

납-고무베어링의 기계적 특성에 관한 실험적 평가

Experimental Evaluation of Mechanical Property for Lead-Rubber Bearing

이경진*, 김갑순*, 서용표*, 이종림*, 유문식**

*한진 전력연구원, **(주)KR

*대전광역시 유성구 문지동 103-16

**경기도 성남시 분당구 수내동 4-1 성옥빌딩 2, 3F

요 약

최근 먼진시스템은 구조물의 내진성능 향상을 위해 많이 사용되고 있다. 본 연구의 목적은 10tonf 용량 LRB의 동적특성과 기계적 성질을 평가하기 위함이다.

본 연구에서는 6개의 10tonf 용량 LRB의 이력거동, 유효전단강성, 등가 감쇠계수, 에너지소산능력 등을 파악하기 위하여 특성실험을 수행하였다. 특히, 본 연구에서는 선행연구결과들에 비해 고주파수 영역(0.5Hz~3.0Hz)의 가력속도 대한 LRB의 응답을 평가하였다.

실험결과, 전단변형률이 증가할수록 LRB의 유효전단강성은 감소하고, 에너지 소산능력은 증가하였다. 하지만 LRB의 전단거동은 가력속도에는 큰 영향을 받지 않았다.

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.

1. 서 론

면진시스템은 구조물의 지진에 대한 응답을 효과적으로 저감시킬 뿐만 아니라, 원자력 구조물과 같은 중요시설물 내의 중요기기 캐비닛, 컴퓨터시스템 등을 지진동으로부터 보호할 수 있는 혁신적인 기술이다. 1994년 미국의 노스리지(Northridge)지진과 1995년 일본의 고베(Hyogo-ken)지진 이후로 면진장치의 유효성은 널리 알려지게 되었고, 최근 몇 년 동안 면진장치를 적용하는 구조물은 크게 증가하는 추세이다.

현재 면진시스템이 적용된 대부분의 건물들은 1차적인 면진장치로서 적층고무베어링을 사용하고 있으며, 이러한 건물들의 지진발생시 거동은 사용된 면진장치의 기계적 특성치에 의하여 큰 영향을 받게 된다. 따라서 이러한 면진시스템의 설계는 적층고무베어링, 납-고무베어링 등의 면진장치의 기계적 특성치에 대한 충분한 이해를 가지고 설계되는 것이 중요하다.

면진시스템의 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.

본 연구에서는 이러한 면진장치의 수평력 가진속도, 수직 적재하중, 전단변형률의 크기에 따른 기계적 특성치를 평가하기 위하여 10tonf 용량(외경 15cm)의 납-고무베어링(Lead Rubber Bearing)을 사용하여 특성실험을 수행하였다.

일반적으로 납을 삽입하여 감쇠값을 높인 고감쇠 납-고무베어링은 천연고무와 철판을 교대로 적층시킨 적층고무베어링과는 달리 매우 복잡한 비선형거동을 나타내기 때문에 특성치를 단순 설계변수로 나타내기는 어렵다. 따라서 납-고무베어링의 특성실험을 통하여 각 영향변수에 따른 면진장치의 유효강성, 등가감쇠계수, 에너지 소산능력 등의 동적응답특성을 평가하여 합리적인 면진장치 설계를 위한 기초 자료를 확보하였다.

2. 면진장치 및 성능 시험장치

2.1 면진장치 시험체

납-고무베어링의 특성평가에 사용하기 위해서 10tonf 용량의 LRB 6개를 제작하였고(그림 1 참조), 시험체에 사용된 고무의 전단탄성계수는 7.528 kg/cm^2 , 납의 항복강성은 84.5 kg/cm^2 이며, 주요 제원은 표 1과 같다. 일반적으로 납-고무베어링의 1차 형상계수는 20~35, 2차 형상계수는 5이상을 사용하도록 하고 있지만, 본 시험체는 비교적 작은 형상계수 값을 갖기 때문에 좌굴의 영향이 클 것으로 예측된다.

