

중진 지역에서의 점탄성 감쇠기 설계 및 제진 성능 실험

Seismic Design and Test of Viscoelastic Dampers in Regions of Moderate Seismicity

민 경 원* 호 경 찬** 황 성 호** 최 현***

Min, Kyung-Won Ho, Kyoung-Chan Hwang, Seong-Ho Choi, Hyun

ABSTRACT

This paper is a study on the seismic design and test of viscoelastic dampers in regions of moderate seismicity. First, moderate seismic waves are generated with measured strong seismic data based on the theory of effective peak acceleration. Then, their response spectrums are compared each other to estimate the required damping to attenuate the vibration. As relatively smaller damping is required in the regions of moderate seismicity than in the regions of strong seismicity, proper viscoelastic dampers can be designed according to the estimated damping. Finally, a test building model is designed and the viscoelastic dampers are installed for the experimental study under moderate and strong earthquakes. It is found that viscoelastic dampers with low damping capacity, developed in this study, are enough to reduce the building response in regions of moderate seismicity.

1. 서론

건물에 설치되는 점탄성 감쇠기는 점탄성 재료의 에너지 소산으로 인하여 건물의 진동응답을 감소시키고 있다. 에너지 소산 능력은 점탄성 재료의 특성이다. 점탄성 재료는 점성으로 인한 에너지 소산이 커야 하며 이러한 능력은 소산계수와 전단계수와와의 비인 소실비(loss ratio)에 관계가 있으며, 소실비는 건물의 감쇠비를 증가시키는 역할을 하고 있다.¹⁾ 따라서 점탄성 감쇠기의 능력은 점탄성 재료의 소실비의 값에 좌우된다. 즉 소실비의 값이 클수록 점탄성 감쇠기의 설치로 인한 건물의 감쇠비는 증가되어 건물의 진동응답은 감소된다. 그러므로 일차적으로 소실비가 큰 재료일수록 점탄성 감쇠기의 재료로써 적합하다고 할 수 있다. 미국에서 생산되는 점탄성 감쇠재료는 고무와 유사한 특성을 지니는 특수화학적 재료로써 소실비가 1 이상으로 에너지 소산능력이 크다.²⁾ 그러나 국내에서는 이러한 특성을 지니는 재료의 개발이 이루어 있지 않아 소실비가 1 이

* 인천대학교 건축공학과 교수, 정회원

** 인천대학교 건축공학과 석사과정

*** 유니승기술연구소 선임연구원

상인 점탄성 감쇠기를 구성할 수 없다. 국내의 연구 결과에 의하면 점성재료를 가지는 고무를 이용하여 감쇠기를 만들고 소실비를 구한 결과 1보다 작은 0.35 정도로 나타났다.¹⁾ 따라서 미국의 점탄성 감쇠기로 인한 지진에 대한 건물의 응답 제어 효과는 크기 때문에 지진의 강도가 큰 강진 지역에서의 진동 응답을 감소시켜 주기 위하여 이용이 되어 왔다. 그러나 미국과는 달리 우리나라는 지진의 강도가 약하다. 따라서 요구되는 진동응답의 감소량도 작다고 할 수 있다. 그러므로 소실비가 작은 재료이지만 지진의 강도가 낮기 때문에 목표로 하는 진동 수준까지 제어할 수 있다. 지진에 대한 진동응답을 기준으로 할 때에 강진인 경우는 약진인 경우 보다 건물의 응답이 크게 되므로 요구되는 감쇠비가 크다. 따라서 소실비가 큰 점탄성 재료를 사용하여야 한다. 그러나 약진인 경우에는 건물의 응답이 작으므로 요구되는 감쇠비가 강진인 경우보다 작다. 따라서 요구되는 소실비가 클 필요가 없다.

