

# 승강기용 방진고무부품 특성 및 사용수명 평가

우창수<sup>†</sup> · 박현성<sup>\*</sup>

## Useful Lifetime Evaluation of Rubber Component for Elevator Cabin

Chang-Su Woo, Hyun-Sung Park

**Key Words:** Elevator(승강기), Rubber component(고무부품), Physical test(물성시험), Heat aging(열노화), Arrhenius(아레니우스), Useful lifetime(사용수명)

### Abstract

Rubber material properties and useful life evaluation are very important in design procedure to assure the safety and reliability of the rubber components. In this paper, the evaluation of characteristics and useful life prediction of rubber component for elevator cabin were experimentally investigated. The material test and accelerated heat-aging test were carried. Rubber material constants were obtained by curve fittings of simple tension, pure shear and bi-axial tension test data. Heat aging test results changes as the threshold are used for assessment of the useful life and time to threshold value were plotted against reciprocal of absolute temperature to give the Arrhenius plot. By using the rubber material and component test several useful life prediction equations for rubber component were proposed. Predicted useful life of rubber component for elevator cabin agreed fairly with the experimental lives.

### 1. 서 론

승강기는 우리사회에서 자동차 이상으로 중요한 필수 교통수단으로 자리 잡고 있으며 2001년 12월 말 기준으로 204,000여대가 설치되어 운영되고 있으며 매년 15,000여대씩 증설되어, 시장규모는 연간 1조 5,000억원에 달하며 승강기 보유대수는 세계 9위, 신규 설치대수는 세계 5위에 달하는 수준에 이르고 있다.

승강기를 구성하는 여러 부품 중 방진고무는 압축하중과 변위 관계를 이용하여 카 하부에 조

립되어 과부하 감지의 역할을 하고 있으나 방진고무의 특성변화로 인하여 승강기 운행 시, 과부하로 인한 안전사고의 위험이 잠재해 있으며 부품 수명에 대한 관행이나 관념이 올바르게 정립되지 않아 교체시기에 대한 기준이 설정되지 않아 고장이 자주 발생하여 승강기 전체의 신뢰성에 많은 영향을 미치고 있다.<sup>1</sup>

따라서, 본 연구에서는 과부하용 감지장치에 사용되는 방진고무부품에 대한 특성시험 및 평가를 통하여 방진고무부품의 교체주기를 제시하여 유지보수 등에 활용함으로써 이용자의 안전 확보는 물론 승강기의 신뢰성 향상에 기여하고자 한다.

---

† 정회원, 한국기계연구원 나노기계연구본부  
E-mail : cswoo@kimm.re.kr  
TEL : (042)868-7882 FAX : (042)868-7884

\* 한국기계연구원 나노기계연구본부

---

## 2. 방진고무 물성시험

### 2.1 상온 물성시험

고무재료 물성을 구하기 위한 시험으로는 먼저 시험에 적절한 시편을 제작한 후 경도를 측정하여 시편간의 오차가 최소화 되도록 한 다음에 시험온도와 속도 등 시험조건을 설정하여 물성시험을 실시한 후, 시험을 통해 얻어진 데이터를 분석하여 고무재료의 물성을 결정하게 된다. 고무 물성을 보다 정확하게 결정하기 위해서는 단축인장, 단축압축, 순수전단 또는 단순전단, 이축인장시험 등 여러 가지 다른 하중 상태에서의 시험을 통하여 물성을 확보하는 것이 필요하다.<sup>2</sup>

본 연구에서는 고무 물성시험 중 가장 기본적인 단축인장 및 이축인장시험을 수행하여 고무재료의 물성을 파악하고 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 결정하였다.

고무는 변형을 받으면 초기 상태의 분자 구조가 수정 및 재배치로 인하여 강성이 낮아지고 댐핑 특성이 변하게 된다. 이러한 응력-변형률 완화현상을 Mullins 효과라고 한다.<sup>3</sup> 이러한 특성으로 고무는 부하(load)와 제하(unload)시의 응력-변형률 곡선이 다르며 또한, 초기의 응력-변형률 곡선을 다시 반복하지 않고 동일 변형률 구간에서 3~5회 정도의 반복하중을 받아야 곡선이 안정화된다. 그리고 고무재료가 이전에 받았던 변형률보다 더 큰 수준의 변형을 받으면 응력-변형률 곡선은 다시 변하게 된다.<sup>4</sup>

Fig. 1은 다양한 변형률 범위 내에서 5회씩 반복하중을 주어 응력-변형률 곡선을 연속적으로 구한 것으로 반복회수가 증가할수록 또한 변형률 구간이 커질수록 응력이 완화되는 것을 볼 수 있다. 본 시험에서도 고무재료의 최종 물성으로 사용하기 위해 Fig. 2와 같이 시험 결과에서 안정화된 응력-변형률 곡선을 선택하였다.