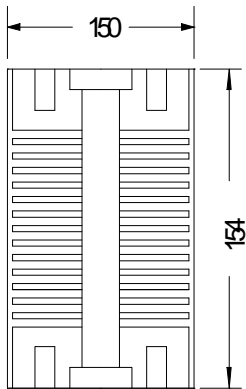


그림 1. 10 tonf 용량 LRB의 도면 및 형상

표 1. 시험용 납-고무베어링 주요 제원

항 목	제 원
설계연직하중	10 tonf
외경/내경	150 / 30 mm
전체높이(상하부 Plate 제외)	154 mm
고무층	4 mm × 14층 = 56 mm
강판층	3 mm × 13층 = 39 mm
납봉의 크기(단면적)	∅30 × 135 mm(7.07 cm ²)
1차 형상계수	9.375
2차 형상계수	2.679

2.2 성능시험 장치

납-고무베어링의 특성평가에 사용된 시험장치의 개념도 및 설치모습을 그림 2에 나타내었다. 시험장치는 수직, 수평방향으로 각각 1대씩 설치된 2대의 유압가력기(Actuator)와 가력장치 설치를 위한 철골구조물로 구성되어 있다. 철골구조물은 상부 철골보를 통하여 반력벽과 일체를 이루게 설치하였다. 수직, 수평방향 유압가력기의 최대용량은 각각 25tonf 이고, 최대 스트로크(Stroke)는 ±250mm 이다. 수평전단시험 수행중에 납-고무베어링의 상부판과 하부판이 평행을 유지하고 수직방향 재하하중을 충실히 전달할 수 있도록 하기 위하여 철골기둥 하부에 충분한 강성(Stiffness)을 가진 원통형 구조물(Cylinder)을 제작하여 고정시키고, 납-고무베어링 하부에 철골 Jig Plate를 부착하였다. 하부 철골 Jig Plate에 수평방향 유압가력기를 부착하여 납-고무베어링의 전단변형을 제어하였다. Jig Plate 하부에는 슬라이딩 베어링(Sliding Bearing)을 설치하여 수평방향 가력시 마찰력을 최소화시켰다.

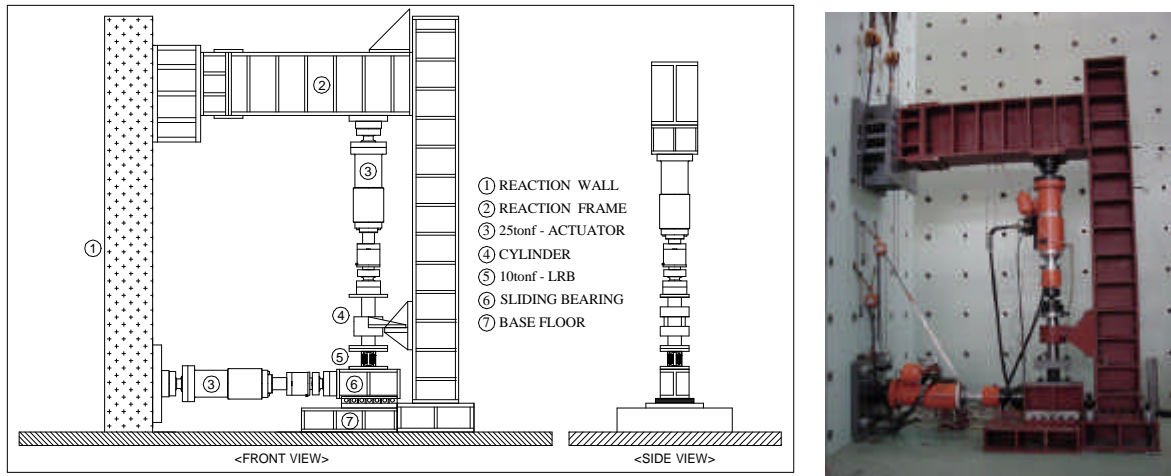


그림 3. 성능시험장치 개념도 및 설치모습

납-고무 베어링에 가해지는 수평력의 크기는 수평방향 유압가력기의 Load cell로부터 계측하였고, 전단변위는 유압가력기 내부에 있는 센서에 의해 측정하였다.

