

점탄성 감쇠기가 설치된 고층건물의 효율적인 진동제어 Efficient Control of Tall Buildings with Viscoelastic Dampers

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

ABSTRACT

Viscoelastic dampers have been successfully applied in building structures to reduce vibration by wind and earthquakes. It may be inefficient or be uneconomical that viscoelastic damper is installed at each story of building structures. Although the number of viscoelastic dampers is reduced, if viscoelastic dampers are installed at only suitable places in building structures, vibration would be controlled by efficiency. In this paper, responses of building structures according to the situation of viscoelastic dampers are compared. Then efficient and economical arrangements of viscoelastic dampers are proposed.

1. 서론

최근 고층건물이 많이 세워지면서 지진이나 바람에 의한 고층건물의 진동을 제어하기 위한 제어기술이 많이 연구되었다. 이러한 제어기술은 크게 능동제어 방법, 준 능동제어 방법, 수동제어 방법 등 3가지로 나눌 수 있다. 능동제어시스템은 제어력(control force)을 구조물에 가하여 응답을 줄이는 방법으로 복잡한 구조를 가지고 있는 제어장치이다. 준 능동제어방법은 구조물의 응답에 영향을 미치는 구조요소의 일부를 매 순간마다 변화시킴으로써 응답을 제어하는 방식으로 시스템의 특성 또한 변화된다. 수동제어방법은 구조물의 에너지를 분산시킴으로써 변위를 줄이는 방법으로서 동조질량 감쇠기(TMD - Tuned Mass Damper)를 이용한 제어방법과 각 층 또는 접합부에 설치된 마찰 감쇠기(friction damper), 점탄성 감쇠기(viscoelastic damper)를 이용하는 제어방법 등을 예로 들 수 있다. 능동제어 방법은 비용이 많이 들 뿐만 아니라, 지진 발생 시에 야기될 수 있는 정전 때문에 신뢰성이 낮아질 수 있는 단점이 있다. 이에 반하여 수동제어 방법은 간단한 장치로써 효과적으로 진동을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 고층건물의 진동을 줄이기 위하여 수동제어 방법중 점탄성 감쇠기를 사용한다. 건물의 진동을 제어하기 위하여 모든 층에 점탄성 감쇠기를 설치한다는 것은 비효율적으로 될 수 있다. 따라서 적절한 곳에 점탄성 감쇠기를 배치하여 점탄성 감쇠기의 수를 줄이면서도 효과적으로 건물의 진동을 제어하는 것이 바람직할 것이다. 본 논문에서는 점탄성 감쇠기의 배치에 따른 건물의 거동을 비교하여 경제적이고 효과적인 진동제어 방법에 대하여 연구하였다.

* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정

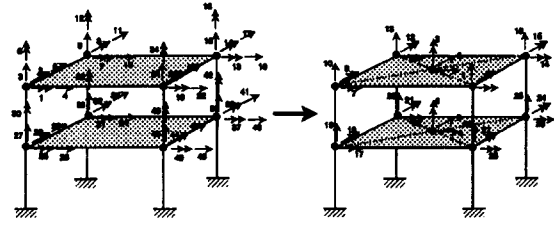
*** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

2. 해석방법

기존의 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 해석방법으로 3차원 고층건물을 해석하기 위해서는 많은 컴퓨터메모리와 해석시간이 필요하다. 그래서 기존 해석방법으로 고층건물에서 감쇠기의 최적 위치를 찾는 연구를 하는 것은 비효율적이 될 수 있다. 본 논문에서는 강막가정과 행렬의 응축기법을 이용하여 건물의 자유도를 줄인 해석모델을 사용하여 연구하였다.⁽³⁾