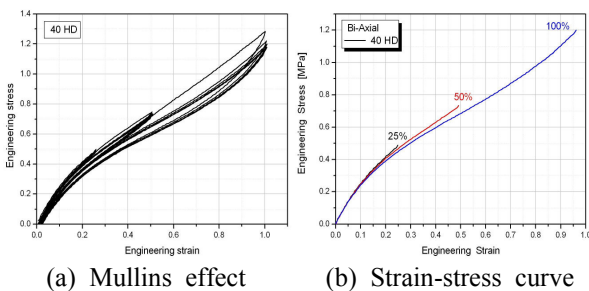


Fig. 1 Physical test of rubber material

### 2.2 비선형 재료상수

고무 특성을 나타내는 재료상수는 고무부품의 유한요소해석에 필수적인 물성 데이터로 이 값의 변화에 따라 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 안정성 및 수렴성에도 큰 영향을 미치게 되므로 정확한 재료상수를 결정하는 것은 매우 중요하다 하겠다. 본 연구에서는 단축인장, 이축인장 시험을 통해 얻어진 응력-변형률 결과를 변형률 에너지함수로부터 구해진 응력-변형률의 관계식을 이용하여 Table 1~2에서와 같이 무니-리블린(Mooney-Rivlin) 2항과 오그덴(Ogden) 3항의 비선형 재료상수를 결정하였다. Table에서 보는 바와 같이 변형률이 클수록 강성(modulus, G)이 낮아짐을 알 수 있었으며 무니-리블린 함수와 오그덴 함수로 구한 재료상수 값들이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

Table 1 Non-linear material coefficient(Mooney)

strain	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>	G
25%	0.285	0	0.57
50%	0.265	0	0.53
100%	0.236	0.012	0.49

Table 2 Non-linear material coefficient(Ogden)

strain	$\mu_1$	$\alpha_1$	$\mu_2$	$\alpha_2$	$\mu_3$	$\alpha_3$	G
25%	4.3e-5	1.613	0.394	2.883	1.5e-5	0.557	0.568
50%	2.067	3.1e-6	1.0e-5	0.072	0.587	1.814	0.532
100%	3.504	0.066	1.303	0.008	0.364	2.118	0.507

### 2.3 노화물성시험

대부분의 고무부품들은 환경적인 영향에 의한 열 노화로 인해 수명을 다하게 되므로,<sup>5</sup> 고무시편을 상온보다 높은 온도인 70°C, 85°C, 100°C의 노화온도에서 1, 2, 3, 4, 7, 14, 21, 30, 45, 60일의 시간 간격으로 각각 시편을 노화시킨 후 물성시험을 수행하여 노화물성을 파악하였다.

Fig. 2는 각 노화온도에서 노화시간에 따른 물성변화를 나타낸 것으로 온도가 높고 시간이 길수록 물성변화가 크며, 특히 노화초기에 물성변화가 심하게 나타남을 알 수 있었다.

70°C에서 14일까지는 노화전의 특성과 유사한 경향을 나타내었으나 14일 이후의 인장강도 및

신율은 급격하게 떨어짐을 알 수 있었으며 85°C에서는 4일, 100°C에서는 2일 이후에는 물성변화가 심해 방진고무로서의 역할이 어려울 것으로 나타났다. 노화시험을 통해 기존 방진고무재료는 내열성이 부족하여 내구수명에 큰 영향을 미치게 되므로 내열성 및 강도가 향상된 고무재료의 선택이 필요하리라 사료된다.

