

적층 천연고무 면진장치의 장기성능과 크리프에 대한 예측

Prediction of Long Term Performance and Creep of Laminated Natural Rubber Bearings(NRB)

황기태¹⁾ · 서대원^{2)*} · 조성국³⁾

Hwang, Kee Tae¹⁾ · Seo, Dae Won^{2)*} · Cho, Sung Gook³⁾

¹⁾(주)에코닝, ²⁾(주)에코닝 지진방재기술연구소, ³⁾(주)제이스코리아 기술연구소

¹⁾Econing Co., Ltd, ²⁾Research Institute of Earthquake and Disaster Prevention, Econing Co., Ltd, ³⁾R&D Center, JACE KOREA Company

/ A B S T R A C T /

Seismic isolation has been considered and utilized in various industries as a way to prevent huge damage on to structures by large earthquakes in various industries. The laminated Laminated rubber bearings is are most frequently used in seismic isolation systems. The structural Structural safety could not be assured unless the performance of the rubber bearing is not guaranteed for the life time of the structure under the consideration that the bearing is a critical structural member to sustain vertical loads in the seismically isolated structure. However, there are few studies on the deterioration problems of rubber bearings during their service life. The long term performance of the rubber bearings was not considered in past designs of seismically isolated structures. This study evaluates the long term performance and creep characteristics of laminated natural rubber bearings that are used in seismically isolated buildings. For the this study, a set of accelerated thermal aging tests and creep tests are were performed on real specimens. The experimental results show that the natural rubber bearings would have a stable change rate of change for durability under severe environmental conditions for a long time.

Key words: Laminated natural rubber bearing, seismic isolation system, accelerated aging, long term performance, creep

1. 서 론

최근 해외에서 발생된 여러 건의 대형 지진으로 인하여 내진설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 지진으로 인한 피해의 규모가 증가함에 따라 구조물에 면진장치를 설치하여 지진력을 획기적으로 감소시키고, 지진피해를 최소화하고자 하는 노력이 시도되고 있다. 이에 따라 국내에서도 최근에 트라움하우스, 유니슨 기술연구소, 충남서산 주민복지센터, LG CNS 데이터 센터 등의 건축물에 면진장치가 적용된 바 있다.

또한, 현존하는 가장 중요한 시설물 중의 하나로 손꼽히는 원자력발전소에도 지진에 대한 안전성 확보를 위하여 면진설계를 시도하고 있다[7]. 현재까지는 프랑스와 남아프리카공화국에 건설된 단지 6기의 상업용 원전 구조물에 면진설계가 채택되었으며[8], 미국의 원자력발전소 구조물의 설계에 적용되는 내진설계기준도 면진설계 규정을 포함하도록 개정이 진행되고 있다[9]. 원전의 면진설계에서 면진장치의 장기거동 문제는 역시 설계단

계에서 검토되어야 할 중요한 문제로 지적되었다[10].

면진장치로 가장 많이 사용되는 면진 적층고무는 상세한 지진응답해석을 통해 안전성을 확보할 경우 경제적으로 내진성능을 확보하는 수단이지만 구조적으로 건물의 하중을 지지하는 면진적층고무의 수명이 불확실하다면 면진구조를 적용한 건물의 안전성에 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 고무계열의 면진장치를 사용한 면진설계에서 고무의 노화 문제는 반드시 고려되어야 할 설계조건 중의 하나이다 [6]. 반면에, 면진적층고무의 장기수명에 대한 문제에 관심을 갖기 시작한 것은 그렇게 오래되지 않았으며, 그동안 구조물의 면진설계에서 면진장치의 장기수명을 고려한 설계사례는 거의 없는 형편이다.

일반적으로, 구조물의 거동에 미치는 노화된 면진장치의 역학적 특성 변화 효과는 수치해석을 통하여 계산되거나, 노화축진시험을 통하여 분석된다. 해외의 경우, 고무발침의 사용 중 성능에 대한 정보를 제공하기 위하여 15년 이상 오래된 면진장치의 노화 특성에 대한 연구를 수행한 사례가 보고되고 있다[11-13]. 반면에 국내에서는 그 동안 면진장치의 장기성능에 대한 실험적 연구에 대한 실적을 찾아보기 힘들다.

따라서, 본 연구에서는 탄성복원능력이 뛰어난 재료적 특성으로 면진장치에 폭넓게 사용되는 재료인 천연고무계 면진적층고무를 실물크기로 제

*Corresponding author: Seo, Dae Won

E-mail: dwseo1@gmail.com

(Received 12 December 2012; Accepted 11 March 2013)

작하고, 경년변화 시험과 크리프 시험을 수행하였다. 실험을 통해 면진적층 고무의 내구성 및 장기거동 특성을 분석하고, 장기치짐에 의한 크리프 특성을 분석하여, 구조물의 면진적층고무 적용에 대한 적합성을 평가하였으며, 향후 면진구조물의 설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 적층고무 면진장치의 장기성능

2.1 적층천연고무 면진장치의 구조

고무를 사용하는 면진장치는 얇은 고무판과 강판을 여러 층으로 적층하여 제작한다. 면진장치에 사용되는 고무는 천연고무계와 클로로프린 및 고감쇠 고무계로 분류된다. 천연고무는 뛰어난 고무탄성과 기계적 강도를 가지며, 온도변화에 의한 물성변화가 작은 재료이다. 면진장치에서 천연고무를 내부의 적층고무 재료로 사용한 것이 천연고무계 면진장치이다. 천연고무계 면진장치는 선형성이 높은 수평방향의 강성을 가지며, 신장특성과 크리프 변형이 작고 온도에 대하여 특성변화가 적은 것으로 보고되고 있다 [13].

