

# 저경도 고무받침의 특성에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Characteristics of Low Hardness Rubber Bearing

정길영\*  
Chung, Gil Young

하동호\*\*  
Ha, Dong Ho

박건록\*\*\*  
Park, Kun Nok

권형오\*\*\*\*  
Kwon, Hyung Oh

### 국문요약

본 연구에서는 저경도 고무받침 시험체의 다양한 특성실험을 통하여 저경도 고무받침의 특성을 파악하였다. 고무받침의 파악하고자 하는 특성은 변위 의존성, 반복재하특성, 진동수 의존성, 면압 의존성, 온도 의존성, 극한전단특성, 수직강성 및 전단변형능력 등이다. 특성실험결과, 저경도 고무받침의 특성치는 변위와 면압의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 진동수가 증가할수록 유효강성과 등가감쇠비가 조금 증가하며, 반복재하의 영향을 거의 받지 않았다. 그리고 대변형에 의해 변형경화 영역을 경험한 고무받침은 전단탄성계수가 저하되나, 시간이 경과하면서 일부 회복됨을 확인하였다. 끝으로, 전단파괴실험을 수행하였으며, 축소 시험체의 경우에 전단파괴가 전단변형률 490% 근처에서 진행되었고 실물의 경우에는 430%에서 진행되었다.

주요어 : 고무받침, 저경도, 특성실험, 유효강성, 등가감쇠비

### ABSTRACT

In this paper, the characteristics of RB(rubber bearing) were studied by various prototype tests on RB with low hardness rubber. The characteristics of RB were tested on displacements, repeated cycles, frequencies, vertical pressures, temperature, vertical stiffness and the capability of shear deformation. The prototype test showed that the displacement and vertical pressure were the most governing factors influencing on characteristics of RB. The effective stiffness and equivalent damping of RB showed small increment in high frequency range. After the repeated cyclic test with 50's cycles, the effective stiffness and equivalent damping of RB were almost constant compared with those of the 1st cycles due to low hysteretic damping. The shear modulus of RB was reduced after large deformation, and this value of RB was partly recovered after 40 days. Finally, the shear failure test of RB was conducted, the prototype was failed over 490% of shear strain, and real size RB was failed over 430% of shear strain.

**Key words** : rubber bearing, low hardness, prototype test, effective stiffness, equivalent damping ratio

## 1. 서 론

지진격리 시스템은 경제성 및 효율성이 비교적 양호하기 때문에 구조물의 지진피해를 최소화하기 위하여 국내·외에서 널리 적용되고 있다. 국내의 경우, 원자력발전소와 LNG 저장탱크와 같이 중요도가 높은 구조물에 적용하기 시작하여 현재까지 적용된 교량 수만도 수십여개에 달하며, 몇몇의 건축구조물에도 적용된 바 있다.

구조물의 지진격리받침은 사용목적, 환경 및 기계적 특성 등을 고려하여 다양한 형태로 제작되어 사용되고 있다. 이러한 지진격리받침중의 하나인 고무받침은 고무판과 보강철판이 적층구조로 제작된 장치로서, 지진시에 구조물에 유연성을 부여하여 구조물의 고유주기를 길게 하기 때문에 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄일 수 있다. 지진시 변위를 감소시키기 위하여 에너지 소산능력을 높인 내부고무를 사용한 고감쇠 고무받침을 사용하기도 하나, 고감쇠 고무는 변위와 면압 및 온도 등에 의존성이 높고 크리프가 크게 나타나는 등의 단점이 있다. 따라서, 의존성이 낮은 고무재료

로 제작한 고무받침과 사용환경과 특성에 맞는 별도의 감쇠기를 함께 사용하기도 한다. 이 외에도 고무받침의 내부 홀에 납봉 또는 고감쇠 소재를 삽입하여 감쇠력을 향상시켜 사용하기도 한다.

저경도 고무는 고무재료에 배합되는 각종 배합약품 중에서 보강제(카본블랙, 화이트카본 등)의 배합량을 조절하여 경도를 낮춘 재료이다. 천연고무계 저경도 고무를 이용한 고무받침 중에서 낮은 전단탄성계수를 갖는 고무받침은 현재 일본에서 0.35MPa까지 제작되어 건물용 지진격리받침으로 사용되고 있다. 이러한 저경도 고무로 제작된 고무받침은 구조물 자체의 고유주기가 비교적 커서 다른 구조물보다 장주기화하여야 할 경우에 많이 사용되고 있으며, 저경도 고무를 사용하면 고무받침의 높이를 줄일 수 있으므로 제작단가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 그러나, 고무받침의 높이를 줄인다는 것은 전단변형률의 증가로 이어지므로 우수한 극한전단변형능력이 확보되어야 한다. 또한, 저경도 고무받침은 현재 국내에서 일반적으로 사용되는 제품이 아니므로 다양한 조건에서의 특성파악을 통하여 제품성능이 설계치와 부합하도록 하여야 한다.

본 논문에서는 다른 감쇠기와 함께 사용되는 저경도 고무받침 시험체의 다양한 실험을 통하여 특성을 파악하였다. 파악하고자 하는 고무받침의 특성은 변위 의존성, 반복재하특성, 진동수 의존성, 면압 의존성, 온도 의존성, 극한전단특성, 수직강성 및 전단변형능력 등이다. 그리고, 극한전단실험중

\* 유니슨기술연구소, 선임연구원(대표저자 : starless@hanafos.com)

\*\* 유니슨기술연구소, 부소장

\*\*\* 유니슨기술연구소, 선임연구원

\*\*\*\* 유니슨기술연구소, 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2002년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 5. 21 / 심사종료일 : 2002. 8. 6)

에 175%의 전단변형실험을 수행하여 대변형 발생 이후의 고무 전단탄성계수의 변화를 점검하였으며, 일정기간(40일) 후의 회복율도 검토하였다. 끝으로, 실물의 전단파괴실험을 통하여 전단변형 능력을 확인하였다.

2. 시험체의 제원

본 연구에 사용된 저경도 고무받침의 제원은 다음과 같다.

2.1 재료

고무받침에 사용된 재료의 물성은 표 1에 나타난 바와 같다. 고무받침의 기계적 특성 및 내노화성을 향상시키고 극한 전단성능을 증대시키기 위하여 내부고무와는 별도로 피복고무를 배합하여 고무받침을 제작하였다.

표 1 재료 물성

특 성	단위	값
내부고무의 전단탄성계수	MPa	0.4
피복고무의 전단탄성계수	MPa	0.6

2.2 제원

고무받침 시험체의 단면도와 치수표기는 그림 1에, 세부치수는 표 2에 나타나 있다. 고무받침 축소 시험체(이하 시험체라 함)의 설계특성치는 표 3에 나타난 바와 같다.

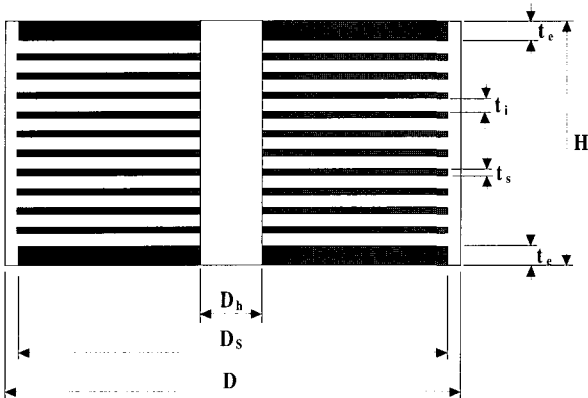


그림 1 고무받침 시험체의 단면도

표 2 고무받침 시험체의 치수

항 목	표기	단위	값
외경	$D$	mm	300
내부보강철판의 직경	$D_s$	mm	280
내부 홀의 직경	$D_h$	mm	60
고무층의 총두께	$T_r$	mm	40
고무층 수	$n$	-	20
고무 1층의 두께	$t_i$	mm	2
내부보강철판의 두께	$t_s$	mm	2
단부철판의 두께	$t_e$	mm	35
총 높이	$H$	mm	148

표 3 고무받침 시험체의 설계특성치

항 목	표기	단위	값
1차 형상계수	$S_1^*$	-	27.5
2차 형상계수	$S_2^{**}$	-	7
유효강성	$K_{eff}$	MN/m	0.590
최대 수직강성	$K_v$	GN/m	0.923

$$* S_1 = \frac{D_s - D_h}{4 \cdot t_i}$$

$$** S_2 = \frac{D_s}{n \cdot t_i}$$

3. 실험개요

유니슨기술연구소 구조시험동 소재의 2,000kN 압축-전단 시험기를 사용하여 2장에 나타난 바와 같은 고무받침 시험체에 대하여 다양한 특성실험을 수행하였다. 실험장비 및 실험방법은 다음과 같다.