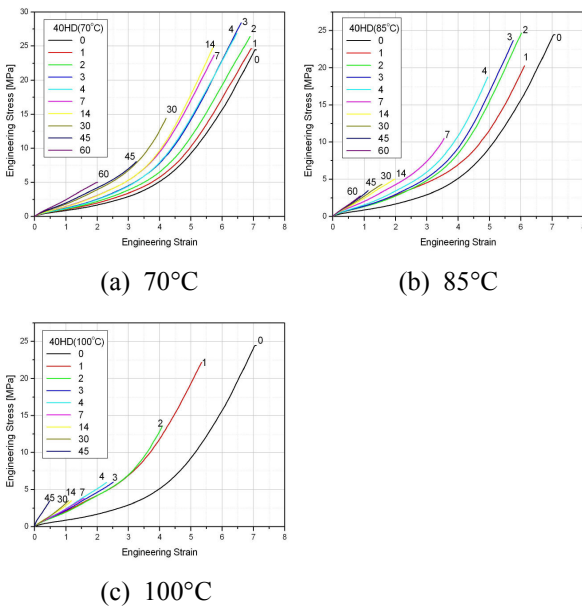
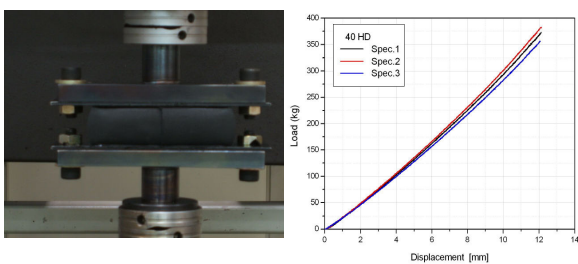


Fig. 2 Result of heat aging test for rubber material

### 3. 방진고무부품 특성시험 및 수명평가

#### 3.1 상온 특성시험

승강기용 방진고무부품의 특성을 파악하기 위해 Fig. 3(a)와 같이 2.5톤 유압식 피로시험기를 이용하여 사용하지 않은 신품에 대해 상온에서의 정적하중시험을 수행하여 하중과 변위와의 관계를 검토하였다.



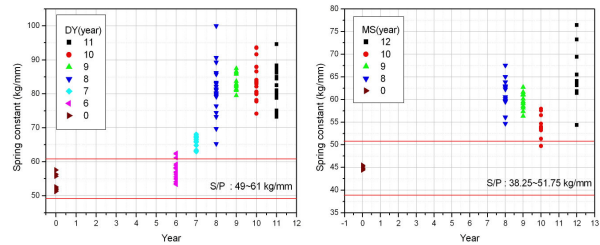
(a) Static test (b) Load-displacement  
Fig. 3 Static test of new rubber component

시험결과는 Fig. 3(b)에서와 같이 스프링상수는 30.2~31.84 kg/mm로 하한기준값 부근이었으며, 일부 고무부품은 기준값을 만족하지 않아 초기상태에서의 특성 및 요구조건의 만족이 필요한 것으로 나타났다.

#### 3.2 노후 방진고무부품 특성시험

현재 승강기에 설치되어 사용되고 있는 방진고무부품에 대한 특성을 파악하기 위해 D사, M사 엘리베이터에 장착되어 6년에서 12년 사용된 노후부품에 대해 특성시험을 수행하였다.

특성시험결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이 신품을 제외한 6년 이후의 방진고무부품은 모두 경화되어 스프링상수가 기준 범위를 벗어나 정확한 과부하 감지가 어려워 안전사고의 위험이 잠재해 있음을 알 수 있었다. 승강기 고무부품의 특성시험을 통하여 승강기의 안전과 방진고무부품의 특성변화를 고려하면 방진고무부품은 6년 주기로 교체하는 것이 타당하리라 사료된다.



(a) D Ltd. (b) M Ltd.

Fig. 4 Static test of old rubber component

#### 3.3 아레니우스 관계식

고무제품은 사용 환경이나 조건이 복잡하고 수명예측에 필요한 데이터가 절대적으로 부족하며 온도, 습도, 오존, 빛, 유체, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자(degradation factors) 및 사용조건과 배합조건 등이 다양하기 때문에 사용수명을 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히, 실제 사용될 때와 동일한 조건에서의 시험을 설계하여 수명을 예측하기란 매우 어려운 문제이다.<sup>6</sup>

본 연구에서는 고무부품에 대한 수명예측을 위해 열 노화시키는 가속방법을 선택하여 가속시험을 통해 얻어진 데이터로 아레니우스(Arrhenius) 모델을 이용하여 수명을 예측하였다.<sup>7</sup>

아레니우스 모델은 여러 온도에서 고무제품의 초기 특성 값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 마스터 곡선(master curve) 및 관계식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정 온도에서 수명을 계산할 수 있으며 상온에서의 자연노화에 의한 수명을 가속시험 결과로 얻어진 데이터를 이용하여 예측할 수 있다.

