

## 적층고무베어링의 동적 특성평가

### Dynamic Property Evaluation of Lead Rubber Bearing by Shear Loading

이 경 진\*   김 갑 순\*\*   강 태 경\*\*   서 용 표\*   이 종 림\*\*\*  
Lee, Kyung-Jin   Kim, Kap-Sun   Kang, Tai-Kyung   Suh, Yong-Pyo   Lee, Jong-Lim

#### ABSTRACT

In these days, The base isolation system is often used to improve the seismic capacity of the structures instead of conventional techniques of strengthening the structural members.

The purpose of this study is to evaluate dynamic properties and mechanical characteristics of the 10tonf-LRB(Lead-Rubber Bearing).

Experimental studies were performed to obtain the hysteretic behavior, effective shear stiffness( $K_{eff}$ ), equivalent damping( $H_{eq}$ ), capacity of energy dissipation( $W_D$ ) of six 10tonf-LRB. Especially, in this study, the response of the LRB for high loading frequency(0.5Hz~3.0Hz) was estimated.

The effective shear stiffness of the LRB decreases and the capacity of energy dissipation increases as the shear strain amplitude increases. But the shear behavior of the LRB is not affected sensitively by loading frequency.

Key words : Lead-rubber bearing, dynamic property, Shear strain

#### 1. 서 론

1995년 일본의 고베 지진과 1997년 터키 이즈미(Izmit) 지진, 연이은 대만의 1999년 지지(Chi-Chi) 지진 이후 우리 나라에서도 지진에 대한 대비를 체계적으로 수립해야 할 필요성이 제기되고 있다. 우리 나라에서는 홍성 지진(1978. 10. 7), 백령도 지진(1995. 7. 24), 영월 지진(1996. 12. 13), 경주 지진(1997. 6. 26)과 같은 중소규모의 지진활동이 최근 증가 추세에 있어 지진재해로부터 안전지대가 아님을 인식하게 되는 계기가 되고 있다.

지진동이 구조물의 기초에서 상부로 전달되는 것을 최소화하기 위해 구조물에 면진장치를 도입하고 있다. 면진장치의 원리는 구조물의 기초와 지반사이에 수평방향으로 유연한 재료를 설치하여 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우세한 진동수 영역 밖으로 이동시켜 상부 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시키고, 감쇠능력의 증가를 통해 지진에너지를 흡수, 분산시키는 개념이다.

면진장치의 한 종류인 적층고무베어링(Lead Rubber Bearing)은 기기나 구조물의 바닥과 기초 사이

\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국전력공사 전력연구원 연구원, 정회원

\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 공학박사, 정회원

에 수평운동 및 비틀림에 대하여 저항력이 크고 수직방향 강성(Stiffness)이 매우 큰 베어링(Bearing)을 설치하여 기기나 구조물에 전달되는 지진력을 감소시키는 장치로서 원전기기, 원전구조물에서의 적용을 위하여 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>(1) (2)</sup>.

본 연구에서는 10ton 용량(외경 15cm)의 소형 적층고무베어링(Lead Rubber Bearing)을 사용하여 특성평가를 수행하였다. 일반적으로 납을 삽입하여 감쇠값을 높인 고감쇠 적층고무베어링은 천연고무와 철판을 교대로 적층시킨 적층베어링과는 달리 매우 복잡한 비선형거동을 나타내기 때문에 특성치를 단순 설계변수로 나타내기 어렵다. 납을 삽입한 적층고무베어링의 특성을 평가하기 위해 10tonf의 수직하중이 재하된 경우에 대하여 수평전단시험을 수행하여 가진 진동수에 따른 응답특성과 수직방향 재하하중의 크기에 따른 응답특성평가를 수행하였다.

## 2. 면진장치 및 성능 시험장치

### 2.1 면진장치 시험체

적층고무베어링의 특성평가에 사용하기 위해서 10ton 용량의 LRB 6개를 제작하였고(그림 1 참조), 시험체에 사용된 고무의 전단탄성계수는  $7.528 \text{ kg/cm}^2$ , 납의 항복강성은  $84.5 \text{ kg/cm}^2$ 이며, 주요 제원은 표 1과 같다<sup>(2)</sup>.

