

# 수평 전단시험에 의한 납 삽입 적층고무베어링의 기계적 특성 평가

## Mechanical Characterization of Lead-Rubber Bearing by Horizontal Shear Tests

전 영 선\*      최 인 길\*\*      유 문 식\*\*\*  
Choun, Young Sun      Choi, In Kil      You, Moon Sig

### 국문요약

본 연구에서는 수평전단시험을 통하여 LRB(lead-rubber bearing)의 동적 특성을 분석하였다. 10ton 및 200ton 용량의 LRB를 이용하여 수평전단시험을 수행한 결과 LRB의 동적 특성은 수평하중의 재하속도, 연직하중의 크기 및 전단변형률 등에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 세장비가 큰 면진장치에 과도한 변형을 가할 경우 내부 납심에 소성현상이 발생되어 납심이 파괴되는 것으로 나타났다. 따라서 면진구조물의 설계 및 해석 시에는 지진응답과 재하하중의 크기에 따라서 달라지는 LRB의 기계적 특성치를 적용하여 안전한 설계가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.

주요어 : 면진장치, 납삽입 적층고무베어링, 기계적 특성, 전단시험

### ABSTRACT

In this study, the horizontal loading tests of 10ton and 200ton capacity of LRB(lead-rubber bearing) were performed for the evaluation of the dynamic properties of the LRB. It is noted from the test results that the dynamic properties of the LRB are dependent on the loading frequency, vertical load and shear strain. A slender bearing subjected to a large deformation will tend to develop plastic hinges in the end regions of the lead plug which will cause the failure of the lead plug. It is recommended that the appropriate mechanical properties of LRB considering the level of structural response and input ground motion should be used in the design of base isolated structures.

Key words : seismic isolation device, lead-rubber bearing, mechanical properties, shear test

## 1. 서 론

면진시스템(seismic isolation system 또는 base isolation system)은 지반으로부터 구조물로 전달되는 지진에너지를 흡수함으로써 구조물에 작용되는 지진력을 감소시키는 역할을 한다. 실제로 면진시스템은 Kobe 지진 등의 대규모 지진에 대하여 구조물을 안전하게 보호함으로써 그 성능이 입증된 바 있다.<sup>(1)</sup> 우리나라에서는 최근에 와서 교량에 면진시스템을 도입하기 시작하였다.

교량에 사용되는 면진장치는 그 기계적인 메카니즘이 간단하여야 하고 완전하게 그 성능을 발휘할 수 있어야 하며 역학적 거동이 사용하고자 하는 조건 하에서 명확하게 입증되어야 한다. 또한 지진동의 지속시간뿐만 아니라 교량의 수명기간 동안 그 기능을 충분히 유지할 수 있어야 하며 앵커볼트 등을 통하여 교량 상판과 교각 또는 교대 사이에 지진력을 확실하게 전달할 수 있어야 한다.

면진장치의 성능을 충분히 확인하기 위해서는 다음과 같은 동적·정적 특성시험을 실시할 필요가 있다.<sup>(2)</sup>

- 설계에 사용한 면진장치의 유효강성 및 등가감쇠정수를 확인하기 위한 시험
- 면진장치의 설계변위에 대한 연속 반복 재하시험

- 면진장치에 생기는 잔류변위 시험
- 반복재하, 이력경험, 지압응력 변화, 변형속도 변화, 정적 변위, 온도변화 등의 환경조건에 대한 안정성 시험
- 온도변화에 따른 상시 반복변위에 대한 내구성 시험
- 크리프에 의한 압축변형률 시험
- 최저 및 최고온도 하에서 면진장치의 유효강성을 확인하기 위한 시험
- 크리프, 건조수축, 온도변화 등의 완속변형에 의한 수평반력 특성시험

이외에도 면진장치의 장기적인 내구성과 내화성을 확인하기 위한 시험도 수행할 필요가 있다.

면진장치의 기계적 특성을 평가하기 위한 실험적 연구는 미국, 일본, 뉴질랜드 등 대규모 지진이 빈번하게 발생하는 국가를 중심으로 많이 수행되어 왔다.<sup>(3)-(7)</sup> 우리나라의 경우에는 면진장치를 생산하는 기업체 등에서 일부 수행한 바가 있으며<sup>(8),(9)</sup> 액체금속로의 원자로 건물에 적용하기 위해 다양한 면진장치에 대한 실험을 수행한 바가 있다.<sup>(10)</sup>

외국의 경우 면진장치에 대한 연구가 과거 십 수년전부터 수행되어 왔으며 다양한 분야에 대한 실험적 또는 해석적인 연구가 이루어져 왔다. 그러나 우리나라의 경우 면진장치의 역사가 매우 짧아 이에 대한 실험적 연구가 충분히 이루어지지 않았다. 김대곤 등의 연구<sup>(9)</sup>에서는 주로 온도에 따른 면진장치의 특성을 평가하였으며 유봉 등의 연구<sup>(10)</sup>에서는 축소시험모델을 이용한 특성 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 현재 우리나라에서 제작되고 있는 LRB(lead-rubber bearing)를 구성

\* 정회원 · 한국원자력연구소, 책임기술원(대표저자 : sunchun@kaeri.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국원자력연구소, 선임연구원

\*\*\* (주)케이알 기술연구소, 수석연구원

본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 6. 4 / 심사종료일 : 2001. 10. 9)

하고 있는 고무 및 납의 특성을 평가하고 소용량 및 대용량 면진장치를 이용하여 다양한 실험조건에서 시험을 수행하고 거동특성 및 기계적 특성을 평가하였다. 이를 통하여 국내에서 활용되고 있는 면진장치의 기계적인 특성을 규명함으로써 추후 면진구조물의 설계 및 해석에 활용할 수 있는 기본 자료를 확보하고자 한다.

본 연구에서는 LRB 면진장치의 동적 특성을 평가하기 위하여 10ton 규모의 축소 시험체와 200ton 규모의 실제 크기의 시험체에 대한 수평 전단시험을 실시하였으며 시험으로부터 얻은 결과를 근거로 면진장치의 각종 동적 재료특성을 분석하였다.

## 2. LRB 시험체의 재료특성 및 제원

### 2.1 시험체 재료특성

LRB 시험체 제작에 사용한 고무와 납에 대한 전단특성시험을 수행하여 각각 그림 1과 2의 결과를 얻었다.

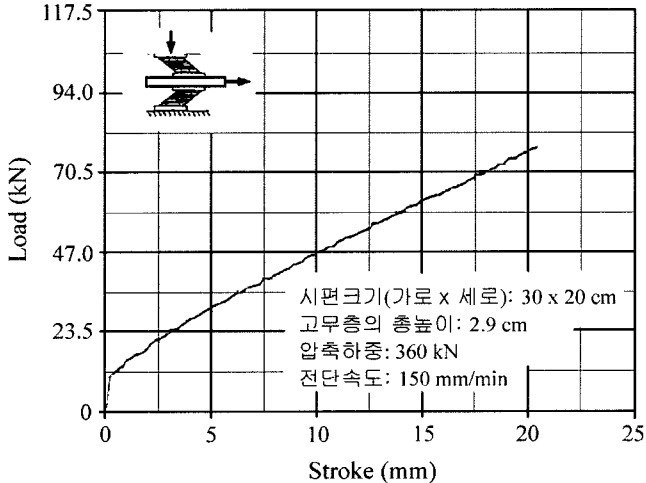


그림 1 시험용 LRB의 적층고무에 대한 전단시험 결과

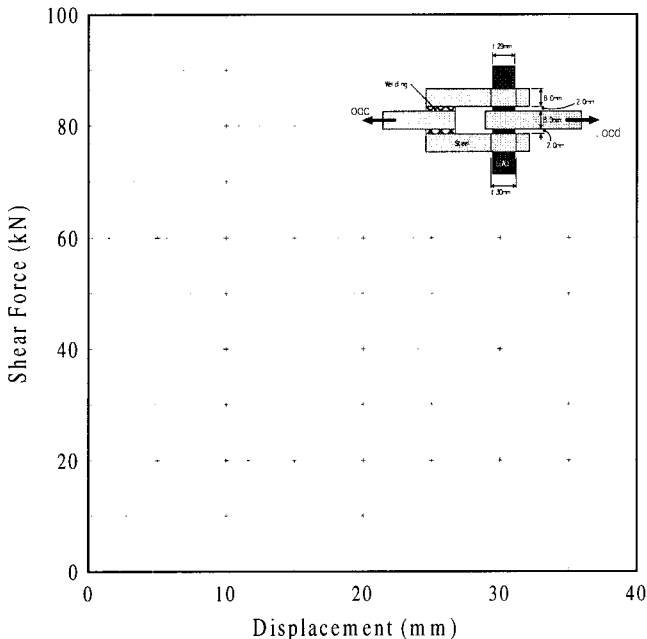


그림 2 시험용 LRB의 납봉에 대한 전단시험결과

그림 3은 납봉의 전단응력-변형을 관계로서 탄소성 모델링을 위한 관계식을 함께 표시하였다.