본 논문에서는 위와 같은 배경하에 우리나라에서와 같이 지진이 약한 지역에서 적용이 될 수 있는 점탄성 감쇠기의 설계와 성능에 관한 연구를 수행하였다. 해석 과정으로는 첫째, 지진자료가 부족한 우리나라에 적합한 지진파를 국내의 코드와 Effective Peak Acceleration(이하 EPA)를 근거로 하여 결정한다.²⁾ 둘째, 지진이 강한 강진지역과 우리나라에서와 같이 지진이 약한 약진지역에서의 지진파를 기준으로 하여 건물의 응답인 감쇠비 별 스펙트럼을 작성한다. 이러한 스펙트럼을 분석하여 진동감소시 요구되는 감쇠비를 택한다. 셋째, 선택한 요구 감쇠비에 따른 감쇠기의 소실비를 적용하고 건물 모델을 설정하여 강진지역과 약진지역에서의 감쇠기를 설계하여 건물에 적용하여 응답감소를 비교한다.

2. 우리나라 지진파 작성

구조물의 내진이나 제진설계시 먼저 결정해야 하는 것은 건물을 설계할 지역의 지진위험에 대한 노출정도이다. 현재 국내에서 적용되고 있는 지진력으로는 우리나라를 지역에 따라 지진위험도를 표현한 지진구역도에서 위험도가 큰 지진구역에서 0.12를 제시하고 있다.⁴⁾ 최근 건설교통부(1997.12)에서는 내진설계기준에 대한 연구에서 지역계수를 약간 수정하는 것을 추진하고 있다. 이 내용에서는 현재 0.12에서 0.11로써 약간 완화된 값을 제시하고 있다.⁵⁾

내진설계시 사용되는 지진력은 그 지역에서 지금까지 기록된 지진을 기준으로 작성해서 사용하는 것이 당연하다. 그러나 우리나라는 기록된 지진의 자료가 지진력을 산정하거나 분석하기에 충분하지 않기 때문에 우리나라에서 발생한 지진을 가지고 지진력을 산정하기 위해서 적용시키는 것은 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 외국에서 보편적으로 사용하는 지진파 인공지진파를 만들고, 지진력의 크기와 관계있는 EPA를 적용시켜서 우리나라의 기준을 적용한 지진파를 만들어서 사용한다. 만드는 과정은 다음과 같다. 강진지역에서 발생한 지진파의 경우, 그 지진파를 주파수 영역에서 분석해서 EPA를 구한다. 구한 EPA 값을 우리나라의 기준이 되는 EPA인 0.12로 만들기 위한 계수를 구하기 위해서, 0.12를 구한 EPA값으로 나눈다. 이렇게 구한 계수를 지진파의 시간 데이터에 곱해서 우리나라에 적합한 지진파를 만든다. 그리고 인공지진파는 먼저 주파수 영역에서 인공지진파를 만든 후, 만든 지진파를 위와 동일한 방법으로 지진의 크기를 EPA값이 0.12가 되도록 조정해서 사용한다.⁶⁾ 이러한 EPA 방법으로 그림 1과 같은 강진에 해당되는 El Centro 지진

을 우리나라의 지진 크기로 수정한 것이 그림 2 와 같으며 인공지진파를 이용한 것이 그림 3 과 같다. 그림 2,3 에서와 같이 우리나라의 지진 크기가 작은 것을 확인할 수 있다.