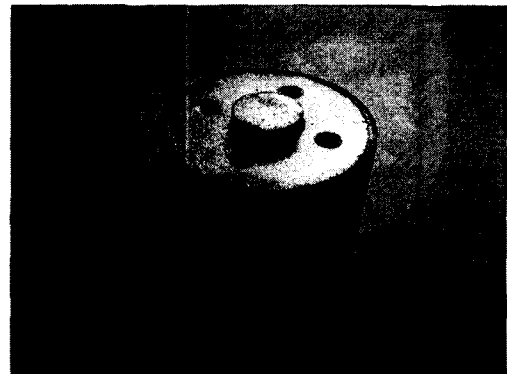
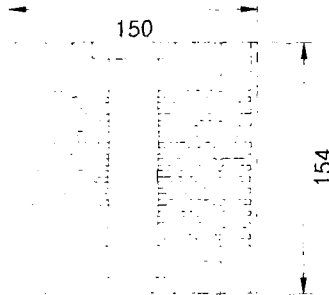


그림 1. 10 ton 용량 적층고무베어링 도면 및 형상

표 1. 시험용 적층고무베어링 주요 제원<sup>(2)</sup>

항 목	제 원
설계연직하중	10 ton
외경/내경	154 / 30 mm
전체높이(상하부 Plate 제외)	155 mm
고무층	4 mm × 14층 = 56 mm
강판층	3 mm × 13층 = 39 mm
납봉의 크기(단면적)	$\phi 30 \times 135 \text{ mm}(7.07 \text{ cm}^2)$
1차 형상계수	7.75
2차 형상계수	3.1

## 2.2 성능시험 장치

적층고무베어링의 특성평가에 사용된 시험장치의 개념도 및 설치모습은 그림 2에 나타난 바와 같다. 시험장치는 수직/수평방향으로 각각 1대씩 설치된 2대의 유압가력기(Actuator)와 가력장치 설치를 위한 철판구조물로 구성되어 있다. 철판구조물은 상부 철판보를 통하여 반력벽과 일체를 이루게 설치하였다. 수직/수평방향 유압가력기의 최대용량은 각각 25tonf 이고, 최대 스트로크(Stroke)는  $\pm 250\text{mm}$  이다. 수평전단시험 수행중에 적층고무베어링의 상부판과 하부판이 평행을 유지하고 수직방향 재하하중을 충실히 전달할 수 있도록 하기 위하여 철판기둥 하부에 충분한 강성(Stiffness)을 가진 원통형 구조물(Cylinder)을 제작하여 고정시키고, 적층고무베어링 하부에 철판 Jig Plate를 부착하였다. 하부 철판 Jig Plate에 수평방향 유압가력기를 부착하여 적층고무베어링의 전단변형을 제어하였다. Jig Plate 하부에는 슬라이딩 베어링(Sliding Bearing)을 설치하여 수평방향 가력시 마찰력을 최소화시켰다.

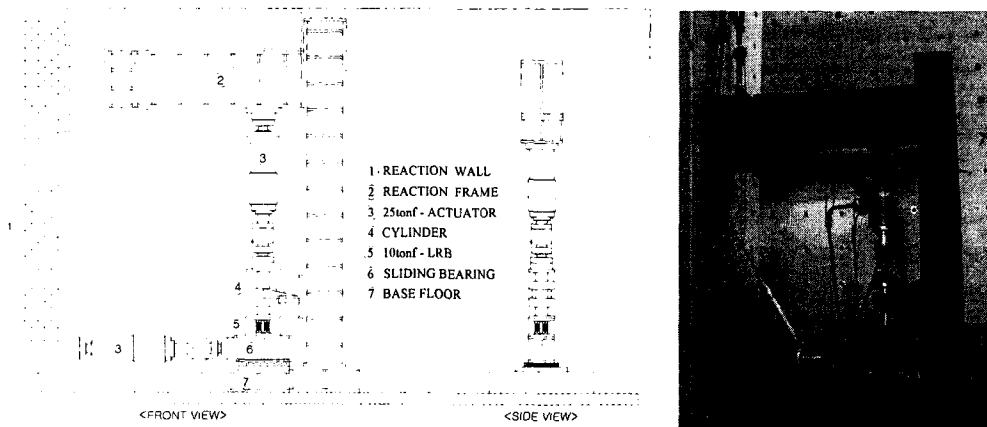


그림 3. 성능시험장치 개념도 및 설치모습

## 3. 수평전단시험

### 3.1 시험방법

본 시험에서는 가진 진동수 변화에 따른 수평전단시험과 수직하중 변화에 따른 수평전단시험을 수행하였다. 진동수 변화에 따른 수평전단시험에서는 수직방향하중을 10 tonf 로 일정하게 하고 수평방향의 가진진동수를 0.5 Hz, 1.0 Hz, 2.0 Hz, 3.0 Hz 로 변화시키면서 시험을 수행하였다. 이 경우 고무의 최대 전단변형율은 200%로 제한하였다.

