

# 적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진 성능에 관한 실험적 평가

## Experimental Evaluation of Seismic Performance of Laminated Elastomeric Bearing and Lead-Rubber Bearing

김 대 곤\*      이 상 훈\*\*      김 대 영\*\*\*      박 칠 림\*\*\*\*  
Kim, Dae Kon      Lee, Sang Hoon      Kim, Dae Young      Park, Chil Lim

### 국문요약

구조물의 내진 성능 향상을 위해 현재 종종 사용되어지고 있는 기초분리장치인 적층고무베어링과 납-고무 베어링의 내진 성능을 실험적으로 파악하였다. 베어링의 전단 변형률 또는 가해진 수직 하중이 클수록 베어링의 전단 강성은 감소하며, 가력 속도에 대한 영향은 무시할 만 하다. 베어링은 순수 압축력에는 강하며, 인장력에는 그 반대이다.

**주요어** : 적층고무베어링, 납-고무베어링, 압축 변형률, 인장 변형률, 전단 변형률, 가력 속도 효과,

### ABSTRACT

Experimental studies for the laminated elastomeric bearing and the lead-rubber bearing, those are often used to improve the seismic capacity of the structures recently, are conducted to evaluate the seismic capacity of the bearings. The shear stiffness of the bearings decreases as the shear strain amplitude or the constant axial load level increases, but not sensitive to the strain rates effect. Bearings are strong for the axial compression but weak for the axial tension.

**Key words** : laminated elastomeric bearing, lead-rubber bearing, compressive strain, shear strain, tensile strain, strain rate effect.

## 1. 서 론

적층고무베어링과 납-고무베어링의 특성을 살펴보고, 이들 면진 장치들의 설계법들을 외국 설계지침서들을 중심으로 조사한 다음, 일경간 이층 철골조를 중력방향 하중만을 고려하여 설계한 후, 이 철골조의 면진에 사용될 베어링들을 설계하였다.<sup>(1),(2)</sup>

고무는 프와송비가 약 0.5로써 변형진과 변형 후의 체적변화가 거의 없고 bulging 현상 등

거동이 매우 비선형적 임에도 불구하고 많은 연구자들이 매우 작은 변형상태와 선형-탄성 거동 등의 가정 하에 이들 베어링들의 역학적 특성들, 즉 강성, 강도, 그리고, 변형 등을 구하였으며 설계 기준집들은 이들 연구와 실험을 통한 보정치에 근거하여 면진 베어링의 설계기준을 마련하였다.<sup>(3)</sup> 그러므로, 우선적으로 실험을 통해, 설계된 면진 베어링들의 내진 성능을 검증한 후, 구조물의 설계시 그 효과를 충분히 반영하여, 실제 시공을 하는 것이 바람직하다.

본 논문의 목적은 일정 수직하중 하에서 수평방향 정현파와 반복하중(cyclic sine wave)에 대한 실험들을 수행하여 적층고무베어링과 납-고무베어링의 성능을 분석하여, 구조물을 이러한

\* 정희원 · (주)대우 건설기술연구소 선임연구원

\*\* (주)대우 건설기술연구소 연구원

\*\*\* (주)대우 건설기술연구소 선임연구원

\*\*\*\* (주)대우 건설기술연구소 소장, 공학박사

종류의 면진 장치들을 이용하여 면진 설계할 때 필요한 데이터 베이스의 일부를 구축하는 것이다.

각 수평방향 실험에서 고려된 변수들은 전단 변형을 크기 효과, 가력속도 효과, 수직하중 효과, 변위경로 효과, 그리고 정현파 하중 반복횟수 효과 및 시간경과 효과 등이다. 수평방향 실험뿐만 아니라 순수 압축, 인장실험을 통해서 면진장치들의 중력방향의 강도, 강성들도 구하였다.

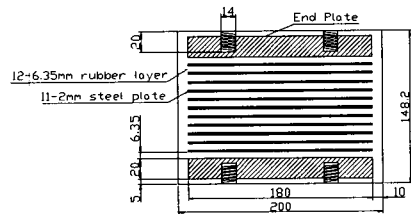
수직하중에 대한 수평 H형강의 휨변형을 최소화하기 위하여 같은 치수의 H 형강을 하나 더 덧붙임으로써 휨강성을 증가시켰다.

수평하중 가력을 위해 최대 50 tonf를 가할 수 있는 동적 가력기를 사용하였으며, 이 가력기의 최대 팔길이(stroke)는  $\pm 12.5\text{cm}$ 이다. 또한, 수직하중 가력을 위해 50 tonf 정적 가력기 2대를 실험체를 중심으로 양쪽에 각각 설치하였다.

