

탄성감쇠를 가진 건축구조물의 동적해석

Dynamic Analysis of Building Structures with Viscoelastic Dampers

이동근* 홍성일** 이한선***

Lee, Dong-Guen Hong, Sung-Il Lee, Han-Seon

ABSTRACT

Viscoelastic dampers have been successfully applied to building structures for reduction of vibration induced by wind or earthquakes. But accurate estimation of responses of building structures with viscoelastic dampers is very difficult, because the properties of viscoelastic damper is dependent on temperature and frequency of vibration. For efficient control of building vibration, required damping of viscoelastic damping device need be estimated and dynamic analysis method which can estimate the response of building structure with viscoelastic damper system is indispensable.

In this paper, an efficient dynamic analysis method of a building structure with viscoelastic dampers is proposed. Efficiency and accuracy of the proposed method are verified comparing analytic results with shaking table test results using reduced building models.

1. 서론

현대 사회의 가장 두드러진 특징인 도시화와 높은 인구밀도로 인하여 도심지에서는 지가(地價)가 상승하게 되고 또 건축주의 욕구를 충족시켜주기 위하여 고층 건축물들이 많이 세워지고 있다. 그런데 고층건물은 고정하중이나 적재하중과 같은 중력하중보다도 지진이나 바람과 같은 횡방향 하중이 중요한 설계하중이 된다. 특히 구조물의 진동은 구조물의 안전성뿐만 아니라 사용성에 있어서도 중요한 문제가 될 수 있다.

최근에는 지진이 고층건물에 미치는 영향을 효과적으로 저감시키기 위한 진동제어분야의 연구가 미국과 일본 등에서 시작되었으며 일부 건물에 시험적으로 적용되고 있을 정도로 기술의 개발이 활발히 추진중이다. 이에 따라 고층건물의 내진설계는 충분한 연성을 확보하는 고전적 방법 외에도 진동제어의 새로운 기법을 추가함으로써 경제적이고 안전한 구조물의 설계가 가능하도록 하는 방향으로 바뀌어 가고 있다. 이것은 지진에 의한 구조적 피해를 감소시키는 효과 외에도 비구조적인 피해를 최소화하는 부차적인 효과가 있기 때문에 앞으로 이 분야에 더 많은 연구가 이루어지게 될 것으로 전망된다.

고층건물의 진동제어방법으로는 탄성감쇠기, 마찰감쇠기, ADAS 감쇠기 또는 동조질량감쇠기 등을 이용한 방법들이 있으며, 이들 진동제어방법 중에서 탄성감쇠재료의 에너지 흡수 능력을 이용한 방법이 널리 사용되고 있다. 효과적인 진동제어를 위해서는 적절한 탄성감쇠기의 설계가 요구되며 이를 위해서는 탄성감쇠기를 가진 건축구조물에 대하여 동적 거동을 예측할 수 있는 해석방

* 성균관대학교 건축공학과 교수, 정회원

** 성균관대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원

*** 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원

법이 필요하다. 그런데 탄성감쇠기의 강성과 감쇠는 온도와 가력 진동수에 따라 다르기 때문에 감쇠기를 가진 건축구조물의 동적 거동을 정확히 예측한다는 것은 상당히 어려운 일이다. 외국에서는 이러한 탄성감쇠를 가진 구조물의 동적 해석방법에 대하여 활발히 연구하고 있으나^{7),8),9),10)}, 국내에서는 최근 일부 연구자들에 의해서 연구되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 탄성감쇠를 가진 건축구조물에 대하여 적절한 동적 거동을 예측할 수 있는 해석방법을 제시하였다. 이와 함께 제안된 해석방법에 의한 시간이력해석결과와 진동대 실험을 통하여 얻은 결과와 비교하여 건축구조물의 동적 거동 예측의 정확성에 대하여 검토하였다.

