

고감쇠 고무받침의 장기 크리프 특성에 대한 실험적 연구

An Experimental Study of the Long-term Creep characteristic of High Damping Rubber Bearings

오 주¹⁾ · 박진영²⁾ · 박건록³⁾ · 김씨동⁴⁾ · 박성규⁵⁾

Oh, Ju · Park, Jin-Young · Park, Kun-Nok · Kim, See-Dong · Park, Sung-Kyu

국문 요약 >> 지진격리 구조물은 하부구조에서 상부구조로 전달되는 지진력의 현저한 감소가 요구되는 경우 고감쇠 고무받침(HDRB)과 같은 지진격리받침을 사용하는 구조물로서 내진설계의 도입 이후부터 많이 설계, 시공되고 있다. 적층고무받침은 지진격리장치에서 가장 중요한 구조부재이다. 적층형 고무받침의 기본 특성은 압축시험, 압축전단시험, 크리프시험 등을 통하여 얻는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 축 응력 7.5MPa, 8.37MPa인 지진격리받침(고감쇠 고무받침)을 실험실로 제작하여 실험실에서 1000시간동안 크리프 시험을 실시하였다. 고감쇠 고무받침과 같은 지진격리받침을 실제 교량환경 상태에서 장기간 압축 크리프 시험한 결과 1000시간 후 최대크리프 변형은 전체 고무두께의 0.3~1.92%로 변형하였다.

주요어 지진격리장치, 크리프, 고감쇠 고무받침

ABSTRACT >> Isolated structures use devices such as high damping rubber bearings (HDRB) in order to dramatically reduce the seismic forces transmitted from the substructure to the superstructure. The laminated rubber bearing is the most important structural member of a seismic isolation system. The basic characteristics of rubber bearings have been confirmed through compression tests, compressive shearing tests and creep tests. This paper presents the results and analysis of a 1000hr, ongoing creep test conducted at 7.5MPa, 8.37MPa in our laboratory. The long-term behavior of bridge bearings, such as high-damping rubber bearings, will be discovered through a compression creep test subjected to actual environmental conditions. These tests indicated that the maximum creep deformation is about 0.3~1.92% of total rubber thickness.

Key words seismic isolation systems, creep, high damping rubber bearing

1. 서론 및 연구동향

지진 활동이 활발한 판 경계로부터 떨어져 있어 지진으로부터 비교적 안전지대라고 인식되어온 우리나라에서도 2007년에 강원도 평창에서 발생한 규모 4.8과 같은 지진을 비롯하여 최근에 여러 차례 지진이 발생하였다. 이에 따라 지진에 대비하여 피해를 최소화 하고 생명과 재산을 보호할 수

있도록 내진관련 기술 및 방안들을 개발하여 왔다. 이러한 내진기술의 하나의 방안으로 교량 또는 건축구조물에 지진격리받침을 설치하여 지진력을 감소시키고 지진피해를 최소화하고자 하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 최근 국내에서도 해상장대교량 및 대형 구조물의 건설이 많이 계획되고 시공됨에 따라서 이에 대한 지진격리 구조물의 설계와 적용이 증가하고 있다. 이에 따라 내진설계의 일환으로 교량 구조물에 지진격리설계가 채용되는 경우가 꾸준히 증가해 왔지만 체계적인 기준과 지침이 없어 그동안 교량의 지진격리설계와 지진격리받침의 특성 및 성능평가 과정에서 많은 혼란이 있었다. 국내에서는 2005년 도로교 설계기준¹⁾ 개정에 이르러서야 내진설계편에 교량 지진격리설계편이 추가되었고 여기에는 지진격리장치의 품질에 관한 최소한의 요구사항만 제시되었다. 따라서 지진격리받침의 성능을 평가하기 위한 구체적인 시험방법과 절차, 시험 결과의

¹⁾ 정회원·유니슨(주) 기술연구소 선임연구원
(대표저자: oju@unison.co.kr)

²⁾ 정회원·유니슨(주) 기술연구소 선임연구원

³⁾ 정회원·유니슨(주) 기술연구소 책임연구원

⁴⁾ 극동엔지니어링(주) 전무이사/토목구조기술사

⁵⁾ 대구대학교 토목공학과 겸임교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 12. 15 / 수정일 1차 : 2009. 2. 4, 2차 : 2009. 2. 12 / 게재확정일 : 2009. 2. 12)

판정기준은 아직 마련되어 있지 못한 실정이다. 지진격리받침의 신뢰성 확보를 위해서는 이러한 지진격리설계기준 이외에도 성능평가기준의 마련이 시급하다.