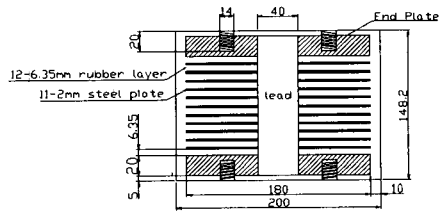
## 2. 면진장치 및 실험 장치

내진 설계되지 않은 일경간-이층 철골조의 내진 성능 향상에 사용될 적층고무베어링과 납-고무베어링을 각각 그림 1(a) 그리고 1(b)와 같이 설계하였다.<sup>(1),(2)</sup> 고무는 硬度  $60 \pm 5$ 의 고감쇠 천연고무를 사용하였다. 이들 원형 베어링의 형상계수는 약 7이며, 가해지는 설계 수직하중은 베어링 한 개당 약 20 tonf이다.

그림 2는 베어링의 성능을 알아보기 위한 실험 장치를 보여 준다. H  $400 \times 400 \times 13 \times 21$ 으로 베어링 상하 연결부분을 만들었으며, 이는 실제 건물의 기둥과 기초 또는, 실제 교량의 상부구조와 교각을 모사 한다. 또한, 수평하중을 전달하기 위해 같은 치수의 H 형강 2850mm를 베어링과 연결된 형강과 수평으로 용접하여 T字형을 만들었다.



(a) 적층고무베어링 상세도 (단위 : mm)



(b) 납-고무 베어링 상세도 (단위 : mm)

그림 1 설계된 면진 장치

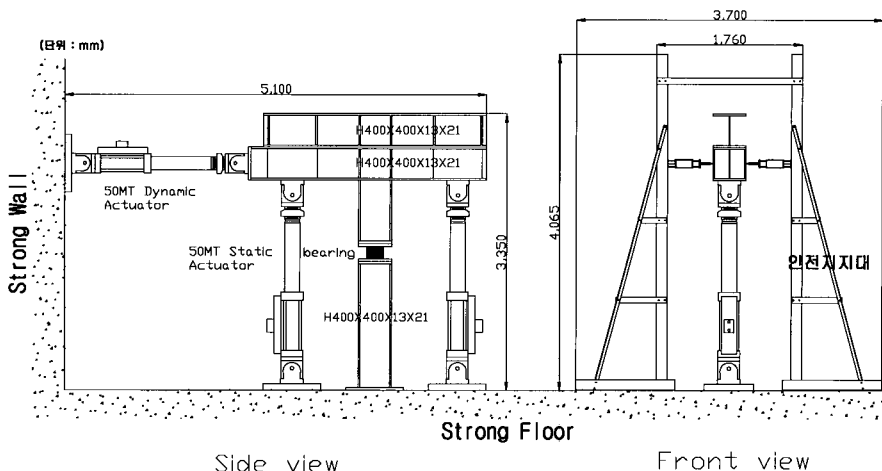


그림 2 실험 Set-Up

수직 가력기들은 T字형 frame의 수평을 유지하기 위해 수직변위를 연동시켜 가력하였다. 이는 수평방향으로 변위가 발생하였을 때 수평하중에 의한 모멘트가 생겨 실험체에 압축력 뿐만 아니라 인장력이 부분적으로 발생하는 것을 방지하기 위함이다.

베어링에 가해지는 전단력은 수평 가력기의 load cell로부터 측정하였고, 전단변위는 수평 가력기 내부에 있는 LVDT, 혹은 200mm strain type 외부 변위계를 이용해 측정하였다. 모든 실험에 걸쳐 변위 제어는 수평 가력기의 내부 LVDT를 사용하였다.

### 3. 전단실험

#### 3.1 전단 변형률 크기 효과

전단 변형률 크기효과 실험은 베어링에 20tonf와 2tonf의 일정한 수직하중을 정적으로 가한 상태에서 수행하였다. 고무의 전단 변형률 크기에 대한 변수를 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75%, 100%, 125%, 그리고, 150%로 설정하였다. 가력 방법은 이 전단변형률을 sine파 변위(전단 변형률)제어로써 점차 증가시켜가며, 각 변수당 2 cycle을 수평으로 가력하였다. 그림 3(a)는 가력속도가 0.02 Hz로 제어된 수평가력기 파형을 보여준다. 고무 전단변형률  $\gamma$ 의 정의는 식 (1)과 같다.

$$\gamma = \frac{\Delta}{T} \quad (1)$$

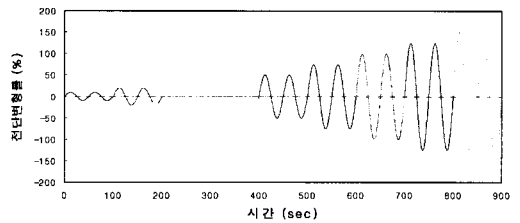
여기서,  $\Delta$ 는 베어링의 수평변위, 그리고  $T$ 는 총 고무 층의 두께 7.62 cm 이다.