Fig.1은 천연고무 면진장치의 일반적인 구조이다.

2.2 적층고무 면진장치의 특성

고무는 낮은 전단탄성계수(0.4~1.2MPa), 높은 체적 탄성계수(1,000~2,000MPa), 그리고 높은 파단신장률(500~800%) 등의 특징 갖는다. 이와 같은 고무의 특성을 살려서, 고무계 면진장치는 얇은 고무시트와 강판을 교대로 적층하여 수직방향으로는 높은 강성과 내력을, 수평방향으로는 낮은 강성과 대변형성 및 복원성 등을 확보하여 구조물의 받침으로서 요구되는 특성을 만족하도록 고안된 제품이다.

일반적으로 고무 덩어리는 수직방향으로 압축할 경우에 압축에 비례하여 횡방향으로 고무가 팽창(bulking)하기 때문에 수직방향으로 낮은 강성을 갖게 된다. 따라서 구조물의 면진장치로서 지진 발생시 수평방향 진동과 상하 진동에 대해서 좋지 않은 성질을 가지게 되며, 좌굴이 쉽게 일어나고 낮은 수직방향의 지지력을 가지게 된다. 그러나, 고무층과 강판을 적층한 구조인 면진장치는 수직방향으로 압축할 경우 내부의 고무층이 강판과의 접착에 의해 수평방향으로 팽창이 억제되기 때문에 큰 수직강성이 얻어지고, 큰 하중을 지지하는 것이 가능하다. 또 수평방향의 전단변형에 대해서

는 강판이 고무의 수평변형을 구속하지 않기 때문에 고무 본래의 탄성과 복원력을 얻을 수 있다.

면진적층고무의 수직 및 수평방향 강성, 수직 지지하중, 한계 수평변형 등은 그 형상, 치수, 고무 층과 강판의 두께 및 적층 수 등에 의하여 변한다. 면진적층고무 면진장치의 고무 총두께는 얇고 층수가 많은 경우 수평방향 강성에 대한 수직방향의 강성의 비율이 높게 된다. 면진적층고무의 성능결정요인으로 1차형상계수(S_1)와 2차형상계수(S_2)가 있다. 1차형상계수는 면진적층고무의 자유면적과 구속면적의 비로 연직강성과 압축한계 성능, 2차형상계수는 고무의 총두께와 적층고무 단면적의 비로 수평강성과 좌굴 안전성을 나타내는 파라미터로 각각 식(1), (2)와 같다[1].

$$S_1 = \left\{ \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right\} / (t_R \cdot D \cdot \pi) = \frac{D}{4t_R} \tag{1}$$

$$S_2 = \frac{D}{n \cdot t_R} \tag{2}$$

여기서,

D : 적층고무외경

t_R : 고무1층두께

n : 고무적층수

2.3 적층고무의 수명예측의 개념

일반적으로 구조재료 가운데 환경열화에 대해 고려하는 경우는 금속재의 부식과 콘크리트의 열화등의 경우뿐일 것이다. 그러나 고분자 재료인 고무를 포함한 유기재료의 경우 사용기간 중에 대기 중의 산소와 반응하여 재료특성이 변화하여 제품수명 및 성능에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 면진장치의 적층고무는 장기수명에 있어서 환경조건의 명확화와 적절한 축진조건을 설정하는 것은 매우 중요하다.

면진적층고무는 구조설계시 정한 초기 기능상태가 환경 중에 포함되는 산소, 오존 및 자외선 등과의 화학반응에 따라 변화하게 된다. 이러한 화학반응은 몇 차의 화학반응이거나 몇 개의 반응 차수의 복합계열 수도 있지만 개략적으로는 아넬리우스의 유사 1차 화학반응[14-15]으로 취급하는 경우가 많다. 1차의 반응이라고 가정할 수 있다면, 저온 장시간의 변화는 고온 단시간의 변화로 고려하여도 무방하기 때문에 상온에서 60년간의 변화(열화)라고 할지라도 가열축진시험으로 예측 가능하다고 볼 수 있다.

2.4 고무의 노화축진 조건 설정

일반적으로 고무소재의 경년에 따른 물리적 변화에 대해서 Arrhenius 식이 성립된다고 알려져 있다[14]. 가령 고무의 특성치 P 가 1차 열화반응한 것이라고 가정하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{dP}{dt} = kP \rightarrow \ln \left[\frac{P}{P_0} \right] = -kt \tag{3}$$

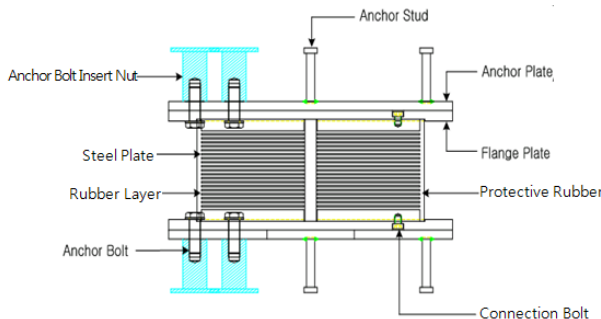


Fig. 1. Natural rubber bearing device

여기서,

P : 고무의 특성치(인장강도, 파단강도, 파단신장율 등),

P_0 : 고무의 초기 특성치

k : 반응속도정수($1/d$ (day))

t : 시간(d (day))

반응속도정수는 고무의 특성치의 열화반응을 나타내는 정수로 Arrhenius에 의해 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$k = A \cdot \exp(-E_a / RT) \quad (4)$$