3.1 실험장비

고무받침 시험체의 특성실험에 사용된 2,000kN 압축-전단 시험기의 최대수직하중은 2,000kN이며 최대 수평하중은 500kN이다. 그리고, 최대수평속도는 300mm/sec이며 수평방향 최대변위는  $\pm 200$ mm 이다. 극한전단실험과 수직강성 실험 및 전단파괴성능실험은 1개의 고무받침으로 실험을 수행하였으며, 그 외에 다른 실험항목에 대해서는 2개의 고무받침을 시험기에 설치하여 실험을 수행하였다. 2개의 시험체로 실험한 경우의 시험기 전경 및 구성도는 그림 2와 그림 3에 나타나 있다.

3.2 실험항목

국내에서는 지진격리용 고무받침과 관련된 기준을 마련 중에 있기 때문에, 일본 및 AASHTO 기준을 주로 참조하여 저경도 고무받침의 특성실험의 항목 및 방법을 선정하였다. 변위 의존성 실험을 위하여 일본측의 고무받침 ISO 규정 최종안<sup>(8)</sup>에서 제시하고 있는 6가지의 전단변형률에 25, 75 및



그림 2 2,000kN 압축-전단 시험기

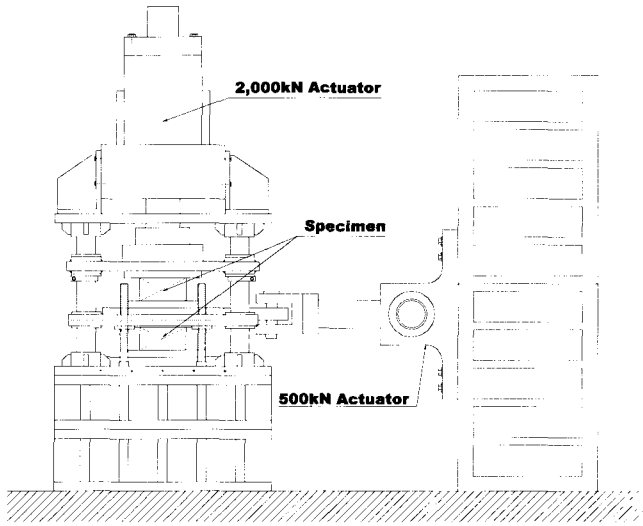


그림 3 시험기 구성도

125%를 추가하여 총 9개의 전단변형률에 대한 의존성 실험을 수행하였다. 일본 도로교 기준은 고무받침의 설계지진시 최대 전단변형률을 250%로 제한하고 있으며, 일본 건축물의 경우에도 설계지진시 250~300%의 전단변형률 이내에서 고무받침을 사용하고 있다.

반복재하특성을 파악하기 위하여 AASHTO<sup>(4)</sup>의 경우에는 10~25회 범위의 반복재하수를 사용하고 있으나, 본 논문에서는 일본 도로교 면진설계 매뉴얼-안<sup>(9)</sup>과 일본측의 ISO 규정 최종안<sup>(8)</sup>에서 제시하고 있는 50회의 반복재하수를 사용하였다. 진동수 의존성의 경우, 일본측의 ISO규정 최종안<sup>(8)</sup>에서는 2Hz까지 실험을 수행하도록 제시하고 있으나 시험기의 가진진동수 한계를 고려하여 0.6Hz까지 실험을 수행하였으며, 일반적인 지진격리 진동수는 0.6Hz 이내이다.

일본 도로교받침편람-개정안<sup>(10)</sup>은 1차 형상계수가 8이상인 고무받침의 사용압력은 상시변위에서의 유효지압면적으로 12MPa이내로 제한하고 있으며, 국내 교량용 탄성받침과 일본 건축구조물의 경우에는 15MPa까지 사용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 교량용 탄성받침과 건축구조물의 허용지압능력인 15MPa을 포함하는 20MPa까지의 면압에 대하여 특성실험을 수행하여 면압의존성을 파악하였다. 온도 의존성을 파악하기 위하여 국내 도로교설계기준<sup>(3)</sup>의 한냉한 지방에서 강교의 온도범위인 -20℃의 저온과 +40℃의

고온에서 각각 실험을 수행하여 온도 의존성을 파악하였다. 300, 400 및 500%의 전단변형률에 대한 극한전단특성을 파악하였으며, 대변형 이후의 특성변화를 확인하기 위해 극한 실험 중간에 전단변형률 175%로 압축-전단실험을 수행하였다. 총하중(TL)의 ±30%로 3회 수직재하하여 수직강성을 측정하였으며, 끝으로 고무받침의 파단시까지 수평변위를 가하여 고무받침의 전단변형능력을 확인하였다.

본 논문에서 수행한 저경도 고무받침의 실험항목 및 방법을 요약하면 표 4와 같다.

### 3.3 특성치 산정

고무받침의 힘-변위 이력곡선에서  $i$ 번째 사이클의 유효강성( $K_{eff}^i$ )은 식 (1)과 같이 구한다. 여기서  $\Delta_i^+$ 와  $\Delta_i^-$ 는 각 사이클에서의 최대 및 최소 변위이며,  $F_i^+$ 와  $F_i^-$ 는 최대 및 최소변위에서의 힘이다.

$$K_{eff}^i = \frac{F_i^+ - F_i^-}{\Delta_i^+ - \Delta_i^-} \quad (1)$$

일본 도로교 면진설계 매뉴얼-안<sup>(9)</sup>에서는 식 (2)와 같이 평균유효강성( $K_{eff}$ )을 4회부터 10회까지 유효강성의 평균으로 계산하고 있다. 본 실험의 결과분석도 이에 따랐다.

$$K_{eff} = \frac{1}{7} \sum_{i=4}^{10} K_{eff}^i \quad (2)$$

$i$ 번째 사이클의 등가감쇠비( $\xi_{eq}^i$ )는 식 (3)과 같이 구한다. 여기서,  $EDC_i$ (energy dissipated per cycle)는 각 사이클에서의 이력곡선 내부의 면적이다.

$$\xi_{eq}^i = \frac{EDC_i}{2\pi K_{eff}^i \left( \frac{\Delta_i^+ - \Delta_i^-}{2} \right)^2} \quad (3)$$

평균유효강성과 마찬가지로 일본 도로교 면진설계 매뉴얼-안<sup>(9)</sup>에서는 평균등가감쇠비( $\xi_{eq}$ )도 식 (4)와 같이 4회부터 10회까지 등가감쇠비의 평균으로 계산하며, 본 실험의 결과분석도 이에 따랐다.

표 4 실험항목 및 방법

실험 항목	실험 방법
변위 의존성	전단변형률 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 및 250%에 대하여 수행
반복재하특성	50회의 반복재하수로 재하
진동수 의존성	가진진동수 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6Hz로 재하
면압 의존성	0, 5, 10, 15 및 20MPa의 수직압력에서 수행
온도 의존성	-20 및 +40℃의 실험온도에서 수행
극한전단특성	전단변형률 300, 400 및 500%에 대하여 수행, 대변형후 특성변화를 확인하기 위해 매실험 중간에 전단변형률 175%로 수행
수직강성	1.3TL부터 0.7TL까지 3회 재하, 여기서 TL=총하중
전단변형능력	파단시까지 변위재하

$$\xi_{eq} = \frac{1}{7} \sum_4^{10} \xi_{eq}^i \quad (4)$$

4. 특성실험 및 결과

고무받침의 특성파악을 위하여 3.2절에 나타난 다양한 실험항목에 대하여 실험을 수행하였다. 교량지지용 탄성받침의 KS규격(F4420 : 1998)에 따라 고온과 저온실험을 제외한 실험온도를 ±23℃로 유지시키며 실험을 수행하였으며, 각 실험항목에 대한 실험방법 및 결과는 다음과 같다.

4.1 변위 의존성

고무받침의 변위 의존성을 파악하기 위하여 다양한 수평 변위에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 2,000kN의 수직가력기로 시험체에 440kN으로 하중제어하여 7.5MPa의 면압을 유지하였으며, 500kN의 수평가력기를 이용하여 해당 변위로 변위제어하였다. 2개의 시험체를 설치하여 0.2Hz의 정현파로 수평변위를 각각 10회 재하하였다. 실험에 사용한 변위는 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 및 250%의 전단변형률에 해당하는 값이다.