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 납-고무베어링 1개를 사용하여 예비시험을 수행하고 본 시험을 수행하였다. 그림 5는 시험장치에 납-고무베어링을 장착하여 수평전단시험을 수행하는 모습을 나타낸 것이다.

고무의 전단변형율 γ 의 정의는 다음 식과 같다.

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

여기서, Δ : 베어링의 수평변위

T : 총 고무층의 두께 (56mm)

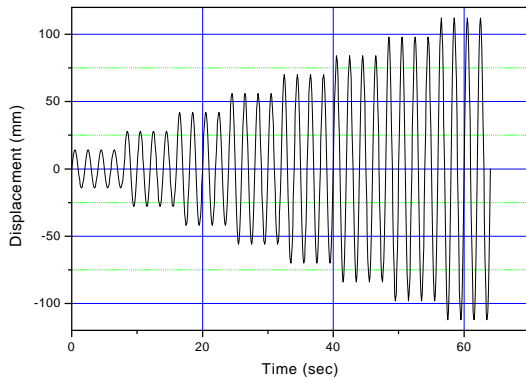


그림 4. 수평가진방향의 변위-시간 이력곡선(가진 진동수 0.5 Hz)

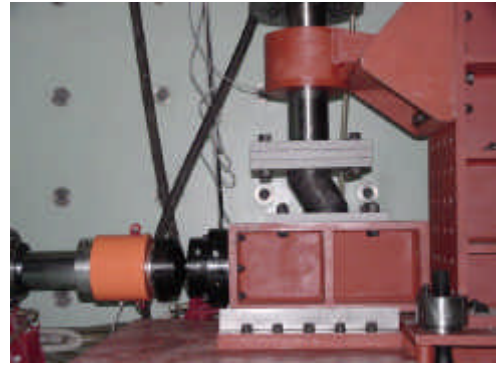


그림 5. 수평전단시험 수행장면

3.2 시험결과

전단변형률의 크기, 가진진동수의 크기, 수직하중의 크기, 하중 반복 싸이클에 대한 납-고무 베어링의 기계적 특성을 평가하기 위하여 특성 실험을 수행한 후 평가된 시험체의 이력거동을 그림 6 ~ 10에 나타내었다. 납-고무베어링(LRB)의 기계적 특성치를 평가함에 있어서 중요한 요소는 유효강성치(K_{eff}), 등가감쇠비(H_{eq}), 에너지 소산능력(ΔW)이며 이는 식(2) ~ (3)에 의해 표현될 수 있다.

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

$$H_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi F_{max} \Delta_{max}} \quad \text{식 (3)}$$

여기서, $\Delta W = 1$ 싸이클에 대한 에너지소산력 (이력루프 면적)

F_{max} = 최대 전단력, F_{min} = 최소전단력, Δ_{max} = 최대전단변위, Δ_{min} = 최소전단변위

납-고무 베어링의 전단력-전단변위(Hysteretic loop)의 관계는 그림6~10에서 볼수 있듯이 기본적으로는 bi-linear의 성격을 띠지만, 전단변형률이 증가할수록 경화현상(Hardening)을 나타내며 기울기가 작아짐을 알 수 있다. 가진 진동수가 0.5Hz인 시험체에서 전단변형률이 200%에 도달되었을 경우에는 베어링의 형상이 울록볼록해지며 고무의 경화현상이 나타나는 것을 볼 수 있었는데, 이는 베어링의 형상계수가 너무 작아 좌굴에 취약했기 때문에 수직, 수평하중의 $P-\Delta$ 효과에 의하여 납봉이 심하게 손상되며 고무를 탈락된 것으로 파악된다.

