

저경도 고감쇠 고무받침의 동특성에 미치는 영향인자 평가

Evaluation of Factors Influencing the Dynamic Characteristics of Low Hardness High Damping Rubber Bearings

최세운¹⁾ · 임홍준²⁾ · 조현진³⁾ · 박건록⁴⁾ · 오 주⁵⁾ · 정희영⁶⁾

Choi, Se-Woon · Lim, Hong-Joon · Cho, Hyun-Jin · Park, Kun-Nok · Oh, Ju · Jung, Hie-Young

국문 요약 >> 본 연구에서는 저경도 고감쇠 고무받침 시험체의 다양한 특성실험을 통하여 저경도 고감쇠 고무받침의 특성을 파악하였다. 고무받침의 파악하고자 하는 특성은 압축강성, 전단강성, 등가감쇠비, 전단특성의 변형을 의존성, 전단특성의 면압 의존성, 전단특성의 주파수 의존성, 전단특성의 온도 의존성, 극한전단특성 등이다. 특성실험은 ISO 22762-1에 따라 수행하였으며, ISO 2276-3에 따라 평가하였다. 특성실험결과 전단강성은 전단변형률과 온도 의존성이 큰 것으로 나타났고, 등가감쇠비는 면압 의존성이 큰 것으로 나타났다. 전단특성의 주파수 의존성 실험결과 0.1Hz를 기준으로 경향이 나뉘는 것으로 나타났다. 0.1Hz 이상에서는 전단특성의 변화가 적었지만, 0.1Hz 이하에서는 전단강성과 등가감쇠비 모두 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 추가적으로 크리프실험과 극한전단특성실험을 수행하였고, 실험결과는 ISO 22762-3의 요구사항을 만족하는 것으로 나타났다.

주요어 고감쇠 고무받침, 특성실험, 전단강성, 등가감쇠비, 의존성

ABSTRACT >> In this paper, the characteristics of low hardness high damping rubber bearings(HDRB) were studied through various prototype tests. The low hardness HDRB were tested to evaluate vertical stiffness, shear stiffness, equivalent damping ratio, various dependencies of shear properties, ultimate shear properties and other factors. The prototype test was performed according to the specifications of ISO 22762-1, and evaluated according to the specifications of ISO 22762-3. The results of the prototype test showed that shear strain and temperature were the factors that most greatly influenced shear stiffness, and that compressive stress was the factor that most greatly influenced the equivalent damping ratio. The frequency dependence test of shear properties showed that two general tendencies of frequency dependence could be observed. At frequencies over 0.1Hz, the changes in shear properties were small. However, at frequencies under 0.1Hz, the changes in shear properties rapidly decreased. The creep test and the ultimate shear test were also performed, and both of them satisfied the requirements of ISO 22762-3.

Key words high damping rubber bearing, prototype test, shear stiffness, equivalent damping ratio, dependence

1. 서론

우리나라는 지진 활동이 활발한 판 경계로부터 떨어져 있기 때문에 지진에 대해서 안전하다고 생각해 왔다. 하지만 2007년 강원도 평창지진(규모 4.8)이 발생한 것처럼 우리나라

라도 결코 지진으로부터 안전할 수 없다.

구조물의 안전성 뿐 아니라 사용성에 대한 관심이 증대됨에 따라 구조물의 지진피해를 최소화할 수 있는 지진격리시스템에 대한 연구와 적용사례가 증가하고 있다. 최근 개정된 도로교설계기준(2005)⁽¹⁾ 내진설계 편에서는 지진격리교량 설계 규정이 신설되어 상당수의 교량에 지진격리장치가 널리 사용되고 있다. 그리고 건축분야에서는 유니슨기술연구소, 트라움하우스 III, 충남 서산에 위치한 주민복지센터 등에 지진격리장치가 적용된 바 있다.⁽²⁻⁵⁾

지진격리장치는 구조물의 기초 부위와 상부구조 사이에 설치되어 지진시에 구조물에 유연성을 부여하여 구조물의 고유주기를 길게 하기 때문에 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄일 수 있다. 하지만 지진시 상대변위를 줄이기

¹⁾ 유니슨(주) 기술연구소 연구원

(대표저자: watercloud@freechal.com)

²⁾ 유니슨(주) 기술연구소 연구원

³⁾ 정희영·유니슨(주) 기술연구소 연구원

⁴⁾ 정희영·유니슨(주) 기술연구소 책임연구원

⁵⁾ 정희영·서울시립대학교 토목공학과 박사과정

⁶⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 2. 26 / 수정일 1차 : 2008. 4. 11, 2차 : 2008. 5. 8 / 게재확정일 : 2008. 5. 8)

위하여 지진격리장치는 높은 에너지 소산능력을 가지고 있어야 한다.

일본, 미국 등 해외에서 널리 쓰이는 지진격리장치 중의 하나인 고감쇠 고무받침은 특수 배합한 고무를 사용함으로써, 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⁽⁶⁾, 고감쇠 고무에 대한 국내기술이 초기단계이기 때문에 일본, 미국 등과는 달리 국내에선 아직까지 널리 쓰이지 못하고 있는 실정이다.

ISO 22762-3⁽⁷⁾에서 건축물용 고감쇠 고무받침은 전단탄성계수가 0.4MPa, 0.6MPa, 0.8MPa인 고무에 대하여 최소 요구 물성이 언급되어 있으며, ISO 22762-2⁽⁸⁾에서 교량용 고감쇠 고무받침은 전단탄성계수가 0.8MPa, 1.0MPa, 1.2MPa인 고무에 대하여 최소 요구 물성이 언급되어 있다. 이처럼 건축물용 고감쇠 고무가 교량용 고감쇠 고무보다 낮은 경도를 가지는 이유는 받침의 높이를 줄여 안정성을 확보하고 제작단가를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 건축물의 경우 교량보다 더 큰 장주기를 요구하기 때문이다. 그러나 저경도 받침을 적용하여 장주기화된 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 저경도 받침의 극한전단특성이 확인되어야 한다.^(9,10)

본 논문에서는 저경도 고감쇠 고무를 이용하여 고감쇠 고무받침의 동특성실험을 ISO 22762-1⁽¹¹⁾에 따라 수행하였다. 다양한 동특성실험을 통하여 압축강성, 전단강성, 등가감쇠비, 전단특성의 전단변형을 의존성, 전단특성의 온도 의존성, 전단특성의 주파수 의존성, 전단특성의 압축응력 의존성, 전단특성의 반복하중 의존성, 압축강성의 전단변형 의존성 등 고감쇠 고무받침의 특성을 파악하였다. 또한 받침의 내구성 및 극한특성을 파악하기 위하여 크리프 실험과 극한전단실험을 수행하였다. 저경도 고감쇠 고무받침의 다양한 특성실험 결과를 통하여 실제제품의 특성을 규명하고, 조건변화에 민감한 항목을 파악하여 제품의 설계치와 부합하기 위하여 설계시에 고려해야 할 인자를 제시하고자 하였다.