가속시험에 앞서 아레니우스 관계식에 대해서 알아보기 위해 노화 반응에서 고무의 특성 값을  $P$  라고 하면 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{dP}{dt} = kP \quad \text{즉,} \quad \ln \left[ \frac{P}{P_0} \right] = -kt \quad (1)$$

$P$  : 특성 값,  $P_0$  : 노화 전 특성 값,  
 $t$  : 시간,  $k$  : 반응속도정수

식 (1)에서 반응속도정수  $k$ 는 특성값,  $P$ 는 노화반응을 나타내는 정수로 1889년 S. Arrhenius는 식 (2) 및 (3)과 같은 실험식을 구하였다.

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (2)$$

$$\ln k(T) = -\frac{E}{RT} + C \quad (3)$$

$A, C$  : 상수,

$E$ : 활성화에너지(activation energy, J/mol)

$R$ : 기체상수(gas constant, 8.314J/mol·K)

$T$ : 절대온도(absolute temperature, K)

식 (1)에서 노화시킨 특성값  $P$ 가 있는 시점을 수명이라고 하면 그 시점의 수명  $t$ 는 식 (4)를 통해 얻을 수 있다.

$$t = -\ln(P/P_0)/k \quad (4)$$

식 (4)에서 수명  $t$ 는 반응속도정수 관계식 (2)로 부터 온도로 표현되어 수명이 온도 함수로 표현할 수 있다. 즉, 특성값  $P$ 로부터 온도  $T_1$ 에서의 수명  $t_1$ 은 온도  $T_2$ 에서의 수명  $t_2$ 와 같게 되어 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \left[ \frac{t_1}{t_2} \right] = \frac{E}{R} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (5)$$

### 3.4 가속 열 노화시험

승강기용 방진고무부품의 노화특성과 사용수명을 평가하기 위해 70°C, 85°C, 100°C에서 60일까지 노화시킨 후 특성시험을 수행하여 경도와 스프링상수 변화를 파악하였다.

경도와 스프링상수 변화는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 온도가 높고 노화시간이 길수록 증가하는 경향을 나타내었으며 이는 제품의 특성에 큰 영향을 미치게 될 것이다.

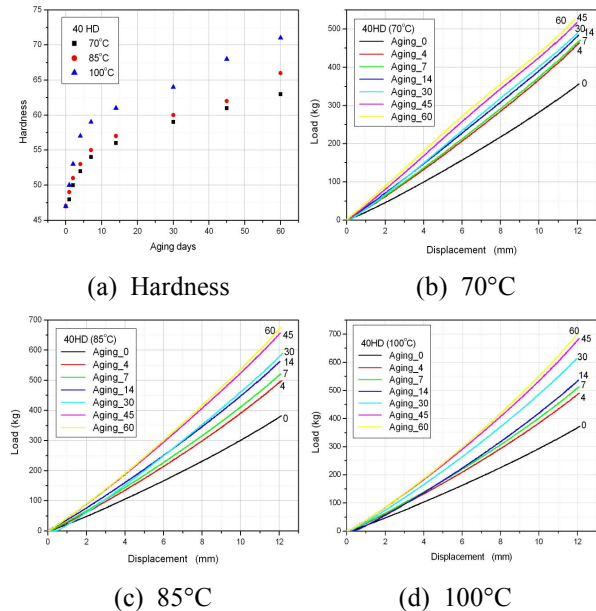


Fig. 5 Result of heat aging test for rubber component

### 3.5 노화수명예측

승강기용 방진고무부품에 대한 온도변화에 따른 스프링상수의 변화를 나타내기 위해 Fig. 6(a)와 같이 x축의 시간을 대수 값으로 하였으며 y축은 초기상태를 기준으로 스프링상수 변화율을 나타내었다.

방진고무부품의 사용수명을 스프링상수 변화율이 50%라고 하면 사용시간은 70°C, 85°C, 100°C에서 7.35, 6.55, 6.43이 된다. 온도와 시간과의 관계로부터 Fig. 6(b)-(d)와 같은 아레니우스 선도를 구할 수 있고 최소 자승법을 이용하여 수명예측식이 Table 3과 같이 구해진다. 구해진 수명예측식을 이용하여 상온 25°C에서 방진고무부품의 스프링상수 변화율이 100%일 경우의 사용수명은

약 6년으로 예측할 수 있다.

