

# 방진용 고무를 이용한 가새형 감쇠기의 진동제어 실험연구

## Experimental Study on Vibration Control of Bracing Dampers using Rubbers

민 경 원\* 호 경 찬\*\* 이 성 경\*\* 김 두 훈\*\*\*

Min, Kyung-Won\* Ho, Kyoung-Chan\*\* Lee, Sung-Kyung\*\* Kim, Doo-Hoon\*\*\*

---

### Abstract

Vibration-resistant rubbers, whose elastic and shear behaviors are similar to viscoelastic materials, are used to make bracing dampers to reduce the building vibration. Experimental study is carried out to find the vibration characteristics of the dampers installed in the building model. The natural frequencies and modal damping ratios are obtained from the free vibration test and Fourier analysis. Shaking table test is performed to find the response behavior of the building model under earthquake loading. The present experimental study shows that the bracing dampers have the behavior of viscoelastic dampers, which increase the modal damping ratios and viscoelastic characteristics.

---

### 1. 서 론

지진 및 바람에 의한 건물의 진동을 감소시켜 주는 것은 건물이 지니고 있는 감쇠 능력 때문이다. 그러나, 이러한 능력은 건물의 경우 매우 작기 때문에 외부하중에 대하여 건물은 과도한 진동을 일으킨다. 따라서, 인위적인 점탄성 감쇠기(viscoelastic dampers)를 건물에 설치하여 감쇠 능력을 향상하여 진동을 감소시켜 주고 있다. 점탄성 감쇠기는 진동변형에 따른 에너지의 소산 능력이 뛰어난 점탄성 재료를 가새를 이용하여 건물 사이에 설치하는 원리를 이용하고 있다. 점탄성 재료로는 전단변형에 의한 전단강성 이외에 소산능력이 있는 실리콘 합성 재료, 또는 자연 및 합성고무가 널리 이용되고 있다.

동적하중을 받는 점탄성 재료에 발생하는 응력과 변형율에는 위상차이가 생기기 때문에 일반적으로 점탄성 재료의 동강성(dynamic stiffness)을 복소수 형태로 표현한다.

---

\* 인천대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

\*\* 인천대학교 건축공학과 대학원 석사과정

\*\*\* 유니슨산업(주) 기술연구소, 소장

이러한 복소 동강성의 실수부분은 변형에너지가 저장되는 저장계수(shear storage modulus)이며, 허수부분은 변형에너지가 소산되는 소산계수(shear loss modulus)이다. 따라서, 소산계수가 클수록 에너지 소산량이 커지게 되며, 저장계수가 클수록 건물에 부가되는 강성이 증가하게 된다. 이러한 강성과 점성을 동시에 가지고 있는 점탄성 재료를 건물의 사이에 가새를 이용, 설치하여 점탄성 감쇠기로 사용하고 있다. 이러한 경우에는 점탄성 감쇠기로 인하여 건물의 모드 감쇠비가 증가하는 효과를 가져오고 있다. 모드 감쇠비는 소산계수와 저장계수의 비, 즉 손실계수(loss factor)에 직접적인 관계가 있기 때문에 손실계수를 파악하는 것이 중요하다.

국내에서는 점탄성 감쇠기로써 감쇠효과가 높은 재료 개발이 이루어져 있지 않으나, 기계 방진을 목적으로 개발이 된 합성 고무에 대한 감쇠특성을 연구한 사례는 많다. 이러한 경우 손실계수가 대부분 0.5 이하이고, 건물과 같은 저주파수 대역에서 구한 것이 아니라 기계진동 같이 고주파수 대역에서 구한 것이다. 미국의 경우, 건물의 진동제어용 점탄성재료가 개발되어 손실계수가 1.0 이상인 제품들이 생산되고 있다. 따라서, 기계 방진용 합성 고무를 점탄성 감쇠기와 같은 형태로 건물 사이에 설치하는 가새형 감쇠기(bracing dampers)로 적용하였을 때, 저주파수 대역에서의 고무의 저장 및 소산계수 그리고, 손실계수를 파악하여 점탄성 감쇠기로써 건물의 진동제어에 대한 효율성도 검증할 필요가 있다.