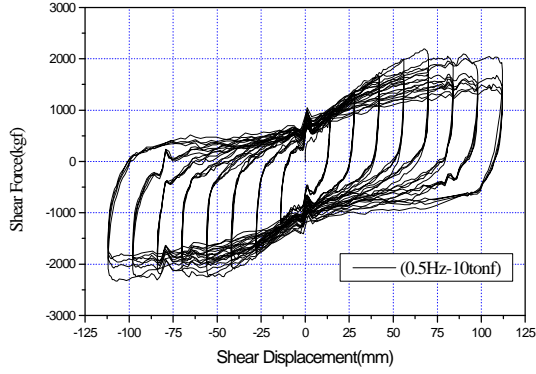


그림 6. 0.5 Hz 이력곡선(10tonf)

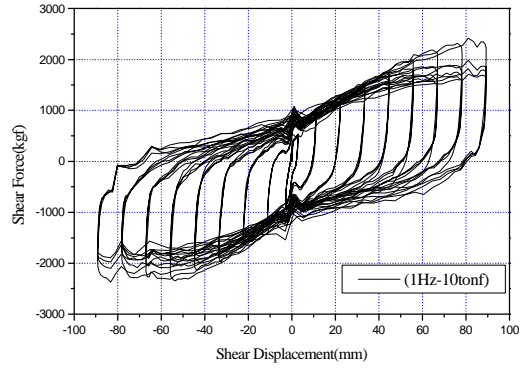


그림 7. 1.0 Hz 이력곡선(10tonf)

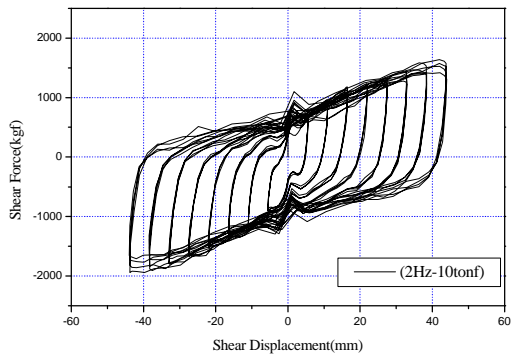


그림 8. 2.0 Hz 이력곡선(10tonf)

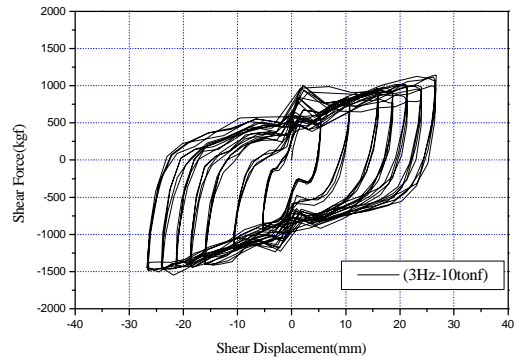


그림 9. 3.0 Hz 이력곡선(10tonf)

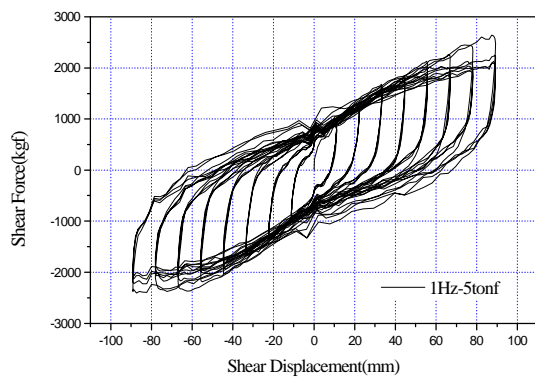


그림 10. 1.0 Hz 이력곡선(5tonf)

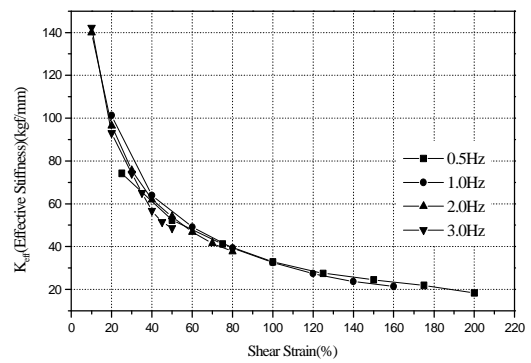


그림 11. 전단변형률, 가진진동수에 따른 유효강성 (K_{eff})