수평 가진방향의 입력자료로서 사용한 변위-시간 이력곡선은 그림 4에 나타난 바와 같고, 본 시험에 앞서서 적층고무베어링 1개를 사용하여 예비시험을 수행하고 본 시험을 수행하였다. 그림 5는 시험장치에 적층고무베어링을 장착하여 수평전단시험을 수행하는 모습을 나타낸 것이다.

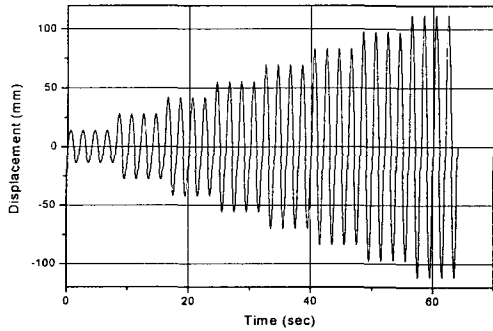


그림 4. 수평가진방향의 변위-시간 이력곡선(가진 진동수 0.5 Hz)

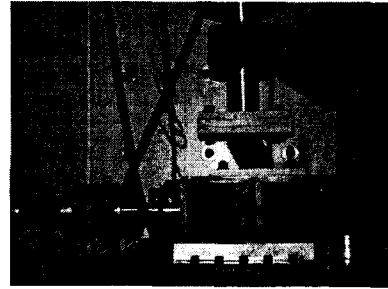


그림 5. 수평전단시험 수행장면

고무의 전단변형을  $\gamma$ 의 정의는 다음 식과 같다.

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

여기서,  $\Delta$  : 베어링의 수평변위  
 $T$  : 총 고무층의 두께 (56mm)

### 3.2 시험결과

그림 6~ 9는 가진 진동수를 0.5Hz, 1.0 Hz, 2.0Hz, 3.0 Hz로 하였을 경우 전단변위-전단하중 이력 실험결과이다. 가진진동수 0.5Hz는 수직하중을 10 tonf, 전단변형율은 최대 200%(112mm)로 제한하여 수평전단시험을 수행하였다. 시험은 고무의 전단변형율 기준으로 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%로 모두 8단계 변위제어를 하여 수행하였고, 전단변형율 200%에서 고무와 철판이 분리되어 소성변형이 발생하고, 적층고무베어링 내부의 납봉이 손상된 것으로 추정된다.

가진진동수 1.0Hz는 전단변형율 최대 140%(78.4mm)로 7단계 변위제어(20%, 40%, 60%, 80%, 100%, 120%, 140%)를 하였고, 2.0Hz는 전단변형율 최대 80%(44.8mm) 8단계 변위제어(10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%), 3.0Hz는 전단변형율 최대 50%(28mm) 7단계 변위제어(10%, 20%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%)를 하여 실험을 수행한 결과 전단변위-전단하중 이력곡선의 전체 형상은 전단변형율이 증가함에 따라 Hardening 현상을 나타내고 있다<sup>(3)</sup>.

그림 10은 가진진동수에 따른 유효강성( $K_{eff}$  : Effective Stiffness)의 변화를 나타낸 그림이다. 전단변위-전단하중 이력곡선의 최대값과 최소값 사이의 기울기로 나타나는 유효강성은 전단변형율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있고, 전단변형율 30~60% 범위에서는 가진진동수가 증가함에 따라 유효강성이 감소하는 경향을 나타내며, 전단변형율 80% 이상에서는 유효강성이 일정한 값을 갖는다.

그림 11은 가진진동수에 따른 소산에너지(Energy Dissipation)의 변화를 나타낸 그림이다. 소산에너지는 전단변위가 증가함에 따라 선형적으로 증가하고, 가진진동수가 큰 경우가 전반적으로 소산에너지가 큰 값을 나타냈다.