시험결과로부터 구한 고무와 납의 재료특성치를 정리하면 표 1과 같다.

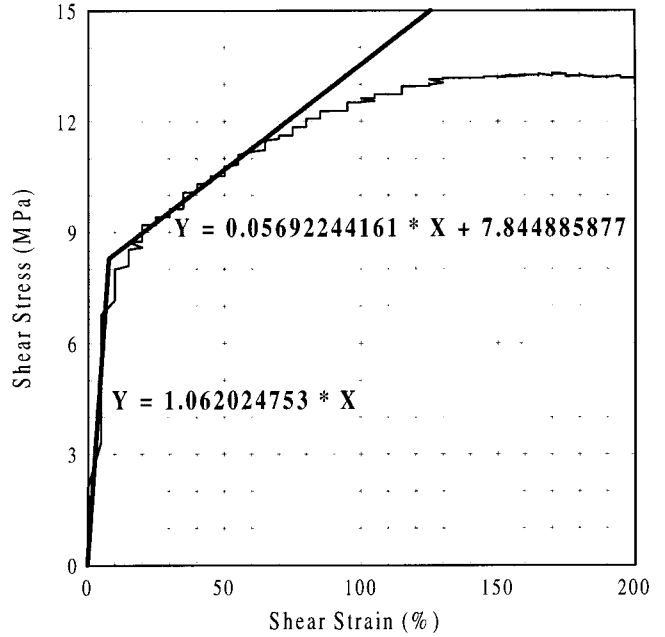


그림 3 시험용 LRB의 납봉에 대한 응력-변형률 관계

표 1 고무 및 납의 재료특성

고무	전단탄성계수 ( $G_r$ )	0.7MPa
납	항복응력 ( $\sigma_y$ )	8.3MPa
	항복변형률 ( $\gamma_y$ )	7.8%
	전단계수(탄성, $G_0$ )	106.2MPa
	전단계수(소성, $G_1$ )	5.7MPa

### 2.2 시험체 제원

LRB의 특성시험을 수행하기 위해서 10ton 용량의 LRB 7개, 200ton 용량의 LRB 2개를 설계·제작하였다(그림 4 참조). 각 LRB 시험체의 주요 제원은 표 2와 같다.

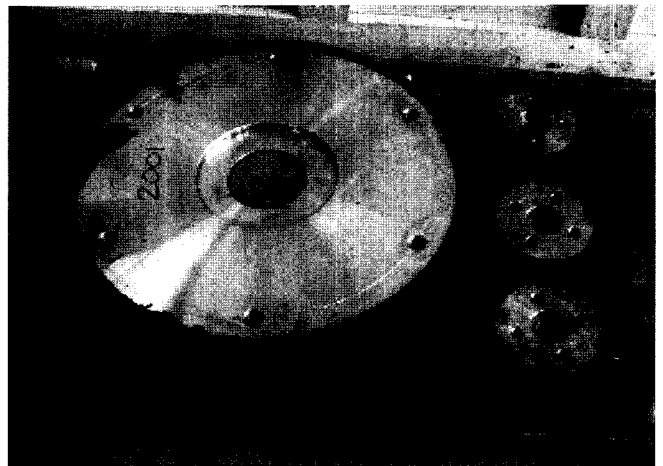


그림 4 시험체 사진

표 2 시험용 LRB의 주요 제원

항 목	10ton LRB	200ton LRB
설계연직하중	10ton	200ton
외경/내경	154/30mm	521/100mm
전체높이(상하부 plate 제외)	155mm	248.5mm
고무층	3.125mm×16층=50mm	9.5mm×15층=142.5mm
강판층	3mm×15층=45mm	3mm×14층=42mm
납봉의 크기(단면적)	φ30×135mm(7.07cm <sup>2</sup> )	φ100×245mm(78.54cm <sup>2</sup> )

표 2에서 제시한 주요 제원을 사용하여 시험체의 최대 1차 형상계수와 2차 형상계수를 구해 보면 10ton LRB의 경우 각각 7.75, 3.1이며, 200ton LRB의 경우는 각각 13.71, 3.66으로서 비교적 작은 값을 갖는다. 일반적으로 LRB의 연직 및 휨강성과 관련되는 1차 형상계수는 20~35, 좌굴과 관련되는 2차 형상계수는 5 이상을 사용한다.<sup>(11)</sup> 그러므로 두 시험체는 적층고무의 휨 변형에 대한 저항력이 작으며 전단변형에 의한 강성저하나 좌굴현상이 나타날 가능성이 있다. 특히 10ton LRB의 경우에는 그 형상계수 값이 대단히 작기 때문에 좌굴의 영향이 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

(최대 stroke: ±75mm), 수평방향으로 1대(최대 stroke: ±125mm)를 설치하여 연직방향과 수평방향으로 각각 200ton과 100ton의 최대하중을 가할 수 있도록 하였다. 연직방향 유압가력기의 하부에는 H형 강재를 설치하고 수평변위가 클 경우 회전하는 것을 방지하고 하중이 항상 시험체에 연직으로 작용될 수 있도록 양측에 지지용 강재와 로울러를 추가적으로 설치하였다. 시험체의 하부에는 바닥판의 마찰력의 영향을 최소화하기 위하여 폭이 좁은 강판과 강봉을 놓고 그 위에 강판을 올려놓았다. 이 강판은 바닥에 설치한 수평방향 유압가력기와 연결되어 시험체에 수평력을 전달한다.

### 3. 수평전단 시험

#### 3.1 시험장치

LRB의 특성시험을 위하여 그림 5와 같이 시험장치를 구성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 반력벽에 강재 프레임을 설치하고 100ton 유압가력기(actuator)를 연직방향으로 2대

#### 3.2 시험방법

LRB의 동적 특성을 평가하기 위하여 수평하중의 가진 진동수와 연직하중의 크기를 변화시키면서 변위제어(displacement control) 방식으로 시험을 수행하였다. 10ton LRB에 대해서는 연직하중을 10ton으로 일정하게 하고 수평방향의 가진 진동수를 0.1Hz로부터 1.0Hz까지 변화시키면서 시험을 하였