그림 3(b)와 3(c)는 적층고무베어링과 납-고무베어링의 전단력-전단변위의 관계를 각각 보여준다. 그림 3(b)에서 관찰할 수 있듯이 적층고무베어링의 유효 전단강성은 전단변형률의 크기에 영향을 받는다. 적층고무베어링의 유효 전단강성  $K_{eff}$ 는 식 (2)에서 정의하였으며, 또한, 그림 4(a)에 나타내었다.

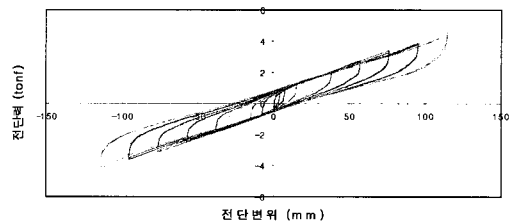
$$K_{eff} = \frac{F_{max} - F_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \quad (2)$$

여기서,  $F_{max}$ 와  $F_{min}$ 는 최대, 최소 전단력이며,  $\Delta_{max}$ ,  $\Delta_{min}$ 는 이들에 상응하는 전단변위 들이다.

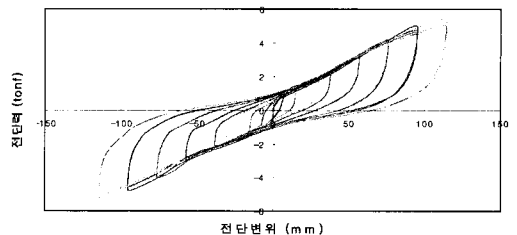
납-고무베어링의 전단력-전단변위의 관계는 그림 3(c)에서 관찰할 수 있듯이, 그 형상이 그림 4(b)처럼 기본적으로는 bi-linear의 성격을 띄지만, 전단변형률이 점차 증가할수록 hardening현상을 나타낸다.



(a) 변형률 제어



(b) 적층고무베어링

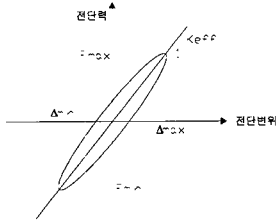


(c) 납-고무 베어링

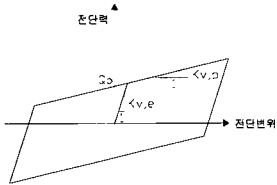
그림 3 전단 변형률 크기 효과

사진 1(a)와 1(b)는 납-고무베어링의 전단 변형전과 전단 변형후( $\Delta=11.43$  cm, 즉  $\gamma=150\%$ )의

모습을 촬영한 것이다. 베어링에 그려진 격자 무늬의 간격은 가로·세로 모두 3cm이다. 적층고무베어링의 변형 후 모습도 사진 1(b)와 같다.

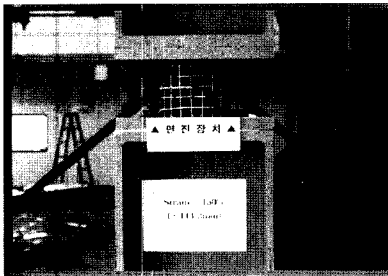


(a) 적층고무베어링

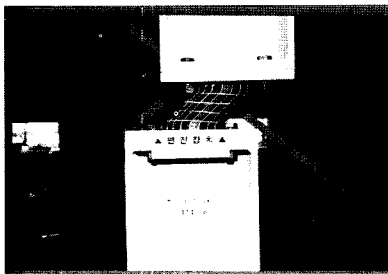


(b) 납-고무 베어링

그림 4 면진 장치의 이론적 이력곡선



(a) 변형전



(b) 변형후

사진 1 납-고무 베어링 전단 변형

그림 5는 적층고무베어링의 유효 전단 강성  $K_{eff}$ 의 각 전단변형률에 대한 변화를 보여준다. 유효 전단 강성은 전단 변형률이 증가할수록 감소하였다.