2. 실험 개요

ISO 22762는 지진 피해로부터 건물 혹은 교량을 보호하고자 사용하는 지진격리장치 중 하나인 고무받침에 대한 내용을 총 세부분으로 나누어 소개하고 있다. Part 1⁽¹¹⁾은 고무받침의 시험방법에 대해 소개하고 있으며, Part 2⁽⁸⁾와 Part 3⁽⁷⁾은 각각 교량과 건물에 대한 설계기준 및 제품검사 기준에

대해 소개하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ISO 22762-1의 내용에 따라 시험체 제작 및 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 압축특성, 전단특성, 전단특성의 전단변형을 의존성, 전단특성의 압축응력 의존성, 전단특성의 주파수 의존성, 전단특성의 온도 의존성, 전단특성의 반복하중 의존성, 압축특성의 전단변형을 의존성, 크리프 특성, 극한전단특성 등 총 10가지 항목에 대하여 실험을 수행하였다.

2.1 시험기 제원(2000kN 압축-전단시험기)

고감쇠 고무받침 시험체의 특성실험에 사용된 시험기는 표 1 및 그림 1에 나타난 바와 같이 2000kN 압축-전단시험기를 사용하였다.

2.2 시험체 제원

전단변형을 100%에서 전단탄성계수 G값이 0.4MPa인 고감쇠 고무를 사용하여 고무받침을 제작하였으며, ISO 22762-1 표 11의 표준시험체(Standard Test Piece : Circle) 규격에 따라 그림 2 및 표 2와 같이 제작하였다.

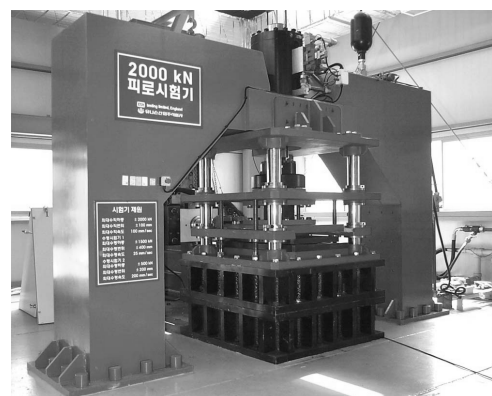
3. 특성시험

특성시험은 제품의 특성치를 파악하기 위해 진행되는 시험으로, 양산 전 시험결과를 검토하여 제품의 적합성 등을 판정하기 위한 목적으로 특성시험을 진행하였다.

우선, 받침 설계시 가장 기본이 되는 압축강성, 전단강성 그리고 감쇠비 등의 특성을 파악하고자 압축특성실험과 전

〈표 1〉 2000kN 압축-전단 시험기 제원표

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



〈그림 1〉 2000 kN 압축-전단시험기 사진

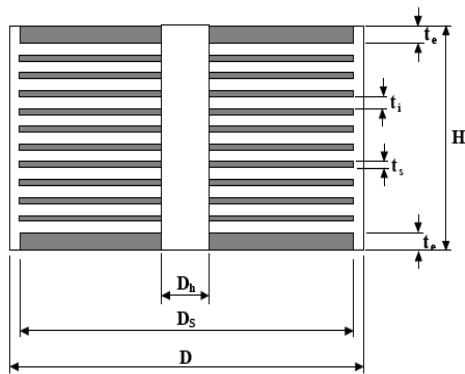
단특성실험을 수행하였다. 이렇게 압축특성 실험과 전단특성 실험을 통해 얻은 제품의 기본 특성치를 ISO 22762-3에 나와 있는 설계식에 따라 계산한 설계값과 비교하여 오차범위를 만족하는지 확인하였다. 여기서 압축강성의 오차범위는 ±30%를 사용하였고, 전단특성의 오차범위는 S-A 등급 기준인 ±15%를 사용하였다.

기존의 연구자료를⁽⁶⁾ 보면 고감쇠 고무의 경우 전단변형을 의존성, 주파수 의존성, 온도 의존성 등이 있는 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 다양한 의존성 실험을 수행하였으며, 고무받침의 내구성 및 극한특성을 파악하기 위하여 크리프 실험과 극한전단실험을 수행하였다.

3.1 압축특성 실험

3.1.1 압축특성 실험

고감쇠 고무받침의 수직강성을 얻고자 상온에서 고감쇠 고무받침 시험체에 2개의 변위계를 설치하여 실험을 수행하



〈그림 2〉 고감쇠 고무받침 시험체 형상

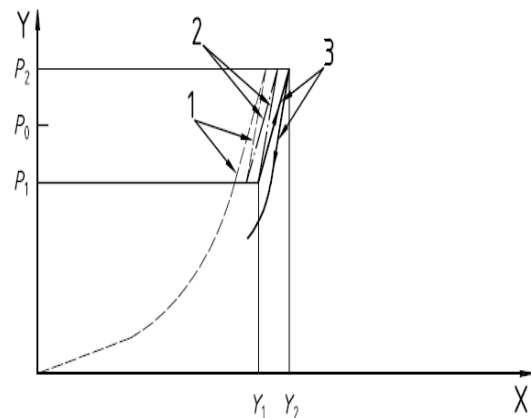
〈표 2〉 고감쇠 고무받침 재료표

	표기	단위	값	비고
외경	D	mm	262	
내부보강철판 직경	Ds	mm	250	
내부 홀 직경	Dh	mm	12.5	
고무층 수	n	-	25	
고무 1층의 두께	ti	mm	2	
고무층 총 두께	Tr	mm	50	
내부보강철판 두께	ts	mm	3	
단부철판 두께	te	mm	40	
총 높이	H	mm	202	
단면적	A	mm ²	48964.67	
1차 형상계수	S1	-	29.68	(= $\frac{D_s - D_h}{4 \cdot t_i}$)
2차 형상계수	S2	-	5	(= $\frac{D_s}{n \cdot t_i}$)