2. 효율적인 동적해석 방법

탄성감쇠를 가진 건축구조물의 동적해석의 효율성을 높이기 위하여 강막가정과 행렬의 응축기법을 이용하여 구조물의 자유도를 줄인 해석모델을 사용하였다. 이 방법은 해석에 필요한 컴퓨터 메모리와 소요시간을 상당히 절약할 수 있으며, 간단하면서도 정확하게 탄성감쇠를 가진 건축구조물의 동적 거동을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

2.1 구조물의 모형화

일반적인 건물은 각 층마다 슬래브가 배치된다. 각 층의 평면에 배치되는 슬래브는 면내에는 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 합리적인 해석방법이라 할 수 있다. 이러한 강막가정을 고려하게 되면 평면 내에 위치한 각 절점의 자유도중에서 평면의 이동과 회전에 대한 자유도만을 그림1(b)와 같이 각 층 평면내부에 있는 대표점의 자유도로 변환할 수 있다. 즉, 그림1(a)는 절점당 6개의 자유도를 가지는 보요소로 이루어진 3차원 골조이다. 각 층의 보와 기둥이 접하는 절점은 같은 평면 내에 존재한다. 여기서 각 층의 평면에서 이동과 회전에 관한 자유도에 대하여 자유도 변환을 수행하면 그림1(b)와 같이 된다. 강막가정에 의하여 자유도를 변환한 후 나머지 자유도에 대하여 행렬응축기법을 적용하게 되면 그림1(c)와 같이 층당 3개의 자유도를 갖는 구조물로 모형화할 수 있다.^{1),2),4)}

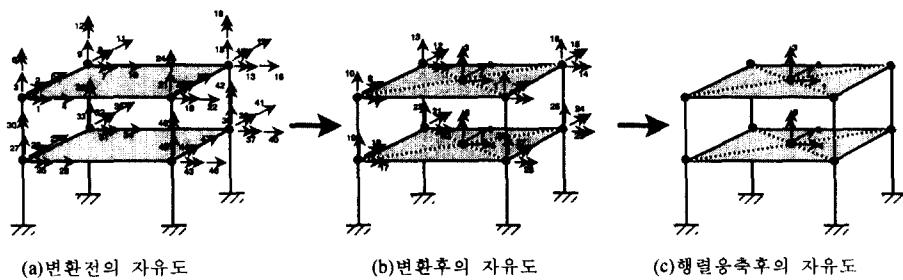


그림 1. 골조의 자유도 변환과 행렬응축기법의 적용

2.2 구조물의 강성행렬, 질량행렬 및 감쇠행렬

감쇠기가 설치되지 않은 건물은 정적응축을 통해 강성행렬을 응축할 수 있고 동적응축을 통해 질량행렬을 응축할 수 있다. 이렇게 응축된 강성행렬과 질량행렬을 사용하여 구조물이 가지고 있는 감쇠행렬을 구하고 동적 해석을 수행하면 된다.³⁾ 그런데 감쇠기가 설치된 건물의 감쇠행렬을 구하기 위해서는 건물의 감쇠행렬에 감쇠기의 영향을 고려하여 주어야 한다. 행렬응축기법을 사용할 경우 응축된 강성행렬과 질량행렬을 가지고 구조물만이 가지고 있는 감쇠행렬을 구하게 되는데, 이때에 국부적으로 추가되는 감쇠기의 감쇠행렬을 첨가하기 위해서는 감쇠기의 감쇠행렬도 응

축한 후, 구조물의 응축된 감쇠행렬에 중첩시켜 전체감쇠행렬을 구하여야 한다.^{1),2)}

일반적인 구조물에서의 감쇠행렬의 유도는 식(1)과 같이 질량행렬과 강성행렬을 이용하여 선형 조합으로 구할 수 있다. 구조물의 응축된 강성 및 감쇠행렬과 감쇠기의 응축된 강성 및 감쇠행렬을 중첩시키면 다음과 같이 탄성감쇠를 고려한 전체 구조물의 강성 및 감쇠행렬을 구할 수 있다. 식(2)와 식(3)에서 구한 강성 및 감쇠행렬을 이용하여 직접적분법으로 탄성감쇠기가 설치된 건물에 대하여 동적 해석을 수행하게 되더라도 자유도수가 줄어들기 때문에 연산시간과 컴퓨터메모리를 절약할 수 있어 효율적으로 탄성감쇠를 고려할 수 있다.

$$C_S = \alpha M_S + \beta K_S \quad (1)$$

$$K^* = K_S + K_D \quad (2)$$

$$C^* = C_S + C_D \quad (3)$$

여기서, M_S , K_S , C_S 는 각각 구조물의 응축된 질량, 강성 및 감쇠행렬이고, K_D , C_D 는 각각 감쇠기의 응축된 강성 및 감쇠행렬이다. 또한 K^* , C^* 는 감쇠기의 강성과 감쇠를 고려한 응축된 전체 건물의 강성 및 감쇠행렬이다.