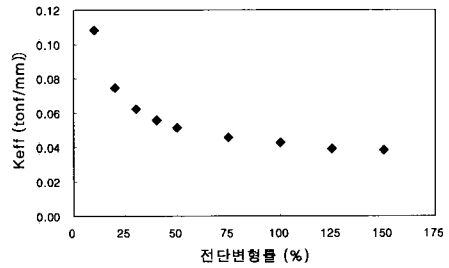


그림 5 적층고무베어링 유효 전단 강성의 전단 변형률에 대한 변화

그림 6은 전단변형률이 증가함에 따라 납-고무베어링의 한 cycle당 이력곡선의 면적  $W_D$ (에너지흡수)의 변화를 보여준다.

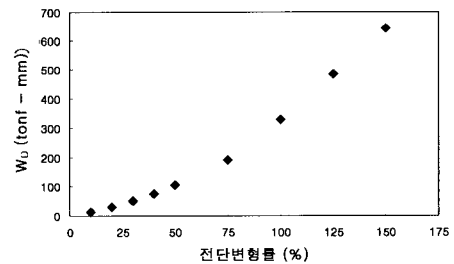
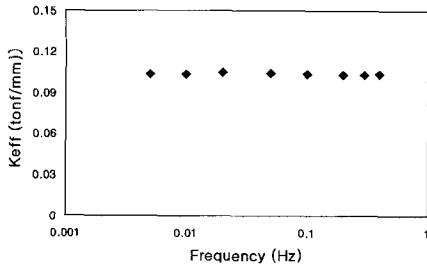


그림 6 납-고무베어링 에너지 흡수 면적의 전단 변형률에 대한 변화

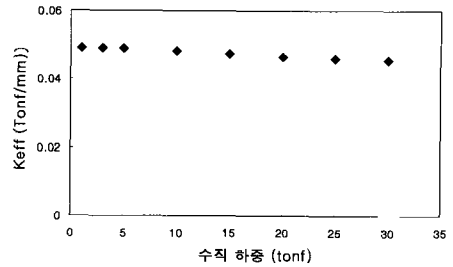
### 3.2 가력 속도 효과

면진 베어링의 가력 속도 효과를 알아보기 위해서 수평 가력기의 가력 주파수를 0.005Hz에서 0.4Hz 범위에서 전단 실험을 실시하였다. 이들 실험에서 수직하중의 크기는 20tonf, 그리고 베어링의 전단변위는 38.1mm( $\gamma=50\%$ )로 고정하였다.

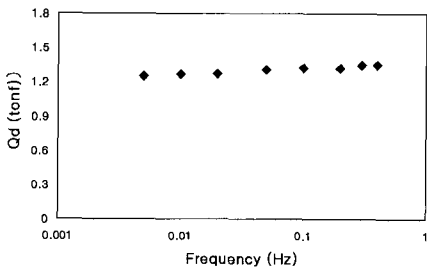
적층고무베어링의 유효전단강성  $K_{eff}$ 와 납-고무베어링의 전단변위가 0일 때의 전단력  $Q_d$



(a) 적층고무베어링

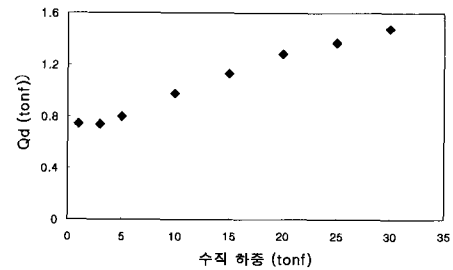


(a) 적층고무베어링



(b) 납-고무 베어링

그림 7 가력 속도 효과



(b) 납-고무 베어링

그림 8 수직하중효과

의 가력 속도 효과를 그림 7(a)와 7(b)에서 각각 보여 준다. 가력속도가 0.005Hz에서 0.4Hz의 범위에서는 적층고무베어링의 유효전단강성은 거의 일정하며, 납-고무베어링의 전단력  $Q_d$ 는 약 8.2% 증가하였지만, 그 효과는 크지 않은 것으로 판단된다.

### 3.3 수직하중 효과

베어링에 가해진 수직하중  $P$ 의 베어링의 전단강성의 효과를 살펴보기 위해서 최소  $P = 1 \text{ tonf}$ 에서 최대  $P = 30 \text{ tonf}$ 를 가한 상태에서 전단 실험을 실시하였다. 모든 실험에서 수평 가력 속도는 0.02Hz, 그리고 전단변위는 3.81cm ( $\gamma = 50\%$ )로 고정하였다.