였다. 실험에서 수직하중은 그림 3에 나타난 것처럼 설계하중 P0(면압 7.5MPa)를^(9,10) 기준으로 하여 P1(-30%)부터 P2(+30%)까지 3회 재하 하였고, 식 (1)을 이용하여 수직강성을 계산하였다. 여기서 Y1, Y2는 세번째 사이클에서 하중 P1, P2일 때 각각의 변위이다.

$$K_v = \frac{P_2 - P_1}{Y_2 - Y_1} \tag{1}$$

압축시험결과 세번째 사이클에서 최대·최소 하중은 455.08kN, 264.65kN이었으며, 이때의 변위는 각각 0.79mm, 0.58mm 이었다. 이 값을 식 (1)에 적용한 결과 압축강성은 표 3에 나타난 것처럼 907kN/mm으로 나타났다. 이렇게 얻은 실험값이 기준의 요구사항을 만족하는지 확인하기 위하여 식 (2)와 식 (3)에 따라 고감쇠 고무의 겉보기 탄성계수 E_{op} 와 압축탄성계수 E_c 를 계산하고, 식 (4)에 따라 압축강성의 설계값을 계산하였다. 여기서, 비등방성(Anisotropic) 재료인 고감쇠 고무의 탄성계수 E_0 값은 전단계수 G값의 3배인 1.2MPa를 사용하였다. 한편 고무의 경도에 따른 보정계수 k값은 高山峯夫(1997)⁽¹²⁾에 따라 0.865를 사용하였고, 체적탄성계수 E_{∞} 값은 AASHTO(1999)⁽¹³⁾에 따라 2000MPa으로 설정하였다. 그 결과 압축강성의 실험값은 설계값과 -3%의 오차만 발생하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 고감쇠 고무의 보정계수 k값과 체적탄성계수 E_{∞} 값으로 각각 0.865, 2000MPa을 설정한 것은 타당하다고 판단된다. 압축강성의 실험값과 설계값을 계산한 결과를 표 3에 정리하였다.



〈그림 3〉 압축하중 재하 곡선

〈표 3〉 압축특성 결과

설계값	압축강성(kN/mm)		
	실험값	기준	오차
936	907	±30%	-3%

$$E_{ap} = E_o(1 + 2\kappa S_1^2) \quad (2)$$

$$E_c = \frac{E_{ap} \cdot E_{\infty}}{E_{ap} + E_{\infty}} \quad (3)$$

$$K_v = \frac{E_c \cdot A}{T_r} \quad (4)$$

3.1.2 압축특성의 전단변형을 의존성 실험

고감쇠 고무받침의 전단변형률에 따른 압축강성의 변화를 파악하기 위하여 다양한 전단변위에 대하여 압축특성 실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 해당 전단변위를 일정하게 유지시킨 상태에서, 그림 3과 같이 수직하중을 재하하였다. 여기서 수직하중 P_0 는 면압 7.5MPa에 상응하는 하중이 되도록 하였으며, 전단변위는 0%, 50%, 100%, 150% 등 총 4가지의 전단변형률에 해당하는 값을 갖도록 하였다.

실험결과는 전단변형률 0%에서의 값을 기준으로 압축강성의 변화율을 계산하여 그림 4에 나타내었다. 전단변형률 0~150%의 범위에서 압축강성은 전단변형률이 증가함에 따라 감소율이 커지면서 11%까지 감소하였지만, 압축특성 시험시 압축강성의 허용오차가 $\pm 30\%$ 인 것을 고려하면 압축강성의 전단변형률 의존성이 작은 것으로 판단된다.

3.2 전단특성 실험

3.2.1 전단특성 실험

고감쇠 고무받침의 전단강성 K_h 와 등가감쇠비 h_{eq} 를 얻기 위하여 전단특성(압축-전단) 실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 설계면압 7.5MPa이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서 0.5Hz의 정현파로 설계전단변위(전단변형률 $\gamma = 100\%$, 50mm)만큼의 횡변위가 발생하도록 하는 방법으로 시험체에 총 11회 연속적으로 재하 하였다.

i 번째 사이클에서의 전단강성은 식 (5)를 이용하여 계산

하였다. 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.

$$K_h^i = \frac{Q_1^i - Q_2^i}{X_1^i - X_2^i} \quad (5)$$

i 번째 사이클에서의 등가감쇠비 h_{eq}^i 는 식 (6)을 이용하여 계산하였다. 여기서 ΔW^i 는 i 번째 사이클의 이력곡선에 의해 둘러싸인 면적이다.

$$h_{eq}^i = \frac{2 \cdot \Delta W^i}{\pi \cdot K_h^i (X_1^i - X_2^i)^2} \quad (6)$$

ISO 22762-1에서는 전단강성과 등가감쇠비를 결정하기 위해 세번째 사이클에서의 값을 이용하거나, 또는 2회부터 11회까지의 평균값을 이용하도록 되어있다. 본 연구에서는 식 (7), (8)처럼 2회부터 11회까지의 평균값을 이용하여 고감쇠 고무받침의 전단강성과 등가감쇠비를 계산하였다.