2.1 강막가정에 의한 모형화

일반적인 건물은 각 층마다 슬래브가 배치된다. 각 층의 평면에 배치되는 슬래브는 면 내에는 무한한 강성을 가지고 있고, 평면의 법선 방향으로 유연한 거동을 한다고 가정할 수 있다. 이와 같이 강막(rigid diaphragm)과 같은 거동을 보이는 슬래브의 영향을 골조해석에 고려하는 것이 보다 정확한 해석방법이라 할 수 있다. 이러한 각막가정을 고려하게 되면 평면내에 위치한 질점의 모든 자유도중에 평면의 이동과 회전에 대한 자유도만을 그림1(b)와 같이 각 층의 대표점의 자유도로 변환할 수 있다. 즉, 그림(a)는 질점당 6개의 자유도를 가지는 보요소로 이루어진 3차원 골조이다. 각 층의 보와 기둥이 접하는 질점은 한 평면 내에 존재한다. 여기서 각 층의 평면의 이동과 회전에 관한 자유도에 대해서 자유도 변환을 수행하면 그림1(b)와 같이 된다.



(a)변환전의 자유도 (b)변환후의 자유도
그림 1 강막을 고려한 골조의 자유도 변환

2.2 행렬응축기법의 적용

감쇠기가 설치되지 않은 건물은 정적응축을 통해 강성행렬을 응축할 수 있고 동적 응축을 통해 질량행렬을 응축할 수 있다. 이렇게 응축된 강성행렬과 질량행렬을 사용하여 감쇠행렬을 구하고 동적 해석을 수행하면 된다. 그러나 감쇠기가 설치된 건물의 감쇠행렬을 구하기 위해서는 건물의 응축된 감쇠행렬에 감쇠기의 영향을 고려하여 주어야 한다. 따라서 감쇠기의 감쇠행렬을 동적 응축하여 구한 후 건물의 응축된 감쇠행렬에 중첩시켜 전체감쇠행렬을 구하여야 한다. 다음은 감쇠기의 감쇠행렬을 응축하여 건물의 응축된 감쇠행렬에 중첩시키는 과정이다.

감쇠가 있는 구조물의 동적 평형 방정식은 식1과 같다.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{D}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{D}} + \mathbf{K}\mathbf{D} = \mathbf{A} \quad (1)$$

식1을 x축, y축 방향의 자유도와 z축 회전자유도를 자유도(F), 나머지 자유도를 (A)로 분류하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{AA} & \mathbf{M}_{AF} \\ \mathbf{M}_{FA} & \mathbf{M}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{D}}_A \\ \dot{\mathbf{D}}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{AA} & \mathbf{C}_{AF} \\ \mathbf{C}_{FA} & \mathbf{C}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{D}}_A \\ \dot{\mathbf{D}}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{AA} & \mathbf{K}_{AF} \\ \mathbf{K}_{FA} & \mathbf{K}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_A \\ \mathbf{D}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_A \\ \mathbf{A}_F \end{bmatrix} \quad (2)$$

식2에서 변위벡터 \mathbf{D}_A 는 변위벡터 \mathbf{D}_F 에 종속되어 있으므로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\mathbf{D}_A = \mathbf{T}_{AF}\mathbf{D}_F \quad (3)$$

\mathbf{T}_{AF} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_{AF} = -\mathbf{K}_{AA}^{-1}\mathbf{K}_{AF} \quad (4)$$

여기서 응축된 감쇠행렬을 구하기 위하여 질량행렬을 응축시키는 방법과 같은 방법을 쓴다. 식3을 시간에 대해서 한 번 미분하면 식5가 된다.

$$\dot{D}_A = T_{AF} \dot{D}_F \quad (5)$$

질량행렬의 응축과 같은 방법을 수행하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$M_{FF}^* \dot{D}_F + C_{FF}^* \dot{D}_F + K_{FF}^* D_F = A_F^* \quad (6)$$

응축된 감쇠행렬 C_{FF}^* 는 다음 식과 같이 유도될 수 있다.

$$C_{FF}^* = T_F^T C T_F = C_{FF} + T_{AF}^T C_{AF} + C_{FA} T_{AF} + T_{AF} C_{AA} T_{AF} \quad (7)$$

이렇게 구한 C_{FF}^* 를 구조물의 감쇠행렬에 중첩시키면 감쇠기의 영향이 고려된 전체 감쇠행렬이 구하여 진다.

$$C = C_S + C_{FF}^* \quad (8)$$

여기서, C 는 응축된 전체 감쇠행렬, C_S 는 감쇠기가 설치되지 않은 구조물의 감쇠행렬이다.