본 논문에서는 현재 국내에서 생산되는 고무를 이용하여 점탄성 재료로서의 특성을 검증하고, 점탄성 감쇠기로 건물에 설치하였을 때의 진동제어 성능을 실험하고자 한다.

## 2. 고무의 동적특성 실험

고무와 같은 점탄성 재료는 단어 자체에 나타나 있듯이 에너지를 흡수하는 탄성과 에너지를 소산하는 점성을 가지고 있다. 이러한 성질은 저장계수  $k_s$ , 소산계수  $k_l$ , 손실계수  $\eta$ 로 나타나며, 다음 그림 1 과 같은 점탄성 감쇠기를 만들어 정상상태(steady-state)의 조화하중  $F$ 를 주어 고정된 조화진동수에서의 하중-변형 그림 2를 구하여 계수를 구할 수 있다. 하중  $F(t)$ 와 변형  $x(t)$ 은 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$F(t) = k_s x(t) + c \dot{x}(t) \quad (1)$$

윗 식에서 감쇠상수  $C$ 는 가력 조화진동수인  $\omega$ 에 관계하며  $\eta$ 는  $k_l / k_s$ 이다.

$$C = \eta k_s / \omega \quad (2)$$

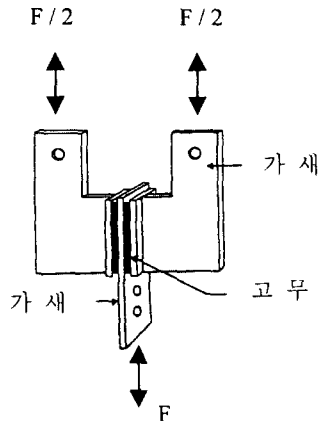


그림 1 점탄성 감쇠기의 일반적인 형태

위에서 고찰한 바와 같이 저장계수, 소산계수, 손실계수 등은 가력진동수에 의존 할 뿐만 아니라 주위의 온도 그리고, 고무의 면적 및 체적에도 관계가 있다. 따라서 본 실험에서는 실물 크기의 점탄성 감쇠기의 성능검증에 앞서 축소모형 감쇠기를 제작하여 동적 조화실험을 하여 동적 계수들을 파악하고, 이것을 바탕으로 본 연구진이 보유하고 있는 진동대 및 건물모형의 동적특성에 적합한 감쇠기를 설계, 제작하여 외부하중에 의한 진동제어 성능을 파악하고자 한다.

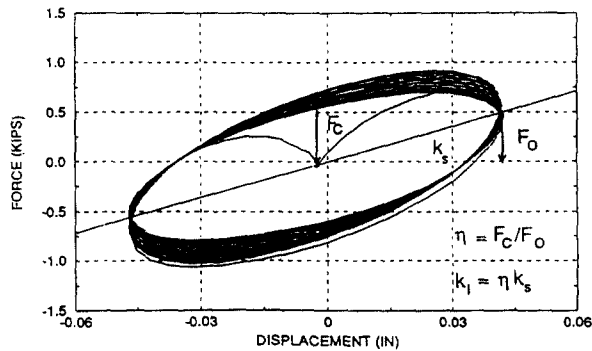


그림 2 조화하중을 받는 점탄성 감쇠기의 하중-변형 곡선

본 연구진이 보유하고 있는 진동대는 1/20 로 축소된 El Centro 지진 및 10Hz 이내의 지반진동이 가능하며, 최대 300kg 의 모형을 설치할 수 있도록 제작되었다. 다음 사진 1 과 같이 진동대 바닥의 크기는 90cm X 70cm 이며 상부에 높이 47cm 의 4 개 기둥으로 지지되어 있는 60cm X 60cm 의 바닥판 크기인 건물 모형이 설치되어 있다. 진동대의 가력방향은 1 방향이며, 건물의 고유진동