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

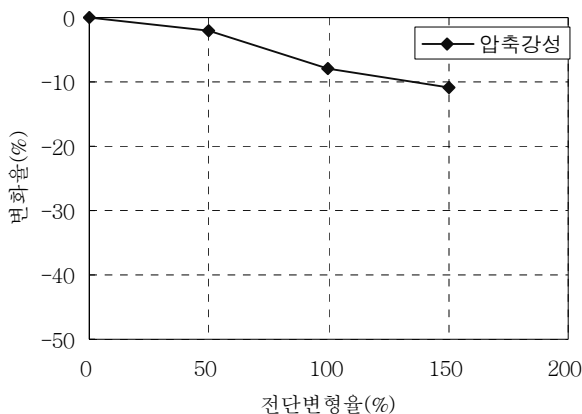
$$h_{eq} = \frac{1}{10} \sum_{i=2}^{11} h_{eq}^i \quad (8)$$

실험데이터를 위 내용에 따라 계산한 결과 전단강성은 0.414kN/mm, 등가감쇠비는 19.5%으로 각각 계산되었다. 한편 전단강성의 설계값은 표 2와 식 (9)를 이용하여 0.392kN/mm으로 계산하였지만, 등가감쇠비의 설계식은 기준에 주어지지 않았기 때문에 여기서 전단강성에 대해서만 설계값과 비교하였다.

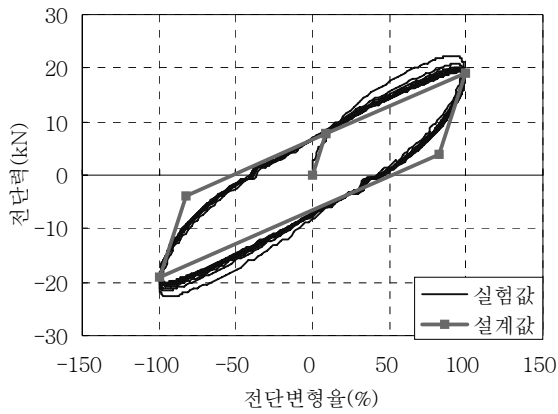
$$K_h = \frac{G \cdot A}{T_r} \quad (9)$$

실험값과 설계값을 비교한 결과, 전단강성은 5.7%의 작은 오차를 보였다. 따라서 기준의 오차범위 $\pm 15\%$ 를 고려한다면 본 연구에서 개발한 고감쇠 고무를 식 (9)처럼 변형률 의존성을 고려하지 않은 전단탄성계수 G 를 사용하여 받침 설계를 할 경우, 설계전단변형률을 전단변형률 100%에 맞추어 설계한 것은 타당하다고 판단된다.

ISO 22762-3에서는 해석시 고감쇠 고무받침의 거동을 이선형(Bi-linear) 모델로 표현하여 초기 강성과 항복 후 강성을 구하도록 되어 있다. 이 기준에 따라 계산한 결과를 그림 5에 실험을 통해 얻은 이력그래프와 비교한 결과, 초기 강성과 항복 후 강성 모두 비슷하게 나오는 것을 확인할 수 있었다.



〈그림 4〉 전단변형률에 따른 압축강성 변화율



〈그림 5〉 이력곡선비교

3.2.2 전단특성의 전단변형률 의존성 실험

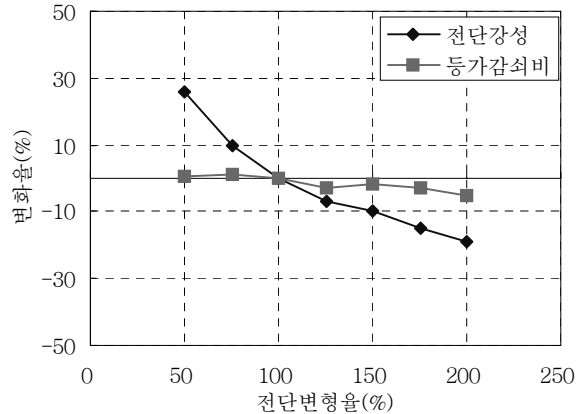
고감쇠 고무받침의 전단변형률에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 전단변위에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 설계면압 7.5MPa이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서, 해당 전단변위가 발생하도록 0.5Hz의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200% 등 총 7가지의 전단변형률에 해당하는 전단변위에서 수행하였다.

실험결과는 전단변형률 100%에서의 값을 기준으로 전단강성 및 등가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 6에 나타내었다. 전단변형률 50~200%의 범위에서 전단강성과 등가감쇠비는 모두 전단변형률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 전단강성은 -19%에서 +26%까지 변화하여 전단변형률 의존성이 큰 것으로 나타났고, 반면 등가감쇠비는 -5%에서 +0.9%까지 변화하여 전단변형률 의존성이 작은 것으로 나타났다. 따라서 받침 설계시 전단변형률 의존성이 고려되지 않은 식 (9) 대신 전단변형률 의존성이 고려된 식 (10)을 사용하여 전단강성의 전단변형률 의존성을 고려할 필요가 있다.

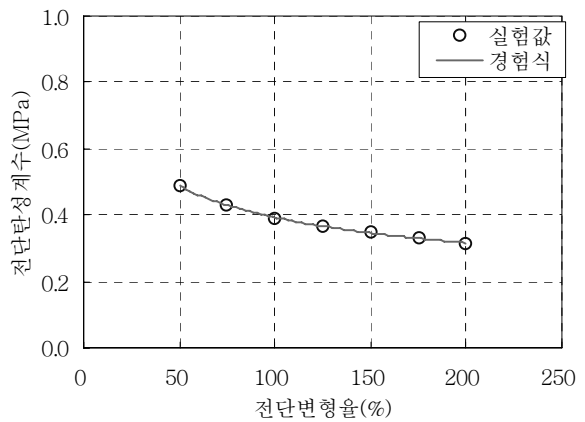
$$K_h(\gamma) = \frac{G(\gamma) \cdot A}{T_r} \tag{10}$$

실험결과를 바탕으로 전단변형률 의존성이 고려된 전단탄성계수 $G(\gamma)$ 의 경험식을 회귀분석을 통해 식 (11)과 같이 구하였으며, 경험식을 통해 얻은 값을 그림 7처럼 실험값과 비교해 보았다. 여기서 전단탄성계수 $G(\gamma)$ 의 단위는 MPa이다.

