에서 제시한 A형 감쇠기 25℃일 때의 값을 사용하였고 단위는 ton, cm를 사용하였다.

표 3의 각 경우에 대해 3차원 시간이력 해석을 하여 최상층 변위를 비교해 보았다. 여기서 CASE-A, C, D는 Rayleigh 감쇠를 사용하였고 1, 2차모드 감쇠비를 0.03으로 하였다. CASE-B는 모드 변형 에너지법으로 구한 각 모드별 감쇠비를 사용하였다.

표 3 예제 구조물의 해석방법

예제 구조물의 해석방법	
CASE-A	3차원 해석 (감쇠기가 없는 경우)
CASE-B	3차원 해석 (모드 변형 에너지법)
CASE-C	3차원 해석 (감쇠기의 특성을 직접 고려하는 방법)
CASE-D	제한된 해석방법 (행렬응축기법을 이용한 경우)

5.2 해석결과

각 경우에 대하여 시간이력해석을 수행한 결과 CASE-A에 비하여 감쇠기가 설치된 건물을 시간이력 해석한 CASE-B, C, D의 최상층 변위가 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 5~7은 해석방법에 따른 최상층 변위의 시간이력해석 결과를 나타낸 것으로 CASE-A에 비하여 나머지 경우는 응답이 1/4정도로 감소되는 것으로 나타났다. 이는 점탄성 감쇠기가 건물의 지진응답을 줄이는데 상당히 효과적이라는 것을 나타내는 것이다.

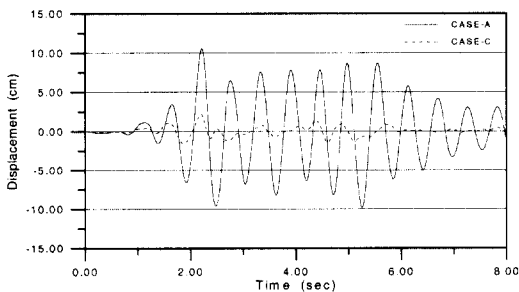


그림 5 CASE-A와 CASE-C의 최상층 변위 비교

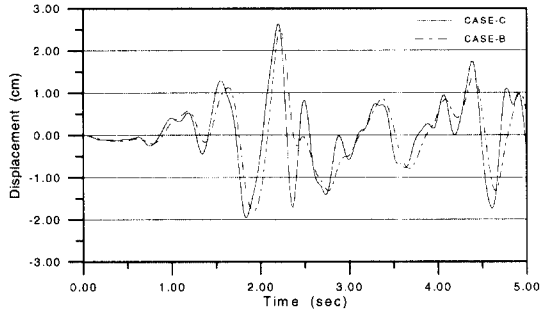


그림 6 CASE-B와 CASE-C의 최상층 변위 비교

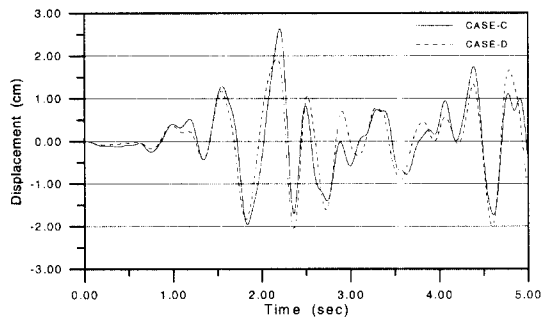


그림 7 CASE-C와 CASE-D의 최상층 변위 비교

CASE-C의 방법이 감쇠기가 설치된 건물의 해석시 가장 정확해에 가까운 결과를 얻을 수 있는 방법이므로 이를 정확해로 간주하고 모드변형에너지법으로 해석한 CASE-B와 본 논문에서 제안한 CASE-D를 차례로 비교하여 보았다. 그림 6은 CASE-B와 CASE-C의 최상층 변위의 시간이력해석 결과를 비교한 것으로 유사한 것을 알 수 있다. 그림 7은 CASE-C와 CASE-D의 최상층 변위의 시간이력해석 결과를 비교한 것인데 전체적으로 유사한 모습을 하고 있다.

각각의 경우에 대하여 자유도와 해석시간을 비교하여 보았다. 표 4에서 보면 CASE-B와 C의 경우 자유도가 576개인 것에 비하여 CASE-D는 1/24인 24개이다. 이에 따라 해석시간도 많이 차이가 나는데, CASE-B와 C의 경우 전체 해석시간이 약 13255초 (3시간 48분 55초)가 소요된 반면 CASE-D의 경우 약 1/600인 24초가 소요되었다. 이는 건물의 규모가 커지면 더 많은 차이가 날 것이라고 생각된다. 참고로 해석에 사용된 컴퓨터 시스템 사양은 Pentium 150MHz이고 RAM은 32Mbyte이다.