변위에 따른 유효강성과 175% 전단변형률을 기준으로 유효강성의 변화율을 그림 4에 나타내었다. 변위가 증가함에 따라 유효강성이 감소하고 있으며, 큰 변형률보다 작은 변형률에서의 감소율이 높게 나타나고 있다. 전단변형률 25%와 250%간의 변화율이 약 25%에 달하므로 설계변위에서의 전단 변형률에서 수평강성의 설계치에 부합되기 위해서는 고무받침의 제작시에 고무의 변위 의존성을 고려해야 한다. AASHTO<sup>(4)</sup>의 품질관리시험(quality control test)에 의하면, 개별제품의 유효강성에 대하여 설계치의 ±20% 이내이고 제품 전체의 평균은 설계치의 ±10%이내 이어야 한다고 규정되어 있다.

그림 5에 변위별 유효강성에서 산출한 전단탄성계수를 회귀 분석식과 비교하였으며, 회귀분석식은 식 (5)와 같다. 여기서,  $\gamma$ 는 전단변형률이고 전단탄성계수(G)의 단위는 MPa이다.

$$G = 0.42 \cdot \gamma^{-0.106} \quad (5)$$

그림 6에 변위에 따른 등가감쇠비를 나타내었으며, 변위가 증가하면서 등가감쇠비가 감소하다가 수렴하는 양상을 나타내고 있다. 등가감쇠비가 2~3% 정도로 비교적 작게 나타나고 있으나, 본 논문에서 사용한 고무받침은 함께 사용되는 감쇠기의 감쇠를 주로 이용하기 때문에, 고무받침 자체의 감쇠비는 중요한 검토대상이 아니다.

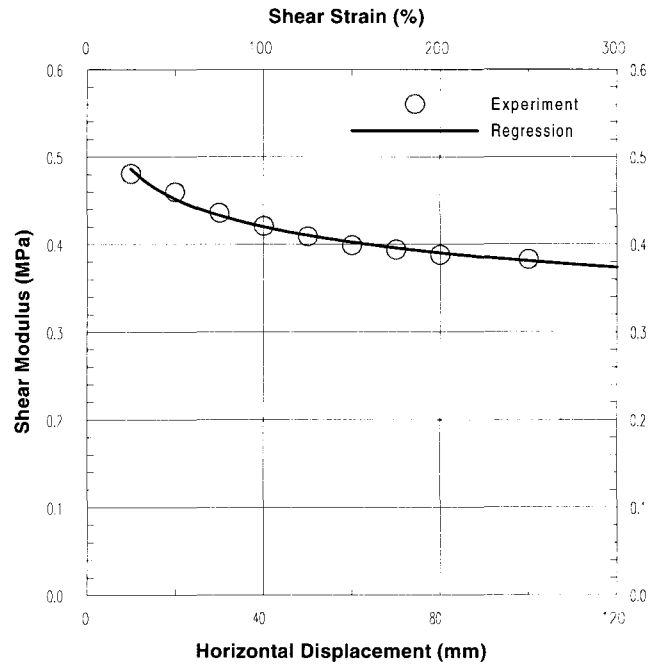


그림 5 변위에 따른 전단탄성계수

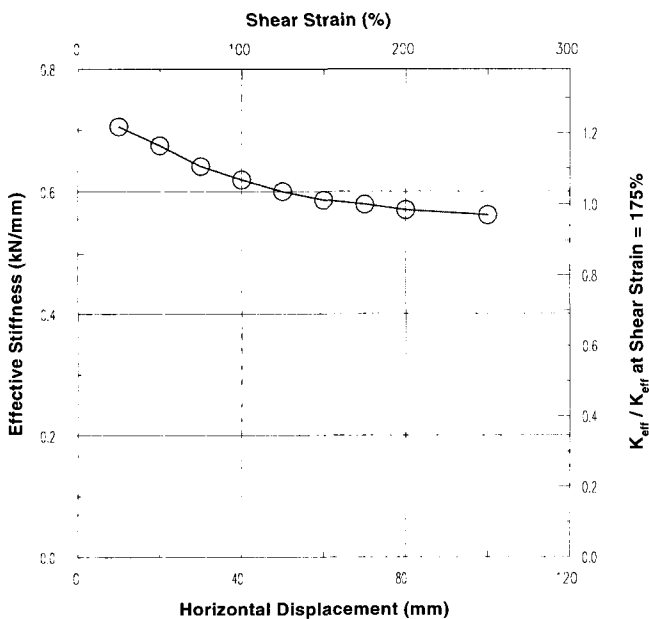


그림 4 변위에 따른 유효강성

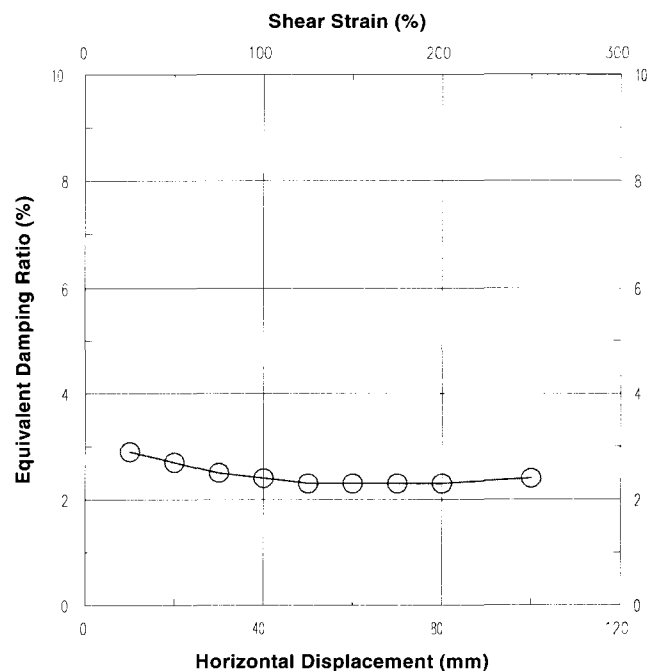


그림 6 변위에 따른 등가감쇠비

### 4.2 반복재하 특성

고무받침의 반복재하 특성을 파악하기 위하여 50회의 반복재하실험을 수행하였다. 2개의 시험체를 설치하고, 7.5MPa의 수직압력을 가하여 0.2Hz의 정현파로 175%의 전단변형률에 해당하는  $\pm 70\text{mm}$ 의 수평변위를 재하하였다.

고무받침 시험체의 힘-변위 이력곡선을 그림 7에 나타내었고, 반복재하수 증가에 따른 각 사이클별 유효강성과 등가감쇠비를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 내부고무의 감쇠비가 작기 때문에 반복재하에 의한 고무받침 내부의 온도상승이 미미하여 유효강성과 등가감쇠비의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