수는 3.51Hz 이고, 모드감쇠비는 0.28%로써 매우 작은 편이다. 따라서, 점탄성 감쇠기의 설치로 인한 모드감쇠비의 증가가 필요하다. 이러한 축소 진동대와 건물 모형에 적합한 점탄성 감쇠기를 설계하기 위해서는 전체 조건이 감쇠기로 인한 부가 강성의 증가가 가능한 작아야 한다는 것이다. 실제 건물에 설치되는 감쇠기는 건물의 강성에 비하여 매우 적기 때문에 부가 강성으로 인한 건물의 고유진동수와 모드의 변화가 작다.

점탄성 감쇠기의 동적특성은 점탄성 재료의 크기, 외부 온도, 가력 진동수 등에 따라 변화하기 때문에 축소 모형에 따른 동적 특성의 예측을 정확히 하기가 불가능하다. 따라서, 본 실험에서는 현재 생산하고 있는 합성고무를 이용하여 축소 건물 모형의 크기에 적합하게 가새형 감쇠기를 제작하여 조화하중 실험을 통하여 동적특성인 저장계수, 소산계수, 손실계수를 구하며, 다음 그림 3 과 같이 정적하중을 받는 상태에서의 강성식을 바탕으로 부가강성을 낮추어 축소 모형에 적합한 감쇠기를 제작하기로 한다.

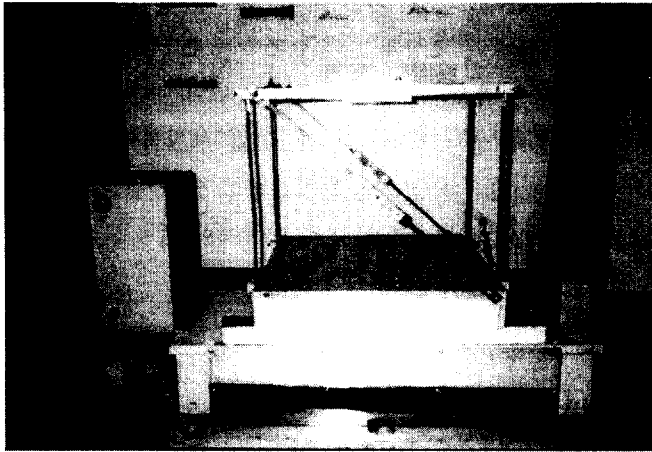


사진 1 감쇠기가 설치된 진동대 모습

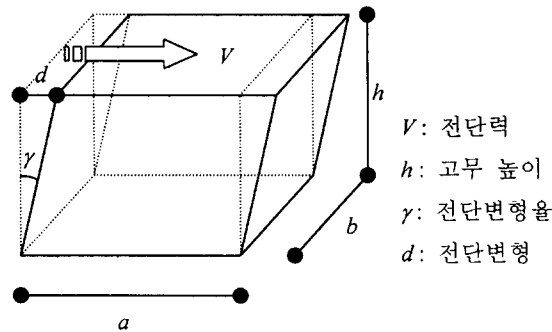


그림 3 정적인 하중을 받는 상태에서의 전단거동

$$k_{static} = \frac{V}{d} = \frac{abG}{h} \quad (3)$$

위 식에서  $G$ 는 고무의 전단계수이며, 고무의 면적  $ab$ 와 높이  $h$ 를 조정하여  $k_{static}$ 을 감소시킬 수 있다.