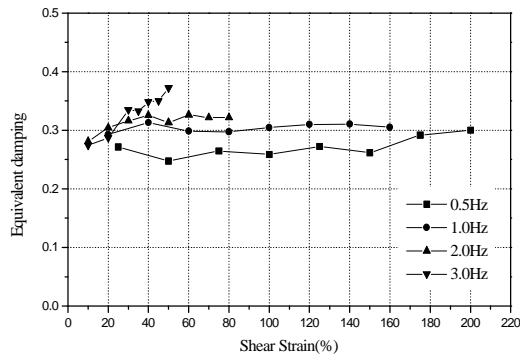


그림 12. 전단변형률, 가진진동수에 따른
등가감쇠비(H_{eq})

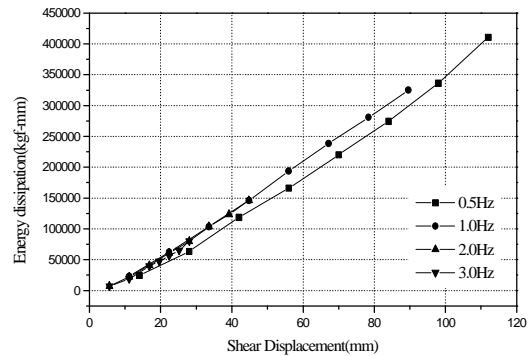


그림 13. 전단변형률, 가진진동수에 따른
에너지 소산능력(ΔW)

3.2.1 전단변형률, 가진진동수의 크기에 따른 영향

전단변형률, 가진진동수의 크기에 따른 납-고무 베어링의 특성을 평가하기 위하여 본 실험에서는 10tonf의 일정한 수직하중을 유지하는 상태에서 수평력을 가력하는 방식의 실험을 수행하였다.

여기서 최대 전단변형률의 크기는 가력기기의 가진진동수에 따른 최대 변위제한치를 초과 하지 않도록 적절히 설정하였는데, 0.5Hz의 경우에는 25%~200% 범위에서 모두 8 단계로 변위 제어를 하였고, 1.0Hz에서는 7단계(20%~140%), 2.0Hz에서는 8단계(10%~80%), 3.0Hz에서는 모두 7단계(10%~50%)로 변위제어를 하며 각 단계별 4 사이클씩 동일한 수평력을 반복 가력하였다.

그림 11에서 볼 수 있듯이 LRB의 유효강성은 전단변형률이 증가함에 따라 2차함수 형태를 나타내며 크게 작아짐을 볼 수 있으나 140%이상의 전단변형률에서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 그러나 가진 진동수에 따른 유효강성의 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. LRB의 등가감쇠비는 이론적으로는 전단변형률이 증가함에 따라 감소해야하지만, 그림 12에서와 같이 실험결과는 이에 대해 특별한 경향을 나타내고 있지 않으며, 가진 진동수가 증가함에 따라서는 등가감쇠비가 다소 증가하는 경향을 보였다. 또한 그림 13에서 볼 수 있듯이 전단변형률이 증가함에 따라 소산되는 에너지는 거의 1차적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 가진 진동수에 따른 에너지 소산능력의 영향은 전단변형률이 큰 경우에는 가진 진동수가 클수록 증가함을 알 수 있었다.

3.2.2 수직하중의 크기에 따른 영향

수직 적재하중의 크기에 따른 납-고무 베어링의 기계적특성을 평가하기 위해 가진 진동수 1.0Hz의 시험체에 대하여 수직하중을 5tonf와 10tonf로 변화시켜가며 시험을 수행하

였다. 그림 14에서 볼 수 있듯이 LRB의 유효강성치는 재하되는 수직하중이 클수록 전단 변형률의 증가에 따른 유효강성 감소율이 커짐을 알 수 있었다. 또한 그림 15~16에서 수직하중이 증가할수록 등가감쇠비와 에너지 소산능력도 증가함을 알 수 있었다.

3.2.3 하중 반복 싸이클에 따른 영향

수평력 반복 싸이클에 따른 영향을 살펴보기 위하여 모든 시험체에 대하여 각 전단 변형률 단계별 4 싸이클의 수평가력을 수행하였다. 베어링의 하중 반복 싸이클에 따른 특성을 그림 17~19에 나타내었다.