지진격리장치는 구조물의 기초 부위와 상부구조 사이에 설치되어 지진 시에 구조물에 유연성을 부여하여 구조물의 고유주기를 길게 하기 때문에 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄일 수 있다. 하지만 지진 시 상대변위를 줄이기 위하여 지진격리장치는 높은 에너지 소산능력을 가지고 있어야 한다. 지진격리받침의 내구성을 고려할 경우 고무층의 산화에 의한 노화와 장시간 동안 축 압축력에 의한 크리프 변형은 중요하다. 환경변화에 의한 지진격리받침의 특성변화에 대한 연구는 정길영 등⁽²⁾과 최세운 등⁽³⁾이 실험을 통하여 특성 및 성능에 대하여 연구하였다. 그러나 크리프와 같은 장기간 압축 처짐 등에 대한 심도있는 실험연구는 부족한 실정이다. 지진격리받침에 대한 크리프에 대한 연구는 오주 등⁽¹¹⁾⁽¹²⁾의 연구에 의하여 국내에서는 처음으로 시도되었다. 오주 등⁽¹¹⁾의 선행연구에서는 지진격리장치의 일종인 고감쇠 고무받침(HDRB)과 납면진받침(LRB)을 대상으로 크리프 시험을 실시하여 장기 처짐량을 예측하였다. 그러나 시험온도 등과 같은 제반조건에 대하여 고려하지 않고 단적으로 적층고무받침의 처짐 예측값만으로 장기 크리프량을 예측하여 정확한 크리프 시험이라 하기엔 부족한 점이 있다. 오주 등⁽¹²⁾의 다른 연구에서는 고압축성질의 폴리우레탄 디스크 받침을 이용하여 6시간동안 크리프 특성시험을 실시하였다. 그러나 디스크받침의 폴리우레탄 디스크는 적층형이 아닌 일반 디스크형태의 순수 폴리우레탄만을 이용하였고 시험시간이 짧은 장기 크리프 시험이라 할 수 없다.

적층고무받침은 빛과 열 등의 영향이 작은 환경에서 사용하는 경우가 많기 때문에 특히 주의해야 할 요인으로는 주로 고무의 산화반응과 크리프(Creep)이다. 특히 장기 압축에 의한 크리프 변형은 교량 상부구조물의 재하시기와 온도 환경 등에 영향을 받기 때문에 그 값을 정확히 추정하는 것은 어려운 일이다. 이와 같은 이유로 지진격리받침의 장기 크리프에 의한 수직 처짐은 설계 시 고려되지 않고 있는 실정이다. 적층고무받침과 같은 지진격리장치에 대한 성능검증은 시험체에 대한 압축시험과 압축전단시험 등을 통하여 실시하는 것이 일반적이다.

Derham and Waller⁽⁴⁾는 건물 주변 지하철로부터 발생되는 진동으로부터 건물을 격리시킬 목적으로 설치된 적층고무받침을 대상으로 8년 동안 고무받침의 처짐변화를 측정하여 100년 후 크리프 처짐량을 예측하였다. 또한 Davies⁽⁵⁾는 동일한 건물을 대상으로 15년 동안 크리프량을 측정하였

다. 그러나 상기와 같은 방법으로 지진격리장치에 대하여 실측을 통한 처짐 예측은 시간이 많이 소요되어 실효성이 낮다.

본 연구에서는 지진격리받침(고감쇠 고무받침)을 실물크기로 제작하고, 대기온도상태와 실온상태에서 1000시간동안 크리프 시험을 수행하였다. 시험 후 측정값을 이용하여 지진격리받침의 장기 처짐에 의한 크리프 특성을 파악하고 이에 따른 영향인자를 분석하였다. 적층형 고무받침과 같은 지진격리장치 설계 시 무시하고 있는 크리프 변형에 대하여 실험을 통하여 구조물의 내구수명인 60년, 100년 후 얼마나 변형될 것인지 예측하였다. 실제 많은 변형이 발생한 지진격리 구조물의 고압축응력상태에서 적층고무받침의 크리프 특성을 명확히 하는 것은 필요하다. 이에 각기 다른 형식의 적층형 고무받침을 이용하여 축 응력과 적층고무받침의 형상에 따른 크리프 시험을 통하여 장기 처짐에 대한 영향인자를 도출하였다. 또한 지진격리받침 설계 및 시공 시 상부하중에 의한 크리프 처짐 정도를 예측하기 위하여, 실물크기의 지진격리받침을 제작하여 ISO 22762⁽⁷⁾에서 제시한 시험법에 따라 1000시간 동안 크리프 시험을 실시하여 장기 크리프 처짐량을 평가하였다. 이때 압축하중으로 재하한 상태에서 장기간 계측하여 기온의 변화에 의한 고무의 팽창, 압축을 측정한 결과 100년 후에도 크리프 양은 고무 전체두께의 약 10%이하일 것으로 추정되었다.