여기서,

k : 반응속도정수

A : 빈도인자(정수)

R : 기체정수(8.31J/mol·K)

T : 절대온도(K)

E_a : 활성화에너지(J/mol)

고무의 특성치 P 가 어떤 값에 열화한 시점을 수명이라고 하면 이때의 수명 t 는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$t = -\frac{\ln(C)}{k} \quad (5)$$

여기서, $C = \frac{P}{P_0}$

이 관계를 이용하여 가열축진시험의 조건 즉, 축진시간에 대한 가열 온도를 정할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{t_R}{t_1}\right) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (6)$$

여기서,

T_R : 축진온도(K)

T_1 : 설치환경온도(K)

t_R : 축진시간 예상시간

t_1 : 축진시간 예상시간

여기서 활성화에너지(E_a)를 구하면 다른 온도 T_i , T_s 에 대한 축진배율(t_i , t_s)의 관계를 구할 수 있다. 고무 소재의 경년에 따른 물리적 변화는 산소와의 결합반응에 따른 산화에 기인한다. 본 연구에서 활성화에너지는 다음 방법으로 산출하였다.

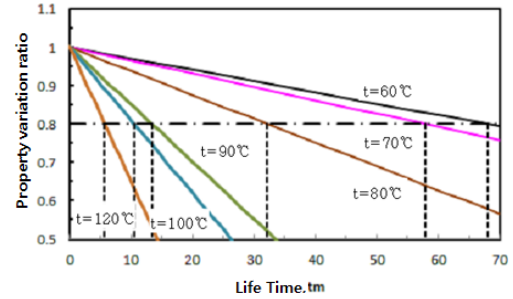


Fig. 2. Temperature-variable property

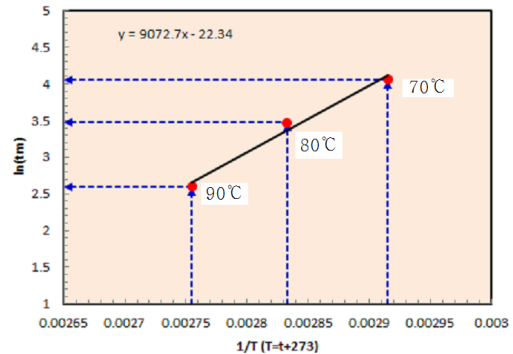


Fig. 3. Arrhenius graph

Fig. 2는 노화 축진온도를 변화하였을 경우, 고무의 물성 변화를 모식적으로 나타낸 것으로 세로축은 고무의 물성변화율이고 가로축은 각 온도에 대한 수명시간이다. 온도가 낮을수록 완만하고 고온일수록 급격한 변화를 나타낸다. 장기수명에 해당하는 물성변화율을 20% ($C = P / P_0 = 0.8$)라고 하면 Fig. 2에서 각각의 온도에 있어서 물성변화율 0.8에 해당하는 시간을 구하면 이것이 수명시간(t_m)에 해당한다.

수명시간과 온도를 식 (4)에 따라 작도하여 나타내면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3의 세로축은 수명시간의 대수 값이고 가로축은 절대온도의 역수로 변환하여 나타낸 것이다.

본 논문에서는 사용환경 조건하에서의 물성변화에 따른 수명을 예측하기 위하여 축진온도를 70°C, 80°C, 90°C의 3가지로 설정하였으며, 축진시간은 각 온도에 대해서 0~40일간 축진하였다.

식 (6)과 Fig. 3의 Arrhenius 그래프에서 축진온도를 실온 293K(20°C)에서 60년 상당의 사용년수에 대응시킬 수 있다. 여기서 $E_a / R = 9073K$ 이고 활성화에너지 E_a 는 75.4 KJ/mol를 구할 수 있다. 이 결과를 이용하여 80°C(353K)에서 노화축진시킬 경우 20°C(293K)에서 60년 상당 노화 축진시간은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\ln(t_1) = 9073K \left(\frac{1}{358} - \frac{1}{293} \right) + \ln(60년) \quad (7)$$

여기서, $t_1 = 0.31$ 년이므로 60년 상당의 경년변화는 113일간 축진노화시키는 것에 해당하게 된다.

이상의 결과에서 산정된 각 물리특성에 있어서 활성화에너지의 최소값

을 대표값으로 하여 고무소재의 경년변화를 산정한다. 적층고무에 대해서는 산정된 모든 활성화에너지의 최소값을 적층고무의 대표 활성화에너지로 하여 온도, 시간의 환산치로 한다. 이 값으로부터 사용기간을 고려하여 가열축진시험조건을 설정하여 장기수명을 예측할 수 있다.

3. 면진장치의 장기성능실험

3.1 적층고무의 경년변화시험

3.1.1 적층고무의 내부 고무의 물성 평가

면진적층고무의 내부에 삽입된 고무의 사용기간 중의 물리적 변화를 분석하기 위하여 물성을 평가하였다. 시험체는 아령3호 시편을 제작하였다. 시편의 형상은 Fig. 4와 같다. 아령3호 시편에 대한 인장시험은 KSM 6782[18]의 인장시험법을 따라 인장속도 500 ± 50 mm/min에서 파단될 때까지 실시하였다. 또한 경년변화에 대한 시험방법은 KSM 6788[19]과 JISK 6257[20]의 가황고무 노화시험방법에 따라 실시하였다. 이때, 노화축진온도는 70℃, 80℃, 90℃로 설정하고, 40일간 시험을 진행하였다. 시험기간 동안 5일 간격으로 시편의 인장시험을 실시하였다. 각 시험결과로부터 인장강도, 100% 탄성계수(modulus), 파단강도를 결정하였다.

