

적층고무받침의 가속 열 노화 동적특성 영향

Effects of Accelerated Thermal Aging on Dynamic Properties of Laminated Rubber Bearings

오 주* · 정희영**

Oh, Ju · Jung, Hie-Young

Abstract

The dynamic properties of laminated rubber bearings used as isolators in structures could be significantly deteriorated because of the change of microstructure in rubber caused by thermal aging. As a result, a catastrophic failure of bridges and buildings unexpectedly occurs when they are subjected to earthquake attack. Here, the dynamic properties of laminated rubber bearings before and after different of compression-shear loading and repeated cycles loadings, ultimated failure test with thermal aging were first measured and compared to each other. The experimental results, the effects of thermal aging on the shear stiffness, energy absorption, and equivalent damping coefficient of laminated rubber bearings are investigated. It is found that the deterioration of dynamic properties of laminated rubber bearings caused by thermal aging is significant and should be taken into account in designing rubber bearings.

Keywords : laminated rubber bearing, isolator, thermal aging, dynamic properties

요 지

격리장치로서 적층고무받침의 동적 특성은 고무 열 노화로 인한 미세 구조의 변화로 인해 악화 될 수 있다. 그 결과, 예기치 못한 지진의 발생으로 교량이나 건물들은 치명적이 손상을 입게 된다. 여기서, 적층 고무받침의 동적특성은 압축-전단 하중 및 반복하중, 극한파괴시험은 열 노화 전· 후에 시험하여 상호 비교하였다. 실험 결과, 적층고무받침에서의 열 노화 현상은 전단강성과 에너지의 감쇠 그리고 등가감소계수에 영향이 있음을 알 수 있었다. 이것은 적층고무받침의 열 노화에 의한 동적특성의 저하를 의미하고, 적층고무받침 설계시 고려해야할 필요가 있다고 판단된다.

핵심용어 : 적층고무받침, 격리장치, 열 노화, 동적특성

1. 서 론

적층고무받침을 이용한 지진격리 교량이나 건물은 기본적으로 구조물의 지중을 지지하고 충분한 전단강성(shear stiffness)과 지진동에 대한 에너지 저감효과가 있어야한다. 그러나 지진격리설계시 적층고무받침의 전단강성과 에너지 소산효과는 주재료로 사용되고 있는 고무재료의 동적거동과 비선형 성질에 의존하고 있다. 적층고무받침은 몇 가지 역학적, 환경적인 영향으로 인해 고무재료에 노화가 진행되고 결국에는 손상이 불가피하게 발생하게 된다. 일반적으로 고무는 오랫동안 외기에 노출되어 사용할 경우 경화하여 표면에 균열이 발생하거나 고무표면에 끈적임 등이 발생하며, 이 같은 현상을 노화(aging)라고 한다. 노화의 주원인은 공기 중의 산소에 의한 산화작용이고, 열, 오존, 금속염 등이 고무의 노화를 현저히 촉진한다. 특히 열에 의해 온도가 높아지

면 반응열로 인하여 산화반응의 진행속도가 촉진된다(일본고무협회, 2000). 이와 같이 적층고무받침에서의 열 노화(thermal aging)는 높은 온도와 같은 환경에 관계가 있고, 이에 의해 다른 파괴 메커니즘이 발생할 가능성이 있다. 교량과 건물에 설치된 적층고무받침이 장기간 열화 환경에 노출되어 노화가 발생하고, 지진과 같은 불확실한 진동이 발생할 경우 구조물에 심각한 피해를 초래할 우려가 있다. 그러므로 열 노화 상태에서 적층고무받침의 동적특성은 지진격리 구조물 설계시 내구성 측면에서 중요한 요소 중의 하나이다. Fitzgerald 등(1992)은 반복응력이 작용할 때 온도가 높을수록 탄성체의 물리적 특성이 저감되는 등 열과 반복하중에 대한 상관관계를 밝혔다. 또한 Choi(2000)은 열 노화에 따른 고무의 분자구조 변화의 영향을 연구 하였고, 열 노화시간이 증가함에 따라 연속적인 고무기황의 증가로 가교밀도가 증가함을 알아냈다. 그리고 천연고무를 공기와 염

*정희영 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : oju1030@paran.com)

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

수에 노출시킨 상태에서 온도를 60~120°C까지 변화시켜 고무시편의 인장파괴 시험을 하였다. 그 결과 염수보다 대기 중 뜨거운 공기가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다 (Mott *et al.*, 2001). 또한 Chou등(2008)은 합성고무(CR)를 이용하여 압축시험편을 제작하여 열 노화 시험을 실시한 결과 열 노화 시간이 길수록 수직변위의 감소와 전단기울기가 점차 증가함을 밝혀냈다. 상기의 연구와 같이 본 연구에서는 천연고무를 이용한 적층고무받침의 열 노화 특성을 평가하기 위해 가속 열 노화시험(accelerated thermal aging test)을 하였다. 가속 열 노화시험에 사용된 시험체는 납 고무받침(LRB)과 천연고무받침(NRB)이고, 각각의 시험체에 동일하게 사용된 고무소재 시편을 절취하여 시제품과 동일한 조건에서 시험을 수행하였다. 열 노화 특성실험에서 사용된 시험체는 공용년수가 약 15년 지난 교량에서 실제 사용되고 있는 교량받침을 대상으로 하였다. 대상 교량의 받침장치에 대한 기술 자료를 바탕으로 시험체를 재현하여 제작하였으며, 현재의 지진격리받침 설계기준에서는 부 적합한 받침장치이다. 본 연구에서는 이 처럼 현재 설계기준에 적합하지 않은 지진격리받침에 대하여 열 노화에 따른 기본 특성변화와 극한전단파괴실험을 통한 성능변화 등 지진격리받침의 내구성에 대해 검토하여 기초자료로 사용하고자 하였다.