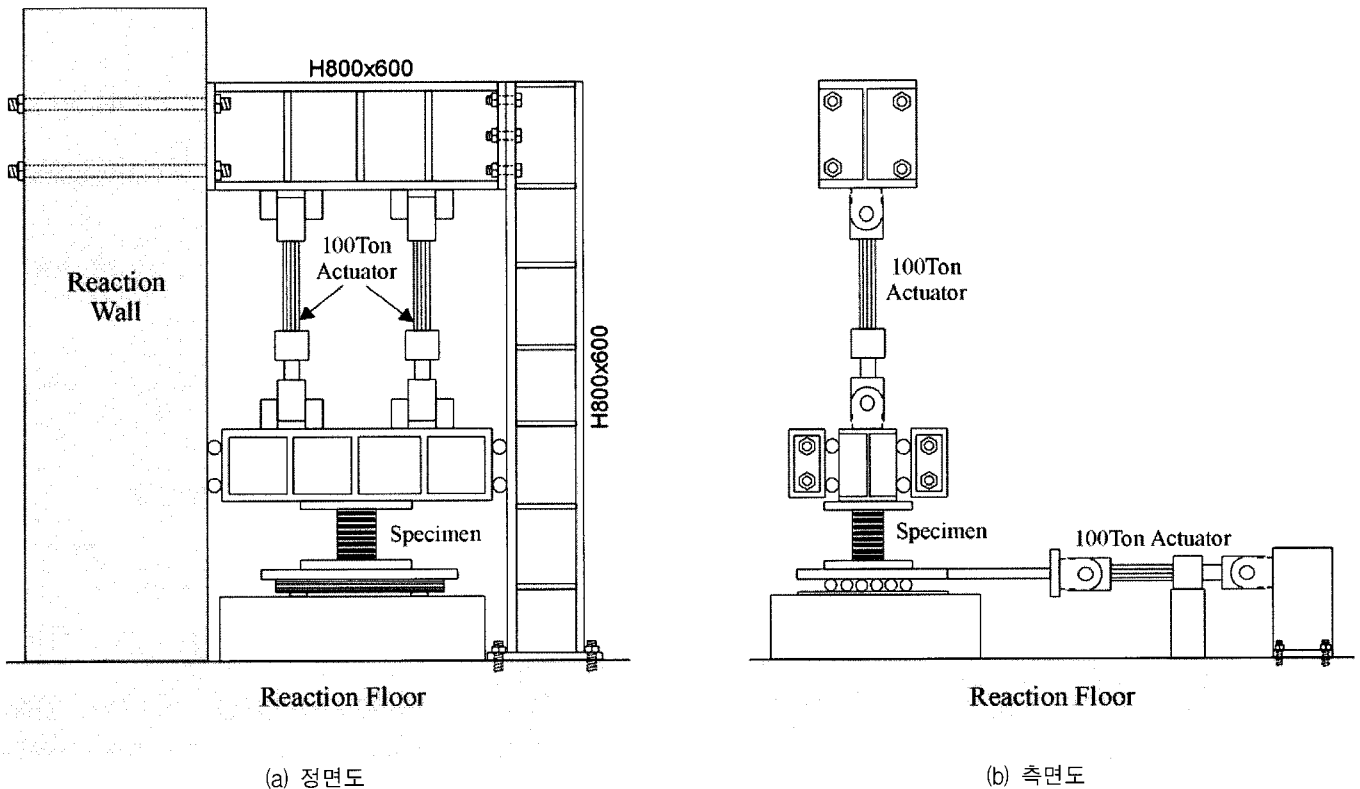


그림 5 시험장치

다. 이 때의 최대 전단변형률은 200%로 제한하였다. 200ton LRB에 대해서는 수평방향의 가진 진동수를 0.3Hz로 고정하고 연직하중의 크기를 0에서부터 200ton까지 증가시키면서 시험을 하였다. 이 때의 최대 전단변형률은 시험장치의 성능 제한으로 인해 50%로 하고 10%씩 변형률이 증가하는 것으로 하였다. 그림 6은 10ton LRB 시험체가 시험장치에 장착되어 수평하중에 의해 변형된 모습을 보여주고 있다.

10ton LRB의 변위제어 방식 시험에서 수평 가진방향의 입력데이터로서 사용한 변위-시간 이력곡선은 그림 7과 같다. 본 시험에 앞서 10ton과 200ton LRB 시험체 1개씩을 사용

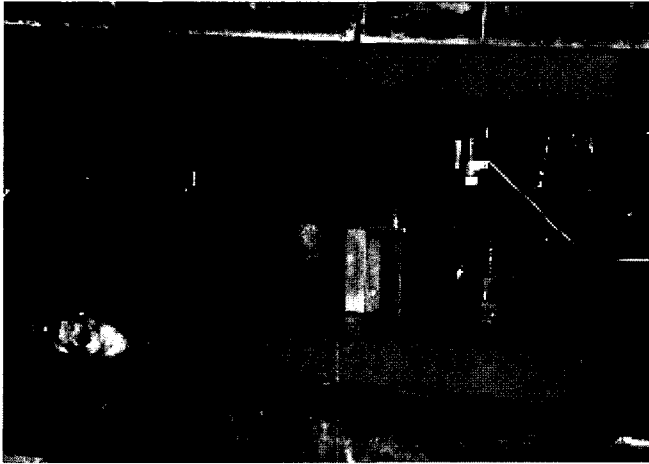


그림 6 시험체 장착 및 수평전단시험 장면

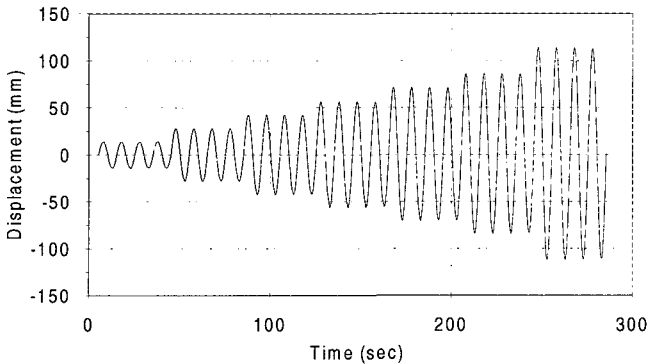


그림 7 수평가진방향의 입력 변위-시간이력 (10ton, 0.1Hz)

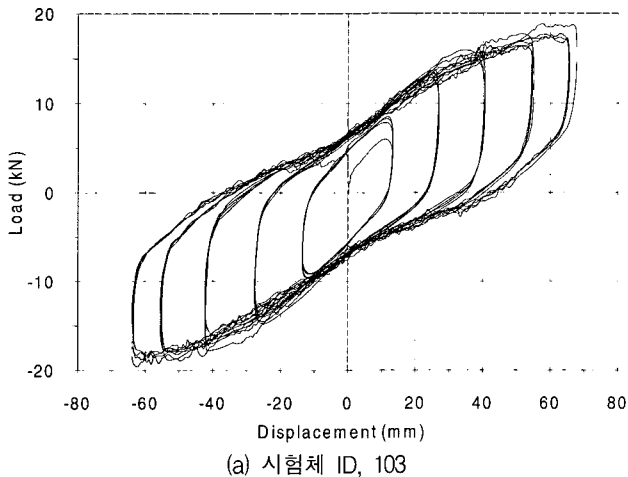


그림 8 하중-변위 이력곡선(10ton, 0.5Hz)

하여 예비시험을 수행하고 본 시험의 시험변수를 결정하였다.

시험방법은 일본 면진구조협회에서 제시한 JSSI 규격 I-21의 LRB 평가방법의 수평성능시험 방법<sup>(12)</sup>에 따라서 수행하였다.

### 3.3 시험결과

그림 8은 동일한 조건 (가진진동수=0.5Hz) 하에서 시험한 10ton 시험체의 두 이력곡선을 보여주고 있다. 그림으로부터 두 시험체의 거동이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 두 시험체의 품질이 균일하며 시험방법도 타당한 것으로 판단된다.

그림 9~13은 수평 전단력의 가진진동수 변화에 따른 10ton LRB의 이력곡선을 나타내고 있다. 가진진동수가 0.5Hz 이상인 경우에는 실험장치의 성능 제한으로 인해 200%의 변형률까지 실험을 진행하지 못하고 0.5Hz의 경우 125%, 0.7Hz의 경우 100%, 0.8 Hz의 경우 75%, 1.0Hz의 경우 70%까지의 이력곡선을 얻을 수 있었다. 개략적으로 보면 가진진동수 0.1Hz, 최대 전단변형률 200%의 경우 고무에서 변형률 경화 현상이 나타났으며(그림 9), 그 이하의 변형률에 있어서는 가진 진동수의 변화에 대해 유사한 이력거동을 보이고 있다. 그림 14~그림 18의 이력곡선은 각각 200ton LRB에 연직하중 0, 50, 100, 150 및 200ton을 가한 상태에서 시험한 결과이다. 100ton이상의 큰 연직하중이 작용한 경우에는 시험체 밑에 놓여있는 강판이 강봉을 통해 전달되는 하중으로 인해 변형되어 정확한 거동을 얻을 수 없었다. 150ton이상의 연직하중이 작용된 경우에는 비록 시험결과와 신뢰성은 떨어지지만 전반적인 경향이나 특성을 파악하는데 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여 본 연구에서는 그 시험결과들을 포함하여 분석하였다.

연직하중을 가하지 않은 경우(그림 14)에는 폭이 좁은 이력루프를 보이지만 연직하중이 증가함에 따라서 이력곡선 루프의 폭이 크게 증가함을 알 수 있다. 이것은 연직하중이 증가함에 따라서 LRB의 소산에너지가 크게 증가하는 거동 특성을 보여준다. 유효강성 또한 연직하중이 증가함에 따라서 크게 증가함을 알 수 있다.