2. 지진격리받침

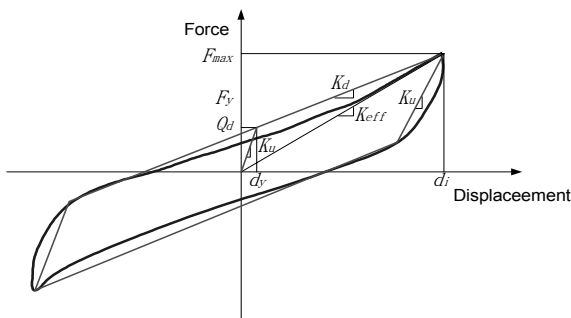
2.1 시험에 사용한 지진격리장치의 특성

크리프 시험에 사용한 고감쇠 고무받침(HDRB)은 지진격리장치의 일종으로 교량 및 건축물의 동적특성에 적합하게 설계하여 개발하였고, 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 특성이 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 본 실험에 사용된 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.

고감쇠 고무받침의 단면내부 형상과 기계적 특성은 그림 2와 같고, 하중-변위 이력곡선은 그림 1과 같으며 EDC(사이클당 등가감쇠)값이 클수록 감쇠율이 증가하는 특징이 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 낸다.⁽⁶⁾



〈그림 1〉 고감쇠 고무받침의 힘-변위 이력곡선



〈그림 2〉 고감쇠 고무받침 형상 및 기계적 특성

2.2 시험체의 설계

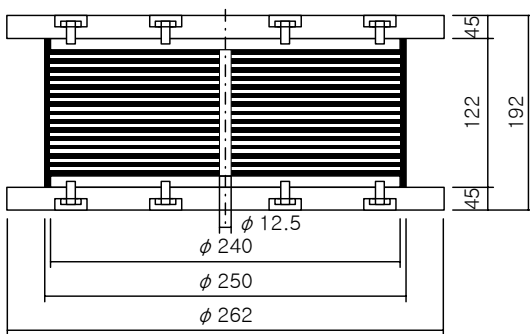
지진격리받침은 설계압축력에 의해 결정되는 사용 한계 상태, 풍하중 등에 대한 저항 그리고 지진에 의한 극한 한계 상태에 대하여 만족하도록 설계하였다. 이와 같은 설계조건에 따라 지진격리받침인 고감쇠 고무받침(HDRB)은 크게 두 가지 형태로 제작하여 시험하였다(그림 3 참조). 본 연구에 사용된 시험체는 ISO 22776에서 제시하고 있는 표준 시험체 규격으로 제작하였다. 원형 표준시험체에 대한 형상 및 구성은 그림 4와 같다.

2.3 시험체의 제원

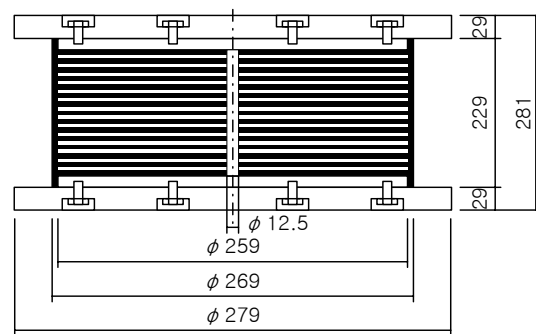
천연고무는 탁월한 탄성능력, 복원능력을 가지고 있어 지진격리받침에 폭넓게 이용되어 왔다. 본 연구에서 사용된 시험체 또한 천연고무의 고유성질에 고무자체의 탄성능력과 복원능력을 유지한채로 에너지 흡수 능력을 증가시킨 고감쇠 고무(High Damping Rubber)를 사용하여 시험체를 제작하였다. 시험체간의 크기에 차이는 있으나 시험체의 주된 구성성분은 천연고무이다. 시험체의 직경은 외부고무 두께 10mm를 포함한 것으로 내부 적층고무 한층의 두께는 각각 2mm, 3mm이고, 고무의 적층수는 25층, 31층으로 적층하였다. 그리고 보강철판의 두께는 3mm이다. S_1 는 한 개의 고무층 구멍을 포함한 자유 표면에 대한 하중면적의 비로서 1차 형상계수이고, S_2 는 내부고무의 총 두께에 대한



〈그림 3〉 고감쇠 고무받침 시험체



(a) HDRB 1, HDRB 2, HDRB3



(b) HDRB 4

〈그림 4〉 시험체 제원

유효폭의 비율을 나타내는 2차 형상계수이다. 자세한 시험체의 제원은 표 1과 그림 4와 같다. 표 2는 시험체의 주된 성분인 고무의 기본 구성성분을 나타낸 것이다. 일반적으로 고무재료 중에 카본블랙이 증가하면 고무의 가공성이 나빠지며, 또한 변형경화가 커지게 된다. 이처럼 고무재료의 구성성분에 따라서 그 성질 등이 변하게 된다.