표 4 예제구조물의 자유도와 해석시간

	CASE-B	CASE-C	CASE-D
자유도수	576	576	24
고유치 해석시간	476 (초)	478 (초)	2 (초)
시간이력 해석시간	13253 (초)	13258 (초)	20 (초)
전체 해석시간	13731 (초)	13738 (초)	24 (초)

6. 결 론

감쇠기의 감쇠행렬을 건물의 감쇠행렬에 중첩시키는 방법은 비교적 해석이 정확하지만 건물이 고층화 되면 많은 컴퓨터 메모리와 해석시간이 필요하다. 또 모드 변형 에너지법을 사용하는 해석법은 각 모드별 감쇠비를 구하여 감쇠기의 설계에 활용할 수 있는 장점이 있지만 역시 많은 해석시간이 필요하고 두 가지 이상의 점탄성 재료를 함께 사용할 수 없는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 기존의 해석방법의 단점을 보완하기 위하여 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 새로운 동적 해석방법을 제시하였다.

- 1) 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 감쇠행렬을 응축하는 방법으로는 건물의 응축된 강성행렬과 질량행렬을 사용하여 응축된 감쇠행렬을 형성한 후 감쇠기의 감쇠행렬을 동적응축하여 중첩시키는 방법을 사용하는 것이 바람직하다.
- 2) 본 논문에서 제시한 방법으로 해석한 최상층 변위의 시간이력 해석결과는 기존의 두가지 해석방법에 의한 결과와 유사함을 알 수 있었다. 해석결과에서 오차가 발생하는 것은 동적응축과정에서 부자유도의 질량과 감쇠의 영향이 다소 소실되었기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 해석시간을 비교하여 보면 기존의 2가지 방법은 약 4시간을 소비한 반면 본 논문에서 제시한 방법은 24초만에 해석을 수행하여 효율적이라고 할 수 있다. 본 논문에서 제시한 방법의 효율성은 건물이 고층화, 대형화 될수록 더욱 커질 것이라고 생각된다.
- 4) 일반적으로 고층건물에 감쇠기를 설치할 때 전체에 감쇠기를 설치하는 것보다 최적위치를 구하여

설치하는 것이 효과적이다. 이러한 최적위치를 구하는 연구를 할 때 본 논문에서 제시한 방법을 사용하면 빠른 시간에 연구가 진행될 수 있을 것이다.

추후 과제로 본 논문에서 제시한 방법의 정확성을 보다 높이는 것과 감쇠기의 위치에 따른 건물의 거동을 비교 분석하여 고층건물에서 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있는 점탄성 감쇠기의 최적위치에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국중공업주식회사의 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이동근, 신영수, 조한욱, 고층건물의 해석 및 설계, 한국전산구조공학회 교재 11-2.
2. 이동근, 윤정방, 구조동역학의 개념 및 내진설계, 한국전산구조공학회 교재 8-1.
3. 황재승, 민경원, 홍성목, "건물 구조물을 위한 능동 제어 효과를 가지는 수동 점성감쇠기의 최적설계", 한국소음진동공학회지 제5권 제2호, 1995, pp. 225-234.
4. Weaver Jr., W., and Johnson, P. R. *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, pp. 164-168, pp. 282-290, pp. 411-423.
5. Weaver Jr., W., and Gere, J. M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, Van Nostrand Reinhold, Third Edition.
6. Timoshenko, S. P., Weaver Jr., W., and Young, D. H., *Vibration Problem in Engineering*, John Wiley & Sons, Fifth Edition.
7. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, pp. 409-428, pp. 576-583.
8. Mahmoodi, P., "Structural Dampers," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 1969, pp. 1661-1672.
9. Chang, K.C., Soong, T.T., Oh, S-T., and Lai, M. L., "Seismic Behavior of Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers," *Journal of Structural Engineering*, October 1995, pp. 1418-1424.
10. Fujita, S., Fujita, T., Furuya, O., Suizu, Y.,

- Morikawa, S., Teramoto, T., and Kitamura, H., "Development of High Damping Rubber Damper for Vibration Attenuation of High-rise Buildings," *Tenth World Conf. Earthquake Engineering*, 1992, pp. 2097 - 2101.
11. Tasi, C. S., and Lee, H. H., "Applications of Viscoelastic Dampers to High-rise Buildings," *Journal of Structural Engineering*, April 1993, pp. 1222-1233.
12. Zhang, R-H., and Soong, T. T., "Sesmic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications," *Journal of Structural Engineering*, May 1992, pp. 1375-1392.
13. Lobo, R. F., Bracci, J. M., Shen, K. L., Reinhorn, A. M., and Soong, T. T., "Inelastic Response of R/C Structures with Viscoelastic Braces," *Earthquake Spectra*, Vol.9, No.3, 1993, pp. 419-446.
14. Bergman, D. M., and Hanson, R. D., "Viscoelastic Mechanical Damping Devices Tested at Real Earthquake Displacements," *Earthquake Spectra*, Vol.9, No.3, 1993, pp. 389-370.
15. Chang, K. C., Soong, T. T., Lai, M. L., and Nielsen, E. J., "Viscoelastic Dampers as Energy Dissipation Devices for Seismic Applications," *Earthquake Spectra*, Vol.9, No.3, 1993, pp. 371-387.
16. Chang, K. C., Soong, T. T., Lai, M. L., Hao, D. S., and Yeh, Y. C., "Full-scale Viscoelastically Damped Steel Frame," *Journal of Structural Engineering*, October 1995, pp. 1443-1447.