$$G(\gamma) = 0.39 \cdot \gamma^{-0.3128} \tag{11}$$



〈그림 6〉 전단특성의 전단변형률 의존성 그래프



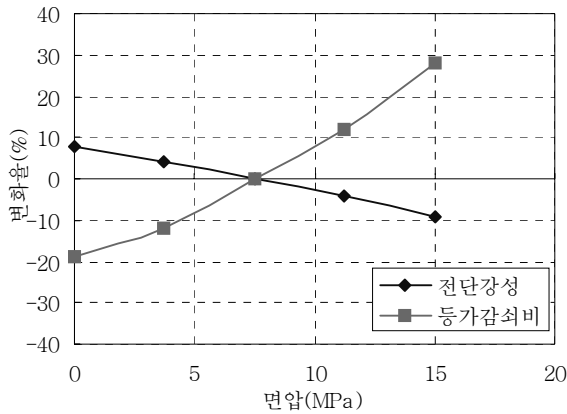
〈그림 7〉 전단변형률에 따른 전단탄성계수 경험식

3.2.3 전단특성의 압축응력 의존성 실험

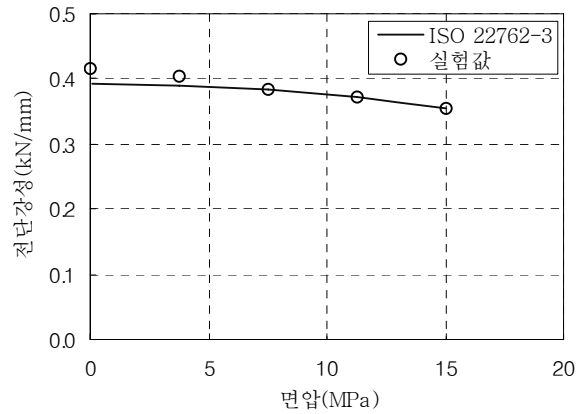
고감쇠 고무받침의 압축응력에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 의존성을 파악하기 위해 다양한 압축응력에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 해당 설계면압이 유지되도록 일정하게 수직하중을 재하한 상태에서, 설계전단변위(변형률 $\gamma = 100\%$)가 발생하도록 0.5Hz의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 설계면압 7.5MPa의 0%, 50%, 100%, 150%, 200% 등에 해당하는 총 5가지의 면압에서 수행하였다.

실험결과는 설계면압 7.5MPa에서의 값을 기준으로 전단강성과 등가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 8에 나타내었다. 전단강성은 면압이 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났고, -9%에서 +8%까지 변화하여 면압 의존성이 작은 것으로 나타났다. 등가감쇠비는 면압이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈고, -19%에서 28%까지 변화하여 면압 의존성이 큰 것으로 나타났다.

등가감쇠비의 면압 의존성이 큰 것은 면압이 증가하면서 고무 분자 사이의 점성 및 마찰 감응 요소가 증가했기 때문이라고 판단된다. 따라서 등가감쇠비의 설계값을 결정할 경



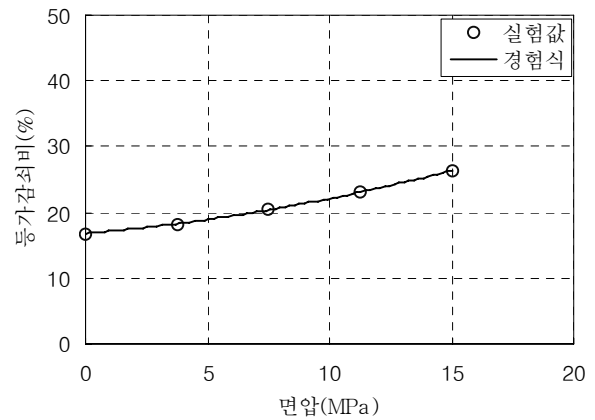
〈그림 8〉 면압에 따른 전단특성 변화율



〈그림 9〉 면압에 따른 전단강성 변화 비교

우 설계면압에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

압축응력에 따른 전단강성의 변화를 ISO 22762-3에 제시된 식과 비교하여 그림 9에 나타내었다. 비교결과 작은 면압에서는 상대적으로 큰 오차를 나타내었지만, 전체적으로 -2~6%의 작은 오차 범위를 나타내었으며, 면압 7.5~11.25MPa에서 이론값과 가장 작은 오차를 보였다. 전단특성 실험시 전단특성의 오차 범위가 ±15%인 것을 고려한다면 본 연구에서 개발한 고감쇠 고무받침에 대하여 면압 의존성을 고려한 설계를 ISO 22762-3에 제시된 식을 이용하여 설계하는 것은 타당하다고 판단된다.



〈그림 10〉 면압에 따른 등가감쇠비 경험식

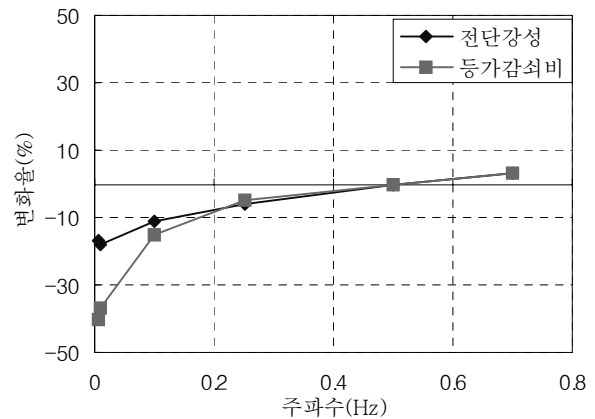
실험결과를 바탕으로 압축응력 의존성이 고려된 등가감쇠비 $h_{eq}(\sigma)$ 의 경험식을 회귀분석을 통해 식 (12)와 같이 구하였으며, 경험식을 통해 얻은 값을 그림 10처럼 실험값과 비교해 보았다. 여기서 등가감쇠비 $h_{eq}(\sigma)$ 의 단위는 %이며, 면압 σ 의 단위는 MPa이다.

$$h_{eq}(\sigma) = 0.0213\sigma^2 + 0.32\sigma + 16.78 \quad (12)$$

3.2.4 전단특성의 주파수 의존성 실험

고감쇠 고무받침의 가진 주파수에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 가진 주파수에 대하여 압축-전단실험을 그림 12 및 13과 같이 수행하였다. 실험은 상온에서 해당 설계면압 7.5MPa이 유지되도록 일정하계수직하중을 재하한 상태에서, 설계전단변위(변형률 $\gamma = 100\%$)가 발생하도록 해당 주파수의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 0.005Hz, 0.01Hz, 0.1Hz, 0.25Hz, 0.5Hz, 0.7Hz 등 총 6가지의 주파수에서 수행하였다. 시험기의 속도 제약으로 인하여 0.7Hz이상의 주파수에 대해서는 실험을 수행하지 않았다.