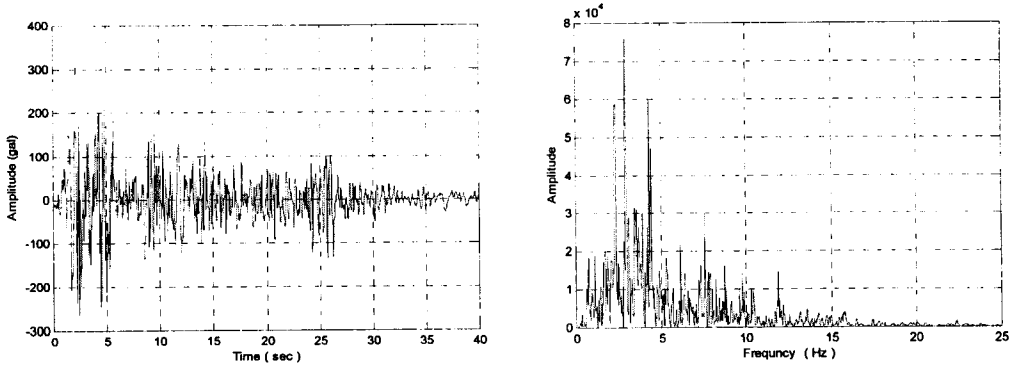


그림 1 El Centro 지진파의 시간영역과 주파수 영역

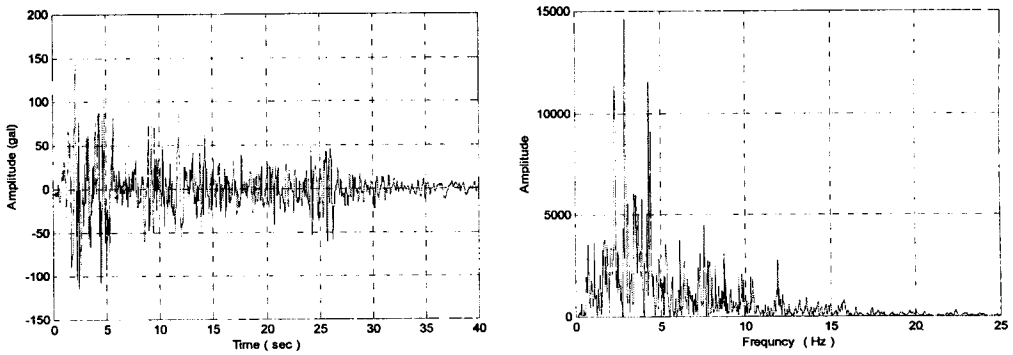


그림 2 우리나라 기준을 적용해 산정한 지진파의 시간영역과 주파수영역

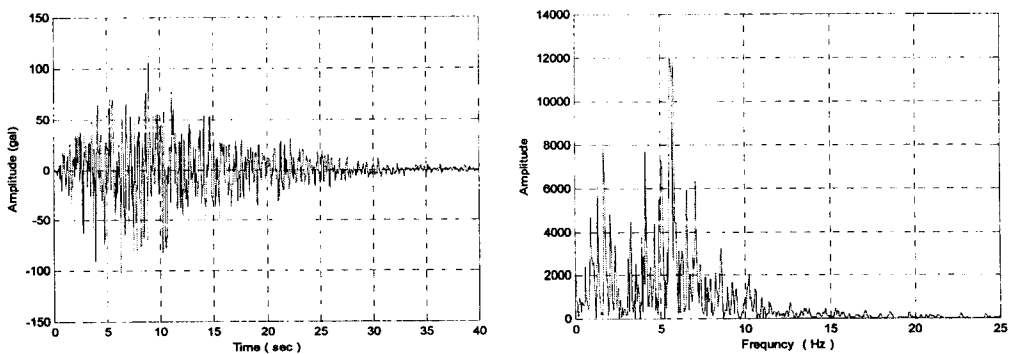


그림 3 인공지진파의 시간영역과 주파수 영역

3. 우리나라 지진파의 응답스펙트럼 분석

건물의 응답은 건물의 감쇠비에 의해서 많은 영향을 받는다. 건물의 감쇠비는 작으면 진동이 크게 발생하고 발생한 진동이 오랫동안 지속된다. 반대로 감쇠비를 키우면 건물의 진동을 줄일 수 있다. 그러나 인위적으로 건물의 감쇠비를 늘리는 것은 경제적인 면에서 한계를 가지고 있다. 따라서, 건물의 감쇠비 증가를 위하여 지진의 크기와 경제성을 동시에 고려해야 한다.