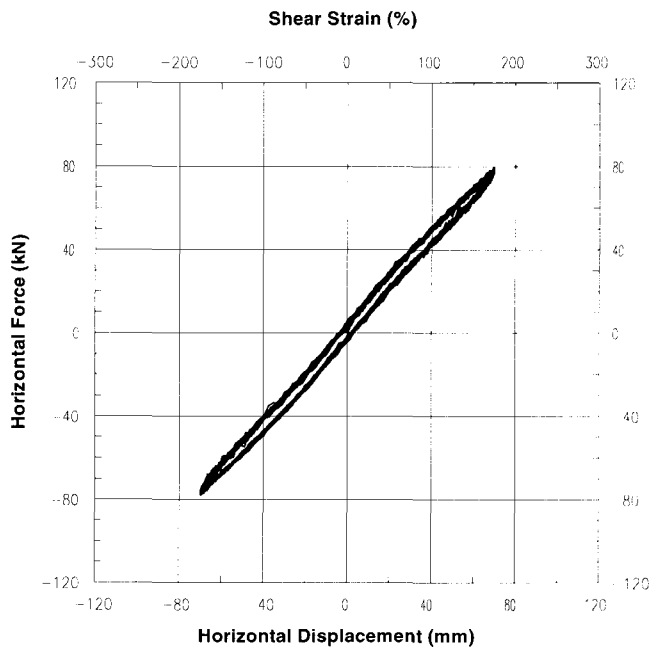


그림 7 반복재하실험의 힘-변위 이력곡선

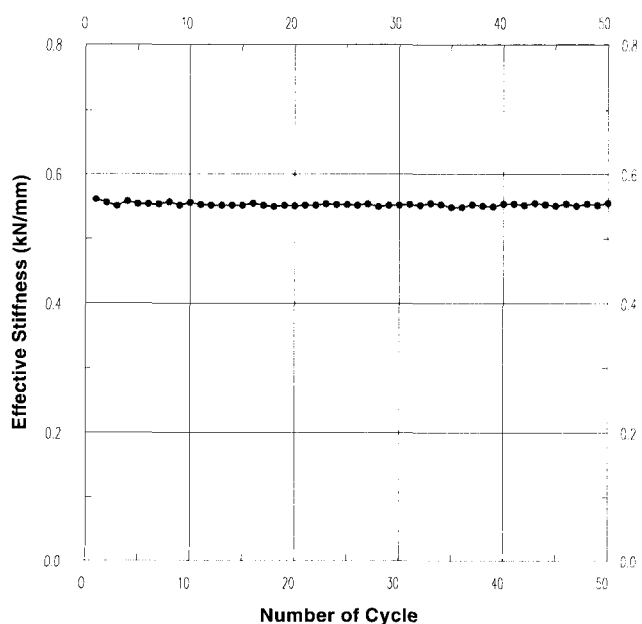


그림 8 반복재하에 따른 유효강성

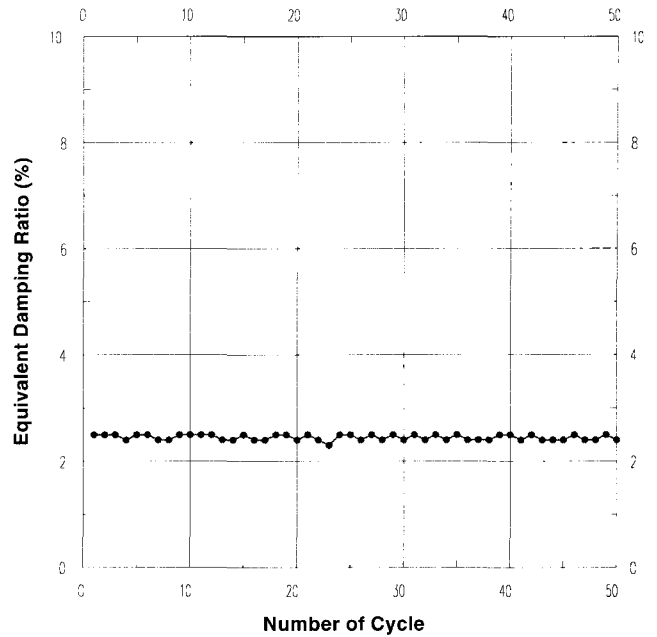


그림 9 반복재하에 따른 등가감쇠비

### 4.3 진동수 의존성

고무받침의 진동수 의존성을 파악하기 위하여 다양한 진동수에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 2개의 시험체를 설치하고 7.5MPa의 수직압력 하에서, 전단변형률 175%에 해당하는  $\pm 70\text{mm}$ 의 전단변위에 대하여 정현파로 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6Hz의 가진진동수로 수평변위를 10회 반복 재하하였다. 이때 가진진동수별 최대속도는 4.4, 44.0, 88.0, 131.9, 175.9, 219.9 및 263.9mm/sec 이다.

진동수에 따른 유효강성과 등가감쇠비를 그림 10과 그림 11에 나타내었으며, 진동수가 커짐에 따라 유효강성과 등가감쇠비가 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 증가량은 크지 않다.

### 4.4 면압 의존성

고무받침의 면압 의존성을 파악하기 위하여 다양한 면압에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 2개의 시험체를 설치하여 실험을 수행하였으며, 전단변형률 100%와 175%에 해당하는  $\pm 40$ ,  $\pm 70\text{mm}$ 의 전단변위에 대하여 0.2Hz의 정현파로 수평변위를 10회 반복재하 하였다. 실험한 면압은 0, 5, 10, 15 및 20MPa이므로 0, 294, 588, 881 및 1175kN의 수직하중을 가하였다.

그림 12는 175%의 전단변형률에 대한 0, 10 및 20MPa인 면압에서의 힘-변위 이력곡선으로서, 본 그림을 통하여 면압이 증가함에 따라 수평력이 감소되고 이력곡선의 내부면적이 증가하였음을 확인할 수 있다. 면압에 따른 유효강성을 그림 13에 나타내었고, 전단변형률 175%에서의 실험결과와 고무받침에 대한 수평강성의 면압의존성 이론인 Haringx 이론<sup>(11),(13)</sup>을 그림 14에 비교하였다. 그림 13에서 100% 및 175%의 전단변형률에서 유효강성이 동일한 경향으로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그림 14에서는 면압이 증가하면서 유효강성의 이론치와 실험치가 같은 경향으로 감소하고 있으나, 고무받침 시험체의 면압 의존성이 이론치에 비하여 높

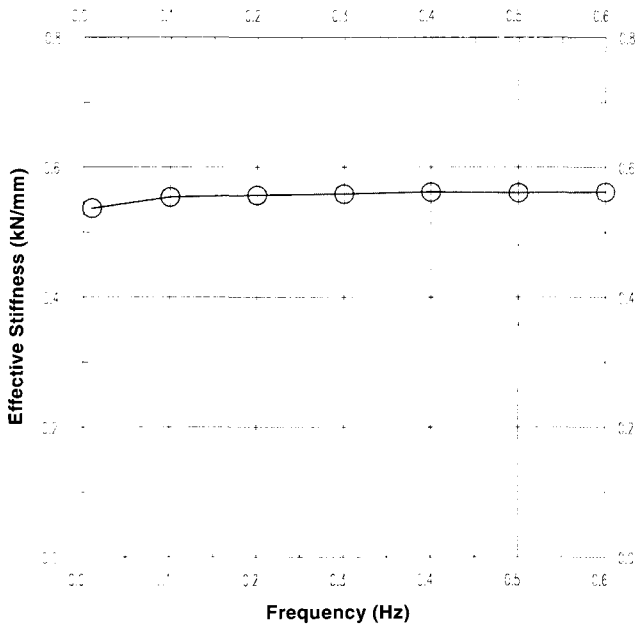


그림 10 진동수에 따른 유효강성

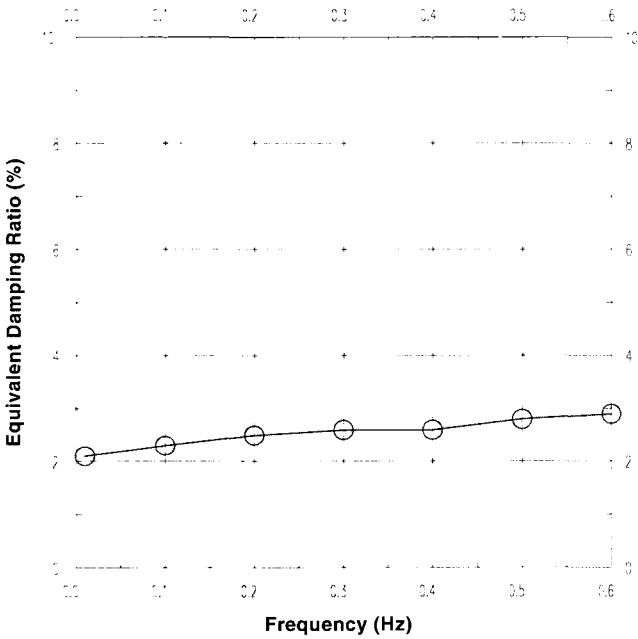


그림 11 진동수에 따른 등가감쇠비

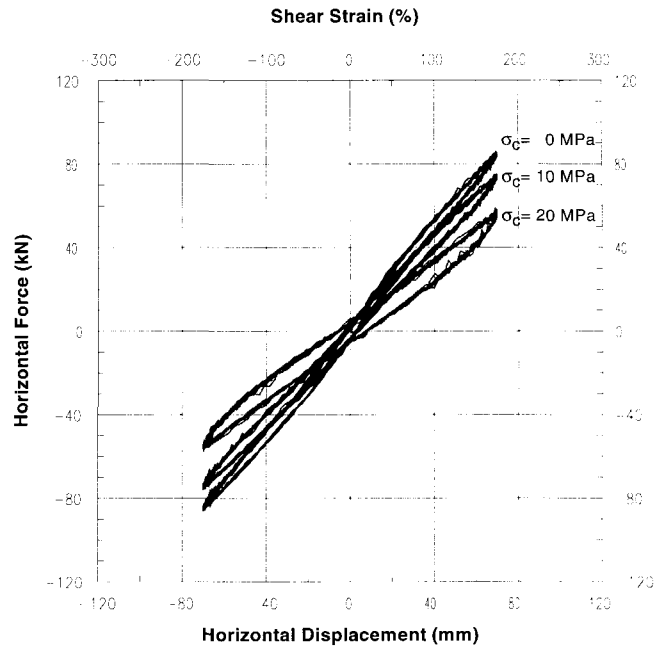


그림 12 힘-변위 이력곡선(면압 : 0, 10, 20MPa)