실험결과는 주파수 0.5Hz에서의 값을 기준으로 전단강성



〈그림 11〉 주파수에 따른 전단특성 변화율

및 등가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 11에 나타내었다. 주파수 0.001~0.5Hz의 범위에서 전단강성과 등가감쇠비는 모두 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었지만, 0.1Hz를 기준으로 변화 경향이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 0.1Hz이상의 주파수에서는 전단강성 및 등가감쇠비 모두 11%이하의 안정된 변화율을 나타냈지만, 0.1Hz이하에서는 전단강성 및 등가감쇠비 모두 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 전단강성과 등가감쇠비의 변화 범

위는 각각 -17~3%, -40~3% 이었다. 주파수에 따른 등가감쇠비의 변화가 상대적으로 큰 것은 고감쇠 고무에 적용된 특수 배합약품이 고무 분자 사이의 점성 및 마찰 감응요소에 크게 기여했기 때문이라고 판단된다.

3.2.5 전단특성의 온도하중 의존성 실험

고감쇠 고무받침의 온도에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 온도에 대하여 압축-전단실험을 그림 12 및 그림 13과 같이 수행하였다. 실험은 설계면압 7.5MPa이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하하고, 해당 온도에서 설계전단변위(변형률 $\gamma=100\%$)가 발생하도록 0.5Hz의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 -20°C, 0°C, 23°C, 40°C 등 총 4가지의 온도에서 수행하였다. 해당 온도의 항온항습기 내에 3일간 보관한 시험체를 시험기에 장착하고, 시험기 주변에 항온챔버를 설치하였다. 이후 저온 실험인 경우 저온을 유지하기 위해 액체질소를 이용하였고, 고온 실험인 경우 고온을 유지하기 위해 열풍기를 이용하였다.

실험결과는 온도 23°C에서의 값을 기준으로 전단강성 및 등가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 14에 나타내었다. 온도 -20~40°C의 범위에서 전단강성은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 등가감쇠비는 40°C에

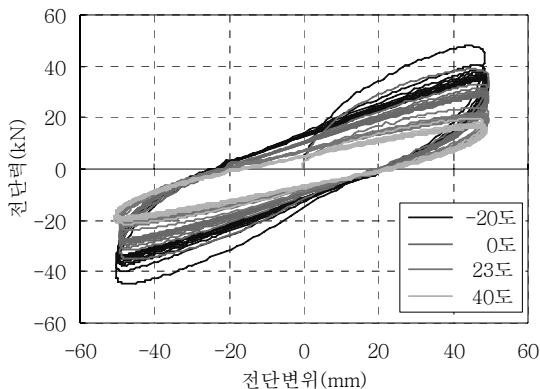
서 7% 감소한 것을 제외하면 거의 일정하게 유지되었다. 한편, 전단강성은 최대 72%까지의 변화율을 나타내었다. 고무와 같은 고분자재료는 온도에 따라 탄성률이 변화하는데 특히 저온에서는 유리전이점(Temperature of Glass Transition)에서 급격하게 상승한다. 고감쇠 고무의 경우에는 고무의 감쇠 성능을 높이기 위하여 가소제 및 연화제, 무기보강제 등의 배합약품을 투입하는데 이와 같은 배합약품이 온도의존성을 갖게 하며 배합약품의 종류와 투입량에 따라서도 크게 변화한다. 일반적으로 고감쇠 고무받침은 천연고무계 고무받침에 비해서 비교적 높은 온도의존성을 갖고 있는데 전단강성 및 감쇠가 저온일 경우에는 높게 나타나며 고온에서는 낮아진다. 이러한 특성은 일본의 제조사별⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 온도의존성 시험결과로 확인 할 수 있는데 20°C 기준으로 -10°C에서는 강성이 23~40%, 감쇠는 10~26%로 상승하며, 40°C에서는 강성이 7~13%, 감쇠는 3~12% 범위로 저하되어 본 연구에서의 시험결과와 비슷한 결과를 갖는 것을 알 수 있다. 참고로 ISO 22762-3에서는 전단특성의 변화율에 대하여 정량적으로 규정된 것은 없는 반면, 도로교표준시방서(2005)⁽¹⁴⁾의 탄성받침 완제품 성능규정에서는 저온시 전단탄성계수의 변화가 상온시 전단탄성계수의 3배 이하가 되도록 정해져 있다.



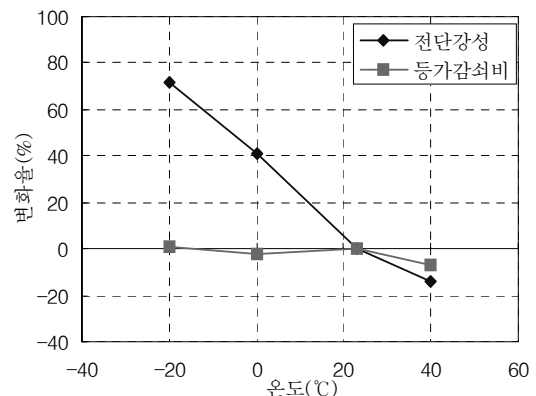
〈그림 12〉 온도 의존성 실험 사진

3.2.6 전단특성의 반복하중 의존성 실험

고감쇠 고무받침의 반복하중에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 반복재하 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 설계면압 7.5MPa이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서, 해당 설계전단변위(변형률 $\gamma=100\%$)가 발생하도록 0.5Hz의 정현파를 50회 반복재하하였다. 반복재하수 증가에 따른 각 사이클별 전단강성과 등가감쇠비를 계산하여 전단특성치의 변화양상을 파악하였다.