### (1) 1차 축소 모형

다음 그림 4와 같은 형태의 감쇠기를 제작하여 가진기에 설치하여 하중-변형 그림 5를 구하였다. 고무는 각각 다른 배합비율로 된 8 종류의 합성고무를 이용하였으며, 가력 조화진동수가 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 5Hz 일 때 고무의 동적변형율이 10%가 되도록 가진하였다. 실험시 주위의 온도는 20°C 정도를 유지하였으며, 가진시 고무의 온도상승을 피하기 위하여 목적진동수에서 6사이클 후 바로 진행하거나 대체로 1분 안에 수행하였다.

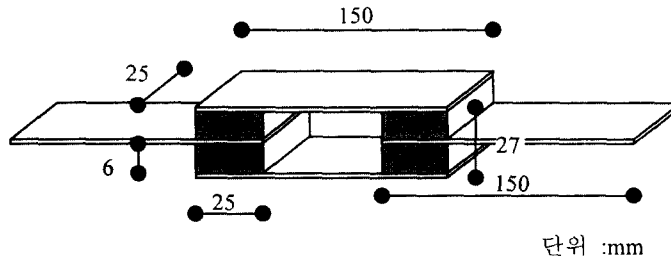


그림 4 1차 축소 모형의 감쇠기

다음 그림은 8 종류의 고무 중 “Cr”이라고 명명된 고무를 이용한 감쇠기의 하중-변형 곡선이다.

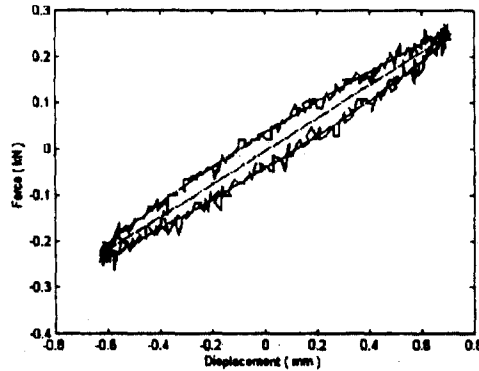


그림 5 “Cr” 감쇠기의 하중-변형 곡선

위 곡선에서 동적특성인 저장계수, 소산계수, 소실계수를 구할 수 있으며 결과는 다음 표 1 과 같다.

표 1 1차 축소모형의 동적특성 계수

동적특성 고무종류	저장계수( $G'$ ) ( $KN/mm^2$ )	소산계수( $G''$ ) ( $KN/mm^2$ )	소실계수 ( $G''/G'$ )
Blbr	0.0018	0.000576	0.32
Cr	0.0019	0.00029	0.154
Iir	0.00167	0.00058	0.348
Lrb	0.00153	0.000184	0.12
N2	0.00014	0.000035	0.25
Nrb	0.0012	0.000225	0.188
P4	0.00176	0.00048	0.273
Slrb	0.00189	0.001163	0.615

위의 표에서 저장계수의 값이 굉장히 커서 건물에 부가되는 강성의 증가가 매우 크다. 따라서 이러한 축소 모형은 건물의 강성 보다도 훨씬 커서 감쇠기로서 적합하지 못하다는 것을 알 수 있으며 소실계수의 값이 “Slrb”모형을 제외하고는 모두 0.5 이하여서 감쇠능력이 낮은 것을 확인할 수 있다.

## (2) 2차 축소 모형

1차 축소 모형에서의 큰 강성을 줄이기 위해서 고무의 배합 비율을 바꾸어 4 종류의 합성 고무를 만들었다. 다시 만든 축소모형으로 1차 축소 모형에서와 같은 가력하중을 가해서 동일한 실험을 실시했다. 2차 축소 모형을 대상으로 실험을 한 결과 고무의 동적특성은 다음 표 2와 같다.

