

전동차용 방진고무스프링 특성평가 및 사용수명 예측 Characteristics Evaluation and Useful Life Prediction of Rubber Spring for Railway Vehicle

우창수* 박동철**

Woo, Chang Su, Park, Dong Chul

ABSTRACT

The non-linear properties of rubber material which are described as strain energy function are important parameter to design and evaluate of rubber spring. These are determined by material tests which are uni-axial tension and bi-axial tension. The computer simulation using the nonlinear element analysis program executed to predict and evaluate the load capacity and stiffness for chevron spring. In order to investigate the heat-aging effects on the rubber material properties, the acceleration test were carried out. Compression set 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 compression set test, several useful life prediction for rubber material were proposed.

1. 서론

전동차용 방진고무스프링에 대한 국내 관련기술은 기초 설계 및 해석기술을 비롯한 성능평가의 모든 면에서 매우 취약한 상태로 외국 업체의 부품을 전량 수입에 의존하는 실정으로 기술 보유국으로부터의 기술종속 탈피와 독자기술의 확보를 위해서는 고무 관련기술의 확보가 필요하다 하겠다.

본 연구에서는 전동차의 1차 현가장치용 방진고무스프에 적용되는 고무재료에 대해 단순인장, 이축인장 시험을 통하여 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 결정하였으며 유한요소해석을 통하여 특성과 주요 설계변수의 영향을 파악하였다. 또한, 방진고무재료에 대한 열 노화시험을 통하여 고무재료에 대한 사용수명을 예측하였다. 온도변화에 따른 노화조건은 50°C, 70°C, 85°C, 100°C에서 180일 동안 노화시간을 갖도록 하였으며, 가속 열 노화시험을 위해 압축 줄음률 장치를 이용하여 고무시편 초기높이의 25%를 압축하여 영구 압축 줄음률 시험을 수행한 결과, 노화온도가 높고 노화일수가 증가할수록 높이 변화율은 증가하였다. 사용수명을 판단하기 위한 수명 한계점을 높이 변화율로 하여 절대온도의 역수 값으로 아레니우스 관계식을 유도하여 방진고무재료의 사용수명을 예측한 결과 15%의 높이 변화율이 발생할 때까지의 수명은 약 10년 정도임을 알 수 있었다.

향 후 고무부품의 상태와 사용기간을 고려한 수명평가 방법을 개발하여 적기에 부품 교체를 통하여 이용자의 안전 확보는 물론 전동차 고무부품의 수명향상에 기여하고자 한다.

* 정회원, 한국기계연구원회원, 나노공정장비연구센터, 책임연구원

E-mail : cswoo@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7882 FAX : (042)868-7884

** 정회원, 동명특수고무, 대표이사

2. 방진고무스프링 특성해석

2.1 변형률에너지함수

일반적인 탄성재료는 하중을 가했다가 제거하면 하중과 변형이 선형적인 관계를 유지하는 범위 내에서 원래의 상태로 되돌아오는 탄성거동을 나타낸다. 그러나 고무재료는 일반 탄성체와는 달리 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대 변형 범위에서도 탄성 거동을 나타내는 초 탄성 특성을 지닌다. 이러한 고무재료의 특성은 수치적으로 고무재료의 거동을 나타내는 변형률에너지함수(strain energy function, W)의 계수로 표현할 수 있다[1].

고무분자 사슬의 방향이 처음에는 등방성이지만 재료가 신장됨에 따라 분자 사슬이 방향성을 갖게 되어 이방성이 증가하게 된다. 그러나 이방성의 증가가 변형 방향을 따르므로 재료는 변형이력을 통해 등방성으로 간주된다. 따라서 고무의 변형을 표현하기 위해서는 재료거동은 탄성이며, 등방성이라는 가정 하에 변형률에너지함수(W)는 연신률 불변량(strain invariant)의 함수와 주 연신률(principal stretch)의 함수로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} W &= W(I_1, I_2, I_3) \\ W &= W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주 연신률이며, 재료가 등방성인 경우 I_1, I_2, I_3 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

대부분의 고무재료는 비압축성이므로 체적계수(bulk modulus)는 전단계수(shear modulus)보다 상당히 크며 재료가 많이 구속되어 있지 않는 경우에는 비압축성의 가정이 타당함이 알려져 있다. 비압축성 고무의 변형 해석에 널리 쓰이는 변형률에너지함수는 다음과 같이 연신률불변량의 함수로 표시되는 무너-리블린(Mooney-Rivlin)의 다항식 형태와 주 연신률의 함수로 표시되는 오그덴(Ogden) 형태로 나타낼 수 있다.

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (4)$$

여기서, C_{ij}, μ_n, α_n 는 시험결과로부터 결정되는 재료상수로 단순한 변형을 포함하는 단축 인장시험, 이축인장시험, 전단시험 등으로 얻어지는 응력과 변형률 관계를 이용하여 정해진다.