2. 고무소재의 열 노화 실험

2.1 시험의 개요

적층고무받침의 노화 정도를 정확히 평가하기 위해서는 실제 사용된 환경에서의 손상자료로부터 제품의 노화 정도를 추정하는 것이겠지만, 이 방법은 너무 오랜 시간이 소요되다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 사용 환경이나 조건보다 가혹한 조건을 적용함으로써 노화 손상시간을 단축시키는 가속시험방법을 적용하여 사용조건에서의 노화 손상 정도를 추정하였다. 가속시험의 기본 개념은 제품의 특성이나 성능을 열화 촉진시키는 것으로, 본 실험에서는 고무의 성능열화에 영향을 미치는 인자들 중 가장 주요한 인자인 온도를 선택하여, 실제 사용 환경보다 높은 온도에서 시험하는 가속 열 노화시험방법을 적용하였다.

2.2 열 노화 시험 방법

열 노화시험은 ASTM D 412, ASTM D 2240에 근거하여 인장강도, 신장률, 경도시험을 하였다. 그리고 위의 측정결과를 ISO 11346, ISO 188에 근거한 수명 시험법으로 실제 사용온도보다 높은 온도에서 가속 열 노화시험을 수행하였다. 대부분 천연고무는 약 -40~120°C에서 사용 가능하다고 알려져 있다. 따라서 열 노화시험 조건은 70°C온도범위로서 정하여 시험 하였다.

천연고무를 이용한 적층고무받침과 동일한 배합으로 시트(sheet)형 시편을 만들어 인장시험편을 채취하여 70°C의 온도로 열 노화시험을 수행하였다. 이때 가속 열 노화시험 조건은 적층고무받침의 사용온도보다 가혹한 온도환경으로 그림 1과 같이 시험편을 채취하여 열 노화하여 일정 시간대별로 그림 2와 같이 인장시험을 하여 신장률(elongation), 인장강도(tensile strength)와 경도(hardness)를 측정하였다.



그림 1. 천연고무의 인장시험편

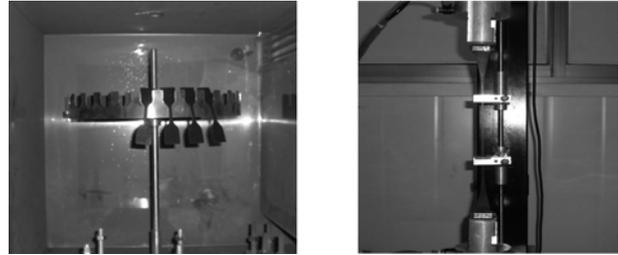


그림 2. 열 노화 및 인장시험

가속 열 노화시험에서는 총 100개의 시험편을 채취하여 24, 48, 72, 120, 168, 240, 360, 480, 720, 1080, 1440, 1800, 2160, 2880, 3600, 4320, 5760, 8760시간동안 지속적으로 가속 열 노화하였고, 각 시간대별로 시험편을 각각 4개씩 꺼내어 특성을 측정 하였다. 여기서 인장강도와 신장률 시험은 시험편의 파괴시의 강도와 이때 까지 늘어나는 변형량을 구하는 것이므로 재사용 할 수 없다. 경도시험은 인장강도 및 신장률 시험이 종료된 후 시험편의 두께가 12 mm 이상이 되도록 시편을 겹쳐 경도계를 사용하여 각 고무시험편의 경도를 측정하였다. 일정 시간이 경과된 후 시험편을 노화기에서 꺼내어 상온에서 충분한 시간동안 방치한 후 만능재료 시험기를 이용하여 인장강도, 신장률을 측정하였다. 인장강도와 신장률은 식 (1)과 식 (2)이 따라 구하였고, 시험결과는 평균값을 취하였다.

$$T_s = \frac{F_{BE}}{A} \quad (1)$$

$$E = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

여기서, T_s 는 최대하중시 인장강도(MPa)이고, E_{BE} 는 파단시 최대하중(N), A 는 인장시험전 시험편의 단면적(mm^2)이다. 그리고 E 는 파단신장률(%), L 과 L_0 는 파단시 시험편의 길이와 초기 시험편의 길이(mm)이다.

2.3 시험결과 분석

열 노화조건에서 8760(365일)시간 동안 가속 열 노화 시켜 노화 시간별로 일정시간대에 열 노화조건에서 시험결과 인장강도는 그림 3과 같으며, 초기 시간대에는 인장강도가 약간씩 증가하였으나 시간이 장시간으로 흘러감에 따라 점차 감소하였다. 이는 고무가 열에 의해 경화되면서 인장강도가 초기 물성 값에 비해 증가하는 것으로 판단된다. 반면에 신장률의 경우는 그림 4와 같이 열에 의해 시간이 지날수록 고무의 고유 특성인 탄성을 잃어버려 시간에 반비례하였다.