감쇠비별로 건물의 응답을 보기 위해서 위의 2 절에서 만든 지진파를 가지고, 각각의 감쇠비 별로 건물의 응답스펙트럼을 작성한다. 이때 감쇠비에 따른 응답을 비교해 보기 위해서 7가지의 감쇠비를 그려서 비교한다. 이러한 방법으로 강진에 해당하는 지진과 우리나라 기준에 맞게 수정한 지진으로 만든 응답스펙트럼이 그림 4 와 그림 5 이다. 그림 4 와 그림 5 는 El Centro 지진을 , 그림 6 은 인공지진파를 기준으로 작성한 것으로 안정된 응답을 보이는 감쇠비를 찾아서 제어목표로 정한다.

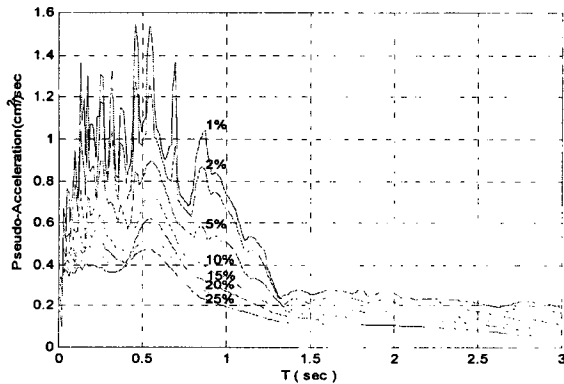


그림 4 El Centro 지진의 가속도 응답스펙트럼

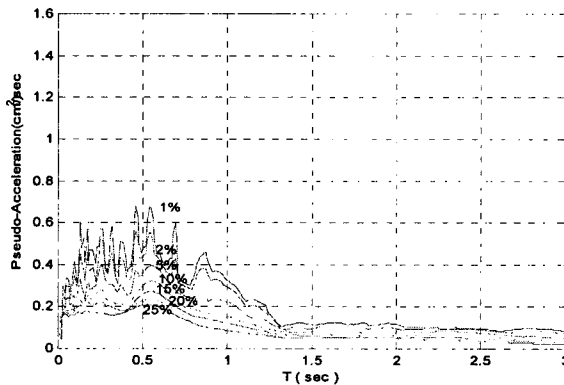


그림 5 우리나라 기준을 적용해 산정한 가속도 응답스펙트럼

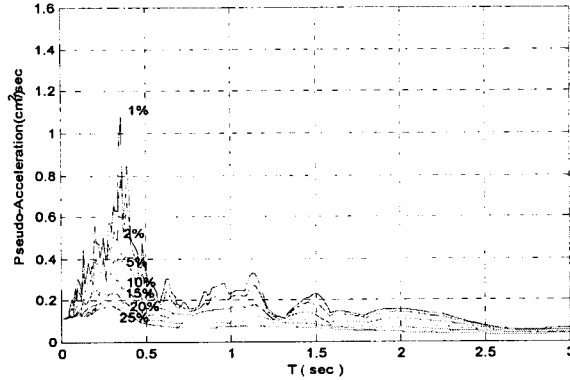


그림 6 인공지진파의 가속도 응답스펙트럼

위의 응답스펙트럼을 비교했을 때, 우리나라 기중에 맞게 조정된 응답스펙트럼은 전체적으로 응답이 감소되어 우리나라의 경우 5% 감쇠비의 응답 스펙트럼과 El Centro 지진의 25% 감쇠비의 응답 스펙트럼이 비슷한 가속도 응답을 보이는 것을 알 수 있다.

따라서 우리나라와 같은 중진지역과 강진지역의 지진력은 서로 다르기 때문에 상대적으로 우리나라와 같은 중진지역에서 5% 감쇠비는 강진지역에서 25% 감쇠비와 같은 응답을 보인다고 할 수 있다.