납-고무베어링의 유효강성치는 하중 반복 싸이클이 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보이거나 2번째 싸이클 이후에는 거의 일정한 값을 나타냈다. 베어링의 등가감쇠비는 하중 반복횟수가 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보이거나 그 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 소산된 에너지는 하중 반복 싸이클이 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 이러한 경향은 가진 진동수가 작을수록 크게 나타났다.

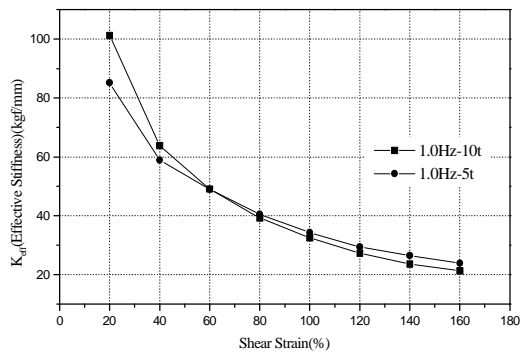


그림 14. 수직하중에 따른 유효강성(K_{eff})

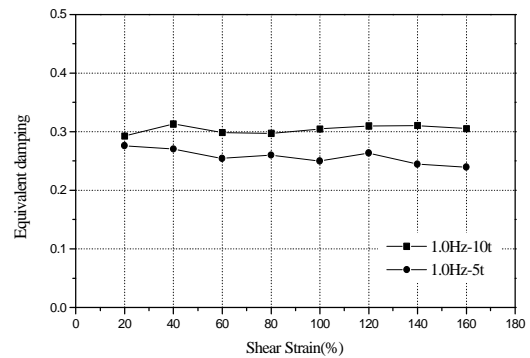


그림 15. 수직하중에 따른 등가감쇠비(H_{eq})

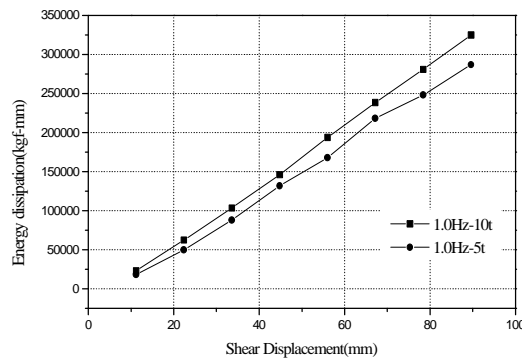
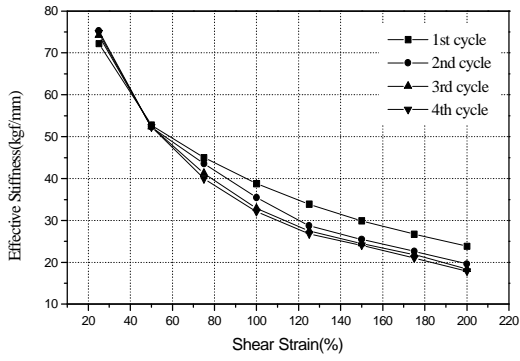
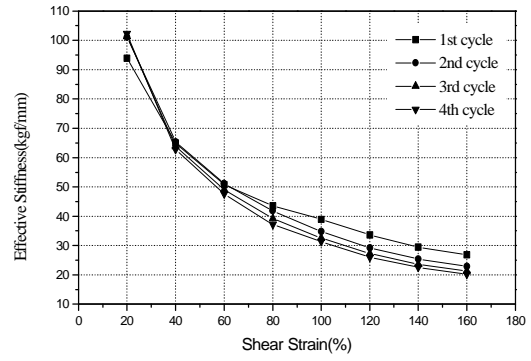


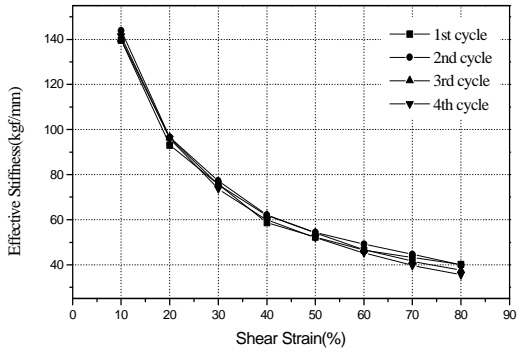
그림 16. 수직하중에 따른 에너지 소산능력(ΔW)