일반적으로 탄성감쇠기의 K_D , C_D 는 실제의 감쇠기에 대한 실험을 통해 구해져야 되지만, 실험에서 구조물을 축소시켜 실험할 경우 감쇠기의 크기도 축소되므로 감쇠기의 실물 실험을 통해서 감쇠기의 강성과 감쇠를 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 축소된 감쇠기의 강성과 감쇠를 구하는 방법이 필요하다.

2.3 감쇠기의 강성 및 감쇠 추정방법

실제의 감쇠기의 강성과 감쇠는 직접 실험을 통해서 구해지지만, 축소된 감쇠기의 강성과 감쇠는 크기가 매우 작기 때문에 직접 실험을 통해서 구할 수가 없다. 그러나 그림2와 같은 단자유도 구조물을 이용하면 축소된 감쇠기의 강성과 감쇠를 구할 수 있다. 구조물의 자유도가 한 개이기 때문에, 감쇠기의 감쇠는 실험을 통하여 얻어진 구조물의 질량과 진동수 그리고 감쇠비를 이용하여 구할 수 있으며, 감쇠기의 강성은 감쇠기의 설치유무에 따른 진동수의 변화량을 이용하여 구할 수 있다.

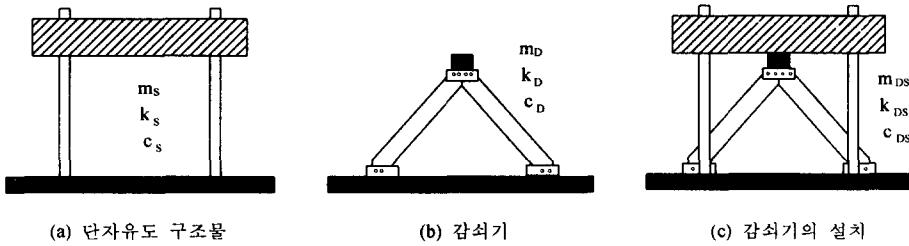


그림2. 감쇠기가 설치된 단자유도 구조물

다음은 일자유도 구조물의 자유진동 실험을 통하여 감쇠기의 강성과 감쇠를 구하는 방법이다. 다음의 식(4)는 감쇠기가 설치된 단자유도 구조물의 동적 평형 방정식이다. 여기서 감쇠기가 설치되었을 때의 구조물 전체의 감쇠 (c_{DS})은 식(8)과 같이 감쇠기를 고려한 질량 (m_{DS})과, 진동수 (ω_{DS}), 감쇠비 (ξ_{DS})를 통하여 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 감쇠기가 없는 구조물만의 감쇠 (c_S)을 구하여 식(10)과 같이 감쇠기가 설치된 구조물의 감쇠 (c_{DS})에서 감해주면 감쇠기의 감쇠를 구할 수 있다.

$$m_{DS}\ddot{x} + c_{DS}\dot{x} + k_{DS}x = -m_{DS}\ddot{x}_g \quad (4)$$

$$\dot{x} + \frac{c_{DS}}{m_{DS}}\dot{x} + \frac{k_{DS}}{m_{DS}}x = -\ddot{x}_g \quad (5)$$

$$\dot{x} + 2n\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_g \quad (6)$$

$$\xi_{DS} = \frac{n}{\omega}, \quad \frac{c_{DS}}{m_{DS}} = 2n = 2\omega\xi_{DS} \quad (7)$$

$$c_{DS} = 2m_{DS}\omega_{DS}\xi_{DS} \quad (8)$$

$$c_S = 2m_S\omega_S\xi_S \quad (9)$$

$$c_D = c_{DS} - c_S \quad (10)$$

감쇠기의 강성은 감쇠기의 설치유무에 따른 구조물의 진동수 변화를 이용하여 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다. 식(11)과 식(12)에서와 같이 감쇠기가 설치되지 않은 구조물의 진동수와 감쇠기가 설치됨으로써 변화한 진동수비와 질량비 그리고 구조물만의 강성으로써 감쇠기가 설치된 구조물의 강성을 얻을 수 있다. 여기서 식(13)과 같이 감쇠기의 강성을 구할 수 있다.