〈그림 13〉 온도에 따른 이력곡선비교



〈그림 14〉 온도에 따른 전단특성 변화율

50회 사이클 동안 전단특성 변화 추이를 그림 15에 나타내었다. 초기 1~3번째 사이클에서 전단강성은 크게 변화하는 것으로 나타났지만, 그 이후 사이클부터는 변화 폭이 줄어들어 조금씩 감소하는 양상을 나타내었다. 1회 사이클과 50회 사이클에서의 전단특성을 비교하면 전단강성과 등가감쇠비는 각각 17%, 3% 감소하였다. 한편 등가감쇠비는 사이클 횟수에 상관없이 약 20%를 유지하는 것으로 나타났다. 大鳥靖樹(1994)⁽¹⁸⁾은 전단변형을 ±200%, 가진 진동수 0.5Hz(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 냉각하기 위해 상온에서 24시간 동안 놓은 후, 같은 조건에서 3.2절의 압축-전단실험을 다시 수행하였다. 비교 결과 전단강성은 0.402kN/mm에서 0.405kN/mm으로 약 0.75%증가하였고, 등가감쇠비는 전후 모두 20.5%이었다. 전단특성의 감소가 없는 것으로 보아 반복하중으로 인한 영구변형은 없는 것으로 판단된다.

3.3 크리프특성 실험

고무받침의 크리프 특성을 파악하기 위해 1000시간 동안 상온 상태에서 동일하중을 재하 하여 60년 후의 크리프 성능을 예측하였다. 수직하중은 설계하중 7.5MPa에 해당하는 하중을 재하하였으며, 상온을 유지하기 위하여 항온챔버에서 실험을 수행하였다. 크리프량을 측정하기 위하여 변위계

2개를 사용하였다. 100시간에서 1000시간 사이에 얻은 데이터를 최소자승법을 이용하여 식 (13)에 나와 있는 계수 a, b를 추정하고, 이렇게 얻은 값을 식 (14)에 적용하여 60년 후의 크리프량을 예측하였다. 여기서, ϵ_{cr} 은 60년 후의 크리프량을 총 고무두께에 대한 백분율로 나타난 값이며, t는 경과시간(단위 hour)을 의미한다.

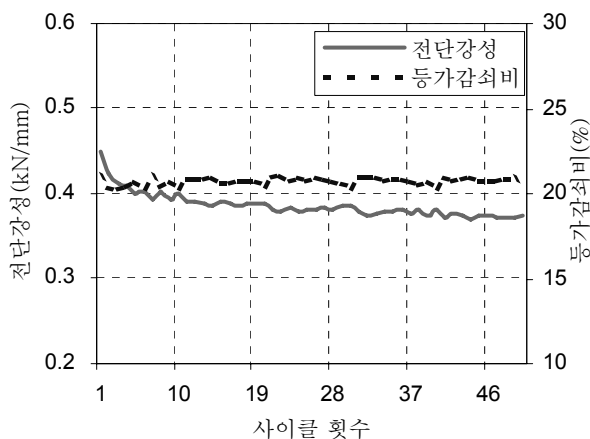
$$\log_{10}\epsilon_{cr} = \log_{10}a + b\log_{10}t \tag{13}$$

$$\epsilon_{cr} = a \cdot t^b \tag{14}$$

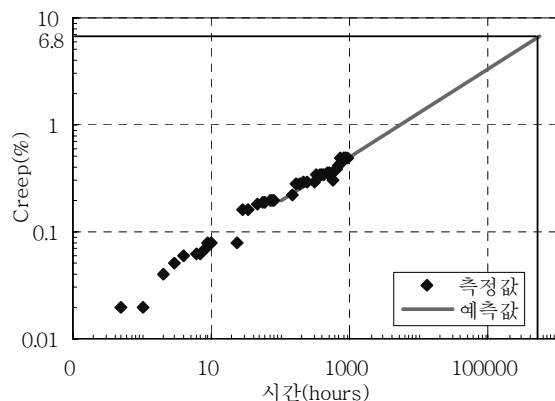
실험결과 1000시간에 대한 크리프 변위는 0.25mm였고, 이는 고무두께 50mm의 0.5%에 해당하는 값이다. 100~1000시간 동안의 크리프 실험데이터를 식 (13)에 적용한 결과 a와 b는 각각 0.03, 0.41을 얻었다. 이 값들을 식 (14)에 적용한 결과 60년 후의 예측 크리프량은 6.8%로 나왔다. 이 값은 ISO 22762-3의 기준 10% 이내를 만족하는 값이다. 실험결과 값과 추세선을 그림 16에 나타내었다.

3.4 극한전단특성 실험

본 실험에서는 좌굴, 파단, Roll-out 등으로 정의되는 극한전단특성을 파악하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 일정한 수직하중을 재하한 상태에서, 일방향으로 횡변위를 발생시켰다. 횡변위가 증가하면서 고무받침은 좌굴, 파단, Roll-out 등이 발생하게 되는데 이때의 변형율을 극한전단 변형율 γ_u 라 정의한다. ISO 22762-3에서는 극한전단 변형율 γ_u 값에 따라 A, B, C, D, E, F 등 총 6등급으로 분류하고 있다. 본 시험에서 사용한 시험체가 A등급 조건을 만족하는지 확인하고자 면압 7.5MPa에 해당하는 설계수직하중을 가한 후 목표변형율 350%인 175mm까지 전단변위를 발생시키는 극한전단 실험을 수행하였다. 극한전단 실험사진



〈그림 15〉 사이클 횟수에 따른 전단특성 변화 추이



〈그림 16〉 60년 후 크리프량 예측 그래프

을 그림 17에 나타내었다.

실험결과 그림 18처럼 전단변형율이 약 160%(80mm)를 넘으면서 변형경화현상(Strain Hardening)이 발생하였음을 확인하였으며, 전단변형율 350%(175mm)가 발생할 때까지 좌굴, 파단 등은 발생하지 않았다. 이 결과를 통해 대변형시 고감쇠 고무받침의 안정성을 확인하였다.