3.1.2 적층고무 노화축진시험

적층고무 경년변화 실험에서는 두 개의 시험체를 제작하고, 노화축진 시험을 수행하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 경년 변화에 대한 시험체는 직경 500mm의 천연 고무계 적층고무로서, 1차형상계수가 각각 35.6, 30.9이고 2차 형상계수는 동일하게 5.1로 제작하였다. 두 시험체는 고무의 기본 물성은 동일하나 1차 형상계수의 차이에 따른 변화를 파악하고자 1차 형상계수를 달리 하였다. Table 1의 시험체의 제원에 나타난 바와 같이, 시험체의 직경은 외부고무를 포함하여 500mm, 고무층의 두께는 3.8mm이고, 적

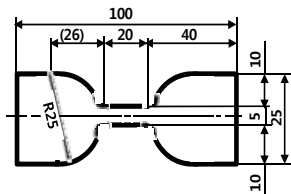


Fig. 4. Dumbbell #3 specimens

층된 고무의 층수는 각각 25, 29층, 강판의 두께는 3.2mm이다.

시험방법은 활성화 에너지에 의한 노화조건(80℃ × 0.31년)을 참고로 하여 80℃ 항온실에 시험체를 투입한 후 10일 간격으로 시험체의 기본성능(수평강성, 연직강성)에 대한 변화량을 확인하였다. 전체 시험기간은 113일 동안 수행하였으며, 기본 면압조건 5MPa, 10MPa, 15MPa에 대해 Fig. 6과 같이 연직강성과 수평강성의 변화율에 대해 평가하였다.

3.2 크리프 시험

크리프 시험은 경년변화시험과 동일한 특성의 시험체를 사용하였다. Fig. 7에 나타난 것처럼 압축전단시험장치의 상단에 S₁=31 시험체를 하단에 S₁=35.6의 시험체를 설치하여, 총 5992시간(249.7일)에 걸쳐 시험과 측정을 실시하였다.

압축력의 가력에는 5,000kN 유압잭이 사용되었으며, 압축력은 3,000kN (면압 15.3N/mm²)으로 설정하였다. 압축력이 설정하중보다 저하하는 경우에는 자동으로 설정하중까지 가력된다. 하지만 온도의 변동에 따른 수축 팽창으로 인하여 설정된 하중이 다소 변동하는 경우가 있으므로, 매일 4차례에 걸쳐 확인을 하고 수동으로 하중을 보정하였다. 압축력의 평균값은 3,078.6kN이었고, 최대값은 3,276kN, 최소값은 2,936kN이었다. 압축력의 계측을 위하여 7000kN 용량의 로드셀을 설치하고, 각 시험체의 4개소



Fig. 5. NRB Specimen

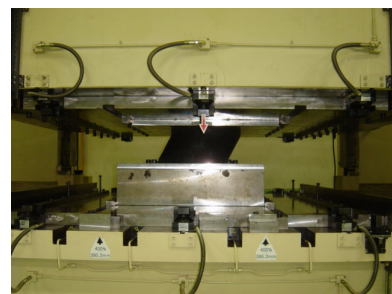


Fig. 6. Performance test after aging

Table 1. Details of specimens

No.	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	height (mm)	Rubber layer(mm)			Steel plate(mm)			Attachment plates(mm)	S ₁	S ₂	G (N/mm ²)	Section area (cm ²)
				thickness	No. of rubber layers	Total thickness	thickness	No. of layers	Total thickness					
051002	500	30	242.8	3.8	26	98.8	3.2	25	80.0	32	31.0	5.1	0.392	1956.4
051008	500	30	241.8	3.3	30	99.0	3.2	29	92.8	25	35.6	5.1	0.392	1956.4

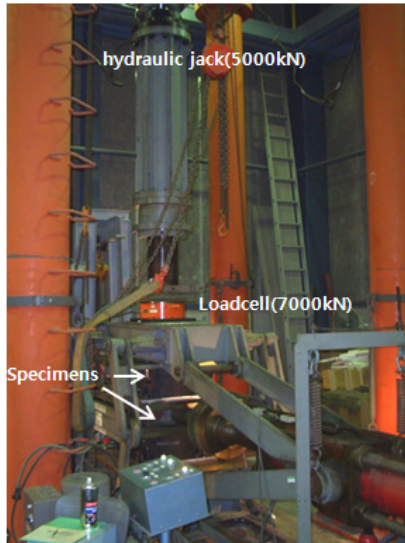


Fig. 7. Creep test setup



Fig. 8. Specimens loading

에 LVDT를 설치하여 연직변위를 계측하였다. 외부 기온은 시험체 주변에 열전대온도센서를 설치하여 기록하였다. 각각의 계측은 1시간 간격으로 데이터 로거를 통하여 기록하였다. Fig. 8은 시험체의 재하 모습이다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 노화축진실험 결과

4.1.1 고무시험편의 물성강도

아령3호 고무시험편을 이용한 축진노화시험 결과는 Fig. 9~12에 보인 바와 같다. Fig. 9는 시험편의 초기 인장강도와 각 온도에서의 축진노화 후의 인장강도이다. 인장강도는 시험편의 최대값(최소값)/시험편 단면적의 평균값으로 나타내었다. Fig. 10은 고무의 탄성계수(modulus)는 100% 인장시의 인장응력을 시험편의 단면적으로 나눈 100% 탄성계수와 각 노화 축진 온도별 시험결과를 나타낸 것이다. Fig. 11은 파단신장율을 각 노화 축진 온도에 따라 나타내었으며, Fig. 12는 노화전 초기파단신장율에 대해 각 온도별 축진노화 후의 파단신장율비로 나타낸 것이다.