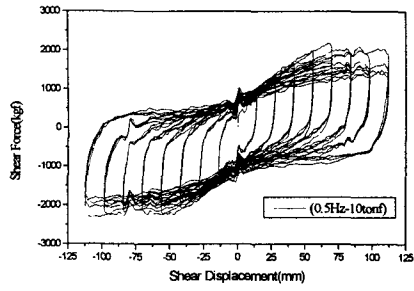


그림 6. 0.5 Hz 이력곡선

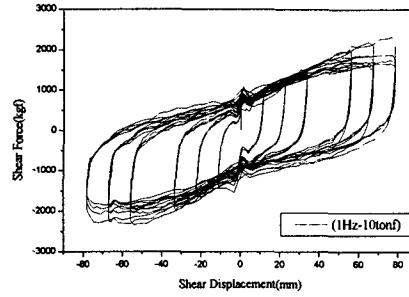


그림 7. 1.0 Hz 이력곡선

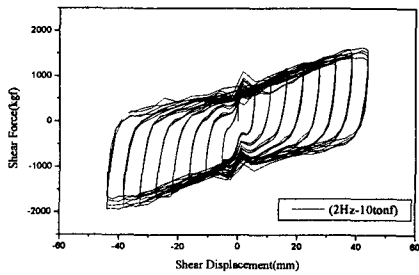


그림 8. 2.0 Hz 이력곡선

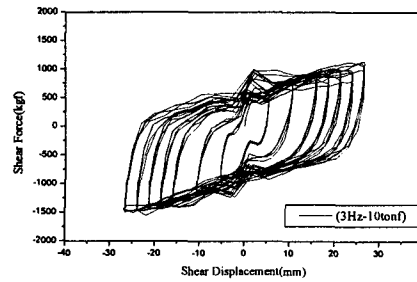


그림 9. 3.0 Hz 이력곡선

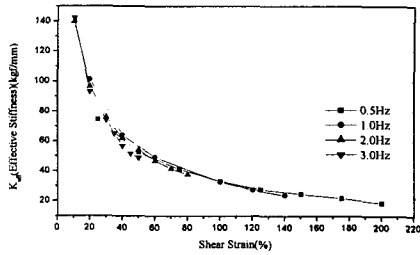


그림 10. 진동수에 따른 유효강성

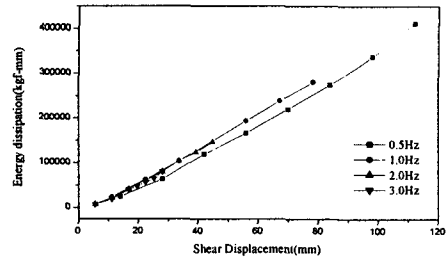


그림 11. 진동수에 따른 소산에너지

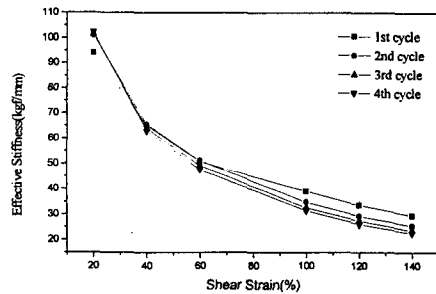


그림 12. 재하 사이클별 유효강성 (1 Hz)

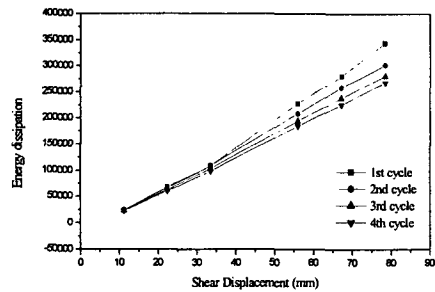


그림 13. 재하 사이클별 소산에너지 (1 Hz)

그림 12, 13은 가진진동수 1 Hz인 경우의 재하 사이클별 유효강성과 소산에너지의 변화를 나타낸 그림이다. 유효강성은 전단변형율이 증가하고 재하 사이클이 커질 수록 감소되는 경향을 나타내고, 소산에너지는 전단 변위가 증가함에 따라 선형적으로 증가하고 재하 사이클이 커질 수록 에너지 소산은 적어진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수직재하용량 10 ton의 납 삼입-적층고무베어링을 사용하여 동적특성을 평가하였고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 실험 결과 전단변위-전단하중 이력곡선은 전단변형율이 증가함에 따라 경화현상을 나타내고 있다.
- 2) 유효강성은 전단변형율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있고, 전단변형율 30~60% 범위에서는 가진진동수가 증가함에 따라 유효강성이 감소하는 경향을 나타내며, 전단변형율 80% 이상에서는 유효강성이 일정한 값을 갖는다.
- 3) 소산에너지는 전단변위가 증가함에 따라 선형적으로 증가하고, 가진진동수가 큰 경우가 전반적으로 소산에너지가 큰 값을 나타냈다.

#### 감사의 글

본 논문은 과기부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 면진장치를 제작해 주신 (주)KR에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Ebisawa, K. Ando, K. Shibata, "Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components," Nuclear Engineering and Design 198, pp.61~74, 2000.
2. 전영선, 최인길, 유문식, "수평 전단시험에 의한 납 삼입 적층고무베어링의 기계적 특성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제6호(통권 제22호), pp.1~10, 2001. 12.
3. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박철립, "적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호(통권 제8호), pp.53~62, 1998. 12.
4. 구경희, 이재한, 유봉, "면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호(통권 제8호), pp.73~85, 1998. 12.
5. Zayas V., Low, S.S. and Mahin, S.A., "The FPS Earthquake Resisting System, Experimental Report," Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA., June, 1987.