$$\frac{\omega_{DS}^2}{\omega_S^2} = \frac{k_{DS}/m_{DS}}{k_S/m_S} = \alpha \quad (11)$$

$$k_{DS} = \alpha k_S \frac{m_{DS}}{m_S} = \alpha k_S \frac{m_S + m_D}{m_S} \quad (12)$$

$$k_D = k_{DS} - k_S \quad (13)$$

3. 예제구조물의 동적해석

진동대 실험³⁾과 비교하여 제안된 해석방법의 효율성과 정확성을 검토하였다. 본 예제구조물의 경우, 규모가 매우 작기 때문에 탄성감쇠기의 크기 역시 축소되어 실험을 통하여 감쇠기의 강성과 감쇠를 구할 수는 없다. 따라서 예제구조물은 단일자유도를 갖는 1층 건물에 대하여 2.3절에서 제안한 방법으로 감쇠기 종류에 따른 감쇠기의 동적 특성을 구한 다음, 여기서 얻어진 감쇠기의 강성과 감쇠를 이용하여 3층 건물에 대하여 동적해석을 수행하였다. 동적 해석에 사용된 지진하중은 그림3과 같이 1940년 El Centro 남북방향 지진 기록을 1/12로 축소하여 사용하였고 실험장비의 계측한계 때문에 최대 지반가속도가 0.1g 이하로 축소하였다.

3.1 1층 예제구조물

진동대 실험에 사용된 1층 구조물은 그림4와 같이 1자유도를 갖는 구조물이다. 예제 구조물의 제원과 실험을 통해 구한 동적특성은 표1과 같다. 총질량은 아크릴판과 기둥부재로 사용한 볼트 및 너트 등의 질량을 합산하여 결정하였으며, 기둥 강성은 ø6 볼트의 최소직경인 4.5mm를 기준으로 하였고, 층고는 아크릴판과 너트 등에 의해서 횡지지되는 구간을 제외한 순층고를 236mm로 하였다. 감쇠기가 설치되지 않은 구조물을 MODEL A, 감쇠기의 종류에 따라 MODEL B-1, MODEL B-2로 구분하여 표기하였다.

표2는 1층 예제구조물의 자유진동 실험을 통하여 구한 고유진동수와 감쇠비, 기둥의 강성을 이용하여 각 감쇠기의 강성과 감쇠를 추정한 값이다. 그림5는 1층 예제구조물의 자유진동실험을 통해 얻은 시간이력곡선이며, 그림6은 실험을 통하여 구한 감쇠기의 강성과 감쇠를 사용하여 구한

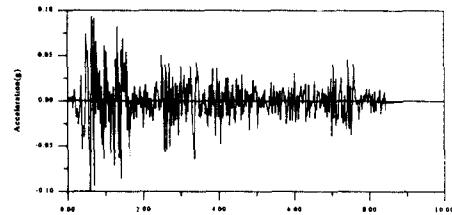


그림3. El Centro Earthq. 1940 S00E(1/12축소)

시간이력곡선이다. 그림5와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

표1. 1층 축소모형구조물의 제원 및 특성

MODEL	A	B-1	B-2
감쇠기의 종류	-	D1	D2
총 질량(kg)	0.005873	0.005888	0.005908
총 높이	310.0	310.0	310.0
총 고(mm)	310.0	310.0	310.0
순총고(mm)	236.0	236.0	236.0
고유진동수(Hz)	8.423	9.838	11.646
고유진동주기(sec)	0.1187	0.1016	0.0859
감쇠비(%)	0.43	1.11	2.08
기둥강성($\phi 6$ 볼트)	3.86×4 개 기둥 = 15.44		