그림 8(a)와 8(b)는 적층고무베어링의 유효전단 강성  $K_{eff}$ 와 납-고무베어링의 전단력  $Q_d$ 의 수직하중 효과를 각각 보여 준다. 수직하중이 1tonf에서 30tonf의 범위에서 적층고무베어링

의 유효전단강성은 7.2% 줄었지만, 사용하중 (service load)하에서 그 효과는 미비하리라 생각된다. 납-고무베어링의 전단력은 이 범위의 수직 하중하에서 상당히(98.7%) 증가하였다. Lindley는 steel plate들에 접착되어 있는 고무층에서의 압축응력은 베어링의 가장자리에서 0이고, 중앙에서 최대값을 가짐을 보여주었다.<sup>(4)</sup> 이 중앙에서의 최대압축응력이 납을 잘 구속(confine)하기 때문에 베어링에 가해진 수직하중이 클수록 납-고무베어링의 전단력  $Q_d$ 가 커짐을 그림 8(b)는 보여준다.

### 3.4 변위 경로 효과

지진파와 같은 불규칙파에 대한 베어링의 전단 강성 변화를 살펴보기 위해서 그림 9(a)와 같은 준-불규칙파(semi irregular wave)를 사용하여 전단실험을 실시하였다. 첫 번째 싸이클의  $\gamma = 5\% \sim 25\%$ , 그리고 두 번째 싸이클의  $\gamma = 10\% \sim 20\%$ 에서 가력의 방향을 순간적

으로 바꾸면서 베어링 전단강성의 변화를 살펴 보았다. 그림 9(b)와 9(c)는 적층고무베어링과 납-고무베어링의 이력 곡선을 각각 보여준다. 베어링의 unloading, reloading 강성은 이력곡선이 어디서 시작하고, 끝나는지에 상관없이 본질적으로 같음을 관찰할 수 있다.

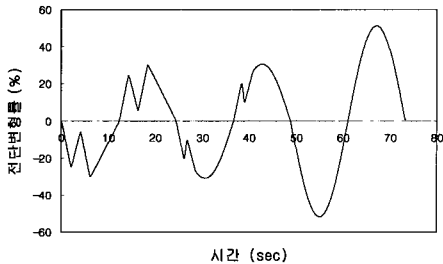
### 3.5 정현파 하중 반복횟수효과 및 시간경과효과

적층고무베어링의 중앙에 납을 삽입하여(납-고무베어링) 지진에너지 감쇠성능을 향상시키

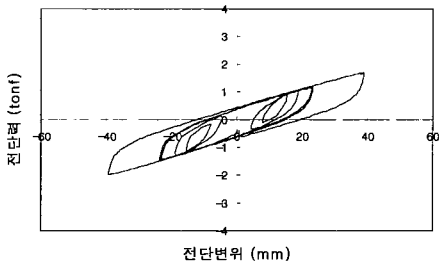
는 주된 이유 중의 하나는, 납은 소성 변형 상태에서 지진 하중과 같은 반복하중에서도 피로하지 않는다는 사실을 들 수 있다.<sup>(5)</sup> 따라서, 이러한 납의 특성을 이용한 베어링은 보다 감쇠 성능을 높이면서도, 오랫동안 그 효과를 지속시킬 수 있는 장점을 지니게 되는 것이다.

그림 10(a)와 10(b)는 납-고무 베어링의 정현파 하중 반복 횟수가 2번일 때와 10번일 때의 이력곡선을 각각 보여준다. 이 실험에서는 중력 하중  $P=20 \text{ tonf}$ , 수평 가력 속도  $f=0.02 \text{ Hz}$ , 그리고 전단변위는  $3.81\text{cm}$  ( $\gamma=50\%$ )로 고정하였다.

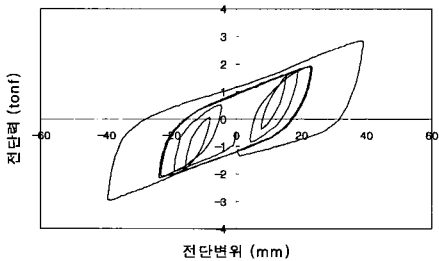
본 논문의 3.1절에서 행한 실험을 1주일 뒤 다시 실시하여 시간이 경과함에 따른 베어링의 성능 변화를 살펴 보았다. 두 실험을 비교한 결과, 1주일사이의 또 다른 실험이 계속 진행되어, 여러 극한 상태의 변형을 경험하였음에도 불구하고, 이력곡선의 형상이 거의 일치함을 관찰할 수 있었다.



