

## 고감쇠 고무받침의 전단특성 의존성에 대한 실험적 연구

### An Experimental Study for the Shear Property Dependency of High Damping Rubber Bearings

오 주\* · 정희영\*\*

Oh, Ju · Jung, Hie-Young

#### Abstract

In this paper, the characteristics of high damping rubber bearing were studied through various prototype test. The characteristics of HDRB were dependent on displacements, repeated cycles, frequencies, vertical pressure, temperature, the capability of shear deformation and the vertical stiffness. The prototype test showed that the displacement was the most governing factor influencing on characteristics of HDRB. The effective stiffness and equivalent damping of HDRB were decreased with displacement, and increased with frequency. The effective stiffness was decreased with high vertical pressure, while the equivalent damping was increased. In which, the equivalent damping was more dependent on the vertical pressure than the effective stiffness. According to the results of this study, more careful examination is required to design the effective stiffness and equivalent damping ratio considering the dependencies of design displacement and exciting velocity.

**Keywords :** *high damping rubber bearing, prototype test, shear stiffness, equivalent damping ratio, dependence*

#### 요 지

본 연구에서는 고감쇠 고무받침 시험체의 다양한 특성실험을 통하여 전단특성 의존성을 파악하였다. 파악하고자 하는 고감쇠 고무받침의 특성은 변위의존성, 면압 의존성, 주파수 의존성, 온도 의존성 등이다. 특성실험결과 고감쇠 고무받침의 특성치는 온도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 주파수가 증가할수록 전단강성과 등가감쇠비 모두 증가하나 반복횟수가 증가 할수록 고무의 온도상승으로 인하여 그 값들은 감소하였다. 그리고 면압이 증가할수록 유효강성은 감소하고 등가감쇠비는 증가하는 것으로 나타났다. 본 실험결과에 의하면 고감쇠 고무받침의 설계의 주요한 변수인 전단강성과 등가감쇠비를 산정함에 있어 설계변위와 가진속도 및 온도의 면밀한 검토가 필요하다고 판단된다.

**핵심용어 :** 고감쇠 고무받침, 특성실험, 전단강성, 등가 감쇠비, 의존성

#### 1. 서 론

지진활동이 활발한 판 경계로부터 떨어져 있는 우리나라는 지진으로부터 비교적 안전지대라고 인식되어왔으나 최근에 발생한 강원도 평창지진(규모 4.5)을 비롯하여 근래에 지진 발생빈도가 증가하고 있다. 이에 따라 지진피해를 최소화하고 생명과 재산을 보호할 수 있도록 내진관련 기술 및 방안들을 개발하여 왔다. 내진기술의 방안으로 교량 또는 건축물에 지진격리시스템을 설계하고 설치하여 지진력을 감쇠시키고, 지진피해를 최소화 하고자하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 이러한 내진기술의 한 방안으로 교량 또는 LNG 저장탱크 등의 구조물에 지진격리받침을 설치하여 지진력을 저감시키고, 지진피해를 최소화하고자 하는 노력을 하고 있다. 최근 국내에서도 장대교량과 같은 대형 구조물의 건설이 계획되고, 시공되어지고 있는 실정이다. 이에 따라 지진격리

교량 및 구조물의 설계와 내진성능 확보를 위하여 지진격리받침의 적용이 증가할 것으로 판단된다. 교량분야의 경우 최근 개정된 도로교설계기준(2005) 내진설계 편에서는 지진격리교량 설계 규정이 신설되어 상당수의 교량에 지진격리장치가 널리 사용되고 있다. 구조물의 안전성 뿐 아니라 사용성에 대한 관심이 증대됨에 따라 구조물의 지진피해를 최소화 할 수 있는 지진격리시스템에 대한 연구와 적용사례가 증가하고 있다. 교량에 지진격리받침을 적용하여 지진시 교량의 응답을 줄이고, 교량의 고유주기를 길게 함으로서 교량에 작용하는 지진력을 감쇠시키며, 에너지를 흡수하게 된다. 이와 같은 지진격리시스템의 설계 및 시공을 위해서는 먼저 지진격리장치 제작시 지진격리장치의 내진에 대한 특성 및 성능에 대한 검토가 우선되어야 한다.

일본, 미국 등 해외에서 널리 쓰이는 지진격리장치 중의 하나인 고감쇠 고무받침은 특수 배합한 고무를 사용함으로

\*정희원 · 교신저 · 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : oju@unison.co.kr)

\*\*서울시립대학교 토목공학과 교수 (E-mail : hjung@uos.ac.kr)

써, 고무 자체의 변형을 통해 많은 에너지를 소산시키는 특징이 있다. 고감쇠 고무받침은 탄성받침과 동일한 형상을 가지고 있으면서 높은 에너지 소산능력을 가지고 있기 때문에 제작 및 시공이 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만 고감쇠 고무받침은 변위량 및 온도, 주파수, 면압, 하중이력 등에 대한 의존성이 있는 것으로 알려져 있고(日本免震構造協會, 2002), 고감쇠 고무에 대한 기술이 일본, 미국 등에 비해 초보적인 개발단계여서 최근까지 국내에서는 널리 쓰이지 못하고 있는 실정이다.

ISO 22762(2005)에서는 고감쇠 고무받침은 전단탄성계수와 관련하여 건축물에 적용하는 경우 전단탄성계수를 0.4~0.8 MPa, 교량에 사용하는 경우 0.8~1.2 MPa인 고무에 대하여 최소 요구 물성으로 언급되어 있다. 이처럼 건축물용 고감쇠 고무가 교량용 고감쇠 고무보다 낮은 정도를 가지는 이유는 받침의 높이를 줄여 안정성을 확보하고, 건축물의 경우 교량보다 더 큰 장주기를 요구하기 때문이다. 그러나 저경도 받침을 적용하여 장주기화된 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 저경도 받침의 전단특성이 확인되어야 한다. 환경의 변화에 따른 지진격리받침의 특성변화에 대해서는 정길영 등(2002)과 최세운 등(2008)이 실험한 적이 있으나 지진격리받침의 전단특성 의존성에 대한 심도 있는 실험연구는 부족한 실정이다. 그리고 이러한 지진격리장치의 의존성에 따른 전단특성변화의 변화 가능성에 대한 연구도 부족하다.

본 연구에서는 고감쇠 고무(HDR)를 이용하여 동특성시험을 실시하고, 전단탄성계수가 각각 0.4 MPa, 0.8 MPa인 고무소재로 고감쇠 고무받침(HDRB) 시험체를 제작하였다. 제작된 고감쇠 고무받침의 내진성능을 파악하기 위하여 여러 특성 중 기본적인 압축특성 및 전단특성에 대하여 실험을 실시하고, 전단특성에 따른 환경적 변화 영향을 파악하기 위하여 동특성실험을 하였다. 이 시험은 ISO 22762에 따라 수행하였고, 동특성실험을 통하여 전단특성의 전단변형을 의존성, 온도 의존성, 주파수 의존성, 압축응력 의존성, 반복하중 의존성 등 고감쇠 고무받침의 의존특성을 파악하였다. 저경도 고감쇠 고무받침의 다양한 특성실험 결과를 통하여 시험체의 특성을 규명하고, 조건변화에 민감한 항목을 파악하여 제품의 설계치와 부합하기 위하여 설계시에 고려해야 할 인자를 제시하고자 하였다.