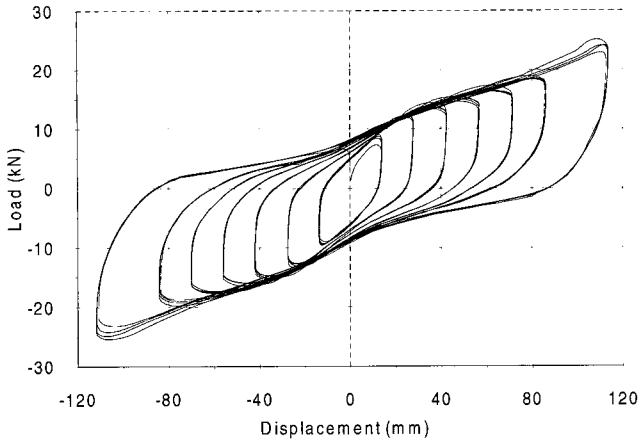


그림 9 0.1Hz에 대한 이력곡선

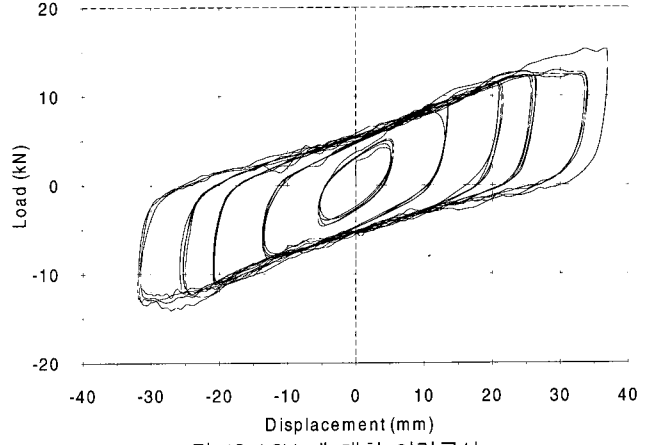


그림 13 1.0Hz에 대한 이력곡선

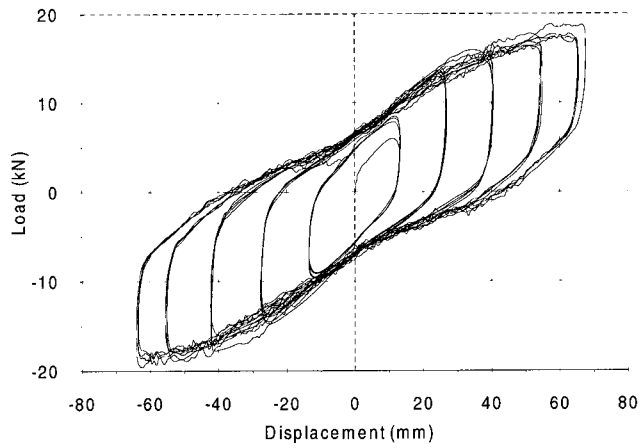


그림 10 0.5Hz에 대한 이력곡선

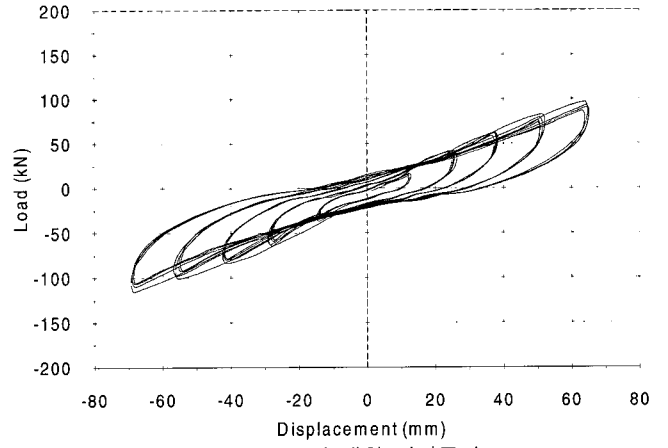


그림 14 0ton에 대한 이력곡선

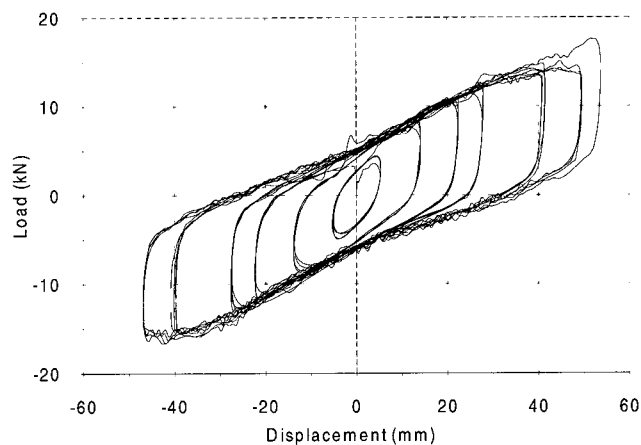


그림 11 0.7Hz에 대한 이력곡선

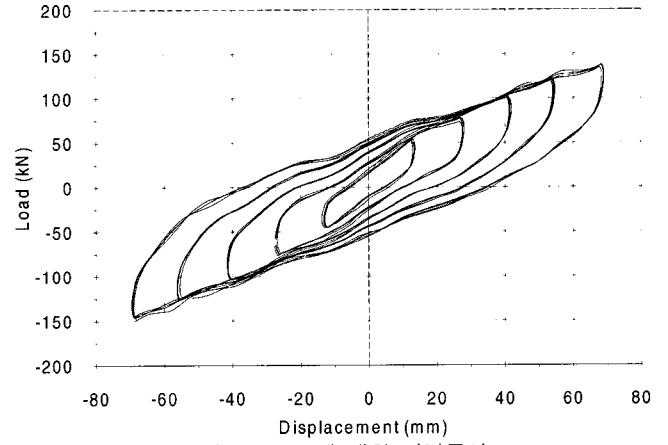


그림 15 50ton에 대한 이력곡선

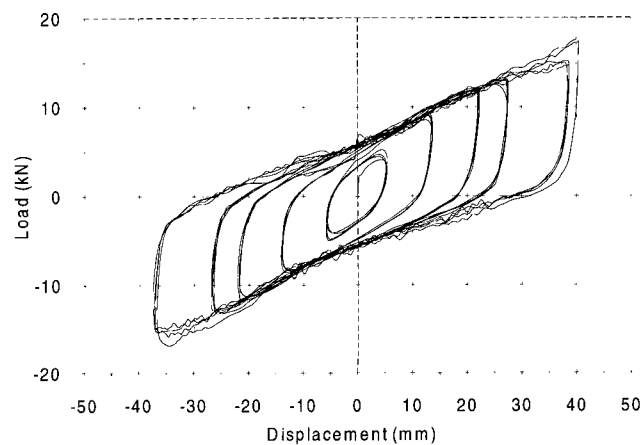


그림 12 0.8Hz에 대한 이력곡선

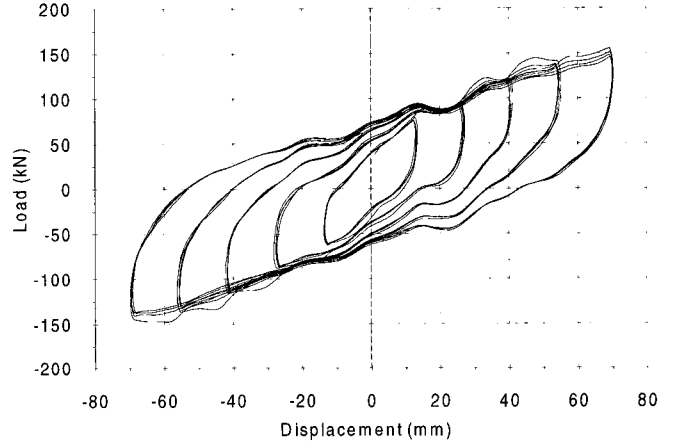


그림 16 100ton에 대한 이력곡선

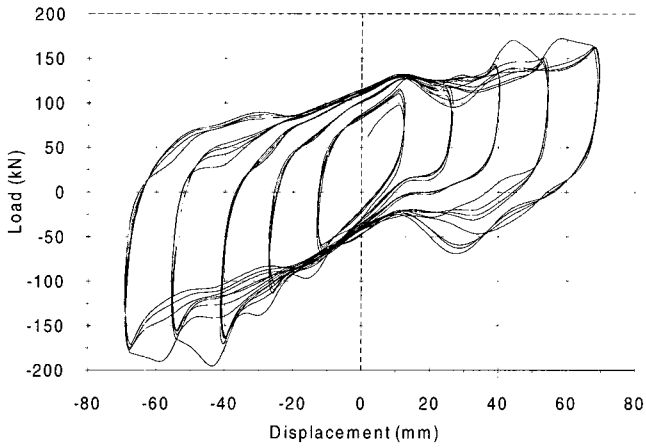


그림 17 150ton에 대한 이력곡선

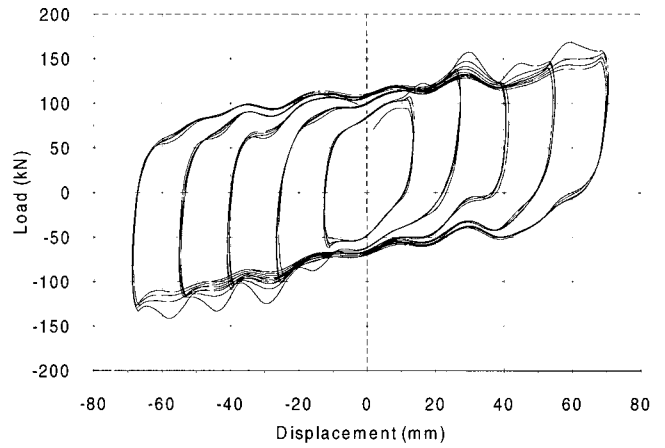


그림 18 200ton에 대한 이력곡선

#### 4. LRB의 기계적 특성 변화

##### 4.1 가진 진동수에 대한 특성

그림 19, 20 및 21은 각각 가진 진동수의 변화에 대한 유효강성, 등가감쇠비 및 소산에너지의 변화를 도시한 것이다. 그림 19에서 보는 바와 같이 LRB의 유효강성은 전단변형률이 증가함에 따라서 크게 감소하는 특징을 나타내고 있다. 그러나 120% 이상의 전단변형률에 대해서는 유효강성이 거의 일정한 값을 갖는다. 또한 가진 진동수가 증가할수록 LRB의 유효강성도 증가하는 특성을 보여준다. 그러나 그 증가량은 크지 않음을 알 수 있다.