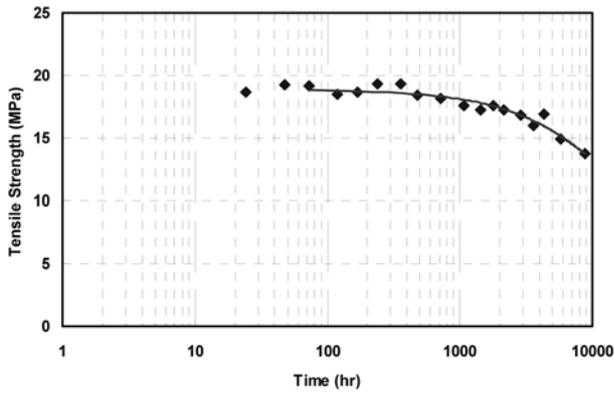


그림 3. 시간에 의한 인장강도 변화

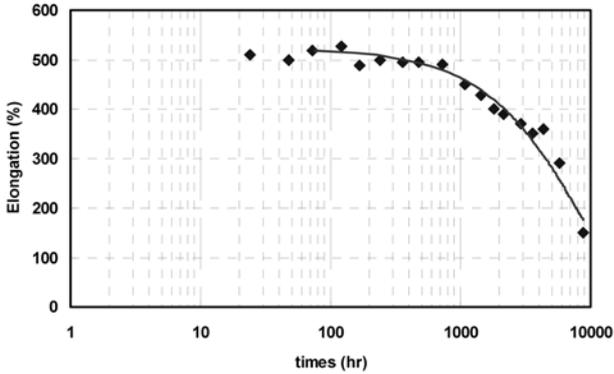


그림 4. 시간에 의한 신장률 변화

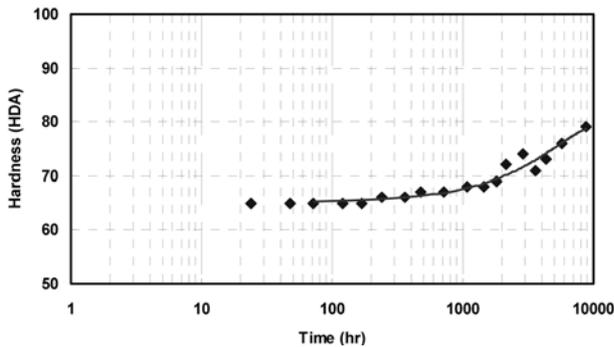


그림 5. 시간에 의한 경도 변화

그림 5는 각 온도에서 시간에 따른 경도를 나타낸 것이다. 온도와 시간에 따른 경도의 변화는 약간의 편차는 있으나 노화시간이 길어질수록 증가함을 알 수 있다. 특히 신장률의 경우 시간이 경과함에 따라 일정 시간 후 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이는 열에 의해 시간이 지날수록 고무의 고유 특성인 탄성이 상실되어 지는 것으로 판단된다. 이상과 같이 고무시편의 인장강도 및 신장률, 경도의 변화는 동일한 고무를 이용한 지진격리장치에서도 유사한 변화가 있을 것으로 판단된다.

3. 적층 고무받침의 열 노화 특성실험

3.1 시험체 설계 및 제원

시험체는 공용년수가 약 15년 경과된 교량에 실제 적용되어 사용중인 적층고무받침과 동일한 제원으로 설계하여 가능한 당시의 설계와 동일하도록 관련자료를 바탕으로 설계



그림 6. 적층고무받침 시험체

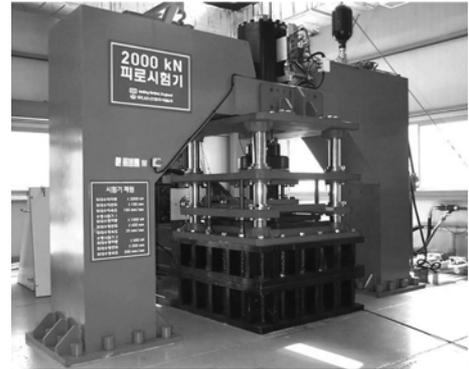


그림 7. 압축-전단 피로시험기(2,000 kN)

하였다. 그리고 시험체의 특성 및 내구성 실험, 평가는 ISO 22762(2005)에 따라 특성실험을 수행하였다. 상기의 규격에서는 지진으로부터 교량 혹은 건축구조물을 보호하고자 사용하는 적층고무받침 형태의 지진격리장치에 대하여 시험방법과 설계기준, 제품검사 기준에 대하여 총 세부분으로 구성 되어있다.

천연고무는 탁월한 탄성능력과 복원능력을 가지고 있어 지진격리장치에 폭넓게 이용되어왔다. 본 연구에서 사용된 시험체 또한 천연고무의 고유성질에 고무자체의 탄성능력과 복원능력을 유지하고 에너지 흡수 능력을 증가시킨 납 고무받침과 천연고무받침을 사용하였다. 시험체의 크기는 동일하고 주된 구성성분은 천연고무이다. 시험체의 직경은 외부고무 두께 10 mm를 포함한 것으로 내부 적층고무 한 층의 두께는 각각 3 mm이고, 고무의 적층 수는 29층으로 적층하였으며, 보강 강판의 두께는 3 mm이다. S_1 은 한 개의 고무층 구멍을 포함한 자유 표면적에 대한 하중면적의 비로서 1차 형상계수(primary shape factor)이고, S_2 는 내부고무의 총 두께에 대한 유효폭의 비율을 나타내는 2차 형상계수(secondary shape factor)이다. 자세한 시험체의 제원은 표 1과 같고, 그림 6과 그림 8은 시험체의 형상 및 단면제원을 나타낸 것이다. 본 연구를 위해 제작된 시험체는 공용년수가 약 15년된 교량에 설치되어 사용되고 있는 적층고무받침을 대상으로 하여 동일한 단면제원으로 설계 제작하였다. 열 노화 특성시험에 사용된 적층고무받침 시험체는 전단변형률 100%에서 전단탄성계수 값이 0.4 MPa인 천연고무를 사용하였고, 과거 지진격리장치에 대한 설계개념이 정립되지 않아 형상계수가 과소하게 설계된 실제 교량받침과 동일하게 제작 하였다.

표 1. 압축-전단피로시험기 제원

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

3.2 시험기 제원

적층고무받침 시험체의 특성실험에 사용된 시험기는 표 2 와 그림 7에 나타난 바와 같은 압축-전단시험기로 최대수직 하중 2,000 kN이며, 최대 수평하중은 500 kN이다. 그리고 최대수평속도는 250 mm/sec이고, 수평방향 최대변위는 ±200 mm이다.