## 2. 고감쇠 고무의 동특성

고감쇠 고무는 다른 고무와 비교하여 고무의 기본특성인 변형 후 원래의 형태로 복귀하는 탄성과 더불어 변형에너지를 자체에서 소모하는 점성특성을 함께 보유하고 있기 때문에 고무받침에 적용할 경우 별도의 감쇠장치가 없이 고무자체로서 이용될 수 있다. 본 절에서는 지진격리받침의 일종인 고감쇠 고무받침에 적용되는 고무재료에 대하여 물성시험을 실시하고 적용고무의 의존특성에 대한 시험을 실시하여 결과를 비교 검토하였다.

### 2.1 실험방법

고감쇠 고무의 전단탄성계수( $G$ )와 감쇠비에 대한 변위, 온도 및 주파수에 대한 의존성을 파악하기 위하여 그림 1과

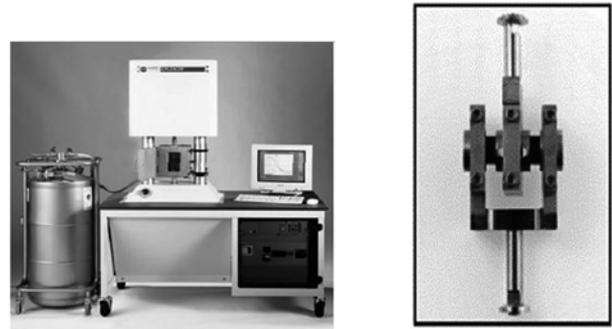


그림 1. 동특성시험기 및 고무시험편 정착

같은 고무시험편과 시험장비를 이용하여 고감쇠 고무의 동특성 시험을 실시하였다. 동특성시험은 EPLEXOR 150N장비를 이용하였고, 고무재료의 동적특성을 비교하기 위하여 ISO 22762에서 제시하고 있는 표준시험체(STD)를 적용하여 특성시험을 실시하였다. 고무소재는 전단계수가 각각  $G=0.4$  MPa,  $G=0.8$  MPa인 다른 고무소재를 대상으로 실험하였다. 시험에 사용한 고무시험편은 시험조건별로 10개씩 총 240개의 고무시험편을 시험하였으며, 시험결과는 각 조건별 고무시험편의 시험결과를 평균한 값을 정리하여 나타내었다. 본 연구에서는 고무시험편을 이용하여 고무소재의 의존특성에 대하여 알아보기 위해 변위의존성, 주파수의존성 그리고 온도의존성 시험을 실시하였다. 각 시험별 시험방법은 다음과 같다.

변위 의존성시험은 주파수와 온도를 일정하게 고정시킨 상태에서 변위를 5%~45%까지 각 5%씩 증가시키는 방법으로 시험하였다. 주파수 의존성시험은 변위와 온도를 일정하게 유지하고 주파수를 각각 0.05 Hz, 0.2 Hz, 1.0 Hz로 증가시키는 방법으로 시험하였다. 마지막으로 온도 의존성 시험은 계절변화에 따른 극한온도 상태를 모사하여  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  온도범위에서 시험을 하였다. 상기의 시험방법에 따라 전단계수와 감쇠비의 변화를 통해 고무소재의 의존특성을 파악하였다.

### 2.2 고감쇠 고무의 동특성 실험결과

고감쇠 고무에 대한 의존특성시험 결과 온도가 낮고 주파수가 높을수록 전단계수(shear modulus)는 증가하고 동적변형이 증가할수록 전단계수는 감소하였다. 그리고 온도 변화에 따른 감쇠비 저감 정도는 적으나 온도가 높을수록 감쇠비(damping ratio)는 감소하였다. 또한 주파수가 높을수록 전단계수는 증가하며, 동적변형이 증가할수록 저감하는 경향이 있었다. 그림 2~그림 5는 온도와 주파수, 변위별 전단계수 및 감쇠비의 상관관계를 전단탄성계수 별로 나타낸 것이다. 구체적으로 고감쇠 고무에 대한 변위의존성 시험결과 동적변위가 작을수록 감쇠비가 높고 변위가 증가할수록 감쇠비는 감소하여 일정한 값에 수렴함을 알 수 있었다. 그리고 전단탄성계수가 높을수록 전단계수가 높게 나타났으나, 전단탄성계수가 높을수록 감쇠비는 오히려 낮게 나타났다. 온도 의존성 시험결과 고감쇠 고무는 고무의 물성 특성상 온도에 대한 감쇠 특성이 강하여 온도변화( $-20^{\circ}\text{C}$ ~ $40^{\circ}\text{C}$ )에 따라 감쇠비는 최대 21.8%에서 최소 14.5%까지 감소하였다. 이처럼 고무소재는 온도의 변화에 민감한 반응을 하며, 고무의

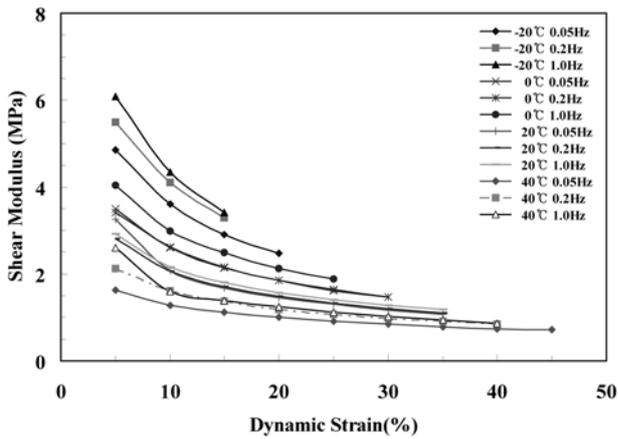


그림 1. 동특성시험기 및 고무시험편 정착

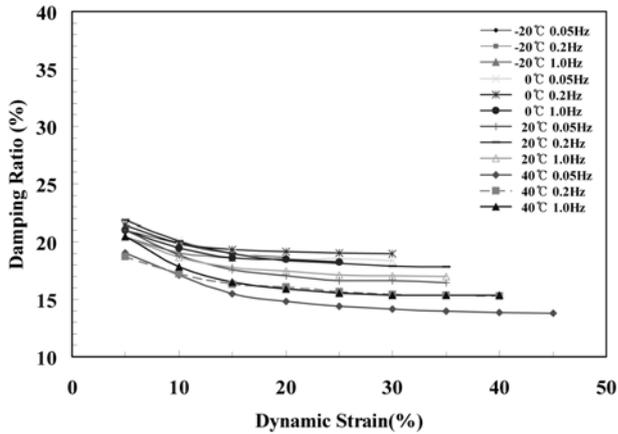


그림 3. 온도-주파수-변위별 감쇠비변화(MPa)