표2. 추정된 감쇠기의 강성 및 감쇠

감쇠기의 종류	D1	D2
감쇠(C)	0.0070	0.0140
강성(K)	9.2800	18.2683

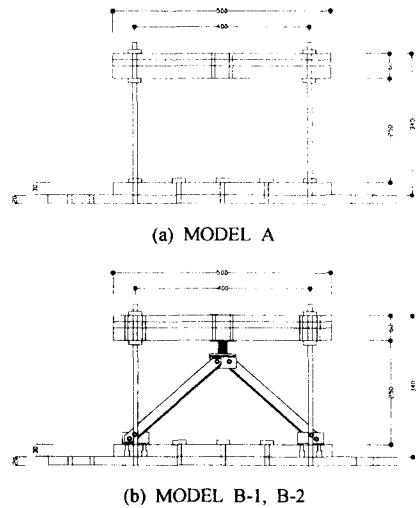


그림4. 1층 축소 모형구조물의 입면도

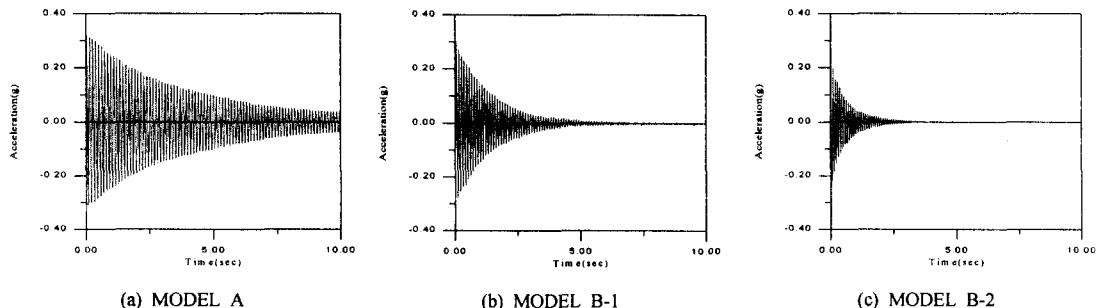


그림5. 실험에 의한 1층 예제구조물의 자유진동

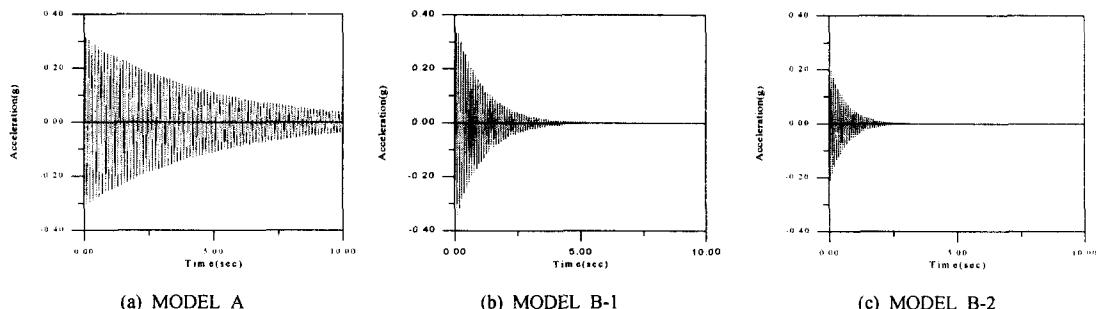


그림6. 해석에 의한 1층 예제구조물의 자유진동

1층 예제구조물의 지진에 대한 가속도응답 실험결과는 그림7과 같으며, 그림8은 해석에 의하여 구한 구조물의 가속도응답 시간이력곡선이다. 실험결과와 해석결과의 오차는 실험시 기계진동 또는 계측기에서의 전기적 잡음 등과 같은 외부 영향과 실험시 구조물의 내부에서 발생하는 마찰력, 가력 진동수에 의존하는 감쇠기의 동적 특성치들에 대한 추정오차, 질량 산출시 오차 등에 의해 발생하는 것으로 볼 수 있다. 또한 기둥으로 사용한 볼트의 유효직경 산정에서 발생하는 기둥강성

의 오차 등과 같은 요인으로 인하여 오차가 발생하는 것으로 추측된다. 그러나, 전체적으로 볼 때에는 상당히 유사한 동적거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 보다 정교한 실험장치의 확보와 감쇠기의 정확한 동적 특성치들을 얻어서 해석한다면 해석과 실험에서의 오차는 상당히 줄어들 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