3. 크리프 시험

가장 최근에 지진격리장치의 성능평가 기준으로는 ISO 22762(Elastomeric Seismic-protection Isolators)가 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 이 ISO 22762에는 지진 피해로부터 교량 혹은 건축물 등을 보호하고자 사용하는 지진격리장치 중 하나인 적층형 고무받침에 대한 내용을 총 세 부분으로 나누어 소개하고 있다. Part 1⁽⁷⁾은 적층고무받침의 시험방법에 대해 소개하고 있으며, Part 2⁽⁸⁾와 Part 3⁽⁹⁾은 각 교량과 건물에 대한 설계기준 및 제품검사 기준에 대해 소개하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ISO 22762-1의 내용에 따라 시험체를 제작하였고 실험을 수행하였다. 또한 ISO 22762에서 제한한 압축특성, 전단특성 등 각종 의존성에 대하여 실험을 선행한 후 동일한 시험체를 사용하여 크리프 시험을 실시하였다.

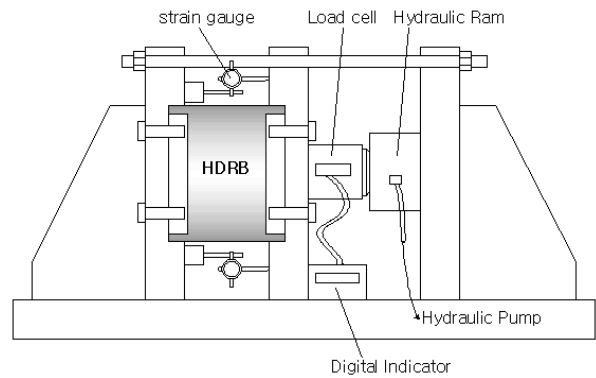
3.1 시험기 제원

크리프 시험에 있어서 가장 중요한 요소는 장시간동안 연속적인 하중재하 여부이다. 하지만 현재 대형시험장비에서는 유압조절 및 시험기 성능 등의 현실적임 문제때문에 시

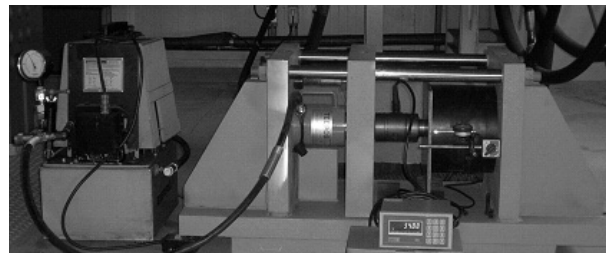
험에 어려움을 겪고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 그림 5와 같은 크리프 시험기를 고안하여 시험을 실시하였다. 그림 6은 크리프 시험기에 시험체를 설치하고 크리프 시험을 실시하고 있는 현황이다.

3.2 크리프시험 방법

크리프시험은 전단변형 없이 일정한 압축력을 장기간 받을 경우 지진격리받침에 발생하는 변형을 알아보기 위한 시



〈그림 5〉 크리프 시험기



〈그림 6〉 크리프 시험 설치현황

〈표 1〉 적층고무받침 시험체 제원

항 목 시험체	강판지름 (mm)	구멍지름 (mm)	전체지름 (mm)	고무두께 (mm)	고무층수 (n)	강판두께 (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	0.8
HDRB 3	240	12.5	250	2	25	3	29.7	5	7.5	0.4
HDRB 4	259	12.5	269	3	31	3	16.6	2.8	8.4	0.4

여기서, S_1 은 1차 형상계수 $\left(\frac{D_s - S_h}{4t_i}\right)$, S_2 는 2차 형상계수 $\left(\frac{D_s}{nt_i}\right)$
 D_s 는 내부보강철편의 직경, D_h 는 내부 홈의 직경, t_i 는 고무 한층의 두께, n 은 고무층 수를 나타낸다.

〈표 2〉 고무의 기본 구성성분(중량비 %)

항 목 시험체	천연고무	카본블랙	가황제	첨가제
HDRB 1	59.1	26.1	0.7	14.1
HDRB 2				
HDRB 3	52.6	34.0	0.8	12.6
HDRB 4				

험이다. 시험체는 제작 후 48시간 이상 경과한 시험체를 대상으로 시험 전 실온상태에서 다시 24시간 이상 안정화한 상태에서 시험을 실시하였다. 또한 크리프 시험에 사용된 시험체는 적층고무받침의 특성시험 및 피로시험 등을 실시한 시험체를 사용하였다. 실험상태는 그림 6과 같다. 유압재과 로드 셀, 시험체가 놓이고 압축하중은 유압펌프로 가력하였다. 수직하중의 재하는 1분 안에 설계압축응력(σ_0)으로 가력하였다. 시험체의 가력하중은 HDRB 1, HDRB 2 그리고 HDRB 3 시험체의 가력하중은 370kN(축 압축응력 7.5MPa)로 재하하였고, HDRB 4 시험체의 가력하중은 450kN(축 압축응력 8.4MPa)로 압축가력하였다. 압축하중의 변동은 3%이내이고, 실험상태는 가능한 실제상태로 유지하였다. 설계 압축력에 도달되었을 때의 처짐변위를 0점으로 설정하였다. 이때 2군데 이상 압축변위와 면진장치 표면의 온도를 측정하며, 시간간격은 0~10시간, 10~100시간, 100~1000시간으로 하고 각각의 시간간격 당 10회의 동일한 시간 간격으로 압축변위와 시험체 표면의 온도를 측정하였다. 지진력리받침에서 온도에 따른 장기처짐 변형에 대한 영향을 알아보기 위하여 HDRB 1 시험체는 대기온도 상태에서 실시하였고, 그 외 다른 시험체는 모두 $23\pm 2^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하여 시험하였다. 시험체의 수직변위는 2개의 변위계를 사용하여 시험판에 고정하여 측정하였다. 시험체의 수직변위는 2개의 고감도 변위계를 사용하여 시험판에 고정하여 측정하였다. 본 연구의 수직변위는 2개의 변위계 값을 평균한 것이다.