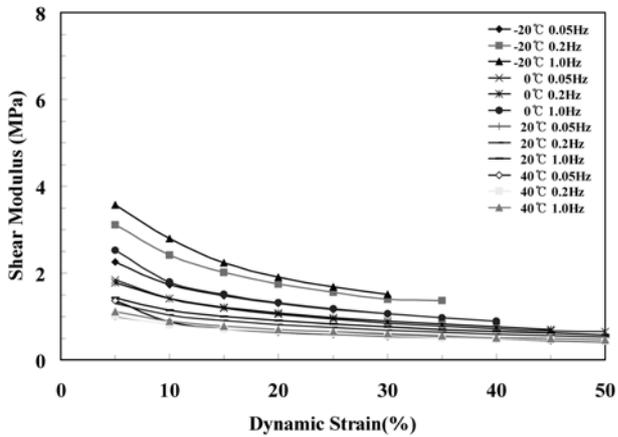


그림 4. 온도-주파수-변위별 전단계수변화(MPa)

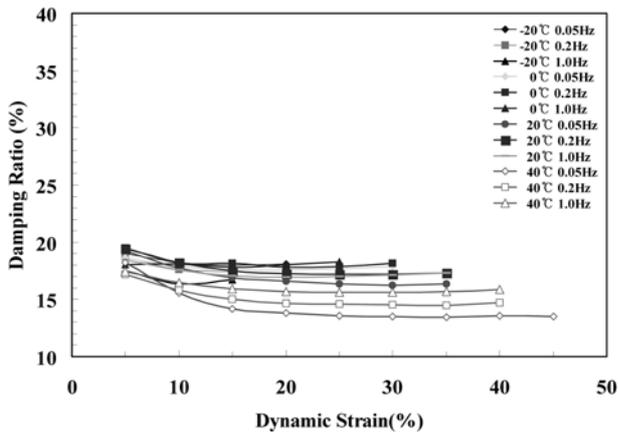


그림 5. 온도-주파수-변위별 감쇠비변화(MPa)

특성상 감쇠비는 고온보다는 저온에서 높은 감쇠비를 얻었다. 이와 같은 고무소재의 특성은 고온에서 고무분자들 간의 결합력이 떨어져서 전단탄성계수( $G$ )와 손실탄성계수( $G''$ )가 위상차에 의한 것으로 판단된다. 또한 변위와 온도를 일정하게 유지한 상태에서 주파수를 0.05 Hz, 0.2 Hz, 1.0 Hz로 증가시켜 시험한 결과 주파수 의존성이 있음을 확인할 수 있었다.

### 3. 지진격리받침

#### 3.1 시험에 사용한 지진격리장치의 특성

전단특성 시험에 사용한 고감쇠 고무받침(HDRB)은 지진격리장치의 일종으로 교량 및 건축물의 동적특성에 적합하게 설계하여 제작하였고, 구성은 고무와 보강철판의 적층형태로서 일반 고무받침과 형태면에서는 동일하다. 그러나 고감쇠 고무받침은 납 면진받침(LRB)과 달리 고무의 배합을 통해 감쇠 능력을 향상시켜 납을 필요로 하지 않는다. 에너지 흡수 능력을 증가시키는 방법으로 고무재료의 점성 증가 및 마찰의 증가로 고려될 수 있다. 그러나 점성을 증가시키면 재료의 유동성이 증가하여 크리프(creep) 특성 및 소재의 물성이 급격히 나빠지는 경향이 있다.

고감쇠 고무받침은 변형하면서 에너지를 흡수하는 능력을 갖는 특수한 고감쇠 고무(HDR)를 이용한 천연고무받침으로서 납 면진받침과 같이 지진격리장치이면서 동시에 감쇠기능을 가진 받침장치이다. 이는 고무배합을 변화함에 따라 여러 가지 이력특성을 변화시킬 수 있는 장점이 있으나 유사 지진격리장치인 납 면진받침의 에너지 소산능력이 30% 이상 발현됨에 비하여 고감쇠 고무받침은 15~20%로서 감쇠기능이 다소 떨어지는 단점이 있다. 그러나 재료와 형상이 가장 유사한 천연고무받침(에너지 소산능력이 8%미만)에 비하여 우수한 감쇠력을 가지고 있다.

일반적으로 고감쇠 특성을 갖는 적층고무받침은 전단변형에 따라서 복잡한 이력거동을 나타낸다. 이러한 고감쇠 고무받침은 아주 작은 변형 범위( $\gamma < 20\%$ )에서는 수평 강성이 매우 커서 바람이나 구조물의 진동에 저항하는 힘이 크고(풍하중 제어강성), 중간범위( $20\% < \gamma < 120\%$ )에서는 복원력의 변화가 선형성을 나타냄으로서 수평강성이 일정하며(지진하중 제어강성), 매우 큰 전단변형 범위( $120\% < \gamma$ )에서는 경화 현상이 발생하여 지진격리장치의 극단적인 전단변형을 억제하는 강성특성(극한하중 제어강성)을 나타낸다(구경희 등, 1998).

#### 3.2 시험체의 설계

고감쇠 고무받침은 실제 교량구조물에서의 설계압축력에 의하여 결정되어지는 사용한계상태와 지진에 의한 극한한계상태 그리고 풍하중에 대한 저항 등에 대하여 만족하도록 설계하였다. 그리고 본 연구에서는 ISO 22762에 따라 시험체를 제작하였고 특성시험을 수행하였다. 상기의 규격에서는 지진으로부터 교량 혹은 건축구조물을 보호하고자 사용하는 적층고무받침형태의 지진격리장치에 대하여 시험방법과 설계기준, 제품 검사 기준에 대하여 총 세부분으로 나누어 소개하고 있다. 상기의 설계조건과 시험평가기준에 따라 시험체를 제작하였으며, 시험체는 전단탄성계수( $G$ )에 따라 크게 2가지 형태로 제작하여 시험하였다.

표 1. 적층고무받침 시험체 제원

시험체	항 목	강관지름 (mm)	구멍지름 (mm)	전체지름 (mm)	고무두께 (mm)	고무층수 (n)	강관두께 (mm)	$S_1$	$S_2$	축응력 (MPa)	전단탄성 계수(G)
HDRB 1		240	12.5	250	2	25	3	29.7	5	7.5	0.8
HDRB 2		240	12.5	250	2	25	3	29.7	5	7.5	0.4

여기서,  $S_1$ 은 1차 형상계수  $(= \frac{D_s - D_h}{4t_i})$ ,  $S_2$ 는 2차 형상계수  $(= \frac{D_s}{nt_i})$

$D_s$ 는 내부보강철판의 직경,  $D_h$ 는 내부 홀의 직경,  $t_i$ 는 고무 한층의 두께,  $n$ 은 고무층 수를 나타낸다.