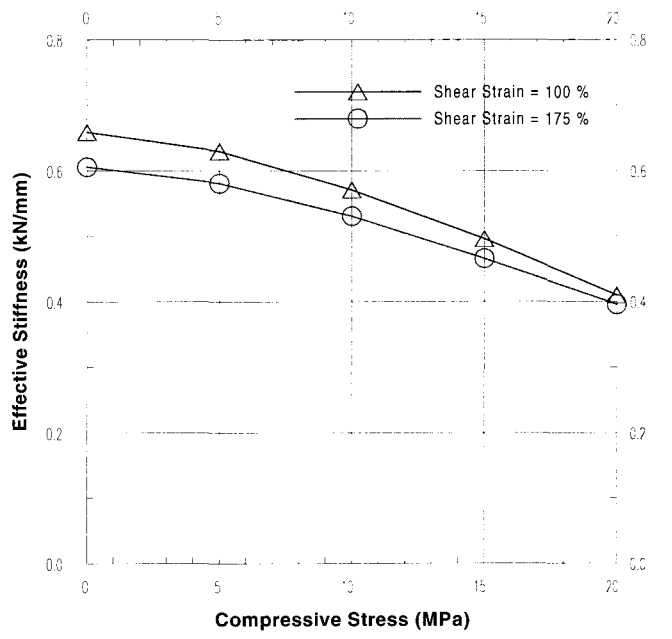


그림 13 면압에 따른 유효강성

게 나타나 실험결과와 압축응력이 이론치의 1/2 수준으로 나타나고 있다. 여기서, 1개의 시험체로 얻은 유효강성이 마찰면에 의해 마찰력이 조금 추가되었기 때문에 2개의 시험체에서 얻은 유효강성보다 조금 높게 나타나고 있다. 따라서, 시험기에 설치하는 시험체의 수량에 의한 면압 의존성의 차이는 거의 없는 것으로 판단되며, 실험결과와 이론치에 차이가 발생하는 것은 고무 재료의 물성차에 기인하는 것으로 보인다.

그림 15에 면압에 따른 등가감쇠비의 변화를 나타내었으며, 면압이 증가함에 따라 유효강성과는 달리 등가감쇠비는 증가하고 있다.

#### 4.5 온도 의존성

고무받침의 온도 의존성을 파악하기 위하여 -20℃의 저온과

+40℃의 고온에서 압축-전단실험을 각각 수행하였다. 여기서, -20℃와 +40℃는 국내 도로교설계기준<sup>(3)</sup>의 한냉지방에서 강교의 온도범위이자 일본측의 ISO규정 최종인<sup>(6)</sup>에서 제시하고 있는 온도범위이다. 2개의 시험체를 설치하여 저온 및 고온 실험을 각각 수행하였으며, 0, 5, 10, 15 및 20MPa의 면압에서 전단변형률 175%에 해당하는 ±70mm의 전단변위에 대하여 0.2Hz의 정현파로 수평변위를 10회 반복 재하하였다. 해당온도의 항온항습기내에 3일간 보관한 시험체를 시험기에 장착하고, 시험기 주변에 항온챔버를 설치하였다. 이후 저온유지시에는 액체질소를 이용하고 고온유지시에는 열풍기를 이용하여 실험온도를 유지시키며 실험을 수행하였다. 그림 16과 그림 17에 저온실험시의 내부모습과 고온실험시의 설치장면을 각각 나타내었다.

그림 18과 그림 19에 고무받침 시험체의 온도별 유효강성과

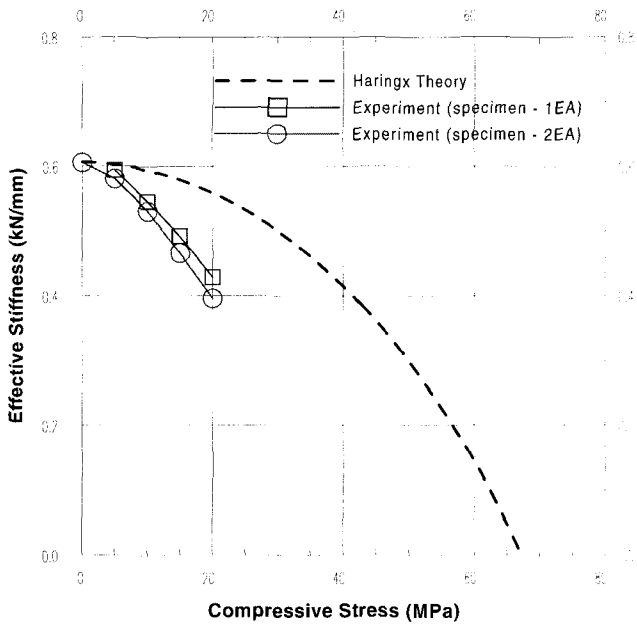


그림 14 실험결과와 이론치와의 유효강성 비교(전단변형률 : 175%)

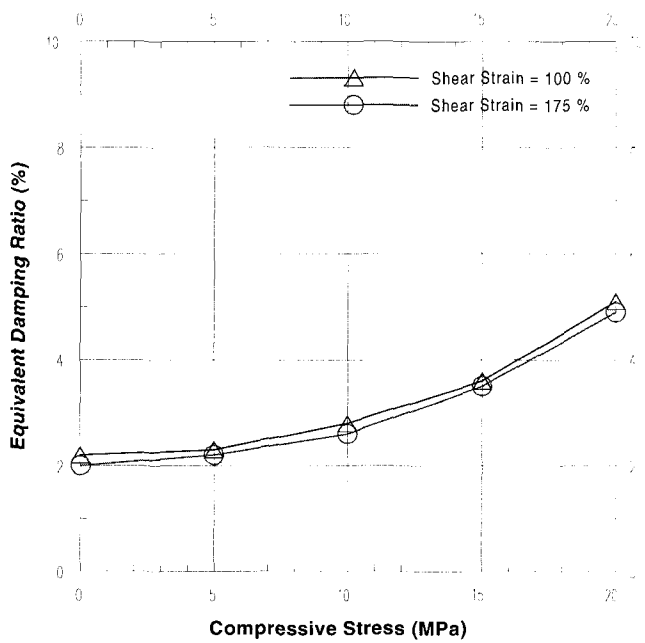


그림 15 면압에 따른 등가감쇠비

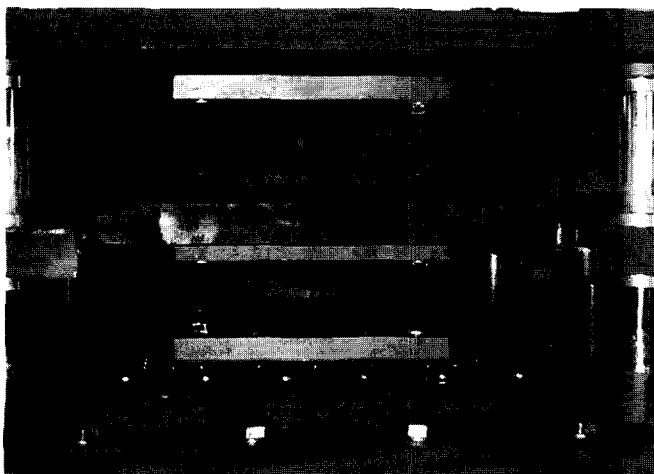


그림 16 저온실험 내부(-20°C)

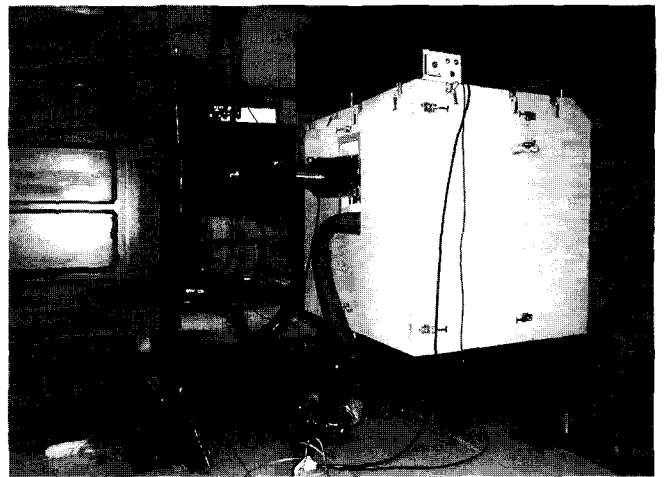


그림 17 고온실험광경(+40°C)