그림 20은 LRB의 등가감쇠비가 전단변형률이 증가함에 따라서 크게 감소하는 특징을 보여준다. 그리고 수평하중의 재하속도에 따라서 LRB의 등가감쇠비가 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 수평하중의 가진 진동수가 클수록 등가감쇠비는 작게 나타났다.

그림 21로부터 전단변위가 증가함에 따라서 소산되는 에너지는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 가진 진동수에 따른 소산에너지의 변화는 작은 범위에서는 크지

않지만 큰 범위에서는 큰 것으로 나타났다.

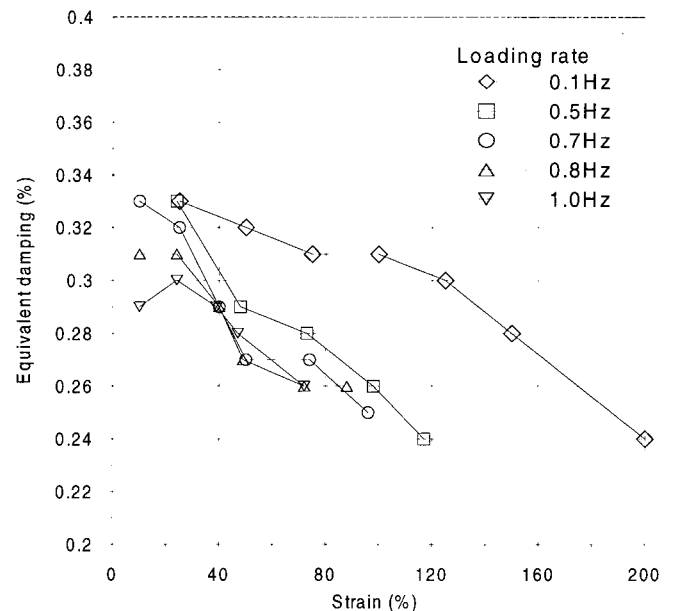


그림 20 가진진동수에 따른 등가감쇠의 변화

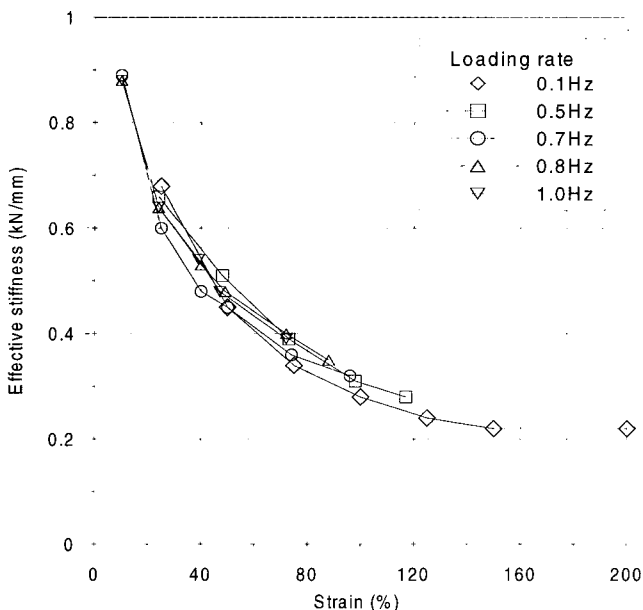


그림 19 가진진동수에 따른 유효강성의 변화

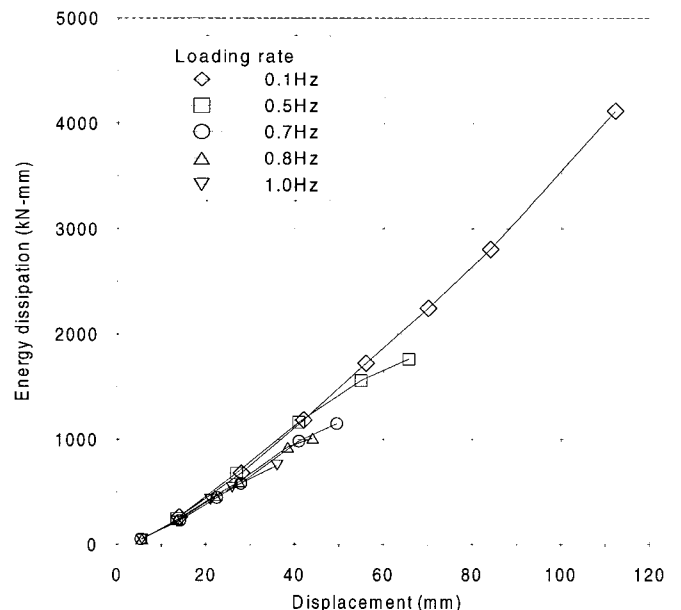


그림 21 가진진동수에 따른 소산에너지의 변화

### 4.2 연직하중의 크기에 대한 특성

그림 22, 23 및 24는 각각 연직하중의 크기 변화에 대한 유효강성, 등가감쇠비 및 소산에너지의 변화를 도시한 것이다.

그림 22에서 보는 바와 같이 연직하중의 크기에 따라서 LRB의 유효강성이 크게 변하는 특성을 갖는다. LRB는 연직하중이 클수록 큰 유효강성을 갖는 것으로 나타났다. 이 때 유효강성의 차이는 변형률이 큰 경우보다는 작은 경우에 더욱 크게 발생한다. 다시 말하면 연직하중이 작은 경우에는 유효강성이 변형률에 의해 크게 변하지 않지만 연직하중이 큰 경우에는 유효강성이 변형률의 크기에 따라서 크게 변화된다.

그림 23은 LRB의 등가감쇠비가 연직하중의 크기에 따라서 크게 변하는 것을 보여준다. 이 경우도 유효강성에서와 마찬가지로 연직하중이 클수록 등가감쇠비가 크다. 그러나 전단 변형률의 크기에 따라서는 거의 변하지 않는다.