식8에서 구한 응축된 전체 감쇠행렬 C 를 사용하여 직접적분법으로 점탄성 감쇠기가 설치된 건물을 동적 해석한다. 강막가정과 행렬응축기법을 적용하므로써 전체 건물의 자유도 수가 줄었기 때문에 직접적분법으로 동적 해석을 하더라도 해석시간과 컴퓨터 메모리를 상당히 절약할 수 있다.

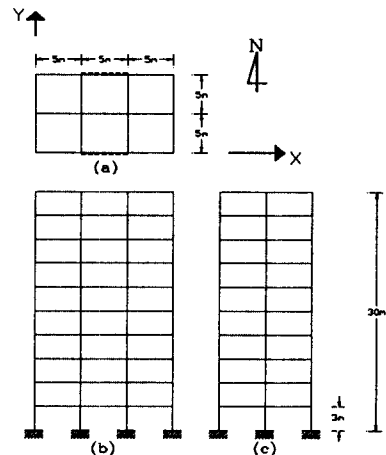
3. 감쇠기의 최적위치

바람이나 지진으로 인한 건물의 진동을 제어하기 위하여 감쇠기를 전 층에 설치하면 제어는 어느 정도 확실하지만 경제성과 건물의 기능적 측면때문에 비효율적이 될 수 있다. 적은 수의 감쇠기를 사용하여 진동을 효과적으로 줄이기 위해서는 층간변위가 많이 발생하는 층에 감쇠기를 설치하여야 한다. 그리고 건물에 요구되는 감쇠정도에 따라 감쇠기의 수도 조절하여야 한다. 이상에서는 예제구조물을 통하여 감쇠기의 수에 따른 감쇠기의 최적위치를 알아보고 감쇠기의 위치와 감쇠기의 수에 따른 감쇠정도를 알아보았다.

3.1 예제 구조물

예제 구조물은 그림2와 같이 3×2경간의 10층 철골구조물이다. 비대칭 평면의 구조물은 내진구조계획적인 측면에서 볼 때 바람직하지 않으므로 비틀림이 발생하지 않도록 직사각형의 평면으로 하였다. 평면은 각 경간당 5m이고 모든 층의 층고는 3m이다. 사용된 부재 중 기둥은 H400×400×13×21을 사용하였고 보는 H300×200×10×15 구조용 형강을 사용하였다. 구조물의 탄성계수는 2100 ton/cm², 포와송비는 0.3이다. 하중은 1940년 El Centro 남북방향 지진기록을 동적 하중으로 사용하였고 단위는 ton, cm를 사용하였다.

점탄성 감쇠기는 Chang et al(1995)이 실험에 사용한 것을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 점탄성 감쇠기의 치수와 특성은 표2.1과 표2.2에 나타나 있고 점탄성 재료로는 3M-ISD110을 사용한 것으로 하였다. 감쇠기의 형상은 그림3과 같다. 감쇠기의 강성과 감쇠는 표2에서 제시한 값을 사용하였고 이 값은 25℃일 때 실험에 의하여 얻은 값이다.