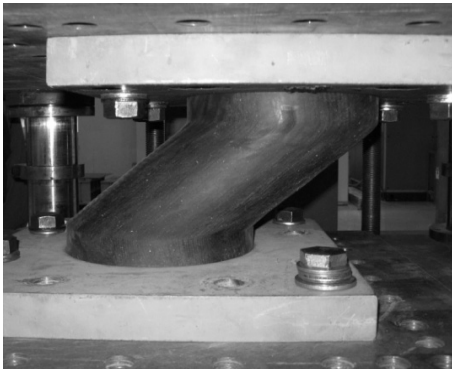
고감쇠 고무받침의 파단능력을 파악하기 위하여 1개의 시험체를 설치한 후 파단능력이 과대평가 되지 않기 위하여 수직하중을 주지 않은 상태에서 전단변형율 600%까지 수평변위를 재하하였다. 파단능력 시험 중의 시험체의 형상 및 결과는 그림 18과 그림 19에 나타냈으며 시험체는 지압면적을 초과하여도 전단파괴가 발생하지 않았다. 일반적으

로 고감쇠 고무받침의 수평파단시의 전단변형율은 약 400% 이상이지만 면압 및 1, 2차 형상계수, 재하속도에 크게 의존한다. 또한 고무 소재 측면에서 고감쇠 고무의 감쇠를 부여하기 위해 투입되는 배합고무 및 배합약품에 의한 결정화도(Degree of Crystallinity)의 저하와 낮은 가교도(Degree of Crosslinking) 등의 요인에 기인하여 신장율의 극대화되었기 때문이라고 판단된다. 또한 350% 극한전단 변형율 시험결과와 비교하면 그 경향이 거의 일치하는 것으로 나타났는데 이것은 3.2.3절에서 나타난 것처럼 고감쇠 고무받침의 전단강성은 압축응력의 영향이 적기 때문이다.

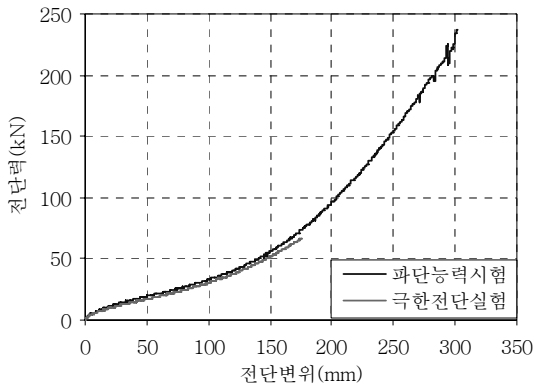
4. 결론

본 연구에서 개발한 저경도 고감쇠 고무받침에 대하여 ISO 기준에 따라 동특성 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 설계전단변형율을 총 고무두께 100%에 맞추어 전단특성 실험을 한 결과 전단강성의 설계값과 5.7%의 오차를 보였다. 이 값은 ISO 22762-3의 기준인 오차범위 $\pm 15\%$ 를 만족하는 값이다. 따라서 본 연구에서 개발한 고감쇠 고무를 사용하여 전단강성의 전단변형율 의존성을 고려치 않고 받침설계를 할 경우, 설계전단변형율을 100% 전후로 설정한 것은 타당하다고 판단된다.
2. 전단강성의 경우 온도 및 전단변형율에 대하여 큰 의존성을 나타내었으며, 면압에 대해서는 작은 의존성을 나타내었다. 따라서 고감쇠 고무받침의 전단강성 설계시 온도, 전단변형율에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.
3. 등가감쇠비의 경우 주파수 및 면압에 대하여 큰 의존성을 나타내었으며, 온도 및 전단변형율에 대해서는 작은 의존성을 나타내었다. 등가감쇠비의 주파수 및 면압의존성이 큰 것은 고감쇠 고무에 적용된 특수 배합약품이 고무 분자 사이의 점성 및 마찰 감응요소의 영향 때문이라고 판단된다.
4. 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 필요하다고 판단된다.
5. 크리프 시험을 통하여 장기하중에 대한 안전성을 확인하였다. 본 연구에서는 면압 7.5MPa에서만 크리프 실험을 수행했지만, 고무받침 설계시 더 큰 면압을 받는 경우가 있으므로 7.5MPa 이상의 면압에 대해서 추가 실험을 할



〈그림 17〉 극한전단 실험 사진



〈그림 18〉 극한전단 실험결과 그래프



〈그림 19〉 파단능력 실험 사진

필요가 있다고 판단된다.

6. 본 실험은 ISO 22762-1에서 제시하고 있는 표준시험체에 대해서만 실험을 수행하였으므로, 시험체 크기에 대한 영향을 파악하기 위해 다른 크기의 시험체에 대한 추가 실험을 할 필요가 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
2. 김두훈 등, “납면진반침을 적용한 건축물의 내진설계.” 한국지진공학회 춘계학술대회논문집, 한국지진공학회, 1998, pp. 258-265.
3. 이동근 등, “우리나라의 면진 및 진동제어”, 한국지진공학회논문집, 제10권 제6호, 2006, pp. 67-77.
4. 민정기 등, “건축구조물 지진격리장치의 현황 및 적용방안”, 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 한국지진공학회, 2007, pp. 224-231.
5. 이명규 등, “이차형상비와 면압의존성을 고려한 RB, LRB 설계.” 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 한국지진공학회, 2008, pp. 229-236.
6. 일본면진구조협회, 지진대책입문 면진구조, 성안당, 2005
7. ISO, ISO 22762-3, *Elastomeric Seismic Protection Isolations Part 3: Applications for buildings-Specifications*, 2005.
8. ISO, ISO 22762-2, *Elastomeric Seismic Protection Isolations Part 2: Applications for bridges-Specifications*, 2005.
9. 정길영 등, “저경도 고무받침의 특성에 관한 실험적 연구”, 한국지진공학회 논문집, 제6권 제4호, 2002, pp. 39-49.
10. 정길영 등, “저경도 납면진반침의 특성에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제22권 제6-A호, 2002, pp. 1295-1307.
11. ISO, ISO 22762-1, *Elastomeric Seismic Protection Isolations Part 1: Test methods*, 2005.
12. 高山峯夫 등, 4秒免震への道 -免震構造設計マニュアル-, 理工図書, 1997.
13. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, 1999.
14. 한국도로교통협회, 도로교표준시방서, 2005.
15. (株)ブヂストン技術資料.
16. 横浜ゴム, (株)技術資料.
17. 東洋ゴム工業, (株)技術資料.
18. 大鳥靖樹 등, “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価と要素設計への適用”, 日本建築學會構造系論文集, 466, 1994, 49pp.