(a) 준-비정현파

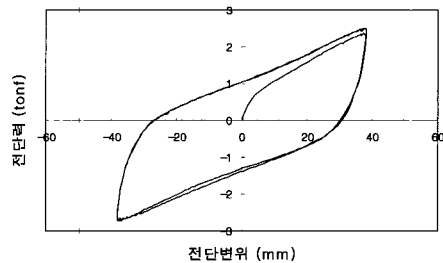


(b) 적층고무베어링

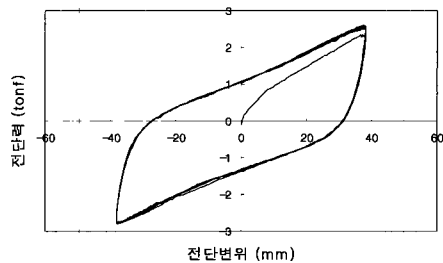


(c) 납-고무 베어링

그림 9 변위 경로 효과



(a) 반복횟수 : 2회



(b) 반복횟수 : 10회

그림 10 정현파 하중 반복 횟수 효과

### 3.6 에너지 흡수

베어링들의 전형적인 전단력-전단변위 관계를 그림 3(b)와 3(c)에서 볼 수 있다. 각 곡선들의 면적은 이력감쇠(hysteretic damping)에 의해서 한 사이클 동안 흡수한 에너지를 나타낸다. 이 그림들로부터 흡수된 에너지(hysteresis loop area)  $W_D$ 는 전단변형이 커짐에 따라 증가함을 알 수 있다. 이 흡수된 에너지는 흔히, 등가 점탄성 감쇠 계수  $\xi$ 로 표현되어 진다.<sup>(6)</sup>

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (3)$$

여기서, 보존되는 탄성 에너지  $W_S$ 는 식(4)로 나타내어진다.

$$W_S = \frac{1}{2} K_{eff} \Delta^2_{max} \quad (4)$$

그림 11은 수직하중  $P=1\text{ tonf}$ 과  $P=20\text{ tonf}$ 일 때의 각각에 대한, 전단 변형률의 증가에 따른 점탄성 감쇠 계수  $\xi$ 의 변화를 보여준다. 이때, 수평방향 가력속도는  $0.02\text{Hz}$ 로 일정하게 유지하였다. 그림 11에서 보는 바와 같이, 감쇠 계수  $\xi$ 는 전단변형률이 증가할수록 감소한다.

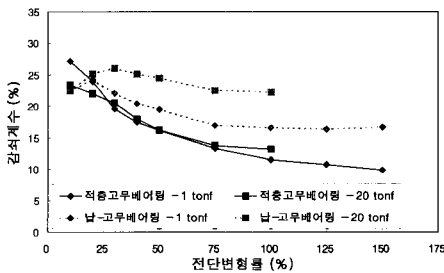


그림 11 전단변형률에 대한 감쇠계수

그림 12는 수평방향 가력속도  $f=0.02\text{Hz}$ , 그리고 베어링의 전단변형률  $\gamma=50\%$ 일 때, 여러 수직하중에 대한 적층고무베어링과 납-고무 베어링의 점탄성 감쇠계수  $\xi$ 의 변화를 나

타내준 것이다. 적층고무베어링의 감쇠계수  $\xi$ 는 중력방향하중의 크기에 민감하게 반응치 않지만, 납-고무베어링의 경우 수직하중이 클수록 납에 대한 구속(confinement) 효과가 커져서 감쇠계수  $\xi$ 도 커짐을 그림 11과 그림 12에서 볼 수 있다.

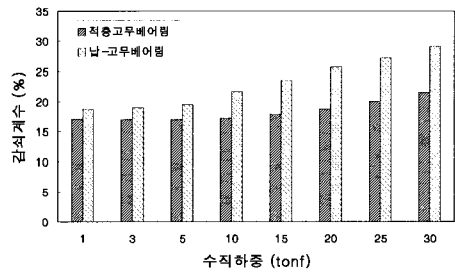


그림 12 수직하중효과

그림 13은 베어링의 전단 변형률  $\gamma=50\%$ , 그리고 수직하중  $P=20\text{ tonf}$ 일 때의 여러 수평방향 가력속도에 대한 점탄성 감쇠계수  $\xi$ 의 변화를 보여준다. 베어링의 점탄성 감쇠계수  $\xi$ 는 가력속도가  $0.005\text{Hz}$ 에서  $0.4\text{Hz}$ 의 범위에서 일정함을 관찰할 수 있다.