표 2. 고감쇠 고무의 기본 구성성분 (중량비, %)

시험체	항 목	천연고무	카본블랙	기황제	첨가제
HDRB 1		59.1	26.1	0.7	14.1
HDRB 2		52.6	34.0	0.8	12.6

### 3.3 시험체의 제원

천연고무는 탁월한 탄성능력과 복원능력을 가지고 있어 지진격리받침에 폭넓게 이용되어 왔다. 본 연구에서 사용된 시험체 또한 천연고무의 고유성질에 고무자체의 탄성능력과 복원능력을 유지하고 에너지 흡수 능력을 증가시킨 고감쇠 고무(high damping rubber)를 사용하여 시험체를 제작하였다. 시험체의 크기는 동일하고 주된 구성성분은 천연고무이다. 시험체의 직경은 외부고무 두께 10 mm를 포함한 것으로 내부 적층고무 한 층의 두께는 각각 2 mm이고, 고무의 적층수는 25층으로 적층하였다. 그리고 보강철판의 두께는 3 mm이다.  $S_1$ 은 한개의 고무층 구멍을 포함한 자유 표면적에 대한 하중면적의 비로서 1차 형상계수이고,  $S_2$ 는 내부고무의 층 두께에 대한 유효폭의 비율을 나타내는 2차 형상계수이다. 자세한 시험체의 제원은 표 1과 같고, 그림 6과 그림 7

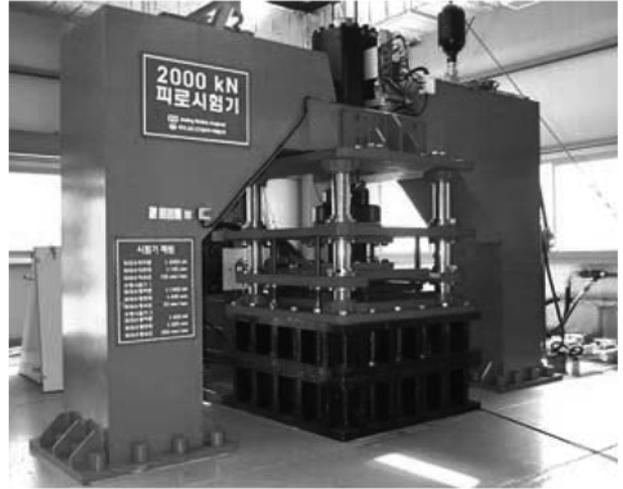


그림 8. 2,000 kN 압축-전단시험기

은 시험체의 제원 및 형상을 나타낸 것이다. 표 2는 시험체의 주된 성분인 고무의 기본 구성성분을 나타낸 것이다. 일반적으로 고무재료 중에 카본블랙이 증가하면 고무의 가공성이 나빠지며 변형경화가 커지게 된다. 이처럼 고무재료의 구성성분에 따라서 그 성질 등이 변하게 된다. 전단특성 시험에 사용된 고감쇠 고무받침 시험체는 전단변형을 100%에서 전단탄성계수  $G$ 값이 각각 0.4 MPa, 0.8 MPa인 고감쇠 고무를 사용하여 고무받침을 제작하였으며, ISO 22762에서 제시하고 있는 표준시험체(standard test piece) 규격에 따라 원형타입으로 제작하였다.

### 3.4 시험기 제원

고감쇠 고무받침 시험체의 특성시험에 사용된 시험기는 표 3 및 그림 8에 나타난 바와 같이 압축-전단시험기로 최대수직하중은 2,000 kN이며, 최대 수평하중은 500 kN이다. 그리고 최대수평속도는 300 mm/sec이며 수평방향 최대변위는  $\pm 200$  mm이다.

### 4. 특성시험결과 및 분석

전단특성시험은 제품의 특성치를 파악하기 위해 진행되는 시험으로서, 지진격리받침 설계시 가장 기본이 되는 압축강성, 전단강성 그리고 감쇠비 등의 특성을 파악하고자 압축특성시험과 전단특성시험을 수행하였다. 이렇게 압축특성 시험과 전단특성 시험을 통해 얻은 제품의 기본 특성치를 ISO 22762의 설계식에 따라 계산한 설계값과 비교하여 오차범위를 만족하는지 확인하였다. 여기서 압축강성의 오차범위는  $\pm 30\%$ 이고, 전단특성의 오차범위는 S-A등급 기준인  $\pm 10\%$ 이

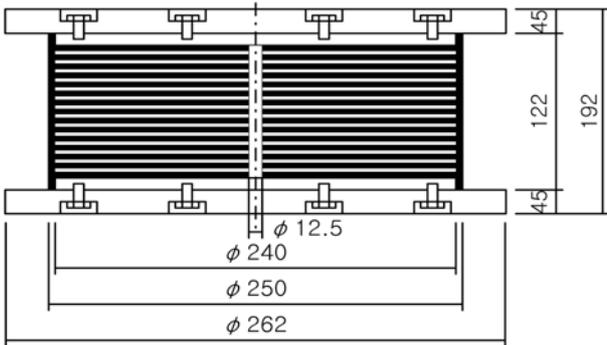


그림 6. 시험체 제원



그림 7. 고감쇠 고무받침 시험체

표 3. 2,000 kN 압축-전단 시험기 제원표

	최대하중	최대변위	최대속도
수직용량	±2000 kN	±100 mm	100 mm/sec
수평용량	±500 kN	±200 mm	250 mm/sec

다. 상기의 절에서 고무소재에 대한 기초특성시험결과 고감쇠 고무의 경우 전단변형을 의존성, 주파수 의존성, 온도 의존성 등이 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 고감쇠 고무소재를 사용하여 시험체를 제작하고, 다양한 의존성 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 전단특성 의존성 시험전에 모든 시험체에 대하여 압축특성시험과 전단특성시험 등의 기초특성시험을 실시한 후, 전단특성의 전단변형을 의존성, 압축응력 의존성, 주파수 의존성, 온도 의존성, 반복하중 의존성시험 등 총 5가지 항목에 대하여 실험을 수행하였다.