4. 열 노화 시험결과 및 분석

4.1 시험조건

적층고무받침의 열 노화 전·후의 전단특성을 비교하여 열 노화에 따른 압축 및 전단특성을 파악하였다. 노화시험은 LRB와 NRB를 노화 전에 전단특성 및 극한전단특성 시험을 실시하고, 노화 오븐에서 70°C의 온도로 168시간(노화연수 60년 상당) 노화시킨 후 전단특성 시험과 극한 전단파괴시험을 수행하였다. 극한전단파괴시험 수행시에는 각각 3개의 시험체를 사용하고 시험 후에는 재사용하지 않았다. 본 연구에서 사용한 시험체는 납 고무받침(LRB) 8개, 천연고무받침(NRB)8개로서 총 16개의 시험체를 사용하였다. 각 시험체는 4개씩 열 노화 전후 시험체로 구분하였고, 압축 및 전단특성 실험 후 극한파괴실험을 실시하였으며, 반복재하특성실험은 별도의 1개의 시험체를 사용하여 실험하였다. 또한 시험체의 제작상의 오차 및 시험 중 발생 가능한 오차를 줄이기 위해 각 실험에 대한 결과는 평균값을 취하였다. 표 3은 실험별 시험체 개수를 나타낸 것이다.

4.2 실험방법

기초 특성실험인 압축-전단특성 시험은 동일한 시험체로

표 2. 실험별 시험체 사용개수(EA)

구분	반복재하특성실험		극한전단파괴실험*	
	노화 전	노화 후	노화 전	노화 후
LRB	1	1	3	3
NRB	1	1	3	3

*극한전단파괴실험은 압축특성 및 전단특성실험 후 실시하였으며, 상기의 실험에 사용된 시험체는 동일한 시험체이다.

노화 전과 노화 후에 실시하였다. 또한 극한 전단특성시험은 시험체를 노화 전과 노화 후로 각각 구분하여 시험을 실시 하였다.

4.2.1 압축특성 실험

적층고무받침의 수직강성을 얻고자 상온에서 시험체에 4개의 변위계를 설치하여 실험을 수행하였다. 실험에서 수직하중은 그림 9와 같이 설계하중 P_0 를 기준으로 하여 $P_1(-30\%)$ 부터 $P_2(+30\%)$ 까지 3회 재하 하였고, 식(3)을 이용하여 수직강성을 산출하였다. 여기서, X_1, X_2 는 세 번째 사이클에서 하중 P_1, P_2 일 때 각각의 변위이다.

$$K_v = \frac{P_2 - P_1}{X_2 - X_1} \quad (3)$$

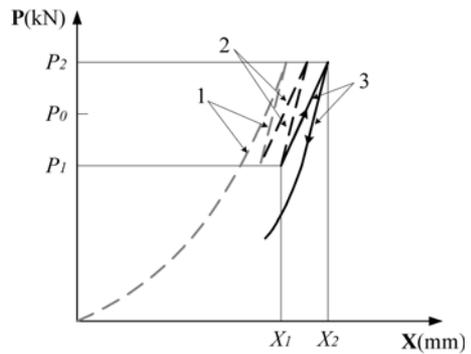


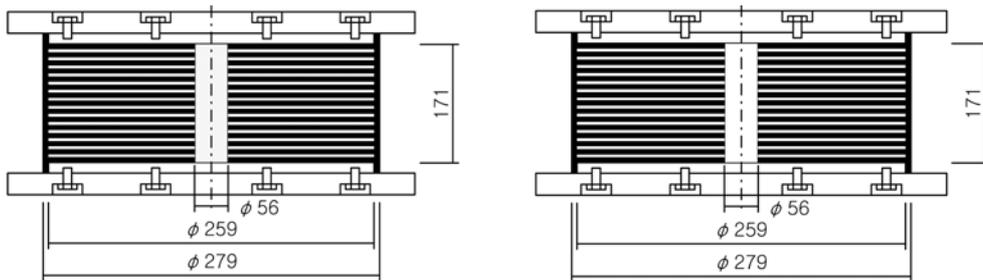
그림 9. 압축하중 재하곡선

표 3. 적층고무받침 시험체 제원

시험체	항목	강관지름 (mm)	구멍지름 (mm)	전체지름 (mm)	고무두께 (mm)	고무층수 (n)	강관두께 (mm)	S_1	S_2	전단탄성 계수(G)
LRB 1		259	56	279	3	29	3	21.6	2.98	0.4
NRB 1		259	56	279	3	29	3	17.5	2.98	0.4

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

D_s 는 내부보강철관의 직경, D_h 는 내부 홀의 직경, t_i 는 고무 한 층의 두께, n 은 고무 층 수를 나타낸다.



(a) Lead Rubber Bearing

(b) Natural Rubber Bearing

그림 8. 시험체의 단면형상 및 제원

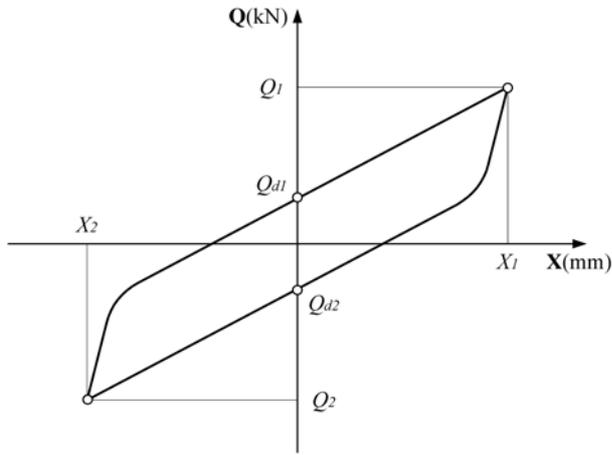


그림 10. 압축-전단하중 재하곡선

4.2.2 전단특성 실험

적층고무받침의 유효전단강성(K_h)과 등가감쇠비(h_{eq}^i)를 얻기 위하여 그림 10과 같이 수행하였다. 실험은 상온상태에서 설계면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서 0.5 Hz의 정현파로 전체고무두께를 설계전단변위로 산정하여 횡 변위가 발생하도록 하는 방법으로 시험체에 총 11 사이클 연속적으로 반복하여 2번째부터 11번째 이력곡선 각각을 평균하여 계산하였다. i 번째 사이클에서 등가감쇠비 h_{eq}^i 는 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 여기서, Q_1, Q_2 는 i 번째 사이클에서 최대, 최소 전단력이며, X_1, X_2 는 i 번째 사이클에서 최대, 최소 변위이다.