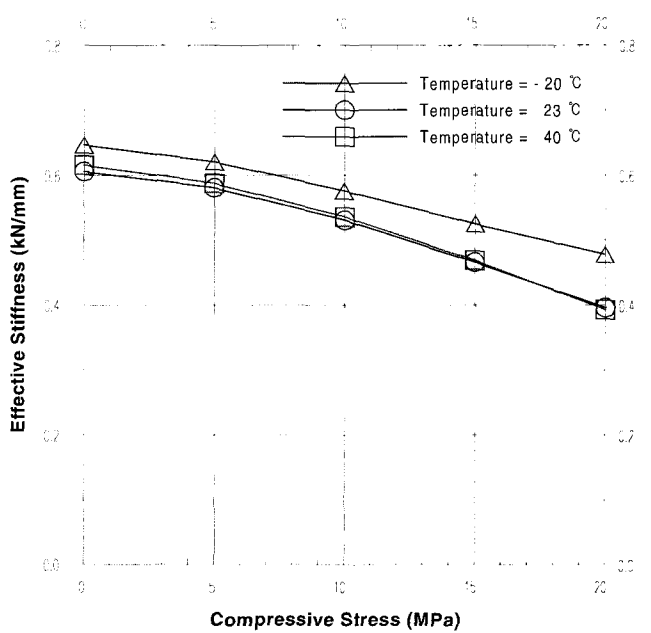


그림 18 온도별 유효강성의 변화

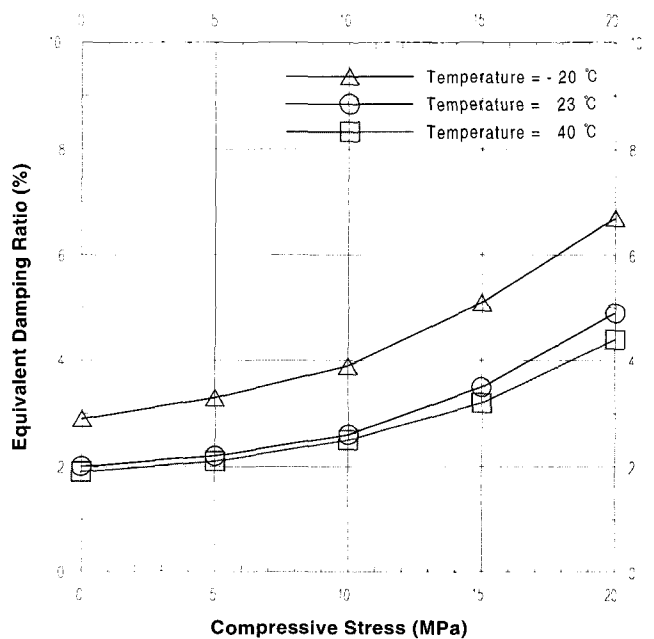


그림 19 온도별 등가감쇠비의 변화

등가감쇠비를 나타내었으며, 유효강성과 등가감쇠비 모두 온도가 상승함에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 저온(-20℃)과 상온(+23℃)과의 차가 상온과 고온(+40℃)간의 차보다 크게 나타나고 있다. 또한, 면압이 증가할수록 온도 차에 따른 유효강성의 차가 크게 나타나고 있으며, 면압이 20MPa인 경우에 저온시의 유효강성이 고온시에 비하여 약 21.6%가 높게 나타나고 있다. 여기서, 상온 +23℃에서의 특성치는 4.1절의 변위 의존성 실험에서 얻은 결과이다.

4.6 극한전단특성

고무받침의 극한전단특성을 파악하기 위하여 전단변형률 300% 이상의 대변형에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 시험체의 파단시 안전을 위하여 1개의 시험체를 설치하고 평판롤러(flat roller)를 이용한 미끄럼면을 설치하여 실험을 수행하였다. 7.5MPa의 면압에서 전단변형률 300, 400 및 500%에 해당하는 ±120, ±160 및 ±200mm의 전단변위에 대하여 0.2Hz의 정현파로 수평변위를 10회 반복 재하하였다.

그림 20에 고무받침 시험체의 전단변형률 500%에 해당하는 200mm에서의 변형모습을 나타내었으며, 이때 얻은 힘-변위 이력곡선은 그림 21에 나타내었다. 그림 21에서 전단변형률이 350%를 넘으면서 변형경화(Strain hardening)가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 극한전단변위에 따른 유효강성과 등가감쇠비를 4.1절에 나타난 변위 의존성 실험결과와 함께 그림 22에 나타내었다. 유효강성은 전단변형률이 300%를 지나며 증가하고, 등가감쇠비는 전단변형률이 200%를 지나며 증가하는 경향으로 나타나고 있으며, 이러한 현상은 고무의 변형경화가 주요 원인으로 판단된다.

극한전단실험의 수행중, 대변형 이후 특성치의 재현성을 파악하기 위하여 각각의 극한변형실험 수행 후에 175%의 전단변형에 대한 압축-전단실험을 수행하였다. 대변형후 175%의 전단변형률에 대한 전단탄성계수를 그림 23에 나타내었으며, 대변형 이후에 전단탄성계수가 저하되고 있다. 이러한 전단탄성계수의 저하원인은 고무의 변형경화에 의한 응력손실에 기인한 것이므로 설계변위내에서 고무의 변형경화가 가급적 발생하지 않아야 한다.<sup>(2)</sup> 그리고, 500%의 극한전단실험

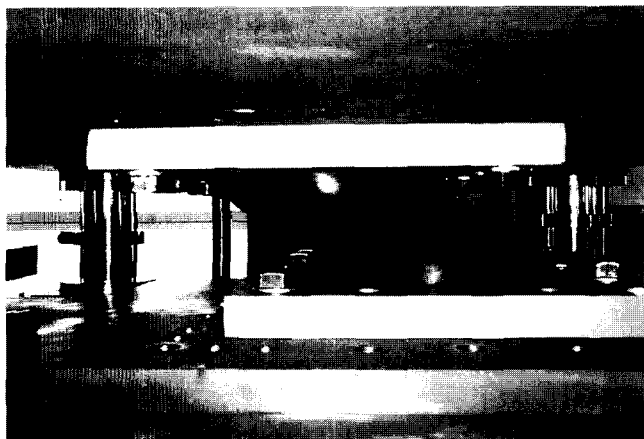


그림 20 고무받침의 극한전단변형(전단변형률 : 500%)

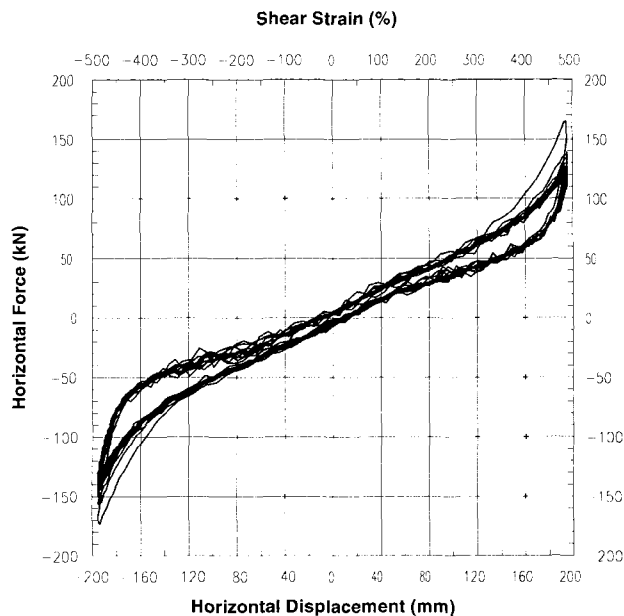


그림 21 힘-변위 이력곡선(전단변형률 : 500%)