#### 4.1 압축 및 전단특성 실험

##### 4.1.1 압축특성 실험

고감쇠 고무받침의 수직강성을 얻고자 상온에서 시험체에 2개의 변위계를 설치하여 실험을 수행하였다. 실험에서 수직하중은 그림 9와 같이 설계하중  $P_0$ (면압 7.5 MPa)를 기준으로 하여  $P_1$ (-30%)부터  $P_2$ (+30%)까지 3회 재하 하였고, 식 (1)을 이용하여 수직강성을 계산하였다. 여기서  $X_1$ ,  $X_2$ 는 세 번째 사이클에서 하중  $P_1$ ,  $P_2$ 일 때 각각의 변위이다.

$$K_v = \frac{P_2 - P_1}{X_2 - X_1} \quad (1)$$

압축시험결과 세번째 사이클에서 최대 및 최소 하중은 HDRB 1( $G$  0.8 MPa)의 경우는 최대 481 kN, 최소 259 kN 이고, 변위는 각각 0.80 mm, 0.56 mm이다. 또한 HDRB 2 ( $G$  0.4 MPa)의 경우 455.08 kN, 264.65 kN이었으며, 이때의 변위는 각각 0.79 mm, 0.58 mm이었다. 이 값을 식 (1)에 적용한 결과 압축강성은 표 4와 같이 각각 1,393 kN/mm, 907 kN/mm으로 나타났다. 이렇게 얻은 실험값이 기준의 요구사항을 만족하는지 확인하기 위하여 식 (2)에 따라 고감쇠

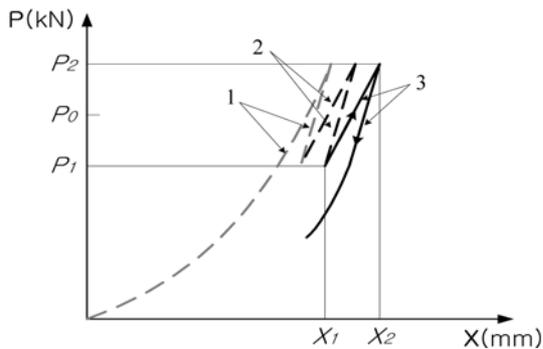


그림 9. 압축하중 재하곡선

표 4. 압축특성 시험결과

구분	압축강성(kN/mm)			
	설계값	실험값	기준범위	오차
HDRB 1	1,538	1,393	±30%	-10%
HDRB 2	936	907	±30%	-3%

고무의 압축탄성계수  $E_c$ 를 계산하고, 식 (3)에 따라 압축강성의 설계값을 계산하였다. 여기서, 비등방성(anisotropic) 재료인 고감쇠 고무의 탄성계수  $E_0$ 값은 전단계수  $G$ 값의 3배인 2.4 MPa과 1.2 MPa를 사용하였다. 한편 고무의 정도에 따른 보정계수  $k$ 값은 高山峯夫(1997)에 따라 0.865를 사용하였고, 체적탄성계수  $E_\infty$ 값은 AASHTO(1999)에 따라 2,000 MPa으로 설정하였다. 그 결과 압축강성의 실험값은 설계값과 오차는 각각 -10%, -3% 발생하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 고감쇠 고무의 보정계수  $k$ 값은 0.865, 체적탄성계수  $E_\infty$ 값으로 2,000 MPa을 설정한 것은 타당하다고 판단된다. 압축강성의 실험값과 설계값을 계산한 결과를 표 4에 정리하였다.

$$E_c = E_0(1 + 2kS^2) \quad (2)$$

$$K_v = \frac{E_c \cdot A}{T_r} \quad (3)$$

여기서,  $S$ 는 형상계수이고,  $T_r$ 은 고무의 전체 두께를 나타내며,  $K_v$ 는 수직강성이다.

##### 4.1.2 전단특성 실험

고감쇠 고무받침의 등가전단강성( $K_h$ )과 등가감쇠비( $h_{eq}$ )를 얻기 위하여 전단특성 실험은 그림 10과 같이 수행하였다. 실험은 상온상태에서 설계면압 7.5 MPa이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서 0.5 Hz의 정현파로 전체 고무두께 50 mm를 설계전단변위로 산정하여 횡변위가 발생하도록 하는 방법으로 시험체에 총 11회 연속적으로 반복하여 2번째부터 11번째 이력곡선 각각을 평균하여 계산 하였다.

$i$ 번째 사이클에서의 등가전단강성은 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 여기서  $Q_1^i$ ,  $Q_2^i$ 는  $i$ 번째 사이클에서의 최대, 최소 전단력이며,  $X_1^i$ ,  $X_2^i$ 는  $i$ 번째 사이클에서의 최대, 최소 변위이다(그림 11).

$$K_h^i = \frac{Q_1^i - Q_2^i}{X_1^i - X_2^i} \quad (4)$$

$i$ 번째 사이클에서의 등가감쇠비  $h_{eq}^i$ 는 식 (5)를 이용하여 계산하였다. 여기서,  $\Delta W^i$ 는  $i$ 번째 사이클의 이력곡선에 의해 둘러싸인 면적이다.

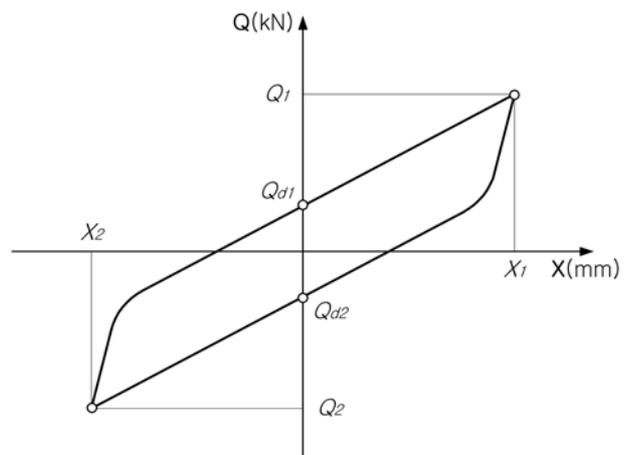


그림 10. 압축-전단하중 재하 곡선

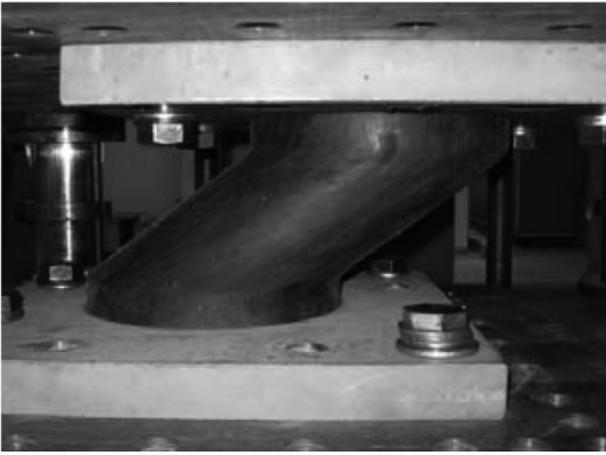


그림 11. 전단특성 실험

$$h_{eq}^i = \frac{2 \cdot \Delta W^i}{\pi \cdot K_h^i (X_1^i - X_2^i)^2} \quad (5)$$

본 연구에서는 전단강성과 등가감쇠비를 결정하기 위해 식 (6), (7)처럼 2회부터 11회까지의 평균값을 이용하여 고감쇠 고무받침의 전단강성과 등가감쇠비를 계산하였다.