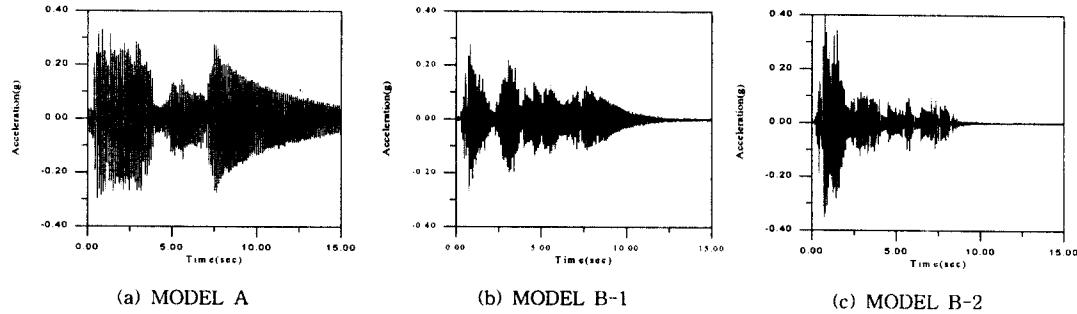


그림7. 실험에 의한 1층 예제구조물의 응답 가속도

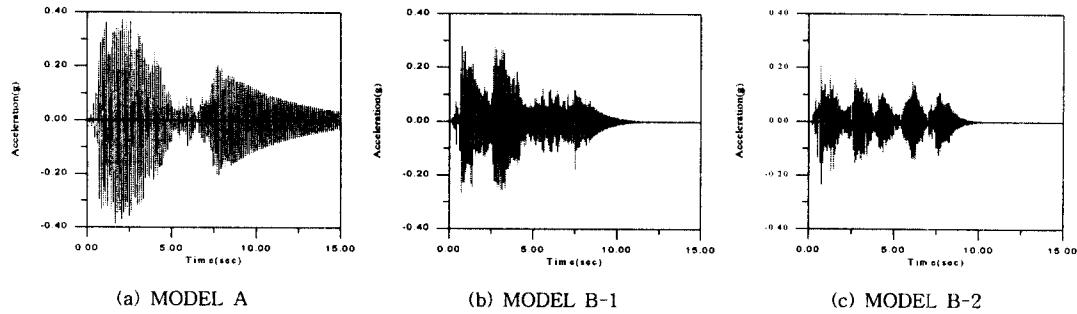


그림8. 해석에 의한 예제구조물의 응답 가속도

3.2 3층 예제구조물

다자유도를 가진 구조물의 지진에 대한 동적 거동 예측의 정확성에 대하여 알아보기 위해서 3층으로 된 축소 모형구조물에 대하여 진동대 실험결과와 해석결과를 비교해 보았다.

3층 예제구조물은 그림9와 같이 각 층의 층고가 23.6cm이고, $\phi 6$ 볼트를 기둥으로 하였으며, 기둥강성은 볼트의 최소직경인 4.5mm를 기준으로 하였다. 1층 예제구조물에 사용되었던 감쇠기를 사용하였으며, 표3과 같이 감쇠기가 설치되지 않은 구조물을 MODEL A, 각 층에 설치되는 감쇠기의 종류에 따라 D111, D222, D200로 분류하였다. 감쇠기의 강성 및 감쇠는 1층 예제구조물에서 구한 값을 사용하였다.

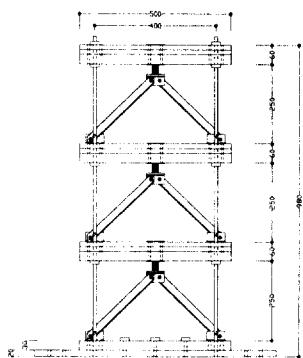


그림9. 3층 예제구조물 입면도

표3. 3층 예제구조물의 주요 세원 (단위:kg)

MODEL	A	D111	D222	D200	
감	3층	-	D1	D2	-
쇠	2층	-	D1	D2	-
기	1층	-	D1	D2	D2
총	3층	0.005888	0.005988	0.006008	0.005888
질	2층	0.005493	0.006756	0.006776	0.006736
량	1층	0.005493	0.006756	0.006776	0.006776

실험여건으로 인하여 응답가속도 계측은 3층에서만 측정하였다. 그림10은 진동대 실험을 통하여 얻은 3층에서의 가속도응답 시간이력곡선이며, 그림11은 해석을 통해 구한 가속도응답이다. 3층 예제구조물의 지진거동에 있어서 실험결과는 기동질량의 영향으로 인하여 2차, 3차모드의 영향이 발생하게 되지만, 해석에서는 기동질량을 각 절점으로 이동시킴으로써 기동자체의 진동이 무시되므로 그림10과 11의 (a)에서와 같이 전체적인 구조물의 거동은 비슷하지만 실험과는 다소 상이한 거동을 나타낸다. 그러나 전반적으로 구조물의 동적거동을 잘 예측하고 있는 것으로 볼 수 있다.