(a)평면 (b)남측입면도 (c)동측입면도
그림 2 예제구조물

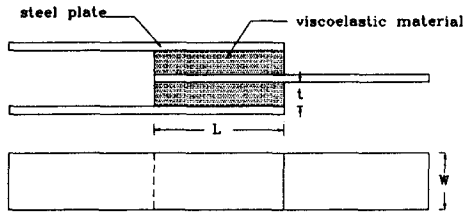


그림 3 점탄성 감쇠기의 형상

표 1 감쇠기에 사용된 점탄성 재료의 치수

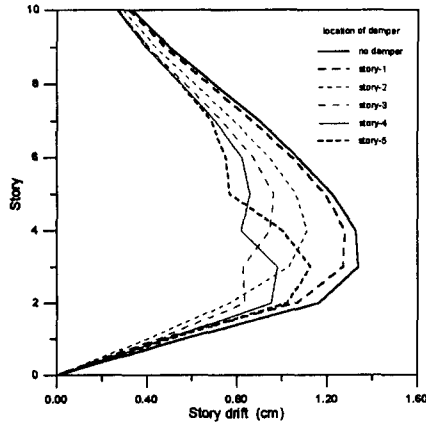
L (cm)	W (cm)	t (cm)	V (cm)
2.54	3.81	0.51	4.62

표 2 점탄성 감쇠기의 특성 ($f = 3.5\text{Hz}$, $\epsilon = 5\%$)

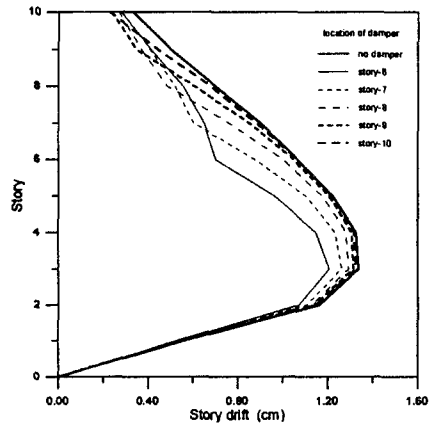
온도(°C)	G'	G''	η	K	C
25	2.106	2.377	1.13	39.973	1.023

3.2 한 개층에 감쇠기를 설치하는 경우

예제 건물의 각 층에 감쇠기를 설치하여 해석한 후 각층의 최대 변위와 층간변위를 비교하여 보았다. 그림 4 (a)와 (b)는 각층에 감쇠기를 설치하였을 때와 설치하지 않았을 때의 층간변위를 비교한 것이다. 감쇠기를 설치하지 않은 경우 3, 4, 5층의 순서로 층간변위가 큰 것을 알 수 있다.

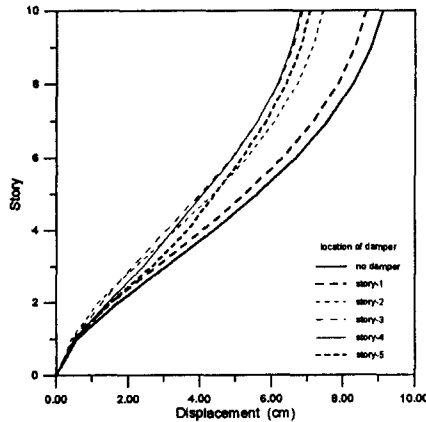


(a) 1, 2, 3, 4, 5층에 설치한 경우

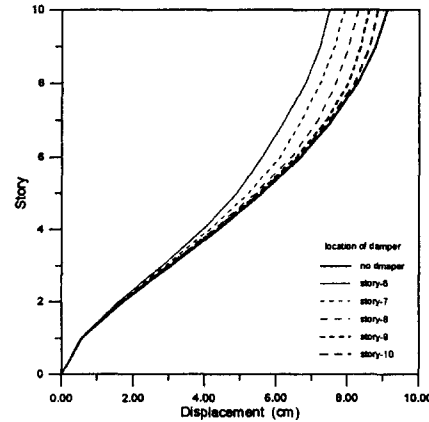


(b) 6, 7, 8, 9, 10층에 설치한 경우

그림 4 감쇠기를 각 층에 설치할 때의 층간변위 (El Centro, 1940, 남북방향)