4. 점탄성 감쇠기 설계 및 성능 비교

위의 3 절에서 각각의 지역에서 구한 감쇠비를 적용하고, 중진지역의 경우는 우리나라의 방진 회사에서 생산되는 고무를 사용하고, 강진지역의 경우는 3M사에서 생산되는 고무를 적용해서 점탄성 감쇠기를 설계한다.

점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 i 번째 모드감쇠비 ξ_i 는 Soong 에 의하면, 다음 식(1)과 같이 표현된다.¹⁾

$$\xi_i = \frac{\eta}{2} \left(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_{si}^2} \right) \quad (1)$$

이때 ω_i 는 감쇠기를 설치하지 않은 건물만의 i 번째 고유진동수이며, ω_{si} 는 감쇠기를 설치한 건물의 i 번째 고유진동수이다. 그리고 η 는 감쇠기의 소실비이다.

원하는 건물의 모드감쇠비 ξ_i 를 3 절의 응답스펙트럼 분석에서 결정한 후, 위의 식(1)을 수정한 다음의 식(2)를 이용해서 건물에 설치할 감쇠기의 강성을 구한다.

$$K_{di} = \left(\frac{2\xi_i}{\eta - 2\xi_i} \right) K_{si} \quad (2)$$

이 때 K_{di} 는 감쇠기의 강성이고, K_{si} 는 건물만의 강성이다.

그리고 감쇠기의 강성(k')과 강성계수(G')와 감쇠기의 고무의 높이(h)를 이용해서 다음 식(3)에서와 같이 감쇠기의 면적(A)을 구한다.

$$A = \frac{k' h}{G'} \quad (3)$$

이 때 감쇠기의 면적 A 는 감쇠기 전체의 면적이 되며, 일반적으로 감쇠기는 고무를 2 개층으로 쌓인 형태를 사용하므로 감쇠기의 평면상 면적은 $A/2$ 가 된다.

다음은 위와 같은 방법을 적용해서 축소된 건물을 설계해서 건물에 설치된 감쇠기의 성능을 파악한다. 감쇠기 설계를 위해서 설계된 건물모델은 특정한 prototype 의 건물이 없기 때문에 본 연구에서 임의로 정해서 사용하였다. 건물의 모형은 1 층으로 재료는 현재 국내에서 생산되는 형강으로 크기는 $150 \times 75 \times 3.2 \times 4.5$ 으로 약축의 $I_y = 31.7 \text{cm}^4$ 을 가진 방향으로 사용했다. 높이는 건물의 일반적인 높이인 4m 와 한 스패의 길이를 3.6m 로 설정한 후, 이것에 $1/3$ 스케일을 적용해서 모형의 평면은 $120 \text{cm} \times 84 \text{cm}$ 이고, 높이는 135cm 이다. 이 때 스케일의 적용은 길이에 대해서만 적용을 하고, 건물의 메스는 건물의 주파수 대역과 지진의 주파수대역이 일치하는 저주파대역에서 약 5Hz 를 건물의 고유주파수로 정해서 건물의 질량을 정했다. 건물의 1 층 기둥은 바닥강판에 용접을 해서 단부를 강접합하고, 모든 기둥과 보의 접합부도 완전한 강접합으로 만들었다. 이 때 감쇠기는 건물의 기둥과 보에서 가셋 플레이트에 볼트로 연결시키고, 감쇠기의 위치는 대각으로 연결된 브레이싱 부재의 상부에 설치한다. 위와 같은 조건으로 만들어 유압식 가진기로 만든 진동대에 설치한 것이 다음의 그림 6 이다.