$$K_h = \frac{1}{10} \sum_{i=2}^{11} K_h^i \quad (6)$$

$$h_{eq} = \frac{1}{10} \sum_{i=2}^{11} h_{eq}^i \quad (7)$$

상기의 방법에 따른 실험결과는 표 5와 같다. HDRB 1의 등가전단강성은 0.814 kN/mm, 등가감쇠비는 15.9%이고, HDRB 2의 경우는 등가전단강성은 0.414 kN/mm, 등가감쇠비는 19.5%로 각각 계산되었다. 한편 등가전단강성의 설계값은 표 1과 식 (8)를 이용하여 각각 0.783, 0.392 kN/mm으로 계산하였지만, 등가감쇠비의 설계식은 기준에 주어지지 않았기 때문에 여기서는 등가전단강성에 대해서만 설계값과 비교하였다.

$$K_h = \frac{G \cdot A}{T_r} \quad (8)$$

등가전단강성의 실험값과 설계값을 계산한 결과는 표 5와 같으며, 각 시험체의 등가전단강성은 설계값에 비하여 3.9%와 5.7%의 오차를 보였다. 따라서 평가기준인 오차범위 ±15%이내를 모두 만족하였다.

## 4.2 전단특성 의존성 실험

### 4.2.1 전단변형률 의존성 실험

고감쇠 고무받침의 전단변형률에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 전단변위에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 설계면

표 5. 전단특성 시험결과

구분	전단강성(kN/mm)				등가감쇠비
	설계값	실험값	기준범위	오차	
HDRB 1	0.783	0.814	±15%	3.9%	15.9%
HDRB 2	0.392	0.414	±15%	5.7%	19.5%

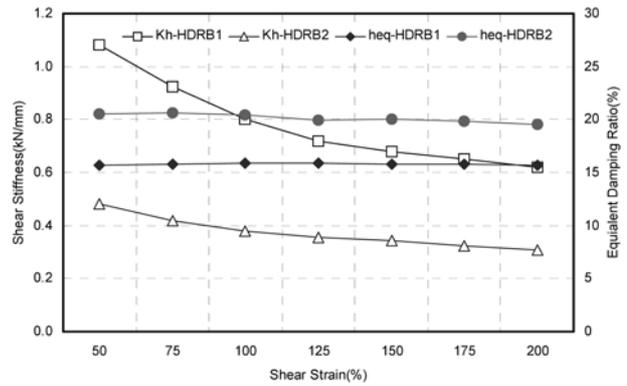


그림 12. 전단변형률에 따른 등가전단강성 및 감쇠비 변화

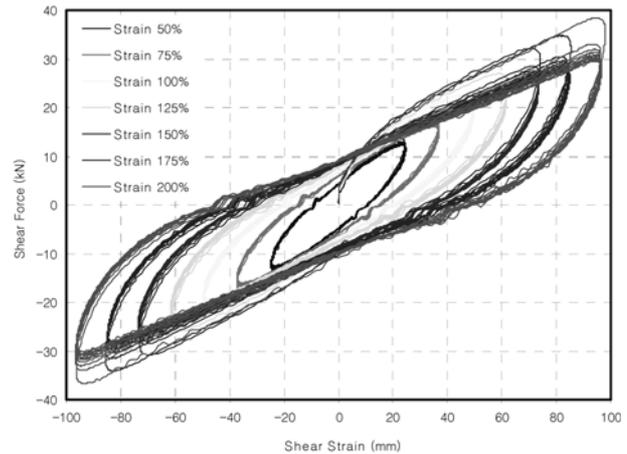


그림 13. 전단변형률 의존성 시험결과

압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서, 해당 전단변위가 발생하도록 0.5 Hz의 정현파를 11회 반복재하하였다. 전단변형률은 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%로 전단변형이 작은 시험부터 큰 시험 순서로 시험을 실시하였고, 반복횟수는 전단시험과 동일하다. 실험에 따른 전단변형률 의존성 이력곡선은 그림 13과 같다. 전단변형률 100%에서의 시험값을 기준으로 등가전단강성 및 등가감쇠비의 변화율을 산정하여 그림 12에 나타내었다. 전단변형률 50~200%의 범위에서 등가전단강성( $K_h$ )과 등가감쇠비( $h_{eq}$ )는 모두 전단변형률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나, 등가전단강성은 약 45%정도의 변화가 발생하여 전단변형률 의존성이 큰 것으로 나타난 반면에 등가감쇠비는 최대 5% 감소하여 전단변형률 의존성이 작은 것으로 나타났다. 따라서 받침 설계시 전단변형률 의존성이 고려되지 않은 식 (8) 대신 전단변형률 의존성이 고려된 식 (9)를 사용하여 등가전단강성의 전단변형률 의존성을 고려할 필요가 있다.

$$K_h(\gamma) = \frac{G(\gamma) \cdot A}{T_r} \quad (9)$$

실험결과를 바탕으로 전단변형률 의존성이 고려된 전단탄성계수  $G(\gamma)$ 의 경험식을 회귀분석을 통해 식 (10)과 같이 구하였으며, 그림 12와 같다.

$$G(\gamma) = 0.039\gamma^{-0.3128} \quad (10)$$

### 4.2.2 압축응력 의존성 실험

압축응력에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 의존성을

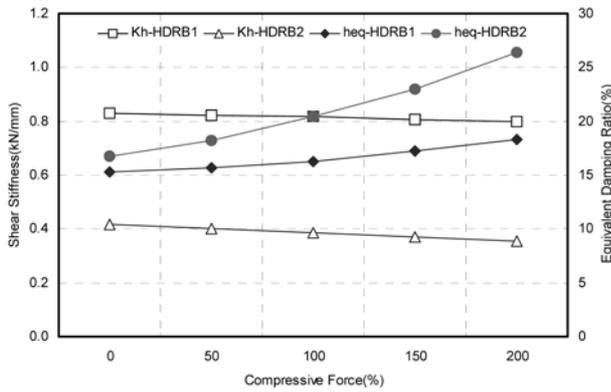


그림 14. 면압에 따른 등가전단강성 및 등가감쇠비 변화

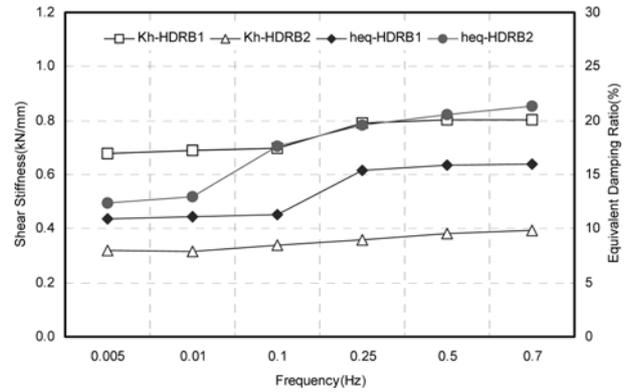


그림 15. 주파수변화에 따른 전단강성 및 등가감쇠비 변화

파악하기 위해 다양한 압축응력에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온상태에서 해당 설계면압이 유지되도록 일정하게 수직하중을 재하하고, 설계전단변위( $\gamma=100\%$ )가 발생하도록 0.5 Hz의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 설계면압 7.5 MPa의 0%, 50%, 100%, 150%, 200% 등에 해당하는 총 5가지의 면압에서 수행하였다.