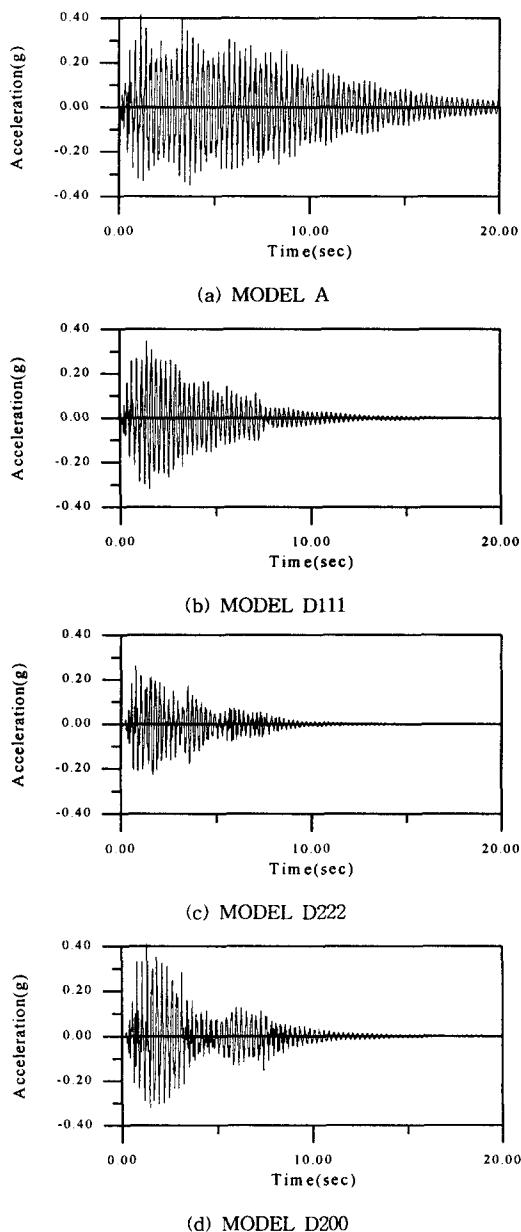


그림10. 실험에 의한 3층에서의 응답 가속도

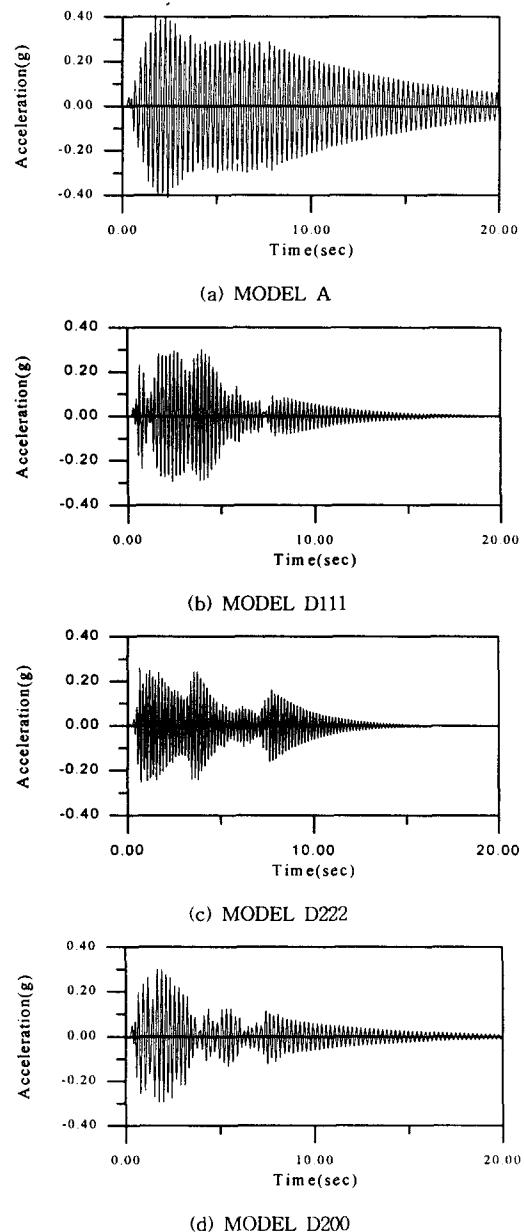


그림11. 해석에 의한 3층에서의 응답 가속도

4. 결 론

탄성감쇠기가 설치된 건물의 동적 거동을 예측하기 위하여 본 논문에서 제안한 해석방법에 의한 결과와 실험결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 진동대 실험에서 탄성감쇠기의 크기가 매우 작아서 실물 실험을 할 수 없을 경우에는 단자유도구조물의 자유진동실험을 통해 얻은 감쇠비와 고유진동수의 변화량을 이용하면 감쇠기의 강성과 감쇠를 간단하면서도 상당히 정확하게 구할 수 있다.
- 단자유도 구조물의 진동대 실험과 비교해 보면, 탄성감쇠기의 강성과 감쇠를 알면 감쇠기가 설치된 구조물의 동적 거동에 대하여 충분히 정확한 예측이 가능함을 알 수 있다.
- 3개의 자유도를 갖는 3층 구조물에 대하여 진동대 실험과 비교해 보더라도, 상당히 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 해석방법은 탄성감쇠기가 설치된 고층건물의 동적거동에 대하여 효과적으로 예측할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

실험결과와 해석결과의 차이는 부재의 단면 특성, 질량의 산출, 감쇠기의 동적 특성 등과 같이 해석을 위한 모형화 과정에서 발생하게 되는 실제 구조물과의 차이 또는 강막가정 및 행렬옹축기법 등 해석에 도입된 여러 가지 가정(假定)에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 구조물에 대하여 보다 정확하게 모형화하고, 또 정확한 감쇠기의 강성과 감쇠를 얻을 수 있다면, 보다 정확하게 동적거동을 예측할 수 있을 것이다.

추후 연구과제로서는 경제적이고 효과적인 진동제어를 위한 탄성감쇠기의 설계법과 효과적인 진동제어 시스템 개발에 대한 연구가 이어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국중공업주식회사의 연구비지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상태, 홍성일, 이동근(1997), "점탄성감쇠기가 설치된 고층건물의 효율적인 동적해석," 한국지진공학회논문집, 제1권 제3호, pp.11-19