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

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

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

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

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

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

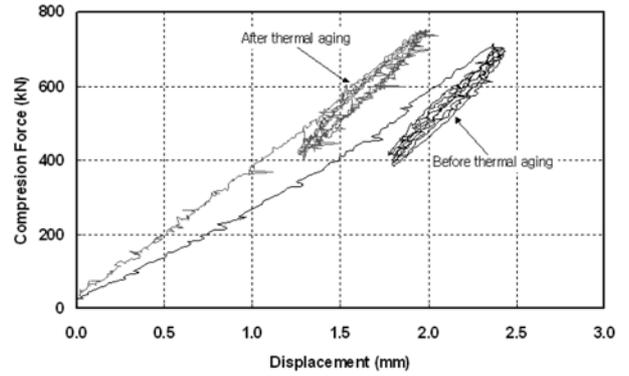
4.3 실험 결과 및 분석

4.3.1 압축특성 실험

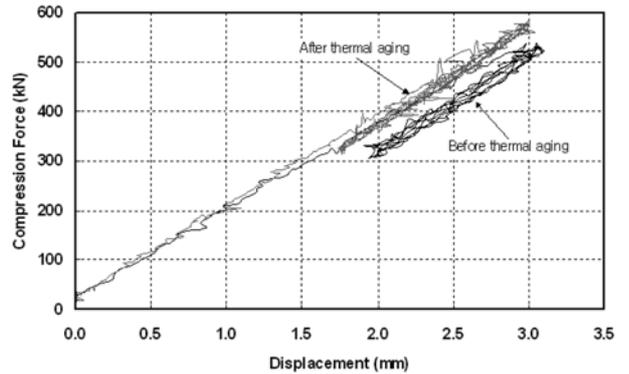
시험조건에 따라 적층고무받침 시험체를 열 노화(70°C,

표 4. 압축특성 실험결과

구분	압축강성(kN/mm)		
	노화 전	노화 후	증감율(%)
LRB	478	462	-3.34
NRB	195	191	-2.05



(a) Lead Rubber Bearing



(b) Natural Rubber Bearing

그림 11. 압축특성실험 결과

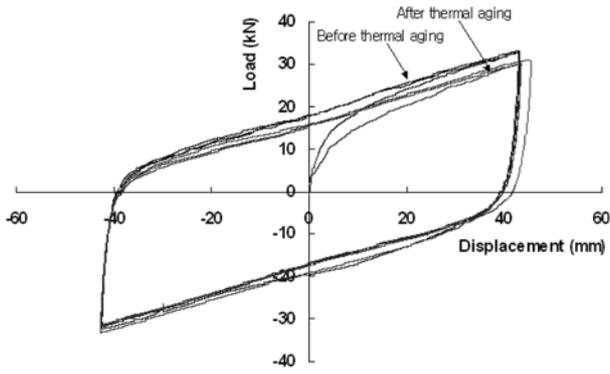
168 hr)하여 압축특성 시험한 결과 표 4와 같은 결과를 얻었다. 이때 납 고무받침의 설계 압축력은 565 kN이고, 천연고무받침의 설계 압축력은 490 kN이며, 각 시험은 설계 압축력을 기준으로 하여 $\pm 30\%$ 씩 3회 재하 하였다. 그 결과 납 고무받침 시험체의 경우 노화 전 압축강성은 478 kN/mm였으나 열 노화 후 압축강성은 462 kN/mm로 약 3.3%가량 저하되었다. 그리고 천연고무받침의 경우도 노화 전 압축강성 195 kN/mm에서 열 노화 후 약 2% 저하되어 191 kN/mm로 나타났다. 열 노화 후 하중변위 이력곡선은 그림 11과 같으며, 각 시험체 종류별 변형곡선을 보면 노화 후 압축력은 노화 전에 비해 약간 증가함을 볼 수 있다. 또한 열 노화 후 수직변위가 노화 전에 비해 감소하고, 기울기는 증가하는 경향을 보였다. 이는 고무소재 시편실험 결과와 같이 열 노화에 따른 고무의 경도가 증가함에 따라 신장률이 감소되는 것으로 판단된다.

4.3.2 전단특성 실험

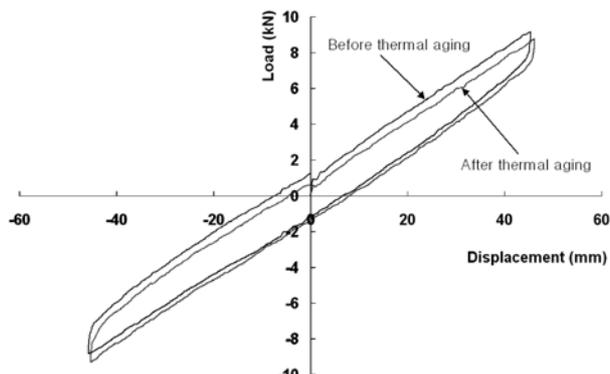
열 노화 전·후의 압축-전단특성시험 결과 전단강성은 납 고무받침의 경우 노화 전 0.73 kN/mm였으나 노화 후 0.70 kN/mm로 저하되어 약 4%감소되었고, 천연고무받침은 노화 전 0.196 kN/mm, 노화 후 0.195 kN/mm로 감소하여 약 0.5%가량 강성이 저하되었다. 그리고 등가감쇠비는 납 고무받침의 경우 노화 전 35.28%에서 노화 후 35.16%로 약 0.34%가량 감쇠비가 저하되었다. 또한 천연고무받침은 노화 전 7.56%였으나 열 노화 후 7.35%로 감쇠비가 약 0.27% 감쇠하였다(표 5참조). 그림 12는 납 고무받침(LRB)과 천연고무받침(NRB) 시험체에 대한 열 노화 전·후 이력곡선을

표 5. 압축-전단특성실험 결과

구분		전단강성 (kN/mm)	등가감쇠비 (%)
LRB	노화 전	0.73	35.28
	노화 후	0.70	35.16
	증감율(%)	-4.10	-0.34
NRB	노화 전	0.196	7.56
	노화 후	0.195	7.35
	증감율(%)	-0.51	-0.27



(a) Lead Rubber Bearing



(b) Natural Rubber Bearing

그림 12. 압축-전단 특성실험 결과

비교하여 보인 것이다.