실험에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화율은 그림 14와 같다. 등가전단강성은 면압이 증가함에 따라 감소하는 경향이 있는데, HDRB 1은 4%, HDRB 2는 17%가량 변화하여 면압 의존성은 비교적 작은 것으로 나타났다. 등가감쇠비는 면압이 증가함에 따라 등가전단강성과 달리 증가하는 경향이 있었고, HDRB 2의 경우 감쇠비 변화율이 -19%에서 28%까지 변화하여 면압 의존성이 크게 나타났다.

여기서, 등가감쇠비의 면압 의존성이 큰 것은 면압이 증가하면서 고무 분자 사이의 점성 및 마찰 감응 요소가 증가했기 때문이라고 판단된다. 따라서 등가감쇠비의 설계값을 결정할 경우 설계면압에 대한 고려가 필요하다.

#### 4.2.3 주파수 의존성 실험

주파수에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 주파수에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온상태에서 해당 설계면압 7.5 MPa이 유지되도록 일정하게 수직하중을 재하하고, 설계전단변위가 발생하도록 해당 주파수의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험 주파수는 0.005 Hz, 0.01 Hz, 0.1 Hz, 0.25 Hz, 0.5 Hz, 0.7 Hz 등으로 저주파수에서 고주파수 순서로 시험을 수행하였다. 본 실험에서는 시험장비의 속도 제약으로 인하여 0.7 Hz 이상의 주파수에 대해서는 실험을 수행하지 않았다.

실험결과는 주파수 0.5 Hz에서의 값을 기준으로 등가전단강성 및 등가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 15에 나타내었다. 0.001~0.5 Hz의 주파수 범위에서 등가전단강성과 등가감쇠비는 모두 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈지만, 0.25 Hz를 기준으로 변화 경향이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 0.25 Hz이상의 주파수에서는 등가전단강성 및 등가감쇠비 모두 11%이하의 안정된 변화율을 나타냈다. 하지만 0.25 Hz이하에서는 등가전단강성 및 등가감쇠비 모두 급격히 감소하는 것으로 나타났다. HDRB 1의 경우 등가전단강성 변화율은 -2~-16%, 등가감쇠비 변화율은 -32~-4%로 변했고, HDRB 2는 등가전단강성 변화율은

-17~3%, 등가감쇠비 변화율은 -40~3% 변화하였다. 주파수에 따른 등가감쇠비의 변화가 상대적으로 큰 것은 고감쇠 고무에 적용된 배합약품이 고무 분자 사이의 점성 및 마찰 감응 요소에 크게 기여했기 때문이라고 판단된다.

#### 4.2.4 온도의존성 실험

온도변화에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 온도에 대하여 압축-전단실험을 그림 16과 같이 수행하였다. 실험방법은 전단특성실험 방법과 동일한 조건으로 실시하였으며, 실험온도는 -20°C, 0°C, 23°C, 40°C의 온도상태에서 수행하였다. 해당 온도에서 항온항습기 내에 3일간 보관한 시험체를 시험기에 장착하고, 시험기 주변에 항온챔버를 설치하였다. 이후 저온 실험인 경우 저온을 유지하기 위해 액체질소를 이용하여 저온을 유지하고, 고온 실험인 경우 고온을 유지하기 위해 열풍기를 이용하였다.

실험결과는 온도 23°C에서의 값을 기준으로 등가전단강성 및 등가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 18에 나타내었다. 온도 -20~40°C의 범위에서 등가전단강성은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 등가감쇠비의 변화는 다소 감소하였으나 거의 일정하게 유지되었다. 한편, HDRB 1은 최대 41%, HDRB 2는 최대 72%까지의 등가전단강성 변화율을 나타냈다. 고무와 같은 고분자재료는 온도에 따라 탄성률이 변화하는데 특히 저온에서는 유리전이점(temperature of glass transition)에서 급격하게 상승한다. 고감쇠 고무의 경우에는 고무의 감쇠 성능을 높이기 위하여 가소제 및 연화제, 보강제 등의 다양한 배합약품을 투입하는데 이와 같은 배합약품이 온도의존성을 갖게 하며, 배합약품의 종류와 투입량에 따라서도 크게 변화한다. 일반적으로 고감쇠 고무받침은 천연고무계 고무받침에 비해 비교적 높은 온도의존성을 갖고 있다. 등가전단강성 및 감쇠는 저온일 경우에는 높게 나타나며 고온에서는 낮아진다. 이러한 특성은 일본의 東洋ゴム工業(株) 등의 제조사별 온도의존성 시험결과로 확인 할 수 있으며, 20°C기준으로 -10°C에서는 등가전단강성이 23~40%, 감쇠비는 10~26%로 상승하며, 40°C에서는 등가전단강성이 7~13%, 감쇠비는 3~12% 범위로 저하되어 본 연구에서의 시험결과와 유사한 결과를 갖는 것을 알 수 있다. 국내의 경우 도로교표준시방서(2005)에 전단특성의 변화율에 대하여 탄성받침 완제품 성능규정에는 저온시 전단탄성계수의 변화가 상온시 전단탄성계수의 3배 이하가 되



그림 16. 온도의존성 실험 사진

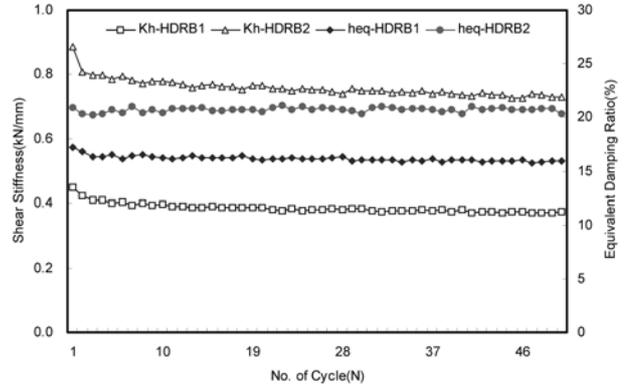


그림 18. 반복횟수에 따른 전단특성 변화 추이

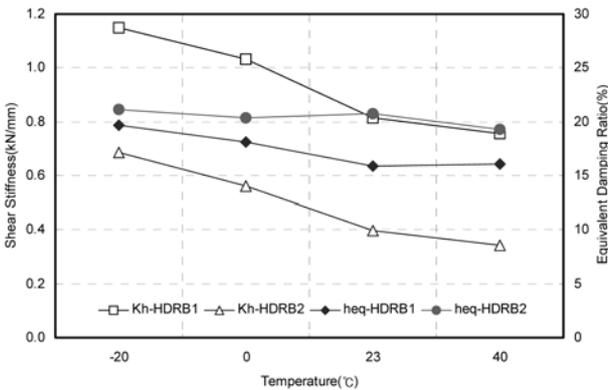


그림 17. 온도에 따른 등가전단강성 및 등가감쇠비 변화

도록 정량적으로 규정되어 있다.