실험결과, 70℃로 40일 축진노화한 경우 약 10% 정도의 파단신장율이 저하하는 것으로 나타났으며, 80℃에서 40일 축진노화한 경우에는 약

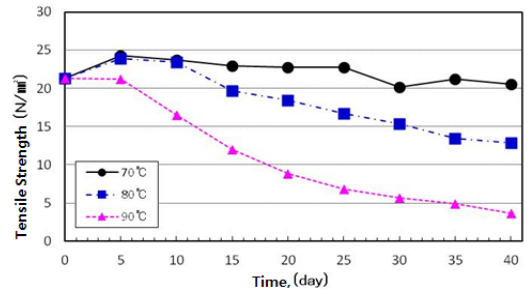


Fig. 9. Initial tensile strength and after aging tensile strength

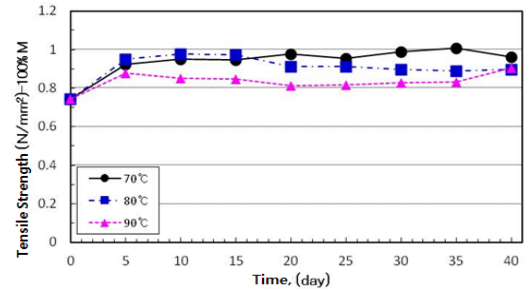


Fig. 10. After aging 100% elastic modulus tensile strength

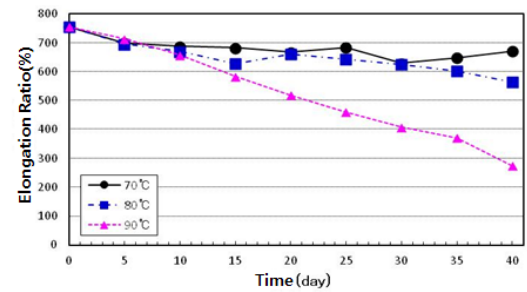


Fig. 11. Rupture elongation after accelerated aging

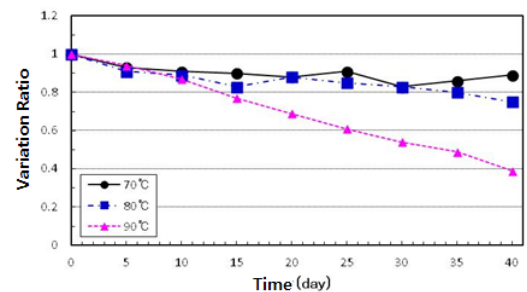


Fig. 12. Variation ratio of rupture elongation by temperature

20% 정도로 나타났으나 90℃에서 40일간 노화를 축진한 경우에는 60%의 파단신장율 저하를 나타내고 있음을 확인하였다. 따라서, 저온에서 장시간의 변화를 고온에서 단시간의 변화로써 예측함으로써 사용기간중의 장기기에 대한 면진장치의 특성 변화를 예측할 수 있다는 것을 확인하였다.

4.1.2 적층고무의 경년변화

그림 13~16은 각 시험체의 가열축진노화 후 5MPa, 10MPa, 15MPa

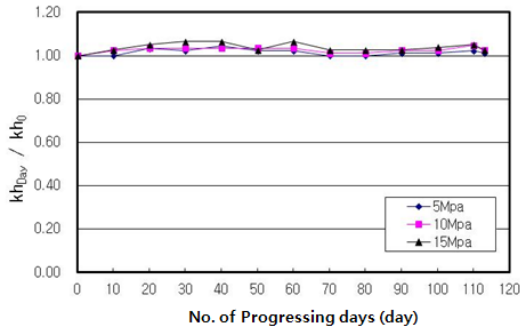


Fig. 13. Yearly variation ratio of lateral stiffness ($S_1=31.0$)

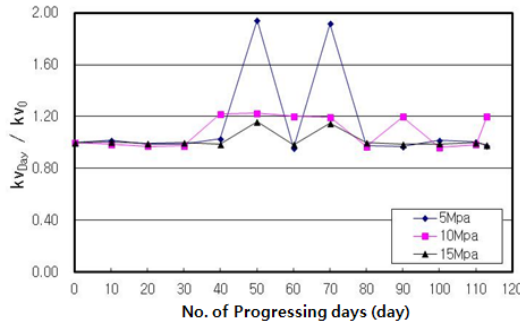


Fig. 14. Yearly variation ratio of vertical stiffness ($S_1=31.0$)

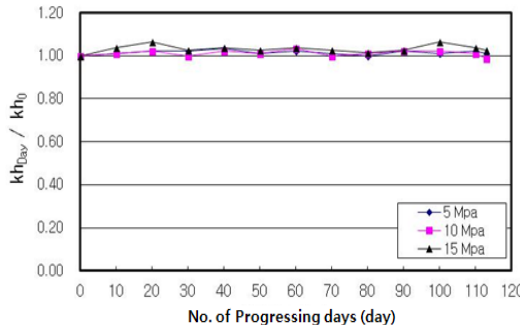


Fig. 15. Yearly variation ratio of lateral stiffness ($S_1=35.6$)

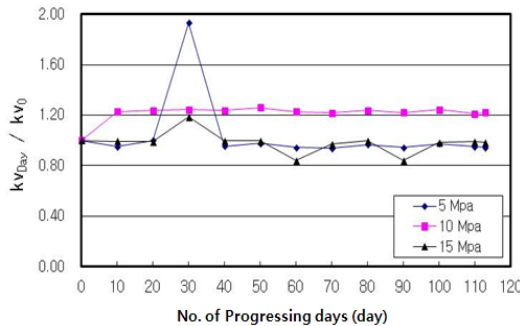


Fig. 16. Yearly variation ratio of vertical stiffness ($S_1=35.6$)