4.3.3 반복재하특성 실험

납 고무받침과 천연고무받침의 노화 전·후의 반복재하 특성을 파악하기 위하여 압축-전단실험을 50회 반복재하 하였다. 각각의 시험체를 설치하고, 설계면압으로 수직압력을 가하여 0.5 Hz의 정현파로 설계전단변위로 수평재하 하였다. 각 시험체의 반복재하수 증가에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화율은 3, 5, 10, 30, 50회 전단가력 후 각각 측정하였다. 각 시험체의 반복재하에 따른 각 사이클별 전단강성과 등가감쇠비의 변화는 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 기존 연구에 의하면 50회 반복재하 시험의 경우 초기 1~3번재 사이클에서의 전단강성과 등가감쇠비의 변화는 비교적 큰 것으로 나타났지만, 그 이후 반복회수 부터는 변화 폭이 점차적으로 감소하는 양상을 나타내었다(오주 등, 2010). 열 노화에 따른 전단강성의 변화는 납 고무받침의 경우 노화 전 0.731 kN/mm에서 노화 후 0.715 kN/mm 변화하였으며,

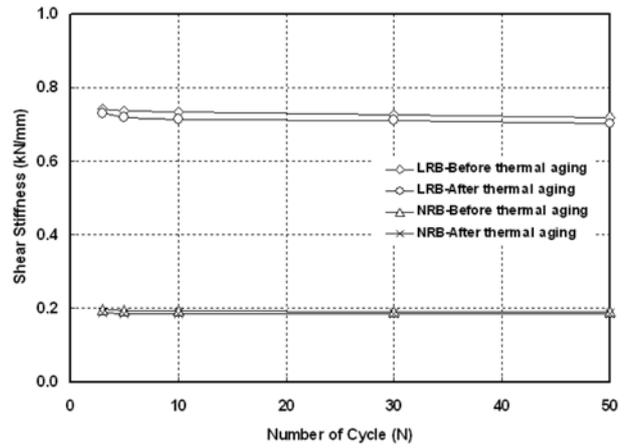


그림 13. 반복재하에 따른 전단강성 변화

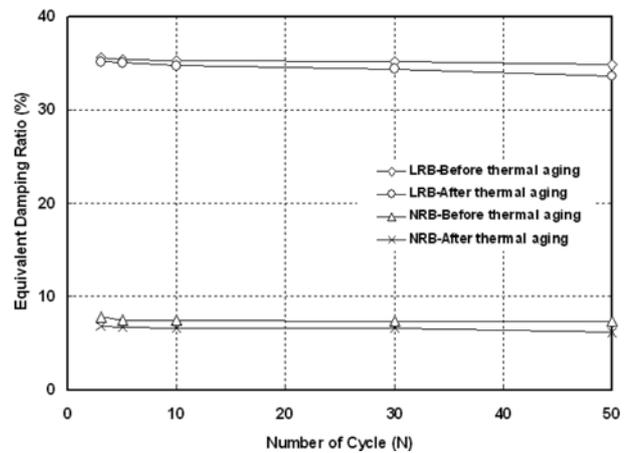


그림 14. 반복재하에 따른 등가감쇠비 변화

천연고무받침의 경우 노화 전 0.194 kN/mm에서 노화 후 0.187 kN/mm 변화하여, 시험체별로 각각 2.7%, 3.6% 저하되었다(그림 13). 등가감쇠비 변화의 경우 납 고무받침은 35.25%에서 34.58% 감소하여 약 1.9% 감소하였고, 천연고무받침은 7.5%에서 6.68%로 감소하여 약 10.9%가량 감소하였다. 열 노화 전·후 반복재하실험결과 LRB보다는 NRB가 더 큰 영향을 받으며, 감쇠비의 경우 반복재하에 따라 약 10%가량 감소되었다. 여기서, 전단강성과 등가감쇠비의 변화율은 각 시험체의 열 노화 전후 각각 50회 반복재하 시험한 결과를 평균한 값을 비교하여 나타낸 것이다.

4.4 극한전단파괴 실험

본 연구에서는 열 노화 전·후 적층고무받침의 전단변형 성능을 파악하기 위하여 극한전단파괴실험을 수행하였다. 1개의 적층고무받침 시험체를 설치하여 실험을 수행하였으며, 고속으로 실험을 수행할 경우 적층고무받침 시험체의 전단 변형 능력이 과대하게 평가될 수 있기 때문에 속도 0.52 mm/sec인 저속의 정속파로 최대변형률 까지 수평변위를 가력 하였다. 실험은 전단파괴가 관찰될 때까지 실시하며 실험 결과 분석방법은 그림 15와 같이 하였다. 시험체를 설치한 후 최대 설계압축력을 재하하고, 적층고무받침 시험체가 파괴에 이르도록 한쪽방향으로 전단변위를 가한다. 이때 하중이 최대점을 지나 급격히 저하될 때 까지 실험을 계속하고, 충분히 파괴에 이르렀다고 판단될 때 시험을 종료하였다. 상