지진력리받침의 크리프 측정시간은 1000시간 이상동안 측정하고, 측정시간은 불확실성을 줄이기 위하여 측정시간을 가능한 장시간 측정하였다. 또한 측정시간은 100~101hr, 101~102hr, 102~103hr의 각각의 시간 간격에서 최소한 10점 이상에서 동일간격으로 측정하였다.

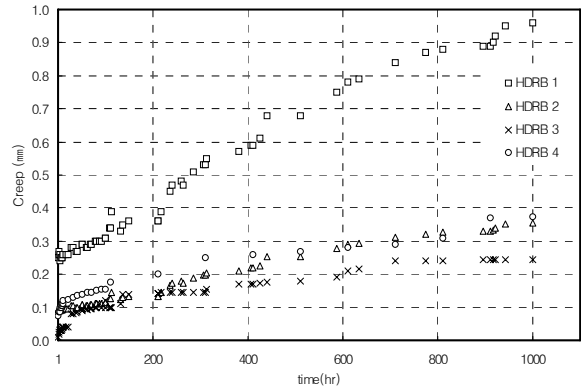
4. 실험 결과 및 분석

그림 7은 온도변화 상태에서 설계압축하중을 재하직후 수직변위의 변화를 나타낸 것이다. 이 수직변위는 적층고무판에 대한 수직변위의 상대변위 관계이다. 이 값은 적층고무가 팽창할 때 감소하게 된다.

대기온도변화 상태에서 크리프 시험이 수행된 시험체 HDRB 1의 수직변위와 실험실온도가 $23\pm 2^\circ\text{C}$ 로 일정한 온도상태에서 측정한 다른 시험체와 비교하기 위해서는 온도변환이 필요하다. 따라서 대기온도변화 상태에서 시험한 HDRB 1시험체는 식 (1)과 같이 시험체의 수직변위에 선형 열팽창계수 α 를 도입하여 변환하였다.

〈표 3〉 열팽창 계수 α (mm/°C)

시 간	1~100hr	101~1000hr
선형 변화도	-0.000371094	-0.000329716



〈그림 7〉 크리프 변위 변화(1000시간)

$$\Delta H_{23} = \Delta H_T + nt_r (T - 23)\alpha \tag{1}$$

여기서 ΔH_{23} 은 23°C 에서 수직변위에 있어서의 변화이고, ΔH_T 는 $T^\circ\text{C}$ 에서 수직변위에 있어서의 변화이다. T 는 시험체의 표면온도($^\circ\text{C}$)이고 α 는 선형 열팽창계수($T^\circ\text{C}$ 에서 23°C)이다. 시험체 HDRB 1의 시간 구간별 열팽창계수는 표 3과 같으며, 이는 실제 실험측정온도($T^\circ\text{C}$)와 표준온도(23°C)의 관계에 의하여 실험을 통하여 산정하였다. 그리고 크리프 변형률은 식 (2)에 의해서 산정하였다. 이와 같이 온도보정에 의한 시험체의 수직처짐 변화는 그림 7의 HDRB 1시험체의 크리프 변위와 같다.

$$\epsilon_{cr} = \frac{\Delta H_{23}}{nt_r} \times 100 \tag{2}$$

시험온도가 $23\pm 2^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지된 HDRB 2, HDRB 3, HDRB 4 시험체의 크리프 처짐량은 100시간에서 1000시간 사이에 얻은 데이터를 최소자승법을 이용하여 식 (3)과 같은 함수관계식으로부터 a 와 b 를 추정하고, 이렇게 얻은 값을 식 (4)에 적용하여 60년 후와 100년 후 지진력리받침의 크리프 변형량을 예측하였다. 여기서, ϵ_{cr} 은 60년 후의 크리프량을 총 고무두께에 대한 백분율로 나타난 값이며, t 는 경과시간(단위 hour)을 의미한다.⁽⁷⁾