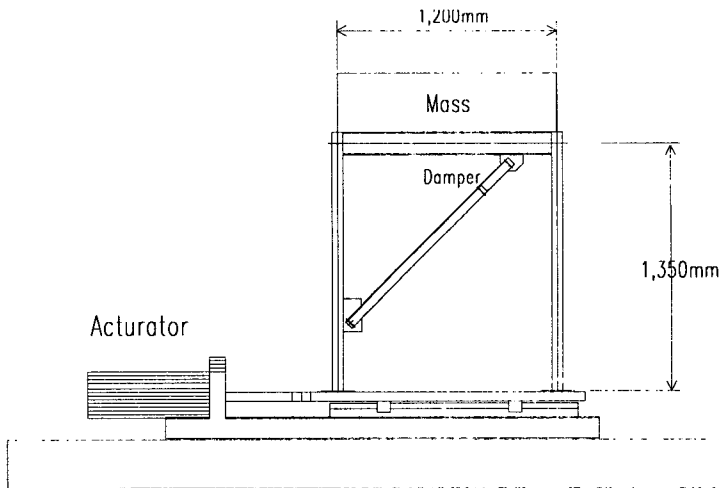
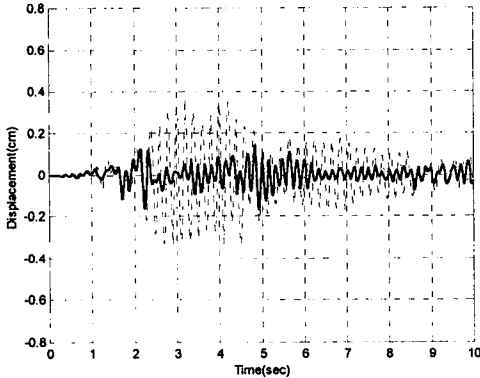


그림 7 진동대에 설치된 1 층 건물

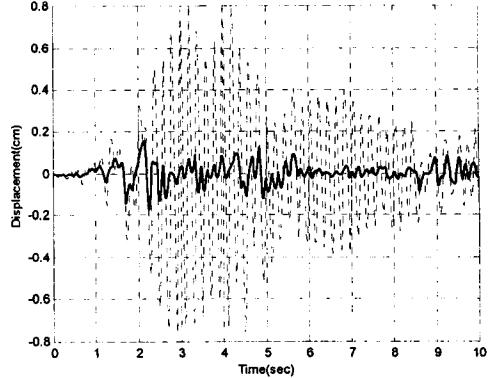
위와 같은 조건으로 구한 건물의 특성값은 건물 질량이 1.35tonf 이고, 건물의 강성은 1.36tonf/cm 이다.

다음은 앞에서 설계한 건물이 강진지역에 있을 때의 감쇠기의 설계와 중진지역에 있을 때의 감쇠기의 설계를 각각의 지역에서 생산되는 고무를 가지고 감쇠기를 설계했을 때의 성능을 비교한다. 먼저, 강진지역에서의 감쇠기 설계를 한다. 이 때 적용하는 감쇠기의 고무는 Soong 등이 실험한 감쇠기에 사용된 고무의 데이터를 적용한다.¹⁾ 이 고무는 강성계수가 9.84kgf/cm^2 이고, η 가 1.2 이다. 그리고 감쇠기 설계시 적용하는 감쇠비는 앞에서 구한 25%로 한다. 위의 식(1)-(3)을 적용하고 주어진 값들을 적용해서 감쇠기를 설계한다. 감쇠기를 설계했을 때 나온 전체의 면적은 88.6cm^2 가 된다. 다음은 중진지역에서의 감쇠기 설계이다. 이 때 적용하는 감쇠기의 고무는 현재 국내에서 생산되는 고무를 감쇠기에 사용해서 구한 데이터를 적용한다. 이 고무는 강성계수가 9.84kgf/cm^2 이고, η 가 0.35 정도이다. 적용하는 감쇠비는 5%로 한다. 감쇠기를 설계했을 때 나온 전체의 면적은 50cm^2 가 된다.