(a) 1, 2, 3, 4, 5층에 설치한 경우



(b) 6, 7, 8, 9, 10층에 설치한 경우

그림 5 감쇠기를 각 층에 설치할 때의 최대변위 (El Centro, 1940, 남북방향)

각 층에 감쇠기를 설치한 결과 층간 변위가 상당히 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 특히 층간 변위가 많이 발생하는 3, 4층의 경우 50%이상 층간변위가 줄었다. 층간변위가 많이 발생하는 층에 감쇠기를 설치하는 것은 최상층 변위를 줄이는 데에도 효과적이다. 그림5(a)와 (b)에서 보면 3, 4층에 감쇠기를 설치한 경우의 최상층 변위가 다른 층에 설치한 경우보다 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림6은 각층에 감쇠기를 설치할 때 최상층 변위를 제어하는 양을 비율로 나타낸 것이다. 층간 변위가 많이 발생하는 3, 4층에 설치한 경우 약 25%의 변위를 제어하고 있다. 반면에 1층과 10층에 감쇠기를 설치한 경우는 5%정도의 미미한 제어능력을 보이고 있다. 그림6에서 나타난 결과는 각 층의 층간변위와 매우 유사함을 알 수 있다.

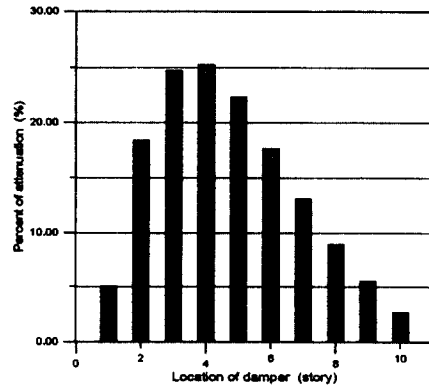


그림 6 각 층에 설치된 감쇠기가 제어한 변위량 (%)

3.3 두 개층에 감쇠기를 설치하는 경우

감쇠기를 한 개층씩 설치한 경우 층간변위가 큰 층에 감쇠기를 설치하였을 때 최상층 변위가 많이 줄어들었다. 두 개층에 설치하는 경우도 마찬가지로 적용할 수 있을 것이다(그림7).

CASE-A의 경우 층간 변위가 제일 많이 생긴 3층에 감쇠기를 설치하고 이를 재해석하여 층간변위가 제일 많이 발생하는 층을 찾는다. 그 결과 5층이 층간 변위가 제일 많이 발생하였으므로 5층에 감쇠기를 설치한 경우이다. CASE-B는 감쇠기가 없는 경우에 층간 변위가 제일 많이 발생한 3층과 4층에 감쇠기를 설치한 경우이다.

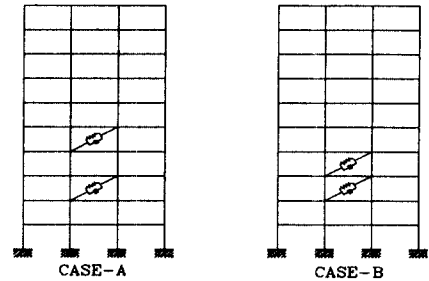
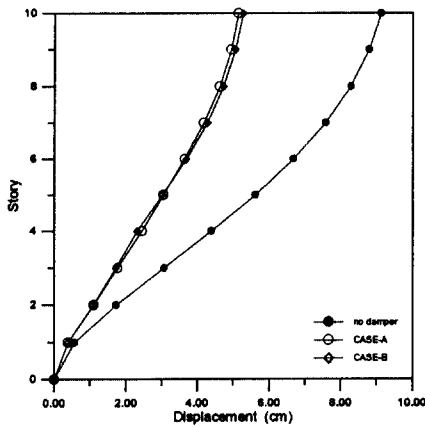
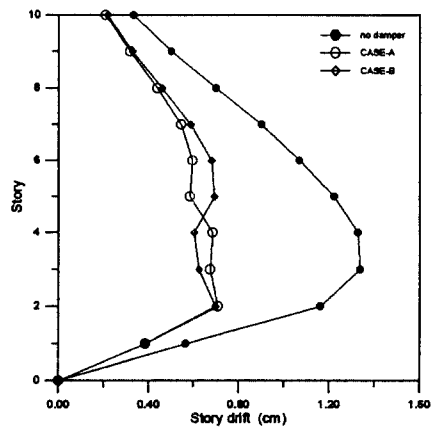