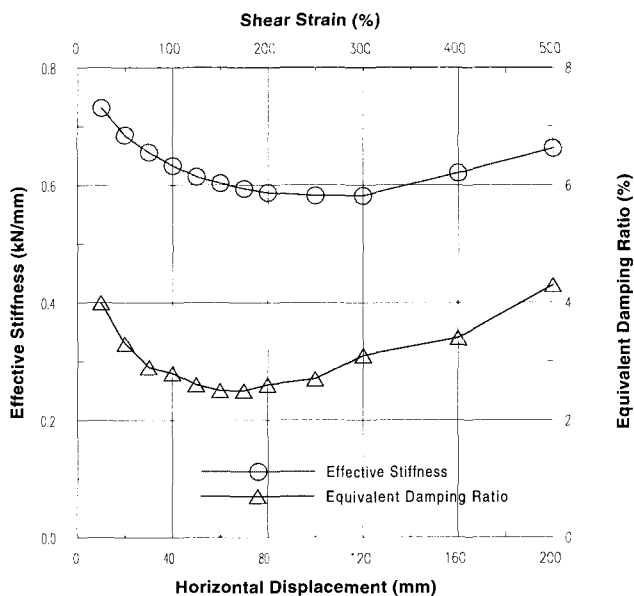


그림 22 변위에 따른 유효강성과 등가감쇠비

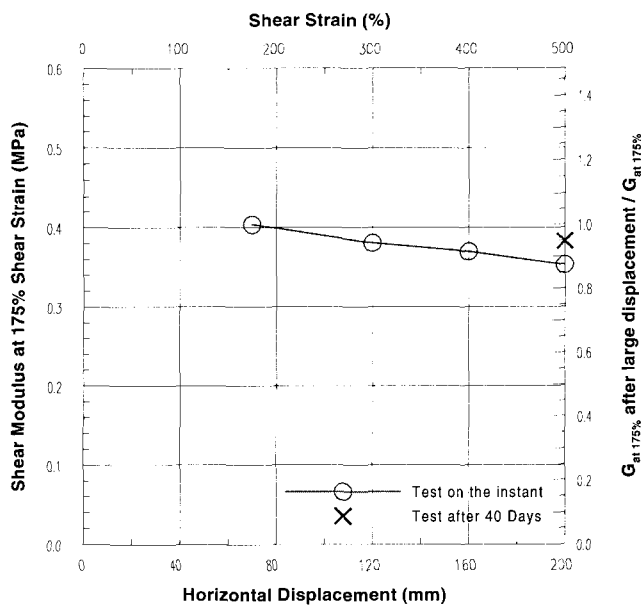


그림 23 대변형후 175%의 전단변형률에서의 전단탄성계수



험을 수행한 시험체를 40일후에 175%의 전단변형률에 해당하는 변위로 재실험하였으며, 전단탄성계수의 변화율이 -12.6%에서 -5.2%로 줄어든 것으로 보아, 대변형에 의해 손상된 전단탄성계수가 시간이 지남에 따라 일부 회복됨을 알 수 있다(표 5).

표 5 대변형후 175% 전단변형률에서의 전단탄성계수 및 변화율 전단변형률(%)

전단변형률(%)	175	300	400	500	
실험시간	직후	직후	직후	직후	40일 후
전단탄성계수(MPa)	0.404	0.381	0.370	0.353	0.383
전단탄성계수의 변화율(%)	N/A	5.7	8.4	12.6	5.2

### 4.7 수직강성

1개의 고무받침 시험체에 2개의 변위계(LVDT)를 설치하여 수직강성을 측정하였다. 수직하중을 설계최대면압(15MPa)의 +30%부터 -30%까지 3회 재하하여 3회의 평균치를 수직강성으로 사용하였다.

수직강성( $K_v$ )을 이론적으로 산정하는 식은 식 (6)과 같고 고무의 압축탄성계수( $E_c$ )와 겔보기 탄성계수( $E_{ab}$ )의 산정 식은 식 (7), (8)과 같다.<sup>(12)</sup>

$$K_v = \frac{E_c \cdot A_s}{T_v} \quad (6)$$

$$E_c = \frac{E_{ab} \cdot E_b}{E_{ab} + E_b} \quad (7)$$

$$E_{ab} = E_0 \cdot (1 + 2 \cdot x \cdot S_1^2) \quad (8)$$

여기서,  $E_0$ 는 고무의 탄성계수로서 전단탄성계수가 0.4MPa인 경우에 1.29MPa이고 고무의 경도에 따른 상수( $x$ )는 0.865이다.<sup>(12)</sup> 그 외의 변수에 대한 값들은 표 2와 표 3에 나타난 바와 같다.

그림 24에 수직강성 실험을 통한 힘-변위 이력곡선을 나타내었으며, 실험을 통해 산출된 수직강성은 1,003kN/mm이다. 실험에 의한 수직강성이 고무의 체적탄성계수( $E_b$ )를 Kfreakley<sup>(12)</sup>가 제시한 1,000MPa로 계산한 설계치인 922.5kN/mm보다 조금 큰 값을 나타내었으며, 고무의 체적탄성계수를 AASSTO<sup>(4)</sup>에서 제시하고 있는 2,000MPa로 사용하면 수직강성은 1,345kN/mm로 계산된다. 따라서 본 시험체에 사용된 고무의 체적탄성계수는 1,000~2,000MPa 사이에 있다고 추정된다.

### 4.8 전단변형능력

고무받침의 전단변형능력을 파악하기 위하여 본 연구에서 사용한 시험체와 동일한 배합의 고무로 제작한 실물에 대하여 전단파괴실험을 각각 수행하였다.

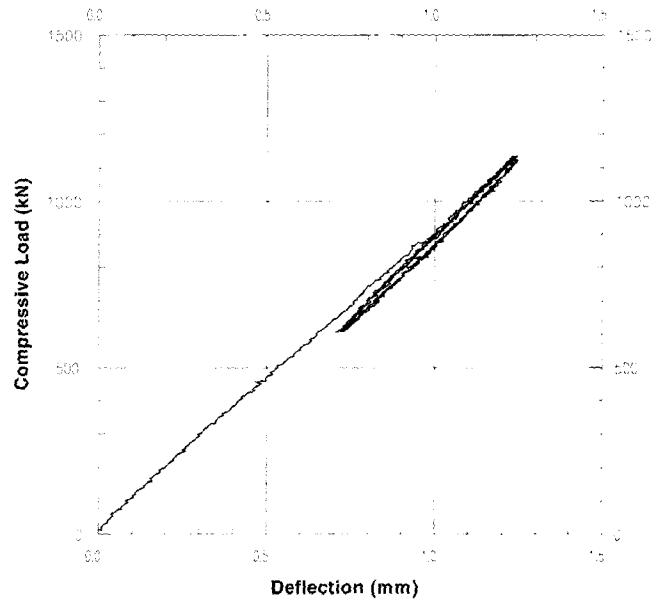


그림 24 수직강성 실험결과

축소 시험체의 경우, 1개의 시험체로 실험을 수행하였으며 시험기에 설치한 모습은 그림 25에 나타내었다. 실험시 면압을 0MPa로 유지시키며 1mm/sec인 저속의 정속파로 최대변형률 600%까지 수평변위를 재하하였다. 실험결과는 그림 26에 나타내었으며, 전단변형률 490%(수평변위 : 196mm)에서 시험체의 상부에 전단파괴가 발생하기 시작하여 505%의 전단변형률(수평변위 : 202mm)에서 최종 파단되었다. 0.2Hz의 가진진동수로 수행한 4.6절의 극한전단특성 실험에서는 500%의 전단변형률에서도 큰 문제가 발생하지 않았으나, 1mm/sec의 저속으로 수행한 전단파괴실험에서는 490%의 전단변형률에서 파괴가 발생하였다. 따라서, 고무받침에 대변형이 장기간 발생할수록 고무 내부의 손상이 진전됨을 알 수 있었다.

고무받침 실물의 경우, 내부보강철판의 직경은 800mm이며, 고무층의 총 두께는 132mm이다. 고무받침의 총 높이는 288mm이며, 1차 형상계수( $S_1$ )는 25이다. 실험에 사용된 실험장비는 30,000kN LRB 성능시험기로, 시험기의 최대수직하중은 30,000kN이며 최대수평하중은 5,000kN이다. 실물 1개에 대하여 전단파괴실험을 수행하였으며, 최대변형률 550%