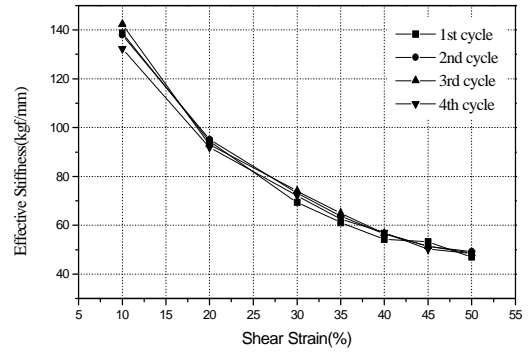
[0.5Hz]



[1.0Hz]

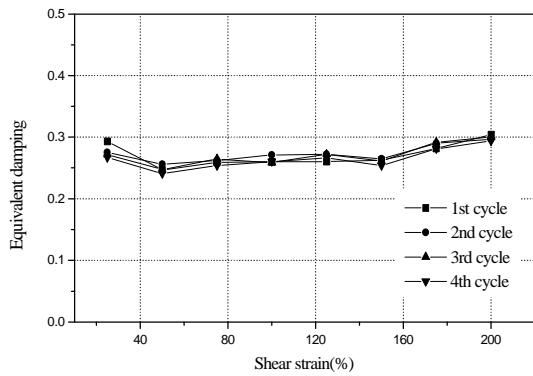


[2.0Hz]

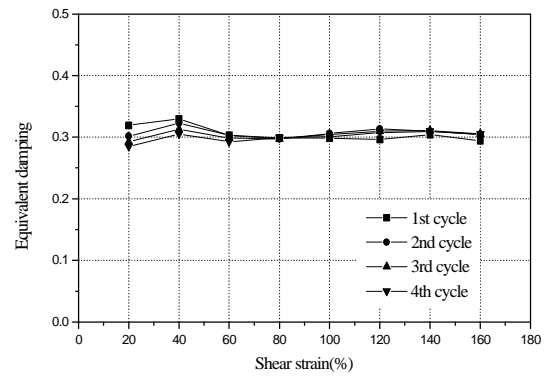


[3.0Hz]

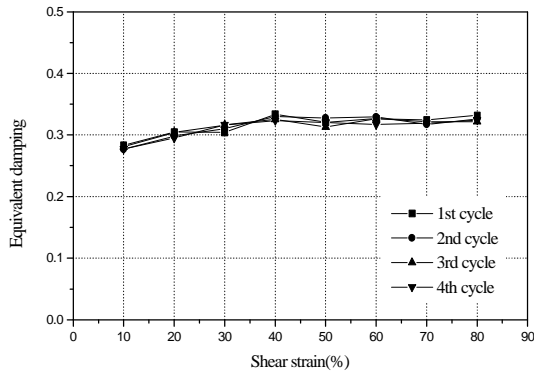
그림 17. 하중 반복 싸이클에 따른 유효강성 (K_{eff})



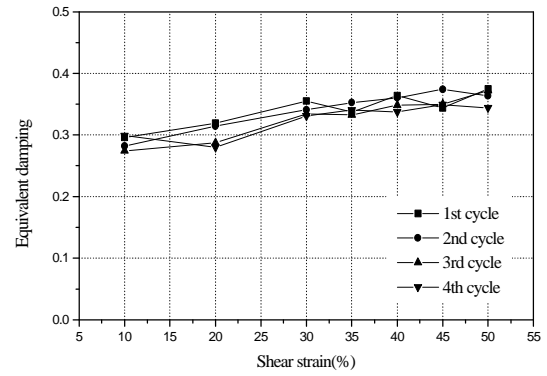
[0.5Hz]



[1.0Hz]