$$\log_{10}\epsilon_{cr} = \log_{10}a + b\log_{10}t \tag{3}$$

$$\epsilon_{cr} = a \cdot t^b \tag{4}$$

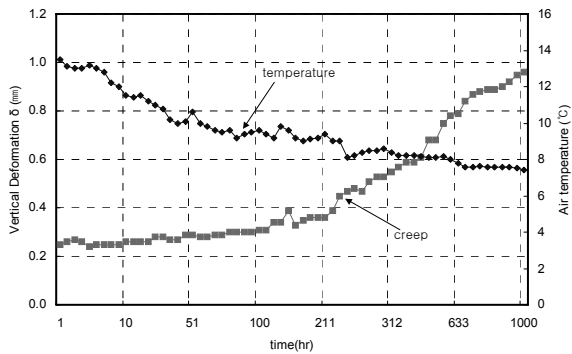
4.1 온도변화에 따른 크리프 변화

동일한 형태의 지진격리받침을 이용하여 1000시간 동안 설계압축하중을 재하한 상태에서 수직변위를 측정된 결과 대기온도 상태에서 시험한 HDRB 1 시험체가 시험온도가 일정하게 유지한 다른 시험체에 비하여 약 2.79배 정도 수직처짐이 크게 발생하였다. 그림 7은 각 시험체를 1000시간 동안 시험한 결과를 나타낸 것이다.

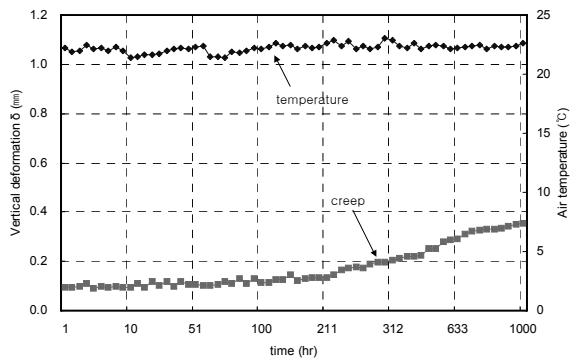
그림 8과 그림 9는 설계압축하중을 재하한 후 시험온도 변화에 따른 적층고무받침의 수직변위 변화를 나타낸 것이다. 대기온도상태에서 시험한 HDRB 1 시험체는 온도가 낮아짐에 따라 수직처짐이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 반면에 시험온도를 23±2℃로 일정하게 유지하여 시험한 HDRB 2 시험체는 수직처짐이 비교적 안정적이고 점진적으로 증가함을 볼 수 있다. 이때 수직변위는 온도변화와 수반하여 고무의 수축과 팽창이 반복적으로 발생하여 나타나는 것으로 판단된다. 또한 그림 9에 의하면 온도가 낮을수록 수직변위량은 증가하고 온도가 높을수록 수직변위량이 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