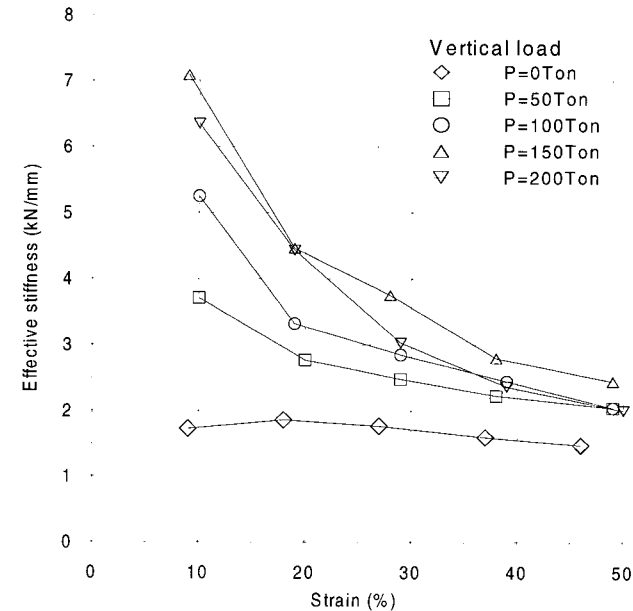


그림 22 연직하중에 따른 유효강성의 변화

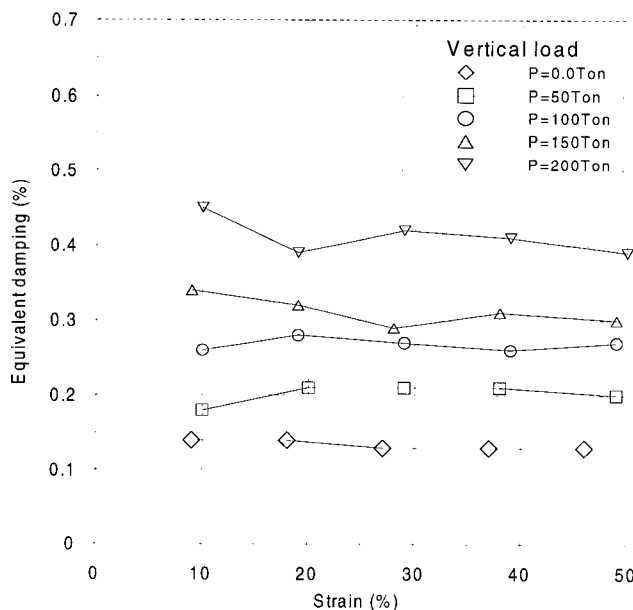


그림 23 연직하중에 따른 등가감쇠의 변화

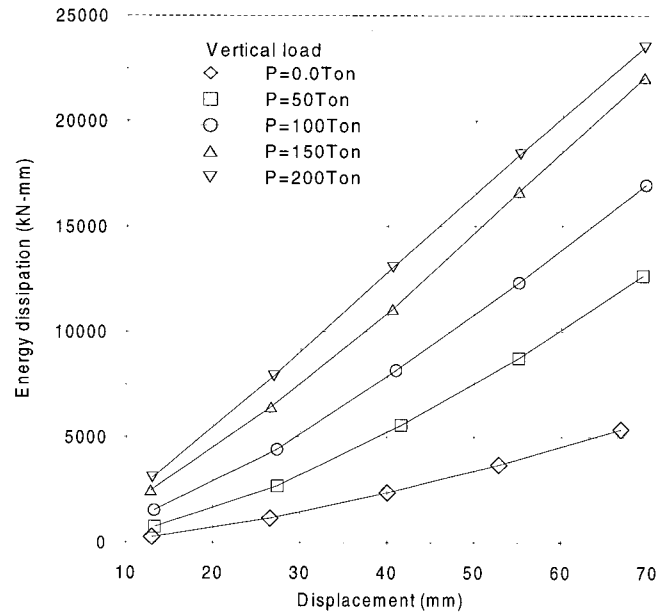


그림 24 연직하중에 따른 소산에너지의 변화

그림 24는 연직하중이 증가함에 따라서 소산에너지도 증가하는 것을 보여준다. 이 때에도 역시 변위가 증가함에 따라서 소산에너지가 거의 선형적으로 증가한다. 소산에너지의 증가율, 즉 기울기는 연직하중이 클수록 크다는 것을 알 수 있다.

### 4.3 재하 사이클에 대한 특성

그림 25, 26 및 27은 각 재하 사이클에 대한 유효강성, 등가감쇠비 및 소산에너지의 시험 결과를 도시한 것이다. 재하 사이클이 증가할수록 유효강성은 증가하며 소산에너지와 등가감쇠비의 값은 감소하는 경향을 보인다. 유효강성의 경우에는 재하 사이클에 크게 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 유지하지만 등가감쇠비는 재하 사이클에 따라서 큰 차이를 나타내고 있다. 또한 유효강성은 가진 진동수에 거의 영향을 받지 않지만 등가감쇠비는 가진 진동수에 따라서 약간의 차이를 보인다. 대체적으로 가진 진동수가 큰 경우의 편차가 더 크게 나타나고 있다.

JSSI 규격 I-21의 LRB 성능 평가방법<sup>(12)</sup>에서는 세 번째 사이클의 시험 결과를 사용하여 성능을 평가하는 것으로 규정하고 있는데, 이러한 규정은 그림 25~27까지의 결과를 보면 타당함을 알 수 있다. 대체적으로 세 번째 사이클의 시험 값들이 모든 사이클의 값들의 평균에 가깝기 때문에 대표값으로 보아도 무방할 것이다.

### 5. LRB의 거동 특성

LRB 시험체에 대한 전단시험을 수행한 후 시험체 내부의 변화를 확인하기 위하여 실험에 사용한 실험체를 절단하여 내부상태를 평가하였다. 전단변형률을 150%까지 시험한 시험체의 경우에는 납봉의 형상에 거의 변화가 없지만 200%까지 시험한 경우에는 납봉이 심하게 손상되었다(그림 28).