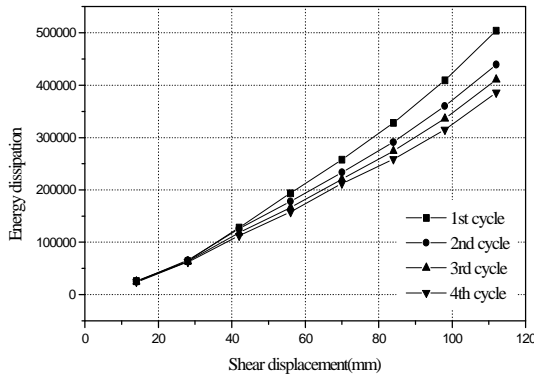


[2.0Hz]

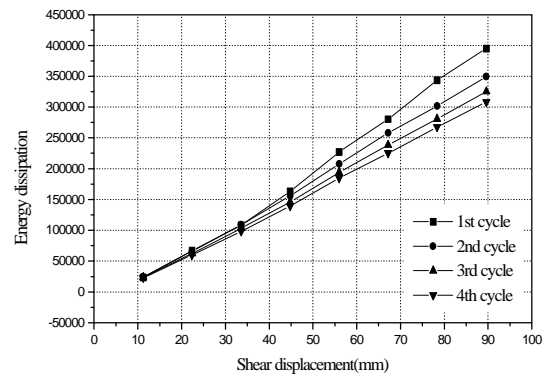


[3.0Hz]

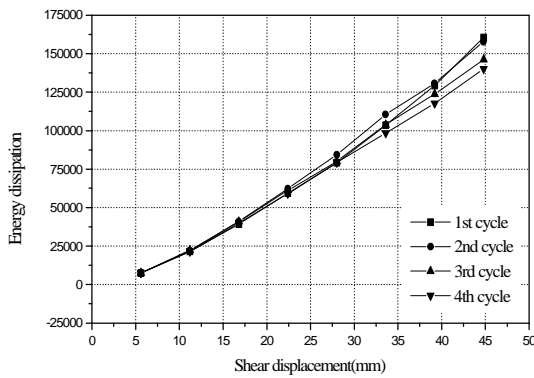
그림 18. 하중 반복 사이클에 따른 등가감쇠비(H_{eq})



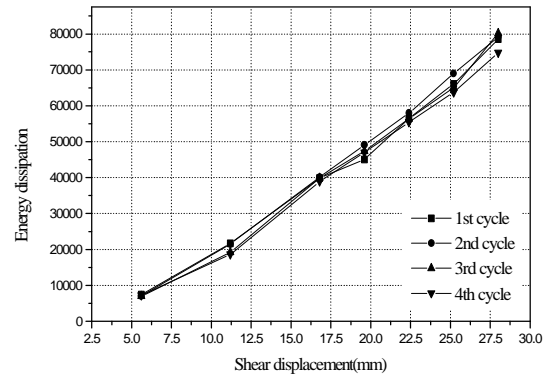
[0.5Hz]



[1.0Hz]



[2.0Hz]



[3.0Hz]

그림 19. 하중 반복 사이클에 따른 에너지 소산능력(ΔW)

4. 결 론

본 연구에서는 수직재하용량 10 tonf의 납 삽입-적층고무베어링에 대한 동적 특성실험을 수행하여 기계적 특성을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험결과 전단변형률이 증가함에 따라 납-고무베어링의 유효강성은 크게 감소하고, 에너지 소산능력은 선형적으로 증가하였다. 또한 가진 진동수는 베어링의 유효강성, 등가감쇠비에는 큰 영향을 주지 않았고, 에너지 소산능력은 전단변형률이 큰 경우에는 가진 진동수가 클수록 증가하였다.

2) 재하되는 수직하중이 증가할수록 전단변형률 증가에 따른 베어링의 유효강성 감소율이 증가하였고, 등가감쇠비와 에너지 흡수면적도 증가하였다.

3) 하중 반복 사이클이 증가함에 따라 유효강성은 다소 감소하는 경향을 보였고, 등가감쇠비, 에너지 소산면적도 감소하는 경향을 보였다.

감사의 글

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

참고문헌

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 삽입 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.
6. Masao Iizuka, "A macroscopic model for predicting large-deformation behaviors of laminated rubber bearings" Engineering Structures 22 (2000), 323-334.