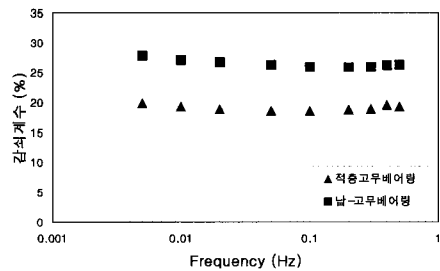


그림 13 가력속도 효과

## 4. 압축-인장 실험

베어링의 압축강성을 구하기 위해 그림 2의 50MT 동적 가력기를 떼어내고, 2개의 수직 50MT 정적 가력기 만으로 순수 압축-인장 실험

험을 실시하였다. 변위는 최대 측정 변위값이 50mm인 strain type 변위계를 4개 이용하여 측정하였다. 그림 14(a)와 14(b)는 적층고무베어링과 납-고무베어링의 압축-인장 응력과 변형률의 관계를 보여주며, 사진 2(a)와 2(b)는 납-고무베어링의 압축, 인장 변형이 최대에 이르렀을 때의 모습을 각각 보여준다. 적층고무베어링의 변형모습도 사진 2와 같다. 압축강성  $k_c$ 는 기본재료역학 이론인 식 (5)로 부터 구할 수 있다.

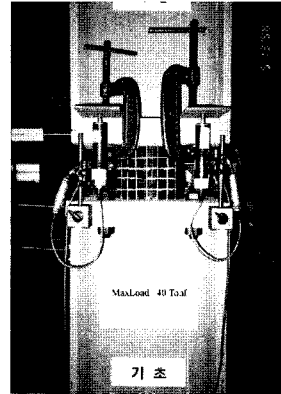
$$k_c = \sum_{i=1}^n \frac{E_c A}{t_i} = \frac{E_c A}{T} \quad (5)$$

여기서,  $t$ 는 고무 한개층의 두께,  $n$ 은 총 고무층의 수,  $A$ 는 압축하중이 가해진 면적,  $T$ 는 총 고무층의 두께, 그리고  $E_c$ 는 압축상태의 apparent Young's modulus인데, 베어링의 형상에 관계가 있으며, 영국 BE 1/76 설계규준집에서는 적층고무베어링 실험치에 근거한 보정치를 도입하여 식 (6)을 제시하였다.

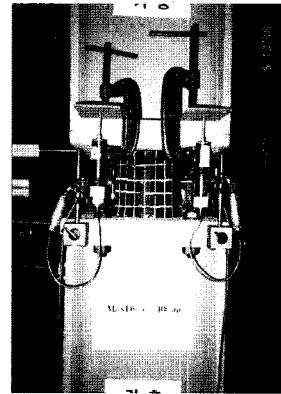
$$E_c = E(1 + 2 \kappa S^2) \quad (6)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수로, 이론적으로 천연고무가 등방성(isotropic) 재료라고 가정했을 때 프와송비가 약 0.5 이므로 전단계수  $G$ 와는  $E=3G$ 인 관계가 있으나, 고감쇠 첨가재등을 넣은 고무는 硬度에 따라 다소 부등방성(anisotropic) 재료의 특성을 보이므로 일반적으로  $E=3.8G \sim 4.4G$ 인데, 1991년 AASHTO Guide Specification에서는  $E=4G$ 로 가정하고 있다.<sup>(7)</sup>  $\kappa$ 는 실험에 근거한 고무의 硬度에 따른 보정계수, 그리고  $S$ 는 베어링의 형상계수이다.

그림 5에서 관찰할 수 있듯이 베어링의 전단강성 또는 전단계수  $G$ 는 전단변형률에 따라 그 값이 변한다. 따라서 구조해석시 어떤 전단변형률을 기준으로 전단강성 또는 전단계수를 사용할지 구조 기술자에게 공학적 판단을 요구한다. 흔히 전단변형률  $\gamma=50\%$  일 때를