의 면압조건에서 수평강성변화와 연직강성변화를 나타낸 것이다. 1차형상계수 $S_1=31.0$ 시험체의 경우, Fig. 13 및 Fig. 14와 같이 각 면압 조건에서 수평강성변화율은 약 10% 내외인 것으로 나타났다. 연직강성에 대한 변화율은 부분적으로 약 20%의 변화율이 나타나기도 하였으나, 평균적으

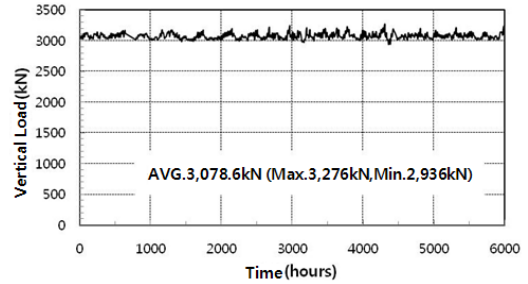


Fig. 17. Vertical load variations

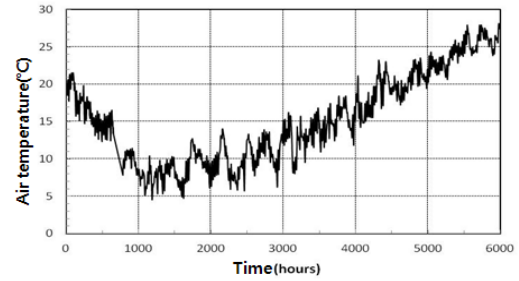


Fig. 18. Air temperature variations

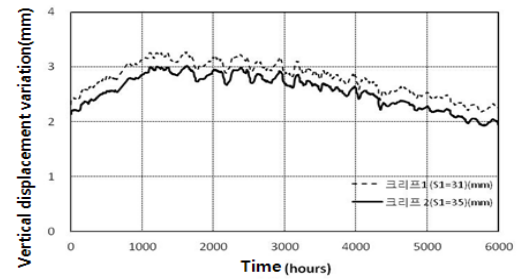


Fig. 19. Vertical displacement variations of specimens

로는 약 10% 정도의 안정된 변화를 나타내었다. $S_1=35.6$ 에 대한 시험결과는 Fig. 15 및 Fig. 16과 같이 수평강성 변화율은 약 5% 정도로 나타났으며, 60년 상당의 경년변화에 따른 수평강성 변화율은 10% 이내로 안정된 수평강성을 유지하는 것으로 평가되었다. 또한 연직강성에 대한 변화율은 30일 경과 후 면압 5MPa의 경우에 큰 변화율이 관찰되기도 하였으나, 전반적으로 약 20% 내외의 변화율을 나타내었다. 면압 10MPa와 15MPa의 경우에는 평균 10% 내외의 안정된 변화율을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 크리프 실험결과

$S_1=31$ 시험체와 $S_1=35.6$ 시험체의 실험결과는 Fig. 17~20에 나타내었다. 또한 연직변위의 변화 및 크리프에 대해서는 압축되는 경우의 부호를 + (정)로 하였다. Fig. 17과 Fig. 18은 시험기간 동안의 연직하중의 변화와 외부 기온의 변화를 보인 것이다. 연직하중의 평균은 3,078.6kN이고, 최대값은 3,276kN, 최소값은 2,936kN이었다. 외부 기온은 2,000시간을 지난 2월 이후 서서히 상승하는 양상을 나타내고 있다. Fig. 19에서 확인하는 바와 같이, 각 시험체의 연직변위는 외부 기온의 변동에 따라서 변동하고 있음

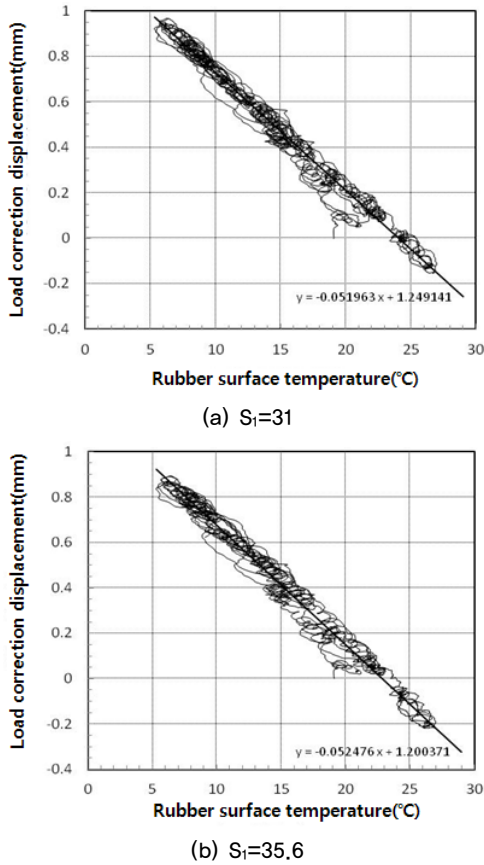


Fig. 20. Vertical displacement - rubber surface temperature relationship

Table 2. Creep of Test Results

	S ₁ =31	S ₁ =35.6
Bearing Stress(N/mm ²)	15.3	15.3
Creep(mm)	0.215	0.143

을 알 수 있다. 온도의 상승에 따라서 면진적층고무가 팽창하기 때문에 연직 변위의 침하량은 감소하고 있다. 또한 하루 동안의 변동은 비교적 완만함을 알 수 있다.