#### 4.2.5 반복하중 의존성 실험

반복하중에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 반복재하 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 설계면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하하고, 해당 설계전단변위로 0.5 Hz의 정현파를 50회 반복재하 하였다. 반복재하수 증가에 따른 각 사이클별 등가전단강성과 등가감쇠비를 계산하여 전단특성치의 변화양상을 파악하였다. 반복하중에 의한 전단특성 변화를 온도상승에 의한 전단특성 변화와 구별하기 위하여, 시험체에 50회 반복하여 전단변위를 가한 후 하중을 가하기 전의 초기온도(initial pre-load temperature)로 냉각시켜 전단특성을 다시 측정하였다.

50회 반복하는 동안 전단특성 변화 추이를 그림 18에 나타내었다. 초기 1~3번째 사이클에서 등가전단강성은 크게 변화하는 것으로 나타났지만, 그 이후 반복회수부터는 변화 폭이 줄어들어 조금씩 감소하는 양상을 나타내었다. 大鳥靖樹(1994)는 전단변형을  $\pm 200\%$ , 가진 진동수 0.5 Hz(정현파)에서 실제로 발생할 수 있는 1회의 지진을 가정하여 10회 가진을 실시한 경우 시험체의 온도상승은 약 5°C, 수평강성 및 감쇠는 약 -5%로 나타나 반복하중 의존성에 대한 영향은 미약하다고 하였으며, 200회 연속으로 극한으로 가진을 실시한 경우 시험체의 온도상승은 약 70°C, 수평강성은 약 20%~25%, 감쇠는 약 -25%로 저하된다고 보고하였다.

50회 반복 재하 후 시험체를 반복재하 전의 온도로 냉각

하기 위해 상온에서 24시간 동안 방치한 후, 같은 조건에서 압축-전단실험을 다시 수행하였다. 실험 결과 HDRB 1은 약 4.57%, HDRB 2는 약 0.75%정도 등가전단강성이 증가하였다. 등가감쇠비는 HDRB 1의 경우 약 1.83%감소하였으나 HDRB 2 시험체는 변화가 없었다. 전단특성의 감소가 미소한 것으로 보아 반복하중으로 인한 영구변형은 매우 적은 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전단탄성계수가 서로 다른 고감쇠 고무와 동일한 고무소재로 제작한 고감쇠 고무받침(HDRB) 시험체의 전단특성 의존성실험을 실시하였다. 시험 후 측정값을 설계기준값과 비교하여 기준값과의 제작 및 성능오차를 비교 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고감쇠 고무소재에 대한 변위와 온도, 주파수에 대한 의존성 시험결과 변위와 온도가 높고 주파수가 증가 할수록 전단탄성계수 및 감쇠비는 감소하였다.
2. 등가감쇠비는 주파수 및 면압에 대하여 큰 의존성을 나타내었으나, 온도 및 전단변형율에 대해서는 작은 의존성을 나타내었다. 면압에 따른 등가감쇠비의 의존성이 크다는 것은 받침의 초기 강성과 항복 후 강성의 설계값에 영향을 미치는 특성강도의 의존성이 크다는 것을 의미한다. 따라서 고감쇠 고무받침의 등가감쇠비 설계시 면압에 대한 고려가 필요하다.
3. 등가전단강성은 온도 및 전단변형율에 대하여 큰 의존성을 나타낸 반면에 면압에 대해서는 작은 의존성을 나타내었다. 따라서 고감쇠 고무받침의 등가전단강성 추정시 온도, 전단변형율에 대한 고려가 필요하다고 판단된다. 또한 온도가 증가하면 등가전단강성이 저감되었으며, 특히 저온에서 큰 변화가 발생하였다.
4. 50회의 반복재하하중에 등가전단강성의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 이는 시험체에 사용된 내부고무의 이력감쇠가 거의 없기 때문에 내부 온도상승 등의 물성치 변화요인이 적기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 주파수 의존성 실험을 통하여, 주파수가 증가하면 유효강성이 소폭 증가함을 알 수 있었다.
5. 본 실험결과에 의하면 고감쇠 고무받침 설계의 주요한 변수인 등가전단강성과 등가감쇠비를 산정함에 있어서 설계

변위와 면압, 온도, 가력속도의 의존특성을 고려하여 면밀한 검토가 필요하다고 판단된다.

6. 본 실험은 ISO 22762-1에서 제시하고 있는 표준시험체에 대해서만 실험을 수행하였으므로, 시험체의 크기에 대한 영향을 파악하기 위해 형상계수를 변화시켜 추가 실험을 할 필요가 있다고 판단된다.

### 참고문헌

구경희, 이재한, 유 봉(1998) 면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석, 한국지진공학회는문집, 한국지진공학회, 제2권 제4호, pp. 73-36.  
오 주, 박진영, 박건록, 김씨동, 박성규(2009) 고감쇠 고무받침의 장기 크리프 특성에 대한 실험적 연구, 한국지진공학회는문집, 한국지진공학회, 제13권 제1호, pp. 53-60.  
정길영, 하동호, 박건록, 김두훈(2002) 저경도 납면진받침의 특성에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권 제6A호, pp. 1295-1307.

최세운, 임홍준, 조현진, 박건록, 오 주, 정희영(2008) 저경도 고감쇠 고무받침의 동특성에 미치는 영향인자 평가, 한국지진공학회는문집, 한국지진공학회, 제12권 제3호, pp. 11-20.  
한국도로교통협회(2005) 도로교설계기준.  
한국도로교통협회(2005) 도로교표준시방서.  
日本免震構造協會(2005) 地震對策入門 免震構造.  
高山峯夫(1997) 4秒免震への道 -免震構造設計マニュアル-, 理工書東洋ゴム工業(株) 技術資料.  
大島靖樹(1994) 高減衰積層ゴムの力學特性におよぼす載荷速度の影響評と要素設計への適用, 日本建築學會構造系論文集, 日本建築學會, 499, pp. 49.  
AASHTO (1998) *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*  
ISO 22762 (2005) *Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-1 : Test Methods*  
ISO 22762 (2005) *Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-2 : Applications for bridge-specifications*  
ISO 22762 (2005) *Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-3 : Applications for buildings-specifications*  
(접수일: 2009.10.19/심사일: 2010.1.26/심사완료일: 2010.2.21)