(a) 압축변형



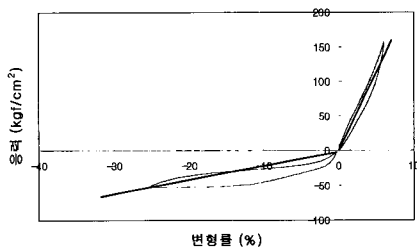
(b) 인장 변형

사진 2 인장-압축 실험

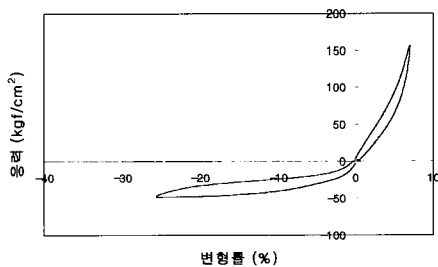
기준으로 전단강성 또는 전단계수를 산정하거나, 또는 전단변형률 27%와 58%지점을 기준으로 구할 수 있다.<sup>(8)</sup> 본 논문에서는 그림 3(b)의 전단력-전단변위 관계로부터 전단응력-전단변형률의 관계를 구한 후 전단 변형률 27%와 58%를 연결하는 기울기를 전단계수로 채택하였으며, 그 값은 약  $G=10.34 \text{ kgf/cm}^2$ 이므로  $E=4G$ 의 관계로부터  $E=41.36 \text{ kgf/cm}^2$ 를 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용된 고무의 硬度가  $60 \pm 5$ 인 경우  $\kappa$ 는 약 0.55이며,  $S$ 는 약 7.0이므로 식 (6)으로부터  $E_c=2270 \text{ kgf/cm}^2$ 를 얻을 수 있으며, 마지막으로 식 (5)로부터 압축강성  $K_c=75838 \text{ kgf/cm}$ 를 얻을 수 있다. 그림 14(a)와 14(b)는 각각 적층고무베어링과



납-고무베어링의 압축, 인장변형률에 대한 압축, 인장 응력의 관계를 보여주고 있다. 이들 그림에서 +y축이 압축응력이고, -y축이 인장응력이다. 또한, 그림 14(a)에 식 (6)으로부터 구한  $E_{\text{값}}$ 도 표시하였다. 본 연구에서 행한 실험치와 식 (6)은 잘 일치함을 알 수 있다. 인장강성(원점에서 최대점을 연결한 선)은 약 7000kgf/cm로써 압축강성의 약 10.8%에 불과하므로 베어링은 압축하중에는 강하고 인장하중에는 약함을 알 수 있다.



(a) 적층고무베어링



(b) 납-고무 베어링

그림 14 압축-인장 실험 결과

## 5. 결 론

### 5.1 적층고무베어링

1. 고무의 에너지 흡수효과 때문에 유효전단강성  $K_{\text{eff}}$ 는 전단 변형률이 증가할수록 감소한다.
2. 가력속도, 수직하중, 변위경로, 하중반복횟수 및 시간경과는 전단 거동에 별 영향을 미치지 않는다.

3. 등가 점탄성 감쇠계수는 전단변형률이 증가함에 따라 감소하나 수직하중의 크기나 가력속도에는 거의 영향을 받지 않는다.
4. 압축하중에는 강하고 인장하중에는 약하다.

### 5.2 납-고무베어링

1. 가력속도가 빨라질수록 에너지 흡수 면적  $W_D$ 와 전단력  $Q_d$ 는 증가한다.
2. 납은 피로(fatigue)에 잘 견디기 때문에 하중 반복횟수가 증가하더라도 거동이 안정적이다.
3. 수직하중이 큰 경우에는 납에 구속효과(confinement)를 제공하기 때문에  $Q_d$ 와  $\xi$ 를 증가시킨다.
4. 압축하중에 강하고 인장하중에 약하다.

## 감사의 글

본 연구에 사용된 적층고무베어링과 납-고무베어링은 '유니슨산업(주)'에서 제작되었으며, 본 연구를 지원해준 '유니슨 기술연구소'의 김두훈 소장님, 정민기 주임연구원께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김대곤, 이상훈, 안재현, 박칠림, "내진 설계되지 않은 철골조에 사용될 면진장치", 한국강구조학회지, 제10권, 제2호, 1998.
2. 김대곤, 이상훈, 안재현, 박칠림, "면진장치 적용 전, 후의 철골조의 내진 성능 평가", 한국지진공학회 논문집, 제2권, 제1호, 1998년 3월, pp. 47-62.
3. NCHRP, *Bridge Bearing*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1977.

4. Tyler, R. G., "Rubber bearings in base-isolated structures-a summary paper," *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 24, No. 3, September, 1991, pp. 251-274.
5. Skinner, R. I., Robinson, W. H., and McVerry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, 1993.
6. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995, 729pp.
7. AASHTO, *Revision to the Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, June 1991, 1998.
8. KS F4420, "교량 지지용 탄성받침", 1998.