Fig. 20은 연직변위의 변화에서 하중 변동의 영향을 보정한 연직변위와 고무표면온도의 관계를 나타낸 것이다. 이 관계로부터 시험체별로 온도보정계수를 산정하였다. 그림에서 나타난 바와 같이, 고무표면 온도가 낮을수록 연직변위량은 증가하고 고무표면 온도가 높을수록 연직변위량은 감소하는 경향을 나타내었다.

시험이 23±2℃에서 수행되지 않고, 대기온도 상태에서 크리프 시험이 수행된 시험체에 대하여 측정시간에서 영점으로부터 수직변위에 있어서의 변화는 다음 식 (8)에 의해 변환이 필요하다.

$$\Delta H_{20} = \Delta H_T + nt_r (T - 20)\alpha \quad (8)$$

여기서, ΔH_{20} = 20℃에서의 수직변위 변화, ΔH_T = T℃에서 수직변위 변화, T = 시험체의 표면온도(℃), α = 선형열팽창계수(T℃에서 20℃)

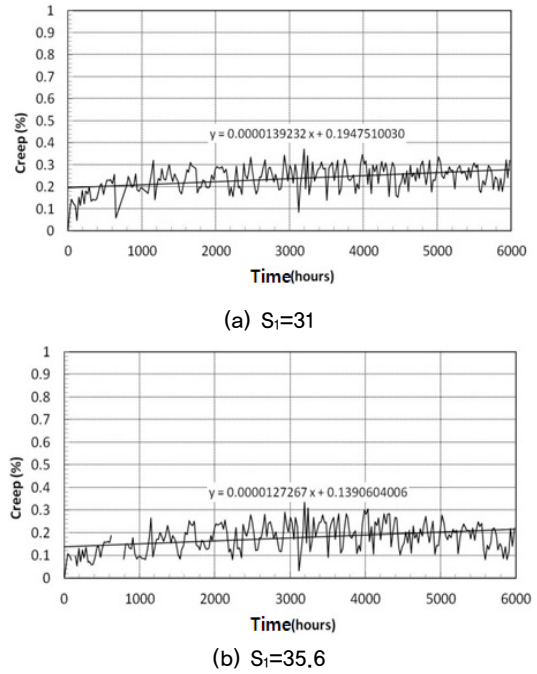


Fig. 21. Creep variation rate of specimens

Table 3. Creep strain ratio by approximate formula

	approximate formula		Prediction creep strain ratio(%)	
			60years	100years
S ₁ =31	linear	9.767×10 ⁻⁶ ×t+0.211	5.34	8.76
	algebraic	(0.0887×log(t))-0.125	0.46	0.49
S ₁ =35.6	linear	9.9901×10 ⁻⁶ ×t+0.150	5.40	8.90
	algebraic	(0.0347×log(t))-0.203	0.50	0.56

각각의 측정시간에서의 크리프 변형률은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\epsilon_{cr} = \frac{\Delta H_{20}}{nt_r} \times 100 \quad (9)$$

여기서, ϵ_{cr} 은 20℃에서 크리프량을 총 고무두께에 대한 백분율로 나타낸 값이다.

Table 2는 각 시험체에 시험면압 15.3MPa을 재하한 상태에서 약 6,000 시간 동안 연직변위를 계속하고 종료 후의 크리프량을 나타내었다. Fig. 21은 각 시험체의 시간에 따른 크리프율의 변화 추이를 나타낸 것으로 크리프 변형율은 식 (9)를 이용하여 20℃에 대응하도록 온도보정을 실시하여 전 고무두께에 대한 변화율의 백분율로 나타내었다.

Fig. 21과 Fig. 22에 각 시험체의 계속 데이터를 외삽법(extrapolation)으로 선형과 대수의 근사식으로 나타내고, 그 결과를 60년 후의 크리프 변형율로 나타내었다. 또한 표 3에 상기 근사식에 의한 60년과 100년 후의 크리프 변형율을 산정하여 나타내었다.

100년 후의 크리프 추정값을 Table 3과 Fig. 22에 나타내었다. 선형근사식(Linear-Linear)으로 추정할 경우에는 100년 후에 약 5~9%의 크리프가