그림 7 두 개층에 감쇠기가 설치된 예제 건물

해석결과 CASE-B에 비하여 CASE-A의 최상층 변위가 작게 나오는 것을 볼 수 있다(그림8).



(a) 최대변위



(b) 층간변위

그림 8 감쇠기를 두 개층에 설치할 때 CASE-A와 B의 층간변위와 최대변위 비교 (El Centro, 1940, 남북방향)

3.4 세 개층에 감쇠기를 설치하는 경우

감쇠기를 두 개층에 설치하는 경우와 마찬가지로 CASE-A와 CASE-B의 감쇠기 위치를 정하였고 CASE-C는 감쇠기의 위치를 2층마다 1층씩 설치하였다(그림9).

그림10에서 CASE-A의 경우가 CASE-B, C보다 최상층 변위가 작은 것을 볼 수 있다.

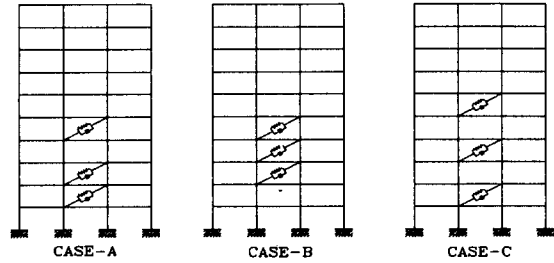
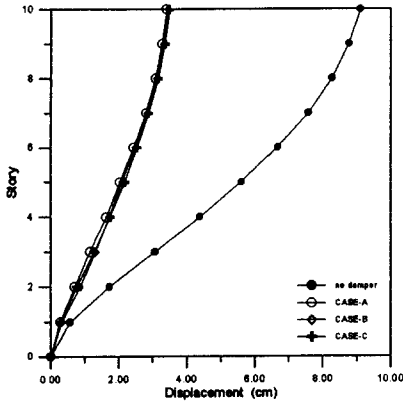
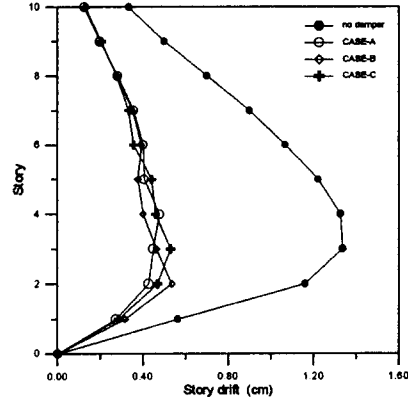


그림 9 세 개층에 감쇠기가 설치된 예제 건물



(a) 최대변위



(b) 층간변위

그림 10 감쇠기를 세 개층에 설치할 때 CASE-A, B, C의 층간변위와 최대변위 비교

(El Centro, 1940, 남북방향)

3.5 일반적인 경우

3.2절과 3.3절의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 일반적으로 감쇠기의 최적위치를 구하는 방법은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 감쇠기가 설치되지 않은 건물을 해석한 후 층간변위가 가장 많이 발생하는 층에 감쇠기를 설치하고 다시 해석한다. 해석결과 다시 층간변위가 가장 많이 발생하는 층을 찾아 감쇠기를 설치한다. 이러한 과정을 반복하면 건물의 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 감쇠기의 위치를 구할 수 있다. 이러한 방법이 모든 경우에 대하여 만족한다고 볼 수는 없으나 일반적으로 감쇠기의 최적위치를 구하는 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