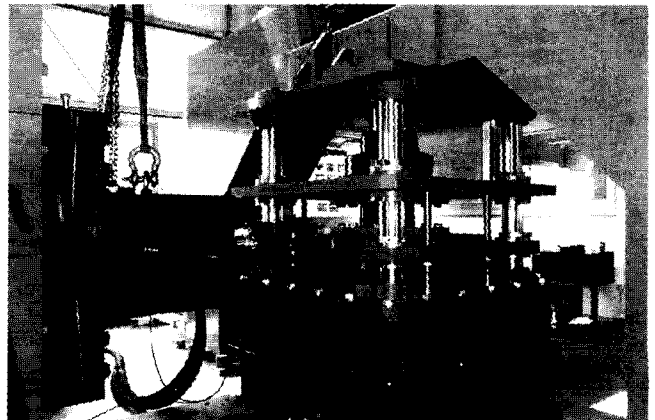


그림 25 전단파괴실험을 위한 시험체의 설치

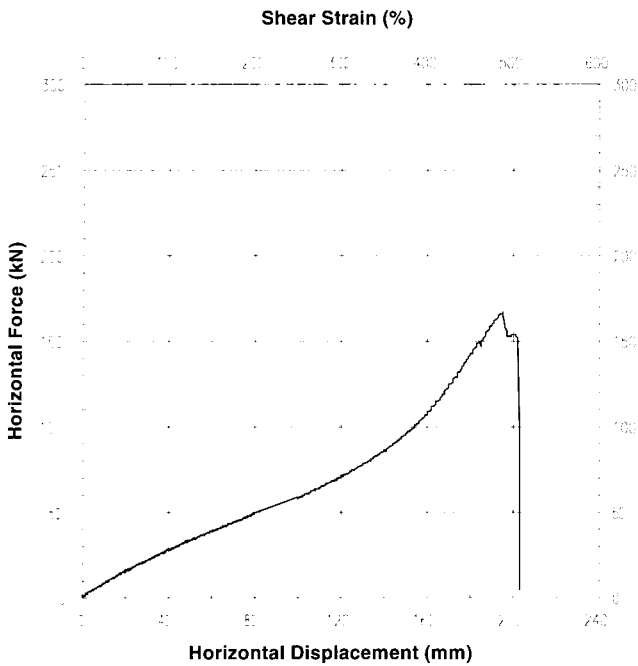


그림 26 시험체의 전단파괴 실험결과

까지 수평변위를 재하하였고 실험시 면압은 설계면압인 7.5MPa이다. 실험시 수평변위가 크기 때문에 축소 시험체에서 사용한 1mm/sec의 정속과 대신에 5mm/sec의 정속파로 전단파괴실험을 수행하였다. 그림 27에 실험수행중의 고무받침의 변형된 모습을 나타내었다. 실험결과는 그림 28에 나타내었으며, 전단변형을 430%(수평변위 : 567mm)에서 시험체의 상부에 전단파괴가 발생하기 시작하여 467%(수평변위 : 616mm)에서 최종 파단되었다.

### 5. 결 론

본 연구는 전단탄성계수가 0.4MPa인 천연고무계 저경도 고무받침의 다양한 특성실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 단, 본 논문에서 사용한 고무받침 시험체는 다른 감쇠기와 함께 사용되기 때문에 받침 자체의 이력감쇠가 중요치 않으므로 본 결론에서 등가감쇠비는 논외로 한다.

1. 천연고무받침은 고감쇠 고무받침, 납면진받침 등과는 달리 유효강성의 변위의존성이 작다고 알려져 있으나, 변위의존성 실험과 극한전단실험을 통하여 유효강성이 변위의 영향을 비교적 크게 받음을 알 수 있었다. 여기서, 저변위 구간에서 변위가 증가하면 유효강성은 감소하였고, 대변위시에는 고무의 변형경화에 의하여 유효강성이 증가하였다. 그리고, 극한전단 특성실험중의 전단탄성계수 확인실험을 통하여, 대변형 이후에 고무의 변형경화로 인한 응력손실로 인하여 전단탄성계수가 저하됨을 알 수 있었다. 또한, 40일후의 재실험을 통하여, 일정기간이 경과되면 저하된 전단탄성계수가 일부 회복됨을 확인할 수 있었다.

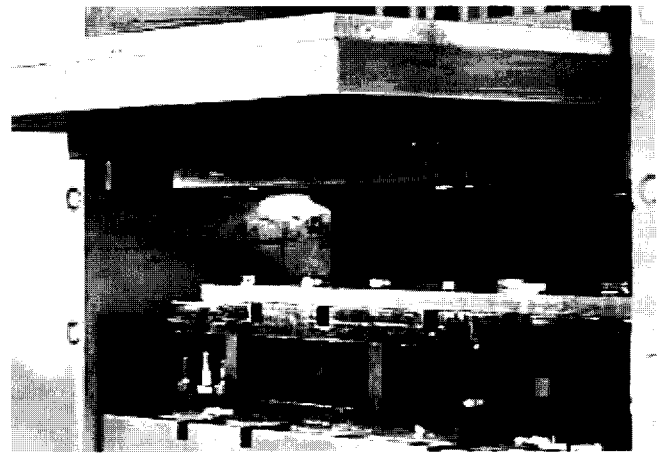


그림 27 실험의 전단파괴실험시 변형 모습

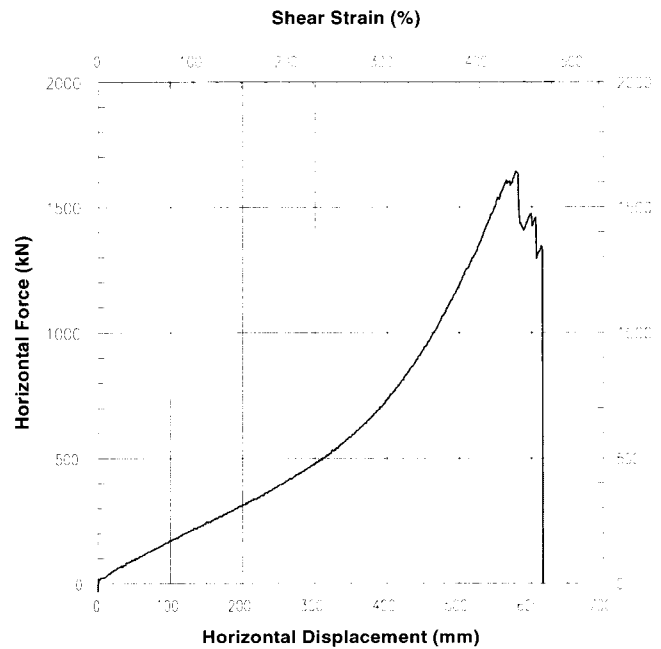


그림 28 실험의 전단파괴 실험결과

- 저경도 고무받침 시험체의 반복재하 실험을 통하여, 50회의 반복재하중에 유효강성의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 이는 고무받침에 사용된 내부고무의 이력감쇠가 거의 없기 때문에 내부 온도상승 등의 물성치 변화요인이 적었기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 진동수의 존성 실험을 통하여, 진동수가 증가하면 유효강성이 소폭 증가함을 알 수 있었다.
- 저경도 고무받침 시험체의 면압 의존성 실험을 통하여, 고무받침이 면압의 영향을 크게 받음을 알 수 있었다. 면압이 증가하면 유효강성이 크게 감소하였다. 따라서, 설계수평강성 산정시에 면압을 신중히 고려해야 함을 알 수 있었다.
- 저경도 고무받침 시험체의 온도 의존성 실험을 통하여, 온도가 증가하면 유효강성이 감소함을 알 수 있었다. 여기서, 저온(-20℃)과 상온(+23℃)간의 차이가 크게 나타난 반면에 상온과 고온(+40℃) 간에는 큰 차이가 없었으며, 저온과 고온간 유효강성의 차이가 22% 이내로 나타났다.

5. 1mm/sec의 저속으로 수행한 축소 시험체의 전단파괴 실험시, 전단변형률 490%에서 전단파괴가 진행되어 505%에서 최종 파단되었다. 그리고, 5mm/sec의 정속파로 실험한 실험체는 전단변형률 430%에서 전단파괴가 진행되어 467%에서 최종 파단되었다. 축소시험체를 0.2Hz의 진동수로 수행한 극한전단특성 실험에서는 500%의 전단변형률에서도 큰 문제가 발생하지 않았으나, 1mm/sec의 저속으로 수행한 전단파괴실험에서는 490%의 전단변형률에서 파괴가 발생한 것으로 볼 때, 대변형이 고무받침에 장기간 발생할수록 고무내부의 손상이 진행됨을 추측할 수 있다. 따라서 실질적인 파괴변위를 평가하기 위해서는 다수의 시험체에 대한 전단파괴실험이 요구된다.

### 참 고 문 헌

1. 정길영, 박건록, 하동호, 김두훈, "건물용 납면진받침의 의존성 평가 실험", 2002년도 춘계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, pp. 373-382.
2. 박건록, 정길영, 김준호, 김두훈, "대변위용 고무받침의 변형경화 개선에 관한 연구", 2001년도 추계 학술발표회 논문집, (사)한국고무학회, pp. 104-108.
3. 건설교통부, 도로교 설계기준, 2000.
4. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, 2nd Edition, 1999.
5. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, 16th Edition, 1996.
6. Skinner, R. I, William, H. R., and McVerry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, 1993.
7. Unison R&D Center, "Prototype test results of natural rubber bearing and lead rubber bearing," 2001.
8. "ISO standard specification - Rubber products - Laminated rubber bearings for seismic protection of bridges," Final draft prepared by Japanese party, 2000.
9. Civil Engineering Research Center(CERC), "Temporary manual of design method for base-isolated highway bridges," Tokyo, Japan, 1992.
10. "道路橋支承便覽-改訂案", 日本道路協會, 2001.
11. "免震構造設計指針", 日本建築學會, 2001.
12. "免震積層ゴム入門", 日本免震構造協會, (株)オーム, 1997.
13. "免震用積層ゴムハンドブック", (社)日本ゴム協會, 免震用積層ゴム委員會, 理工圖書(株), 2000.