4.2 전단탄성계수와 형상계수에 따른 크리프 변화

전단탄성계수(G)와 일차형상계수(S_1)에 따른 크리프 변



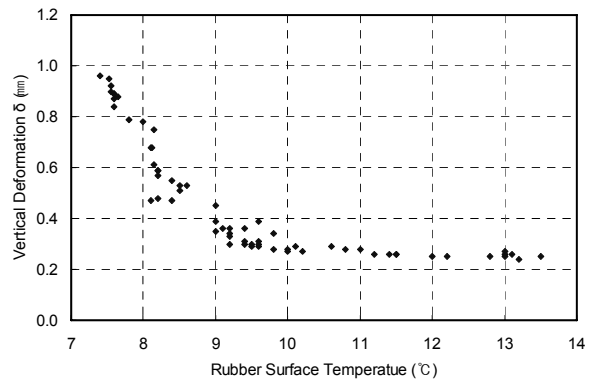
(a) HDRB 1



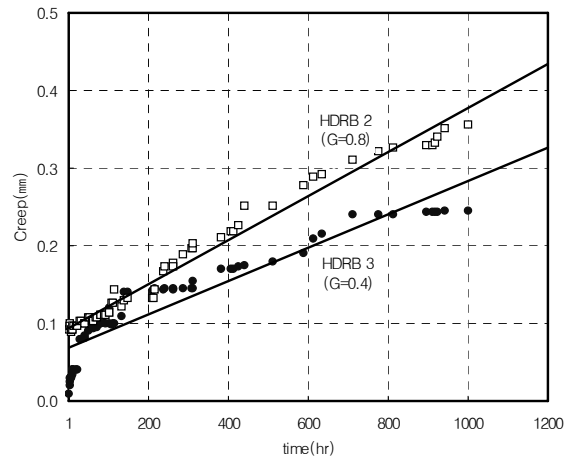
(b) HDRB 2

〈그림 8〉 온도상태에 따른 수직처짐 변화

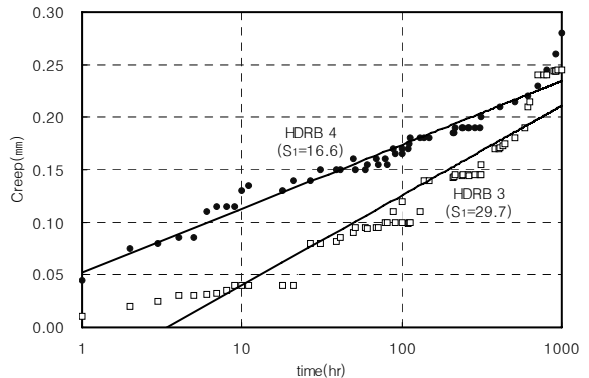
화의 상관관계는 그림 10, 그림 11과 같다. 시험체 단면제원과 형상계수가 동일한 경우 전단탄성계수가 클수록 크리프량은 증가하였다. 즉 크리프는 적층 고무받침의 구성 혼합물에 따라 변화되며, 경도가 높은 고무에서 크리프가 더 발생함을 알 수 있다. 또한 일차형상계수(S_1)이 증가할수록 수직강성은 강해지고, 크리프량은 감소하였다. 森田慶子 et al.⁽¹⁰⁾의 연구에 의하면 천연적층 고무받침을 이용하여 실험한 연구결과 축 압축응력이 10~20MPa이내에서는 축 응력



〈그림 9〉 시험온도와 수직변위의 상관관계



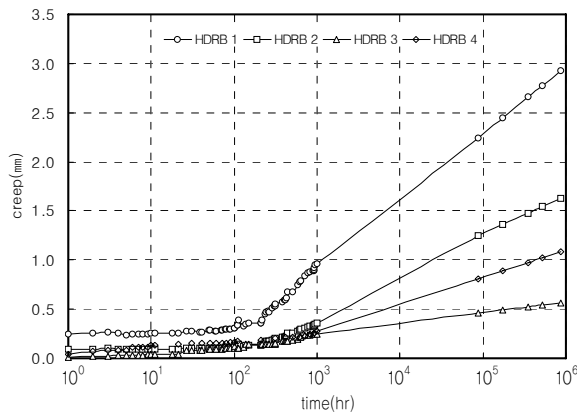
〈그림 10〉 전단탄성계수(G)의 영향



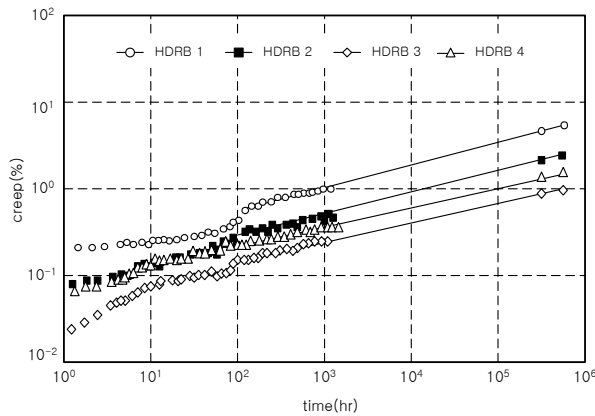
〈그림 11〉 일차형상계수(S_1)의 영향

〈표 4〉 크리프 값 평가(mm)

시험체	시 간	1000시간	60년 후	100년 후	비 고
		크리프(mm)	0.96	2.77	
HDRB 1	변화율(%)	1.92	5.54	5.84	
HDRB 2	크리프(mm)	0.36	1.54	1.62	실온상태 (23±2℃)
	변화율(%)	0.72	3.08	3.24	
HDRB 3	크리프(mm)	0.24	0.54	0.56	
	변화율(%)	0.48	1.08	1.12	
HDRB 4	크리프(mm)	0.28	1.02	1.08	
	변화율(%)	0.3	1.10	1.16	



〈그림 12〉 크리프 변형량(mm)



〈그림 13〉 크리프 변화율(%)

에 관계없이 크리프는 일차 형상계수 S_1 이 증가할수록 낮아지고, S_1 에 의존하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 시험체의 재료적 차이는 있으나 본 실험에 의한 연구결과와 유사한 결과이다.

4.3 크리프 시험결과

지진격리받침의 내구성을 고려할 경우 고무의 산화에 의한 노화와 장시간 동안 축 압축력에 의한 크리프 변형은 중

요하다. 이에 1000시간 동안 4가지 형태의 적층고무받침을 이용하여 크리프 시험을 수행하였다. 적층고무받침 설계 시 무시되고 있는 크리프 변형에 대하여 실험을 통하여 구조물의 내구수명 60년, 100년 후 몇 mm 변형될 것인지 예측하였다.