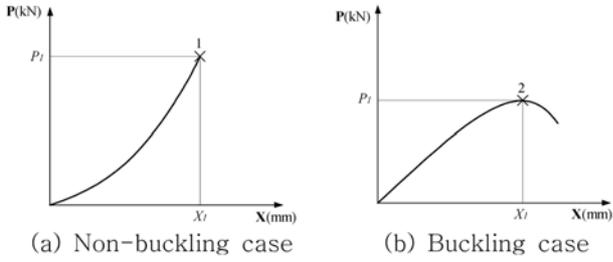


그림 15. 극한전단 특성

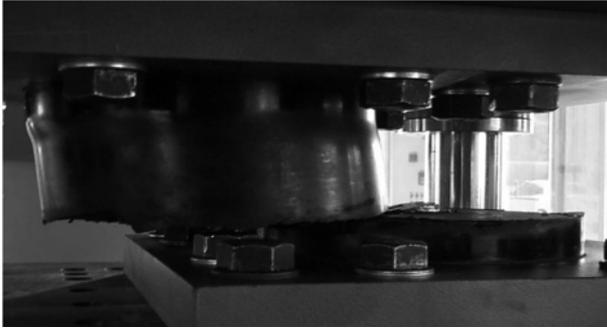


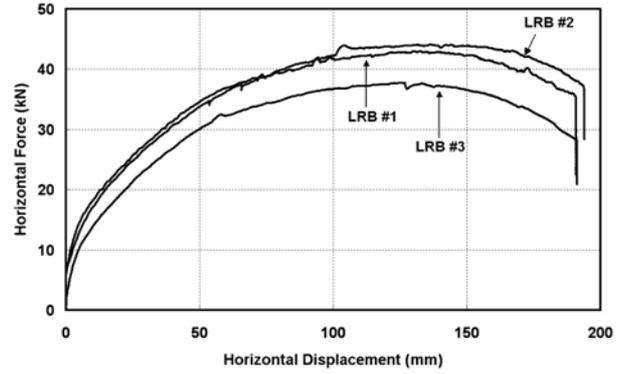
그림 16. 시험체의 극한전단파단 형상

표 6. 극한전단파괴실험 결과

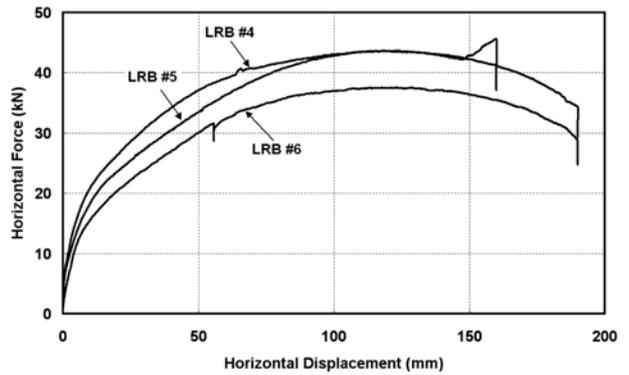
구분		전단변위 (mm)	전단변형률 (%)
LRB	노화 전	#1	132.91
		#2	125.58
		#3	136.40
	노화 후	#4	117.91
		#5	117.36
		#6	118.73
NRB	노화 전	#1	157.96
		#2	159.03
		#3	155.51
	노화 후	#4	148.10
		#5	143.85
		#6	150.51

기의 그림 15에서 X 는 전단변위, P 는 전단력을 나타낸다. 그림 15(a)는 좌굴이 발생하지 않은 경우이고, 그림 15(b)는 좌굴이 발생한 경우이다.

전단파괴 실험 후 시험체의 파괴모습은 그림 16과 같으며 시험체 하부에서 전단파괴가 발생하였다. 각각의 시험체에 대한 실험결과는 표 6과 그림 17, 그림 18과 같다. 납 고무받침의 경우 확실한 고무의 변형경화현상은 나타나지 않았지만 전단변위 약 60 mm부근을 지나면서 나타나기 시작하였고, 130 mm 이상을 지나면서 파괴가 발생하기 시작하였다. 천연고무받침은 약 100 mm의 전단변위에서 고무의 변형경화 현상이 나타나기 시작하여 약 150 mm의 전단변위에서 전단파괴가 발생하기 시작하였다. 또한 열 노화 전·후의 극한전단파괴실험결과 노화 전보다 노화 후 전단파괴 변위가 감소하였다. 납 고무받침의 경우 평균적으로 약 11% 가량 감소하였고, 천연고무받침은 약 6.8%가량 전단변형률이 감소하였다. 그러나 실험결과와 기존 연구 결과를 비교할