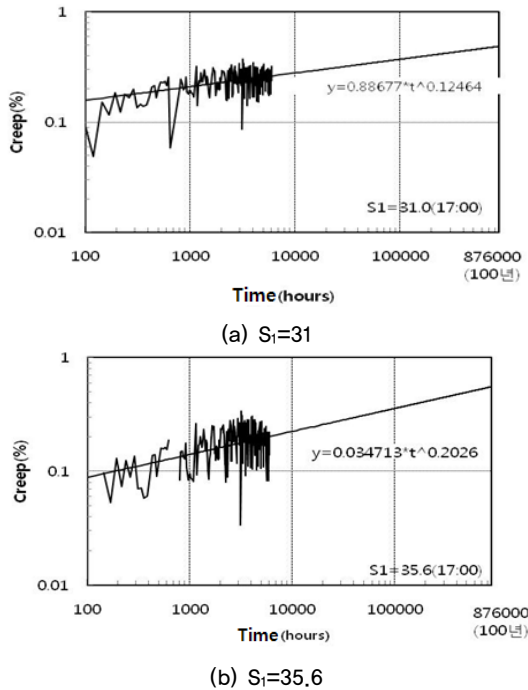


Fig. 21. Creep variation rate of specimens

예상된다. 대수근사식(Log - Log)으로 추정된 경우에는 크리프는 100년 후에도 약 1%미만으로 추정된다. 선형의 관계식으로 크리프량을 추정하는 식은 크리프량을 너무 크게 예측하여 과도하게 안전측으로 평가하는 측면이 있다. 이 때문에 일반적으로는 대수근사식으로 크리프량을 추정하는 경우가 많다. 대수근사식으로 추정된 값은 0.4~0.6%로 미미하지만 이는 추정된 값이기 때문에 안전 여유도를 고려할 필요성은 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 천연고무계 적층고무 면진장치의 장기 수명예측을 위한 노화 축진의 환경조건 설정과 노화축진실험 및 크리프실험에 대한 결과를 평가하고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고무시험편에 의한 노화축진 실험을 하여 활성화 에너지를 산정하여 경년변화를 위한 온도조건과 축진기간을 설정 평가하였다.
- 2) 천연고무계 적층면진장치의 경우 축진노화 실험결과 수평강성 및 수직 강성에서 각각 10%, 20%의 안정된 변화율을 나타내었으며, 1차 형상 계수에 의한 차이는 나타나지 않았다.
- 3) 장기축하중에 의한 면진적층고무 장치의 연직변형을 파악하기 위해 5992시간(249.7일) 동안의 크리프 시험결과 고무표면온도가 낮을수록 수직변위량은 증가하는 것으로 나타났으나 크리프량은 안정적인 변화를 나타내었으며 1차형상계수가 상대적으로 큰 ($S_1=35.6$) 실험체에서 60년 후의 크리프 변형율이 낮게 예측되었다.
- 4) 이상과 같은 천연고무계 적층고무의 장기수명 평가결과, 대수근사식에 의한 60년 후의 예측은 0.5%로 안정적인 크리프 변형율로 ISO에서 제시하고 있는 60년 후 크리프 변형율(10%)를 충분히 만족하는 결과로서

구조물에 적용이 적합한 것으로 나타났다.

- 5) 향후 건전한 면진건축물의 보급을 위해 납입면진적층고무, 고감쇠 적층고무 등의 다양한 면진장치의 내구성능에 대한 연구 및 내구성능에 대한 국내기준의 정립이 필요할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술 평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호: 2011151010010B)결과의 일부입니다. 본 연구에 사용한 실험체는 동일고무벨트(주)에서 제공 받았고, 경년변화실험은 동일고무벨트(주)의 협조를 받아 실시하였고, 크리프 실험은 Fukuoka 대학 Takayama 연구실에서 실시하였으며, 저자 일행은 두 기관에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Hwang KT, Rim JM, Kim DW, Demand Capacities of Rubber Bearing for Seismic Isolated Building, EESK Proceeding, 487-494; c2006.
2. Oh J, Park JY, Park KN, Kim SD, Park SK, An Experimental Study of the Long-term Creep Characteristic of High Damping Rubber Bearings, EESK Journal 2009;13(1):53-60.
3. Hiroki H, Yusuke S, Nagahide K, A Study of Aging Effect of Rubber Bearings After About Twenty Years in Use, 11th World conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Guangzhou, China, c2009.
4. ISO 22762-1, Elastomeric Seismic Protection Isolators Part1 : Test methods, c2005.
5. ISO 22762-1, Elastomeric Seismic Protection Isolators Part3 : Applications for building Specifications, c2005.
6. Clark PW, Kelly JM, Aiken ID. Aging studies of high-damping rubber and leadrubber seismic isolators. In: 4th U.S.-Japan Workshop on earthquake protective systems for bridges, 1996;3480:75-89.
7. Blandford E, Keldrauk E, Laufer M, Mieler M, Wei J. Advanced seismic base isolation methods for modular reactors, UCBITH-09-004, Report, Department of Civil Engineering and Nuclear Engineering, University of California, Berkeley, California, USA, c2009.
8. Whittaker AS, Huang Y-N, Mayes RL, Kennedy RP. Seismic isolation of safety-related nuclear structures, Structures Congress; 2011 April 14-16; Las Vegas, Nevada, 2011;876-885p.
9. Malushte SR, Whittaker AS. Survey of past base isolation applications in nuclear power plants and challenges to industry/ regulatory acceptance. In: 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18); 2005 August 7-12; Beijing, China, Paper K10/7, c2005.
10. Malik AK, Replacement of twenty-year old elastomeric bearings. In: 3rd World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures; Toronto, Ontario, Canada; c1991, 1109-1120p.
11. Shimoda I, Masayoshi I, Mochimaru M, Miyazaki M, Sakuraba S, Masuda K, Wake T. Survey of aging for LRB of a base-isolated

- building completed 15 years ago. In: ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2004); 2004 July 25-29, San Diego, California, USA, c2004.
12. Hamaguchi H, Samejima Y, Kani N. A study of aging effect on a rubber bearing after about twenty years in use. In: 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures; 2009 November 17-21, Guangzhou, China; c2009.
 13. The Society of Rubber Science and Technology. Laminated Rubber Bearings for Seismic Isolation, c2000.
 14. Architectural Institute of Japan, Recommendation for the Design of Base Isolated Buildings, c2001.
 15. Oiles Co., Ltd., Seismic isolation Technical data.
 16. Bridgeston Co., Ltd., Seismic isolation Technical data.
 17. Koren Standard, KSM 6782, Thesion Test for Vulcanized Rubber, c2009.
 18. Koren Standard, KSM 6788, Accelerated aging test methods for vulcanized rubber, c2004.
 19. Japanese Industrial Standards Committee, JIS K 6257 Rubber, Vulcanized or thermoplastic-Determination of heat ageing properties.