표 2 2차 축소모형의 동적특성 계수

동적특성 고무종류	저장계수( $G'$ ) ( $KN/mm^2$ )	소산계수( $G''$ ) ( $KN/mm^2$ )	소실계수 ( $G''/G'$ )
Cr	0.0011	0.00019	0.17
Hdcr	0.00124	0.00015	0.12
Iir	0.00069	0.00011	0.16
Pnr	0.00069	0.000145	0.21

2차 축소 모형은 1차 축소모형과 형태가 동일하나 고무의 배합비율을 조정하여 강성을 다소 낮추는 데는 성공하였으나 여전히 축소건물 모형의 강성에 비하여 높아 실험으로 적합하지 못하였다.

### (3) 3차 축소 모형

1차와 2차 축소모형의 고무 배합에 의한 방법으로는 축소 모형의 강성을 줄이는데 한계가 있어서, 고무의 높이와 단면적을 조정함으로써 강성을 낮추는 방법을 이용하기로 한다. 건물의 고유주기는 낮은 진동수이므로 이 때의 동강성은 정적인 강성에서 유추할 수가 있기 때문이다. 그림 6 과 같이 고무의 단면적을 25mm × 25mm 에서 12mm × 6mm 로, 높이를 6mm 에서 12mm 로 변경하여 강성을 낮추었다.

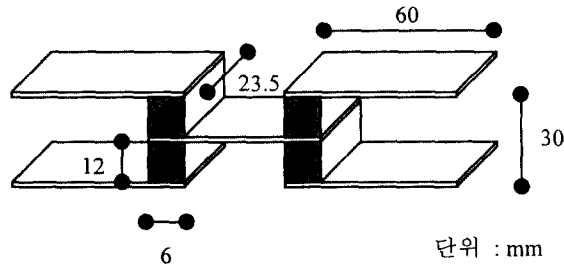


그림 6 3차 축소 모형의 감쇠기

그러나, 3차 축소모형과 낮은 강성을 가지는 감쇠기로는 1, 2차 축소모형과 같은 가진방법으로 저장강성과 소산강성을 구할 수 없기 때문에, 먼저 건물에 감쇠기를 설치하고, 자유진동과 조화진동을 가진해서 건물의 감쇠비와 강성을 구한 후, 역으로 저장계수, 소산계수와 손실계수를 구했다. 건물의 감쇠비와 증가된 강성은 각각 4.27%와 0.02533KN/mm 이며, 다음 식(4)를 이용하여 표 3 과 같은 동적 특성계수를 구하였다.

$$\xi_{SD} = \frac{\eta}{2} \cdot \frac{K_D}{K_{SD}} \quad (4)$$

이 때,  $\xi_{SD}$  는 감쇠기가 설치된 건물의 감쇠비,  $\eta$  는 소산비,  $K_D$  는 감쇠기의 강성,  $K_{SD}$  는 감쇠기가 설치된 건물의 강성이다.

표 3 3차 축소모형의 동적특성 계수

동적특성 고무종류	저장계수( $G'$ ) ( $KN/mm^2$ )	소산계수( $G''$ ) ( $KN/mm^2$ )	소실계수 ( $G''/G'$ )
Hdcr	0.00049	0.000068	0.1389

3차 축소모형의 실험결과 축소모형의 고유주기는 3.51Hz에서 5.66Hz로 바뀌어 감쇠기의 낮은 강성이 반영된 것을 알수있으며, 소실계수의 값이 0.1389이다.

### 3. 진동대 실험

가새형 감쇠기를 사진 1과 같이 건물에 설치하여 1/20로 축소된 El Centro 지진(NS 방향)을 입력하중으로 가한 진동대 실험을 수행하였다. 감쇠기 설치로 인하여 건물의 감쇠비가 0.28%에서 4.27%로 증가하여 그림 7과 8에 나타나 있듯이 제어효과가 뚜렷한 것을 알 수 있다.