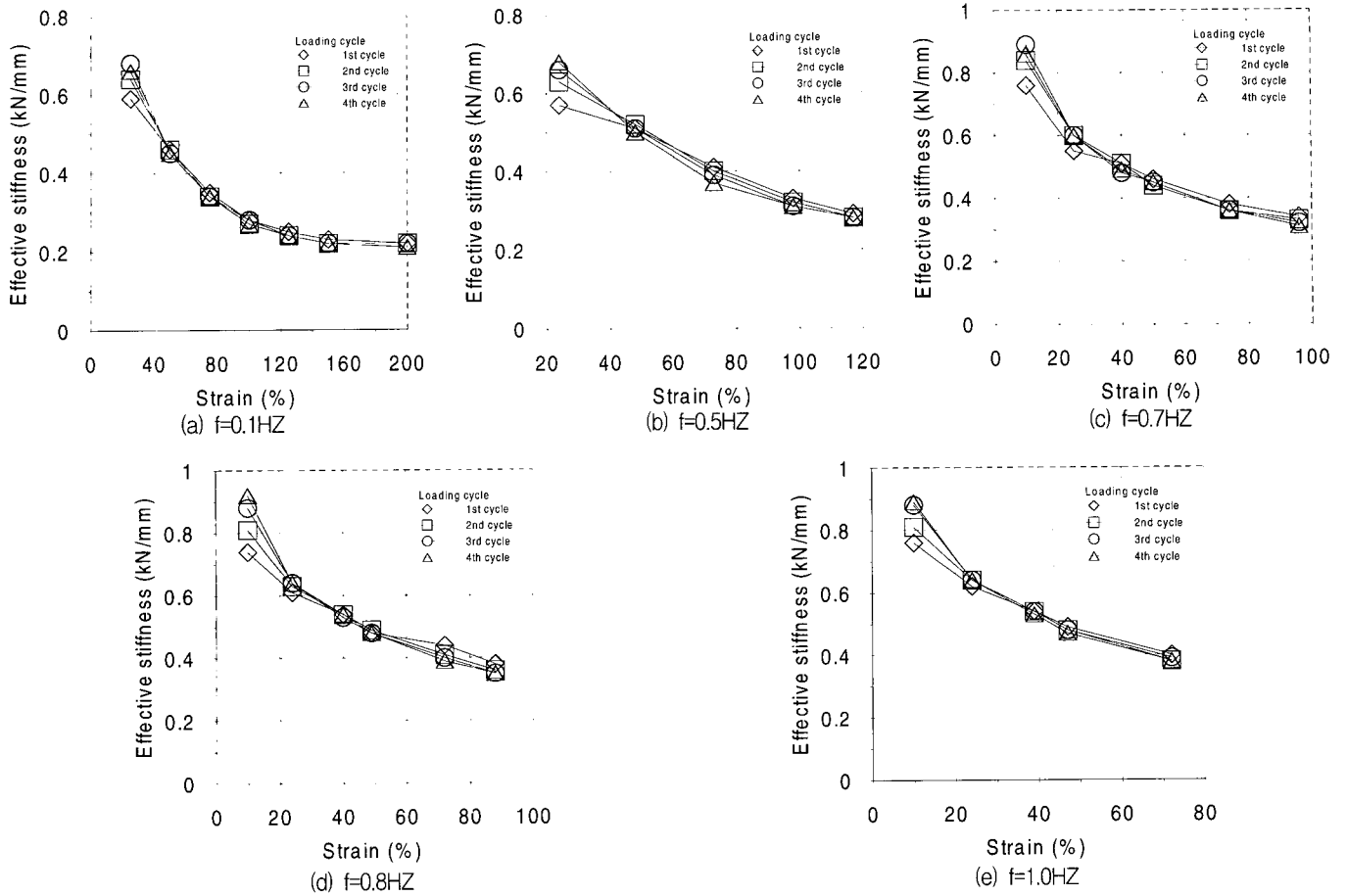


그림 25 재하 사이클에 따른 유효강성의 변화

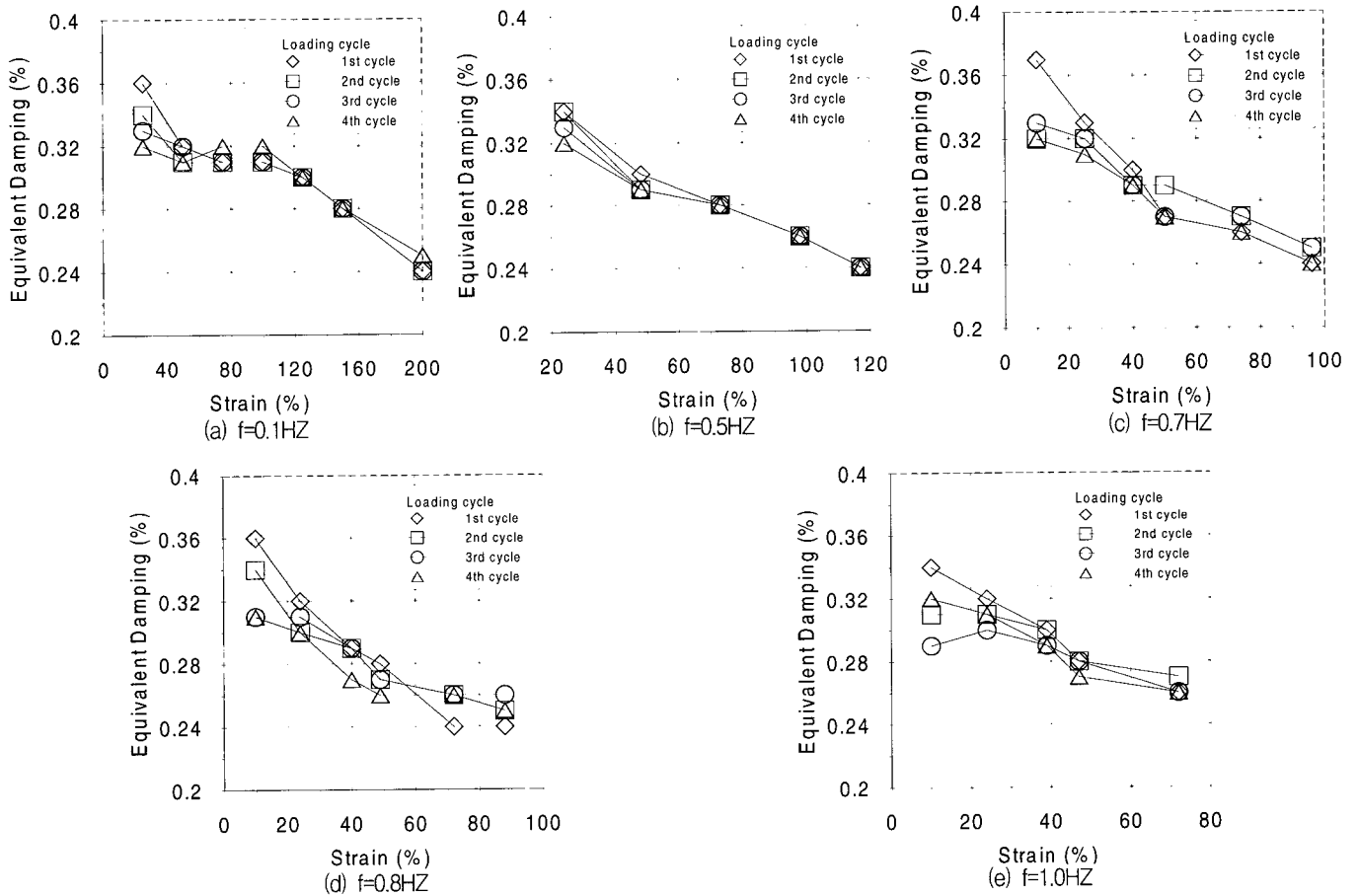


그림 26 재하 사이클에 따른 등가감쇠의 변화



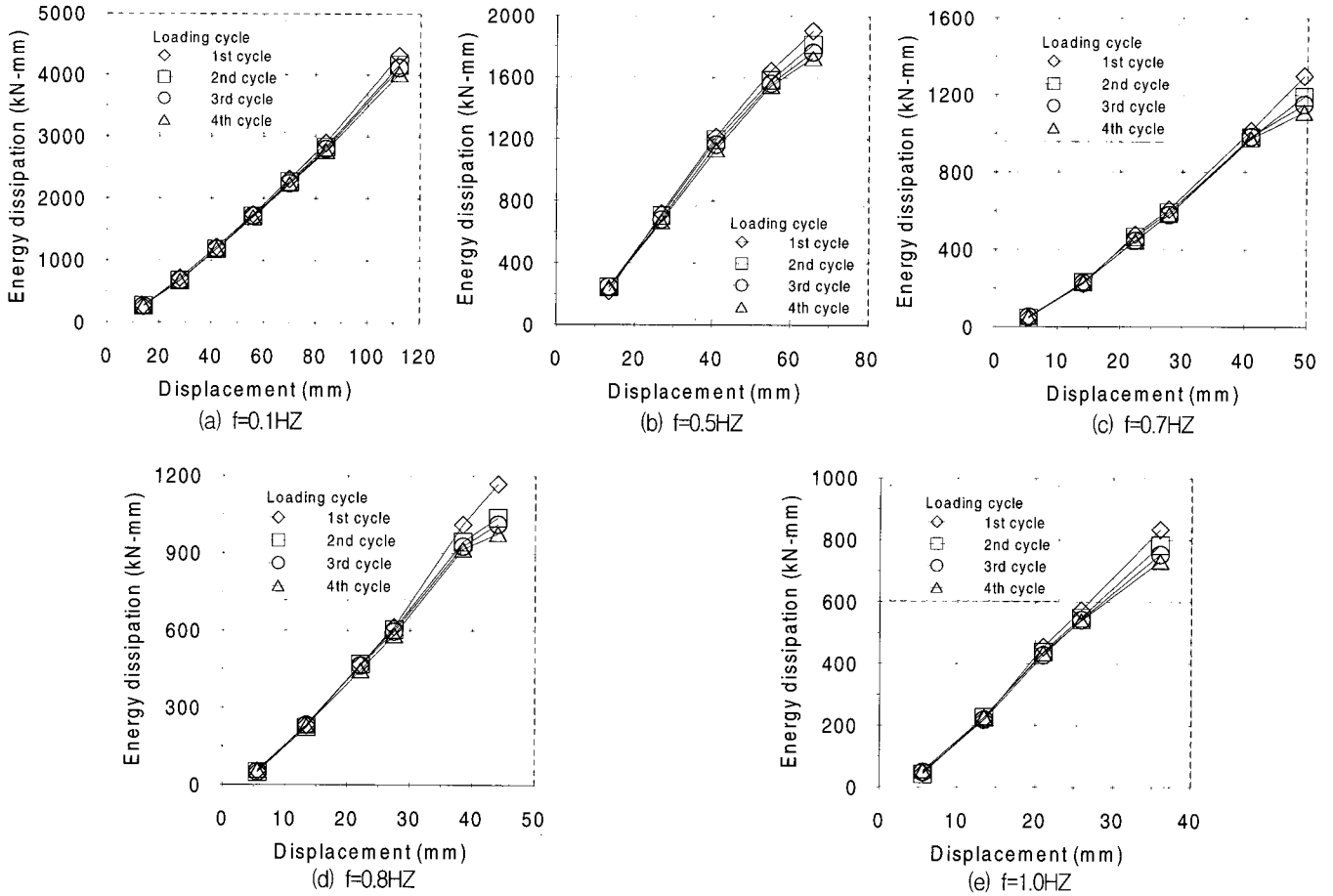


그림 27 재하 사이클에 따른 소산에너지의 변화

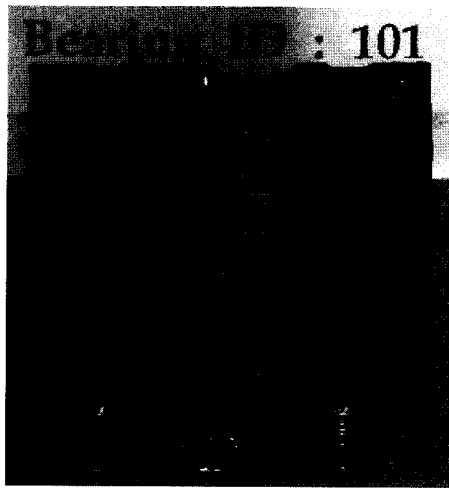


그림 28 Bearing ID. 101의 실험 후 단면

시험체의 납봉 상부와 하부의 거의 동일한 위치에서 각각 균열이 발생하여 납봉이 절단된 현상이 나타났다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 베어링의 형상계수가 작기 때문에 발생한 것으로 보인다.

가장 이상적인 베어링의 거동은 그림 29(a)에서 보는 바와 같이 베어링이 순수 전단변형만을 일으키는 경우로서 이때에는 전단변형량이 납봉의 직경을 초과하지 않아야 한다. 즉 다음과 같은 조건을 만족시킬 경우 LRB 내부의 납봉에 손상이 발생하지 않게 된다.<sup>(5)</sup>

$$\Delta_{\max} < D_b \quad (1)$$

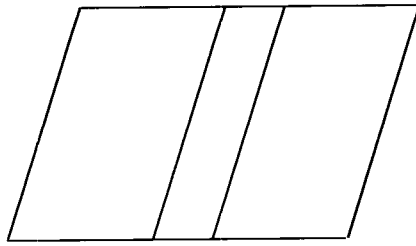
여기서,  $\Delta_{\max}$ 는 베어링의 최대 전단변형량,  $D_b$ 는 납봉의 직경을 나타낸다. 위의 식 (1)을 전단변형률로 나타내면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\gamma_{\max} \leq \left( \frac{D_b}{H_b} \right) \left( \frac{H}{T_r} \right) \quad (2)$$

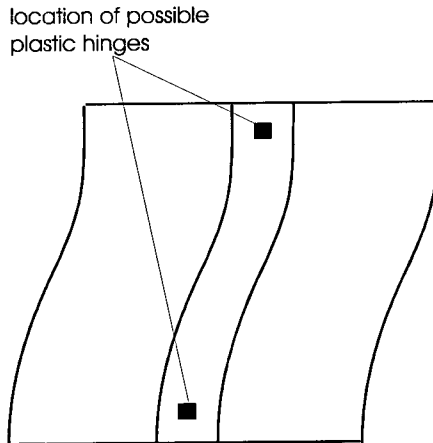
여기서,  $\gamma_{\max}$ 는 허용 최대 전단변형률을 나타내며,  $D_b/H_b$ 는 납봉의 세장비, 즉 납봉의 직경과 높이의 비,  $H/T_r$ 은 베어링의 전체 높이와 고무층의 전체 두께와의 비를 나타낸다.

직경이 작고 높은 베어링에 삽입된 납봉에는 순수 전단변형 이외에 그림 29(b)와 같이 휨 변형이 발생하여 납봉의 양 끝 부근에서 전단으로 인한 소성변형이 생기지 않고 오히려 소성현지가 나타나게 된다.<sup>(5)</sup> 따라서 납봉의 양 끝 부근에서 파괴가 발생하여 그 감쇠기능을 상실하게 된다. 그러므로 LRB의 설계 시에는 베어링과 납봉의 형상계수를 신중히 고려하여야 한다.

그림 28에서 보는 바와 같이 시험체의 납봉 양단에서 소성현지가 발생하여 납봉이 파괴된 것은 세장비가 큰 베어링에 과도한 전단변형을 가하였기 때문에 발생한 것으로 볼 수 있다. 일본 도로교 면진설계법 매뉴얼<sup>(2)</sup>에서는 납봉의 세장비가 0.2~0.8 내에 있도록 규정하고 있다.



(a) 베어링의 전단변형



(b) 베어링의 휨변형

그림 29 베어링의 변형모드

## 6. 결 론

본 연구에서는 10ton 및 200ton 용량의 LRB 시험체에 대한 성능시험을 수행하여 유효강성과 등가감쇠비를 평가하였다.

본 연구에서 도출한 LRB의 기계적 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 전단변형률이 증가함에 따라서 유효강성과 등가감쇠비는 크게 감소하며, 가진 진동수가 클수록 유효강성은 증가하나 등가감쇠비는 감소한다.
- 전단변위가 증가함에 따라서 소산에너지는 거의 선형적으로 증가하며, 큰 변위에서의 소산에너지는 가진 진동수의 영향을 많이 받는다.
- 유효강성과 등가감쇠비는 LRB에 작용하는 연직하중이 클수록 커진다. 이 때 유효강성의 차이는 변형률이 작은 경우에 더 크게 발생한다.
- 소산에너지는 연직하중이 증가함에 따라서 전단변위에 대해 거의 선형적으로 증가한다. 연직하중이 클수록 그 기울기는 더욱 커진다.
- 수평 전단하중의 재하 사이클이 증가할수록 유효강성은 증가하며 등가감쇠비와 소산에너지는 감소하는 경향을 보인다. 이 때 세 번째 사이클의 시험결과는 대체적으로 평균값에 가까운 것으로 나타났다.