표 4는 1000시간동안 설계압축하중을 재하하여 지진격리받침의 수직변위를 측정하고 그 결과를 이용하여 60년 후와 100년 후 크리프 값과 변화율을 예측한 것이다. 장기 크리프 예측은 식 (3)과 식 (4)에 의하여 시간축 로그함수(Semi-logarithmic Time Axis)로 산정하였다(그림 12 참조). HDRB 1, 2, 3 시험체는 설계압축응력 상태에서 100년 후 크리프는 각각 0.59mm, 1.62mm, 2.92mm 변형할 것으로 평가되었다. 또한 HDRB 4 시험체는 100년 후 1.08mm 처짐이 발생할 것으로 예측되었다. 그리고 각 시험체의 크리프 변형률은 60년 후 최소 1.08%에서 최대 5.54% 변형할 것으로 예측되었다(그림 13 참조). ISO 22762-2⁽⁸⁾, ISO 22762-3⁽⁹⁾의 크리프에 대한 성능평가기준에 따르면 60년 후 크리프 변형률은 총 고무두께의 10%이내이어야 한다는 기준에 준할 경우 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서 크리프 변형률은 크리프 시험결과를 통하여 계산된 크리프 예측값을 고무층 전체 두께로 나누어 산정한 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 지진격리 설계에 따라 제작된 지진격리받침인 고감쇠 고무받침(HDRB)의 여러 특성 중 설계 시 대다수 생략하고 있는 크리프 변형성능을 알아보기 위하여 장기 크리프 시험을 실시하였다. 이를 위해 일차형상계수가 $S_1 \approx 29.7$, $S_1 \approx 16.6$ 인 지진격리받침을 실물 제작하여 1000시간 동안 크리프 시험하였다.

시험 후 측정결과를 분석하여 온도변화 및 전단탄성계수, 형상계수 등과 같은 영향인자에 따른 지진격리받침의 크리프 거동변화를 파악하고, 공용 년 수 60년 후의 크리프 처짐 변화율을 예측하였다. 이에 따라 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 지진격리받침 시험체를 대기온도 상태와 실온상태에서 각각 수직압축 재하 시험한 결과를 바탕으로 크리프 수직 처짐과 온도와의 상관관계를 분석한 결과 온도가 높을수록 크리프 처짐이 적게 발생하고, 온도가 낮을수록 처짐이 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 크리프 수직 처짐은 온도에 반비례 관계가 있는 것으로 나타났다.
2. 단면형상과 제원이 동일하고 형상계수가 같은 경우 전단

탄성계수(G)가 클수록 크리프는 크게 나타났다. 또한 크리프는 1차 형상계수 S_1 이 높을수록 크리프량이 낮게 나타나는 경향이 있었다.

3. 지진격리받침 시험체 4개를 이용하여 1000시간동안 재하하여 100년 후의 크리프 처짐량을 산정한 결과 0.56~2.92mm 처짐이 발생할 것으로 예측되었으며, 크리프 률은 대기온도 상태에서 실험한 HDRB 1 시험체에서 최대 5.84% 변형되어 ISO에서 제시하고 있는 60년 후 크리프 변형률인 10%보다 낮게 변형될 것으로 판단된다.
4. 본 실험은 ISO 22762에서 제시하고 있는 방법에 따라 시험을 실시하였다. 그러나 실제 구조물에 적용된 지진격리받침은 보다 오랜 기간동안 대기 중 산화, 오존 등의 외부 환경적 변화요인에 노출되어져 있다. 이와 같이 크리프변화에 영향을 미칠 수 있는 외부환경을 고려한 장기간 크리프 시험을 실시하여야 한다. 또한 납 면진받침, 고무받침 등과 같이 일반적으로 많이 적용되고 있는 적층형 고무받침에 대해서도 크리프 시험을 실시할 경우 우리나라에 적합한 지진격리받침의 내구품질기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
2. 정길영, 하동호, 박건록, 김두훈, “저경도 납면진받침의 특성에 관한 실험적 연구,” 대한토목학회 논문집, 제22권, 2002, pp. 1295-1307.
3. 최세운, 조현진, 박건록, 오주, 정희영, “저경도 고감쇠 고무받침의 동특성에 미치는 영향인자 평가,” 한국지진공학회 논문집, 제12권, 제3호, 2008, pp. 11-20.
4. Derham, C. J., Waller, R. A., “Long-term test confirm laboratory predictions,” *Rubber Developments*, Vol. 28, No. 1, 1975, pp. 7-10.
5. Davies, B., “The Longest Serving Polymer,” *Rubber Developments*, Vol. 41, No. 4, 1998.
6. 구경희, 이재한, 유봉, “면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능 특성 실험 및 비선형 거동해석,” 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호, 1998, pp. 73-36.
7. ISO 22762-1, *Elastomeric Seismic-Protection Isolators Part 1: Test methods*, 2005.
8. ISO 22762-2, *Elastomeric Seismic-Protection Isolators Part 2: Applications for bridges-Specifications*, 2005.
9. ISO 22762-3, *Elastomeric Seismic-Protection Isolators Part 3: Applications for buildings-Specifications*, 2005.
10. 森田慶子, 高山峯夫, 安藤勝利, “天然ゴム系 積層ゴムアイソレータのクープ試験,” 日本建築學會, 2001, pp. 621-622.
11. 오주, 박건록, 조현, 이종윤, “장기크리프 시험에 의한 적층고무받침의 처짐예측,” 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2007, pp. 2448-2491.
12. 오주, 박건록, 임태규, 정희영, “폴리우레탄을 이용한 교량받침의 특성에 관한 실험적 연구,” 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 2008, pp. 134-141.