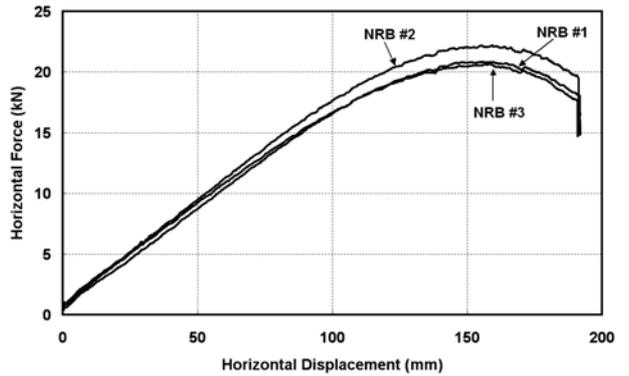


(a) LRB-열 노화 전

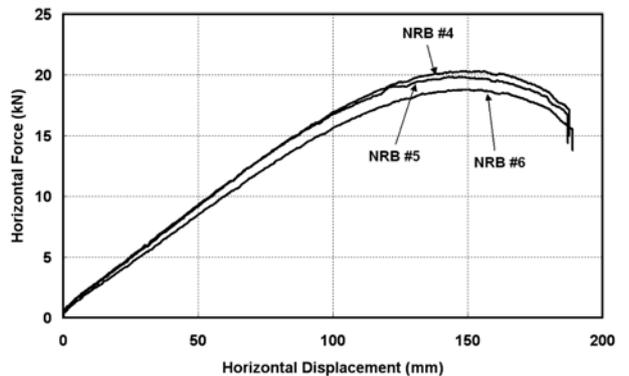


(b) LRB-열 노화 후

그림 17. 납 고무받침 극한전단파괴실험 결과



(a) NRB-열 노화 전



(b) NRB-열 노화 후

그림 18. 천연고무받침 극한파괴실험 결과

경우 비교적 전단변형률이 낮은 편이다. 정길영 등(2002)의 연구에 의하면 납 고무받침과 천연고무받침의 극한전단파괴는 전단변형률 500%와 467%에서 각각 파괴되었으며, 본 실험결과에 비해 약 3배가량 큰 변형률에서 파괴되었다. 이

와 같은 전단변형률의 차이는 형상계수의 영향에 의한 것으로 판단된다. 상기의 연구와 본 실험에서 사용된 고무의 기본 물성은 동일하고, 1차 형상계수(S_1)는 납 고무받침은 35 이고, 고무받침은 28이며, 2차 형상계수(S_2)는 모두 7이다. 그러나 본 실험에서의 시험체는 2차 형상계수가 2.98로 상대적으로 낮다. 八坂 厚彦 등(1991)의 연구에서는 형상계수를 변수로 하여 적층고무의 한계특성 실험결과 2차형상계수가 작을수록 대변형시 전단력과 전단변형률이 현저히 낮아지고, 특히 2차형상계수가 4이하인 경우 탄성복원력이 저하되는 동시에 대변형시 좌굴과괴가 발생하였다. 이는 본 연구에서의 실험결과와 유사한 결과이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진격리장치의 일종인 납 고무받침과 천연 고무받침을 대상으로 고무소재와 시험체를 각각 제작하여 70°C 온도 조건에서 가속 열 노화시험을 실시하였다. 열 노화 전·후에 특성시험을 실시하여 시험체의 열에 따른 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적층고무받침에 사용되는 고무소재를 이용하여 열 노화 조건에서 8760시간동안 시험한 결과 인장강도와 신장률은 열 노화기간이 갈수록 점차 감소하였다. 반면에 온도와 시간에 따라 경도는 노화시간이 길어질수록 증가하는 경향이 있었다.
2. 열 노화 전·후 압축특성시험결과 노화 후 압축강성이 약 2~3%가량 감소하였다. 특히 납 고무받침은 압축하중에 따른 수직변위가 감소하고, 기울기가 증가하는 경향이 있었다. 그리고 압축-전단특성시험을 통해 열 노화에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 검토한 결과 모든 시험체에서 감소하였으며, 특히 납 고무받침의 전단강성의 변화가 비교적 크게 감소하였다. 또한 상기와 동일한 조건에서 50회 반복재하 실험한 결과 전단강성은 2.7~3.6%가량 감소하였고, 등가감쇠비는 납 고무받침은 1.9%, 천연고무받침은 10.9% 감소하여 천연고무받침이 열에 따른 영향이 다소 있음을 확인할 수 있었다.
3. 열 노화 전·후 극한전단파괴실험결과 전단변형은 노화 후 변형률이 감소하였다. 이는 고무소재 시험 결과와 유사한 것으로 노화 초기에는 다소 신장률이 증가하다가 일정

시간 이후 신장률이 점차적으로 저하하는 경향과 유사한 결과이다.

4. 본 연구에 사용된 시험체는 현재 설계기준에는 부적합한 시험체이다. 이와 같은 적층고무받침에 대하여 열 노화에 따른 특성실험결과 압축 및 전단특성과 같은 기본 물성에는 문제가 없을 것으로 판단되나, 대 변위 파괴실험에서는 표준시험체에 비하여 약 3배가량 적은 전단변형률에서 파괴되어 지진과 같은 대 변위가 발생할 경우에는 급작스런 전단파괴로 인하여 상부구조물의 낙고 등을 유발할 것으로 판단된다.

참고문헌

오주, 정희영(2010) 고감쇠 고무받침의 전단특성 의존성에 대한 실험적 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제 2A호, pp. 121-129.

조원제, 최서영, 유종선 역(2000) **고무기술의 기초**, 한국신발과학 연구소, pp. 233-235.

정길영, 하동호, 박건록, 김두훈(2002) 저경도 납고무받침의 특성에 관한 실험적 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제 22권 제6A호, pp. 1295-1307.

정길영, 하동호, 박건록, 권형오(2002) 저경도 고무받침의 특성에 관한 실험적 연구, **한국지진공학학회논문집**, 한국지진공학회, 제 6권 제4호, pp. 39-49.

八坂 厚彦, 水越 薫, 高林 勝人(1991) 形状係數をパラメータとした積層ゴムの限界特性實驗(その1 復元力特性), **日本建築學會大會學術講演集**, pp. 599-600.

Fitzgerald, J.J. and Martellok, A.C. (1992) *Polymer Engoneering Science*, Vol. 32, p. 1350.

Choi, S.S. (2000) *Journal Polymer Science*, Vol. 75, p. 1378.

Chou, H.-W. and Huang J.-S. (2008) *Effects of Cycle Compression and Thermal Aging on Dynmic Propertiesof Neoprene Rubber Bearing*, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 107, pp. 1635-1641.

Mott, P.H. and Roland, C.M. (2001) *Aging of Natural Rubber in Air and Seawater*, *Rubber Chemistry and Techology*, Vol. 74, pp. 79-88.

ISO 22762 (2005) *Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-1 : Test Methods*.

ISO 22762 (2005) *Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-2 : Applications for bridge-specifications*.

(접수일: 2010.7.6/심사일: 2010.8.16/심사완료일: 2010.8.25)