2. 김상태, 홍성일, 이동근(1997), "점탄성감쇠기가 설치된 고층건물의 효율적인 진동제어," 한국지진공학회 학술발표회, Vol.1, No.2, pp.167-174
3. 이한선, 이동근, 허윤섭(1998), "소형 진동대를 이용한 탄성감쇠모델 실험", 한국지진공학회학술발표회, Vol.2, No.1
4. William Weaver, Paul R. Johnson(1987), "Structural Dynamics by Finite Elements," *Prentice Hall*, pp. 164-168, pp. 282-290, pp.411-423.
5. S. P. Timoshenko, William Weaver, D. H. Young(1990), "Vibration Problem in Engineering," *John Wiley & Sons*, Fifth Edition.
6. Anil K. Chopra(1995), "Dynamics of Structures," *Prentice Hall*, pp. 409-428, pp.576-583
7. Mahmoodi, P.(1969), "Structural Dampers." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, pp.1661-1672
8. Chang, K.C., Soong, T.T., Oh, S-T., and Lai, M.L.(1995.10), "Seismic behavier of steel frame with added viscoelastic dampers," *Journal of Structural Engineering*, pp.1418-1424.
9. Tasi, C. S., and Lee, H. H.(1993. 4) "Applications of viscoelastic dampers to high-rise buildings," *Journal of Structural Engineering*, pp.1222-1233
10. Chang, K. C., Soong, T. T., Lai, M. L., and Nielsen, E. J.(1993), " Viscoelastic dampers as energy dissipation devices for seismic applications," *Earthquake Spectra*, Vol 9, No.3, pp.371-387