본 연구를 통해 예측된 수명은 노후 된 고무부품에 대한 특성시험을 통해 얻어진 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

**Table 3** Useful lifetime prediction equation

change	equation
50%	$\ln(t) = - 4.03 + 3961/(T+273)$
75%	$\ln(t) = - 2.12 + 3606/(T+273)$
100%	$\ln(t) = - 4.24 + 4502/(T+273)$

\* T = temperature(°C)

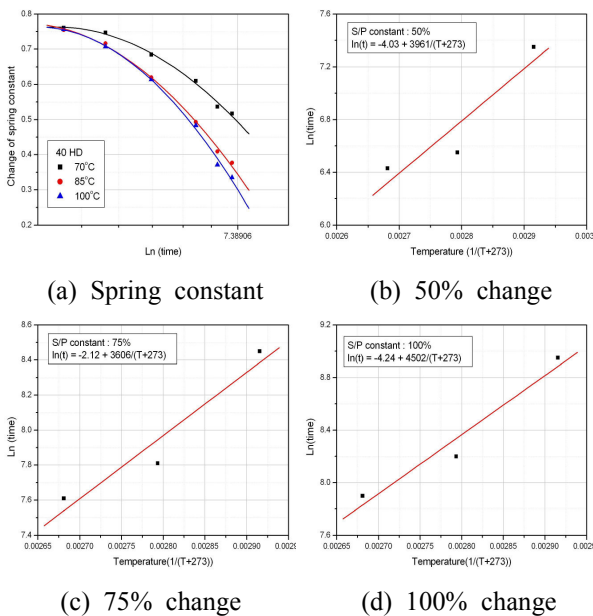


Fig. 6 Arrhenius plot

#### 4. 결론

승강기용 방진고무부품에 대한 특성 및 사용수명평가에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고무재료의 기계적 특성을 파악하기 위해 단축인장, 이축인장상태에서 물성시험을 수행하여 승강기용 고무재료에 대해 물성을 파악하였으며 변형률 범위에 따른 재료상수를 결정하였다.

(2) 고무재료에 대한 노화시험을 통해 노화온도가 높고 노화시간이 길수록 물성변화가 심하게 나타났다.

(3) 승강기 고무부품에 대한 특성을 통하여 승강기의 안전과 방진고무부품의 특성변화를 고려하면 방진고무부품은 6년 주기로 교체하는 것이 타당하리라 사료된다.

(4) 고무부품에 대한 가속 열 노화시험을 통해 시간-온도 환산적인 아레니우스 관계식을 도출하여 노화수명을 예측하였다.

(5) 상온에서 스프링상수 변화가 100%일 때 사용수명은 약 6년으로 예측할 수 있었으며 이는 고무부품 특성시험을 통해 얻어진 결과와 유사하게 나타났다.

(6) 승강기 고무부품에 대한 고장 메카니즘 분석과 고무재료에 대한 물성 및 특성변화에 대한 많은 시험 데이터가 확보된다면 고무부품 수명예측 및 신뢰성 향상에 상당한 도움을 줄 수 있으리라 기대된다.

#### 후기

본 연구는 교육과학기술부에서 시행한 “전자부품 신뢰성 설계기술개발” 연구사업결과의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Frederick R. Eirich, 1978, "Science and technology of rubber. *Rubber Div. ACS*.
- (2) A. N. Gent, "Engineering with rubber", 1992, Hanser Publisher.
- (3) L. Mullins, 1969, "Softening of rubber by deformation", *Rubber Chem. & Tech. Vol. 42*, pp. 339-362.
- (4) R.P. Brown, 1979, "Physical testing of rubber", *RAPRA Technical Ltd*.
- (5) R.P. Brown, T. Butler, S.W. Hawley, 2001, "Ageing of rubber", *RAPRA Technical Ltd*.
- (6) E. Meinecke, F. Stuchal, 1989, "Predictive age of elastomers", *Educational symposium No. 23*, Rubber Div., ACS.
- (7) R.P. Brown, T. Butler, S.W. Hawley, 2001, "Ageing of rubber-accelerated heat ageing test results", *RAPRA Tech. Ltd*.