이렇게 설계한 감쇠기를 각각 건물에 설치한 후 각각의 지역에 맞는 지진을 가진력으로 건물의 응답을 구한다. MATLAB 을 사용해서 건물의 응답을 구하면 다음 그림 8 과 같다. 그림 8(a)는 중진지역에서 설계된 감쇠기의 설치전과 설치후의 건물의 응답을 보여주고 있으며, 그림 8(b)는 강진지역에서 설계된 감쇠기의 설치전과 설치후의 건물의 응답이다. 두 지역에 맞는 지진력과 감쇠기의 성능과 감쇠비를 적용해서 설계를 해서 건물에 감쇠기를 설치한 결과 두 건물의 응답은 거의 같은 것을 알 수 있다.



(a) 중진지역 응답비교



(b) 강진지역 응답비교

그림 8 중진지역과 강진지역에서 감쇠기 설치유무의 응답비교

감쇠기가 가지는 성능의 차이만큼 중진지역과 강진지역에서 입력되는 지진력의 크기에서 차이가 있으므로, 성능이 낮은 감쇠기로 중진지역에 설치했을 경우에 지진응답에 대한 제어효과를 얻을 수 있었다. 위의 결과는 실험에 앞서 수행된 해석결과이며, 현재 실험이 진행되고 있으며 실험결과는 추후 발표할 예정이다.

5. 결론

미국에서 개발되어 적용이 되어 온 점탄성 감쇠기는 지진이 강한 지역에서의 건물 응답을 감소시켜 주기 위하여 이용이 되어 왔다. 점탄성 감쇠기는 점탄성 재료의 전단변형으로 인한 응답 에너지의 소산으로 인하여 건물의 응답을 감소시켜 준다. 따라서 에너지 소산 능력이 큰 점탄성 재료의 개발이 핵심이다. 그러나 미국과는 달리 우리나라는 지진의 강도가 약하다. 따라서 요구되는 진동응답의 감소량도 작다고 할 수 있다. 그러므로 소실비가 커서 진동 감소의 성능이 좋은 점탄성 재료 이외에도 소실비가 낮은 고무와 같은 재료를 이용하여도 지진의 강도가 낮기 때문에 목표로 하는 진동 수준까지 제어할 수 있다.

이와 같은 배경 하에 지진이 강한 지역과 우리나라와 같이 약한 지역에서의 지진파를 기준으로 하여 감쇠비를 변화시켜 응답스펙트럼을 구하였다. 이러한 스펙트럼을 분석하여 강진지역과 약진지역의 건물에 요구되는 감쇠비를 구하여 약진지역에 필요한 감쇠비는 강진지역에 필요한 감쇠비보다 작다는 것을 정량적으로 분석하였다. 이러한 감쇠비와 기존 감쇠기의 특성치 및 실험으로 구한 고무 재료의 감쇠 특성치를 고려하여 점탄성 감쇠기를 설계하였다. 건물 모델에 설치하여 지진에 대한 감쇠기의 성능을 검증한 결과 약진지역에서의 고무 재료용 감쇠기의 제어 효과는 충분하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것이며, 유니슨 산업(주)의 연구비 지원에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 민경원, 호경찬, 황성호, 김두훈 “실물크기 점탄성 감쇠기의 동적특성” 1999년 한국지진공학회 춘계학술발표회
2. K.C.Chang, M.L.Lai, T.T.Soong, D.S.Hao and Y.C.Yeh (1993), "Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers", Technical Report NCCER-93-0009
3. 이동근, 홍장미, 김두훈 “면진장치가 설치된 건축구조물의 개선된 내진설계” 1999년 대한건축학회 춘계학술발표회
4. 한국지진공학회, “건축물의 내진설계”, 제 2 회 기술강습회, 1998
5. 건설교통부, “내진설계기준연구(II)”, 1997
6. 김승훈, 한상환, 이리형 “Nonstationary Random Progress 를 이용한 인공지진파 발생” 1999년도 한국지진공학회 춘계학술발표회