이상에서 기술한 바와 같이 LRB의 기계적 특성은 가진진동수와 연직하중의 크기에 따라서 크게 변화된다. 따라서 면진교량의 설계 및 해석 시에는 교각 및 교대, 상판에서의 지

진응답과 재하하중의 크기에 따라서 달라지는 LRB의 기계적 특성치를 신중하게 적용하여 안전한 설계가 되도록 하여야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 중소기업청의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 면진장치를 제작해 주신 (주) KR과 실험을 수행해 주신 한국기계연구원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Komodromos, P., *Seismic Isolation for Earthquake-Resistant Structures*, WIT Press, Southampton, 2000.
2. 土木研究センター, 道路橋の免震設計法マニュアル(案), 平成4年.
3. Kulak, R. F. and Hughes, T. H., "Mechanical characterization of seismic base isolation elastomers," *SMiRT-11*, K23/3, Tokyo, Japan, 1991, pp. 163-168.
4. Fennes, G. L., Huang, W. H., Whittaker, A. S., Clark, P. W., and Mahin, S. A., "Modeling and characterization of seismic isolation bearings," *Proceedings of the U.S.-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges*, 1998, pp. 371-385.
5. Buckle, I. G., "Factors affecting the performance of lead-rubber energy dissipators," *RRU Bulletin*, Vol. 73, New Zealand National Roads Board, 1984, pp. 157-170.
6. Robinson, W. H. and Tucker, A. G., "Test results for lead-rubber bearings for WM. Clayton building, Toe Toe bridge and Waiotukupuna bridge," *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 14, No. 1, 1981, pp. 21-33.
7. Fujita, T., Ikenaga, M., and Shimoda, I., "Experimental study of hysteretic restoring force characteristics and breaking conditions of lead-rubber bearing(the case of bolt-type connection)," *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, Vol. 57, No. 533, 1991, pp. 76-81.
8. 전영선, 최인길, 유문식, "특성시험을 통한 LRB 유효설계기준치 결정", KAERI/TR-1833/2001, 한국원자력연구소, 2001.
9. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박철림, "적층고무베어링과 납고무 베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가", 한국지진공학회 논문집, 제2권, 제4호, 1998, pp. 53-62.
10. 유봉, 이재한, 구경희, 권혁신, "액체 금속로 면진설계를 위한 축소규모 납삽입 및 3차원 면진베어링의 특성시험결과 분석", KAERI/TR-1362/99, 한국원자력연구소, 1999.
11. 日本免震構造協會, 免震積層ゴム入門, オム社, 1997.
12. JSSI 規格 I-21, 鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ, 日本免震構造協會, 1997.