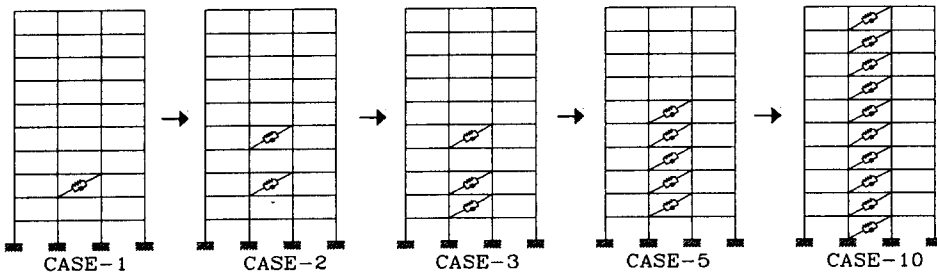


그림 11 감쇠기의 수에 따른 감쇠기의 최적위치

그림12는 감쇠기가 설치됨에 따라서 변하는 층간변위와 최대변위를 나타낸 것이다. 그림12(a)에서 보면 감쇠기가 없는 경우 3층에 최대 층간변위가 발생하게 된다. 3층에 감쇠기를 설치하고 다시 해석하면 5층에 최대 층간변위가 발생하므로 여기에 감쇠기를 설치한다. 이와 같은 방법으로

반복수행함으로써 감쇠기의 위치를 정할 수 있다. 그림12(b)는 그에 따른 최대변위를 나타낸 것인데 2개층에만 설치하더라도 10개층에 설치한 경우의 50%정도를 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

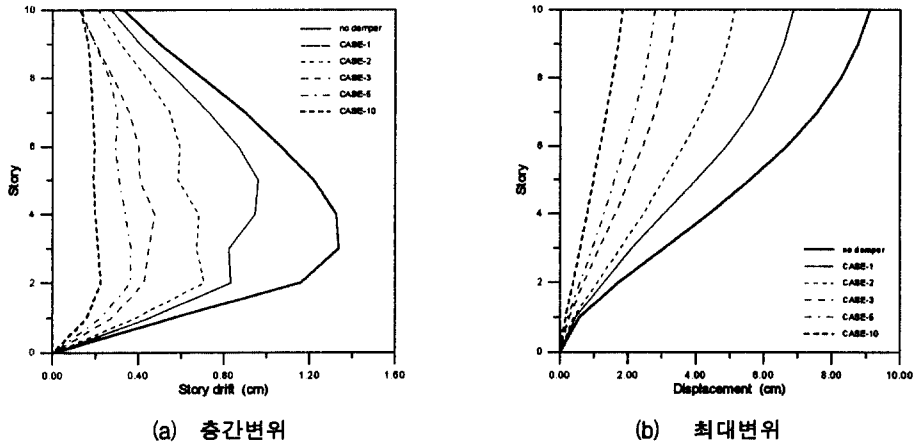


그림 12 감쇠기의 설치에 따른 건물의 층간변위와 최대변위 (El Centro, 1940, 남북방향)

그림13은 10층과 20층 건물의 감쇠기가 설치된 층 수에 따른 최상층 변위비율을 비교한 것이다. 가로축은 감쇠기가 설치된 층수를 건물의 층수로 나눈 값으로 감쇠기를 모든 층에 설치하게 되면 1이 된다. 10층 건물의 경우 4개층에, 20층의 경우는 8개층에 감쇠기를 설치할 경우 감쇠기를 설치하지 않은 경우에 비교하여 변위가 40%정도로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 35-40%정도로 변위가 줄어들면 감쇠기가 설치된 층이 많아지더라도 변위 감소량은 현저히 줄어들게 된다. 따라서 10층의 경우는 4개층, 20층의 경우는 8개층에 감쇠기를 설치하는 것이 최상층 변위를 효과적으로 줄이면서 경제적으로 감쇠기를 설치하는 방법이라고 할 수 있다.