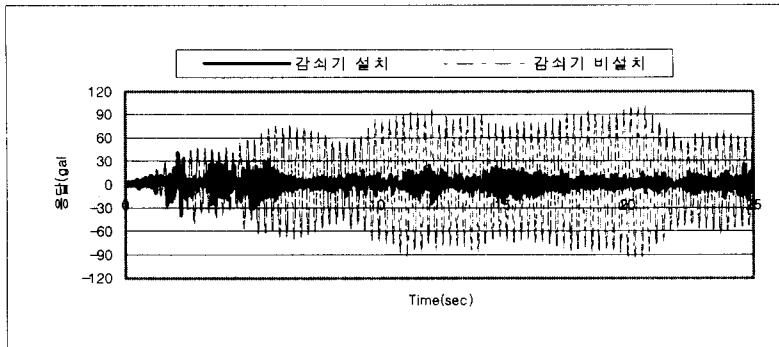


그림 7 축소모형의 지진응답(시간영역)

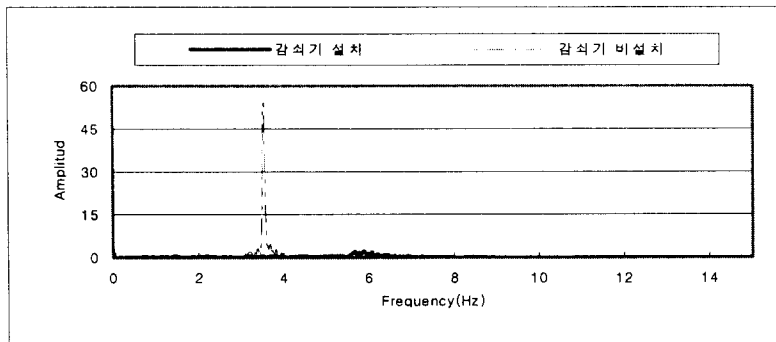


그림 8 축소모형의 지진응답(진동수 영역)



#### 4. 결론

국내에서 생산되는 합성고무를 이용하여 가새형 감쇠기를 설계, 제작하였으며, 축소 모형에 적합하도록 강성을 낮추었다. 조화진동에 의한 실험결과로서 감쇠능력의 척도인 손실계수가 0.5 이하로 낮아 일반적인 점탄성 감쇠기의 능력은 낮은 것으로 판단되었다.

가새형 감쇠기를 건물에 설치하여 자유진동 및 지진하중의 진동대 실험결과 모드 감쇠비의 증가로 인하여 응답제어효과는 탁월한 것으로 밝혀졌다.

앞으로 손실계수가 높은 점탄성 재료의 개발이 이루어지고, 이에 대한 점탄성 감쇠기로서의 동적 특성에 대한 실험 및 실용화에 대한 연구가 뒤따라야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술처의 특정연구개발사업의 연구비와 유니슨산업(주)의 지원에 의해서 이루어졌음을 밝히며, 이에 대해 감사의 뜻을 전합니다.

#### 참고문헌

1. 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.
2. Mario Paz (1991), "Structural Dynamics : Theory and Computation", Van Nostrand Reinhold, 3rd Edition.
3. Ray W. Clough, Joseph Penzien (1993), "Dynamics of Structure". McGraw-Hill, 2nd Edition.
4. C.T.Sun, Y. P.Lu (1995), "Vibration Damping of Structural Elements", Prentice Hall, Inc.
5. Daniel J. Inman (1994), "Engineering Vibration", Prentice Hall Inc.
6. R.H.Zhang, T.T.Soong (1989), "Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol.18.
7. 오순택, 김연태, 허택녕 (1994), "점탄성 감쇠기를 설치한 철골 구조물의 지진거동에 관한 수치해석적 연구", 한국 강구조학회 논문집 제 6 권 제 1 호.
8. 최현, 박건록, 김두훈, 이상조 (1997), "점탄성 재료의 동적특성 측정에 관한 연구", 한국소음진동 공학회지. 제 7 권 제 6 호.
9. K.S. M6604, "방진고무 시험방법".
10. K.S. M6665, "방진고무 재료의 동적성능시험 방법".