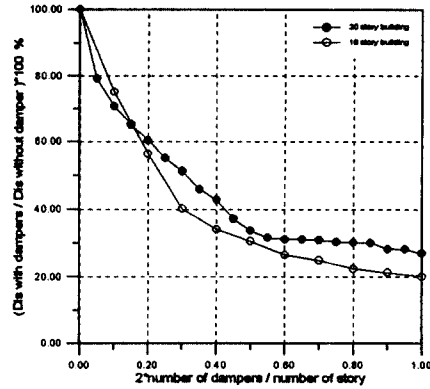


그림 13 10, 20층 건물의 감쇠기가 설치된 층수에 따른 최상층 변위비율 비교

4. 결론

본 논문에서는 점탄성 감쇠기의 배치에 따른 건물의 거동을 비교하여 경제적이고 효과적인 진동제어 방법에 대하여 연구하였다.

1. 본 연구를 수행하기 위하여 사용한 점탄성 감쇠기의 해석방법은 강막가정과 행렬의 응축기법을 이용한 해석방법이다. 이 해석방법은 기존의 해석방법과 비교하여 자유도를 크게 줄일 수 있어 해석시간이 상당히 단축되므로 본 연구와 같이 많은 해석을 수행할 필요가 있는 경우 적합한 해석방법이라고 생각된다.

2. 감쇠기를 1개층에 설치하는 경우 층간변위가 많이 발생하는 층에 감쇠기를 설치하는 것이 변위를 제어하는데 효과적이었다. 감쇠기를 설치하지 않은 경우와 비교하여 최대 25%정도 변위를 제어할 수 있었다.

3. 2개층 이상에 감쇠기를 설치하는 경우 먼저 감쇠기가 설치되지 않은 건물을 해석한 후 층

간변위가 가장 많이 발생하는 층에 감쇠기를 설치하고 다시 해석한다. 해석결과 다시 층간변위가 가장 많이 발생하는 층을 찾아 감쇠기를 설치한다. 이러한 과정을 반복하면 건물의 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 감쇠기의 위치를 구할 수 있다.

4. 10층 20층 건물을 해석한 결과 35-40%정도로 변위가 줄어들면 감쇠기의 수가 증가하더라도 변위 감소량은 현저히 줄어들게 된다. 더 이상의 감쇠기를 설치하더라도 변위를 줄이는 효과는 미미하기 때문에 이 경우가 건물의 진동을 제어하는 효율적인 감쇠기의 위치와 수라고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국중공업주식회사의 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이동근, 신영수, 조한욱, "고층건물의 해석 및 설계," 한국전산구조공학회 교재 11-2.
2. 이동근, 윤정방, "구조동역학의 개념 및 내진설계," 한국전산구조공학회 교재 8-1.
3. 김상태, 홍성일, 이동근, "점탄성 감쇠기가 설치된 고층건물의 동적해석," 한국지진공학회논문집 1권 2호, 1997, 제출
4. 황재승, 민경원, 홍성목, "건물 구조물을 위한 능동제어 효과를 가지는 수동 점성감쇠기의 최적 설계," 한국소음진동공학회지 제5권 제2호, 1995, pp.225-234.
5. William Weaver, Paul R. Johnson, "Structural Dynamics by Finite Elements," *Prentice Hall*, pp. 164-168, pp. 282~290, pp.411-423.
6. William Weaver, James M. Gere. "Matrix Analysis of Framed Structures," *Van Nostrand Reinhold*, Third Edition.
7. S. P. Timoshenko., William Weaver, D. H. Young., "Vibration Problem in Engineering," *John Wiley & Sons*, Fifth Edition.
8. Anil K. Chopra., "Dynamics of Structures," *Prentice Hall*, pp. 409-428, pp. 576-583
9. Mahmoodi, P., "Structural Dampers." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 1969, pp. 1661-1672
10. 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.
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 Eng-ineering*, 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 sismic 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