2.2 고무재료 물성시험

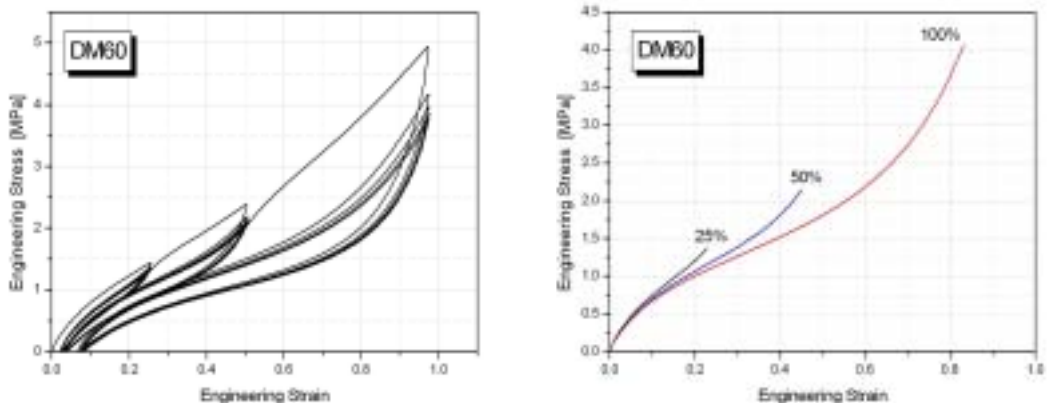
고무부품의 유한요소해석에 필수적인 고무물성 데이터로 이용되는 재료상수 값의 변화에 따라 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 정확성 및 수렴성에도 큰 영향을 끼치게 되므로 정확한 고무재료의 물성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다[2]. 이러한 고무재료의 물성은 변형률 에너지함수의 계수 값으로 표현되는데, 이 계수 값들은 여러 가지 다른 하중상태에서의 재료시험을 통하여 구해진 응력-변형률의 시험결과를 변형률 에너지함수로부터 유도된 응력-변형률 곡선으로 모사하여 시험결과와 계산결과의 차이를 최소화함으로써 결정된다[3,4].

본 연구에서는 전동차용 방진고무스프링에 적용되는 고무재료에 대해 Fig.1에서 보는 바와 같이 단축인장시험과 이축인장시험 및 전단시험을 수행한 결과로부터 응력-변형률 데이터를 이용하여 비선형 재료상수를 결정하였다. 고무재료는 변형률 범위에 따라 물성이 달라지므로 Fig. 2에서와 같이 변형률 25%, 50%, 100%에 대하여 물성시험을 수행하여 각 변형률 범위에서의 물성을 파악하였다. Fig. 2(a)는 반복회수의 증가에 따라 응력이 완화되는 Mullin's effect를 나타내었으며 3~5회 반복 후 물성이 안정화되었으며 변형률이 클수록 강성이 낮아짐을 알 수 있었다. 본 시험에서도 고무재료의 최종 물성으로 사용하기 위해 Fig. 2(b) 같이 안정화된 응력-변형률 곡선을 선택하였다. 시험결과를 이용하여 Table 1과 같이 변형률 범위에 따른 비선형 재료상수 값을 무너-리블린 함수와 오그덴 함수로 결정하였다. 표에서 보는 바와 같이 변형률이 클수록 강성(G)이 낮아짐을 알 수 있었으며 무너-리블린 함수와 오그덴 함수로 구한 재료상수 값들이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었으며, 물성시험을 통해 구해진 비선형 재료상수 값들은 방진고무스프링의 유한요소해석에 물성 데이터로 활용하였다.



(a) Simple tension (b) Equi-biaxial tension (c) Pure shear

Fig. 1 Rubber material tests



(a) Mullin's effect (b) Stress-strain curve

Fig. 2 Mechanical properties test of rubber material

Table 1 Non-linear material properties of rubber material

Material	Strain	Mooney-Rivlin			Ogden						
		C10	C01	G	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	G
DM60	25%	0.868	0	1.736	1.422	3.66e-6	1.471	2.11e-5	1.377	2.514	1.731
	50%	0.743	0	1.486	4.86e-5	0.869	1.662	1.811	0.607	3.04e-5	1.505
	100%	0.615	0.0523	1.334	0.078	4.543	6.874	0.083	1.410	1.234	1.334

2.3 방진고무스프링의 유한요소해석

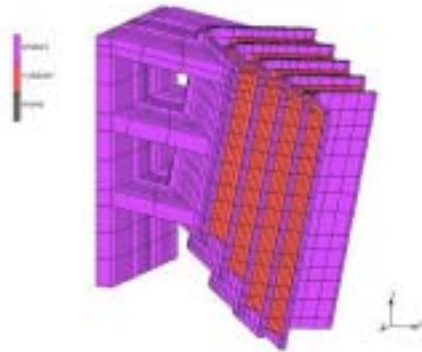
철도차량의 1차 현가장치로 쓰이는 세브론 방진고무스프링은 Fig. 3(a)에서와 같이 금속판재와 고무가 적층되어 있는 구조로 지면으로부터 전달되는 진동을 1차적으로 흡수하는 역할을 하게 되는데 정지 상태에서 정 하중에 따른 수직 방향 강성(vertical stiffness) 뿐만 아니라 출발 및 정지 시의 길이 방향 강성(longitudinal stiffness)과 차량이 방향을 전환할 때 받는 횡 방향 강성(lateral stiffness)을 적절하게 유지시켜 주어야 한다[5,6].

세브론 스프링의 유한요소모델은 3 방향의 해석을 각각 수행해야 하므로 3차원 모델링을 이용하였으며 고무는 Full-Herrmann formulation quad 82(node 8)을 사용하였다. 요소 수는 8114개, 절점수는 10682개이다. Fig. 3(b)는 세브론 스프링의 3차원 유한요소 모델링 형상이다.

사용된 고무는 천연고무로 비압축성으로 가정하여 Table 1과 같이 물상시험을 통해 얻어진 재료상수 값을 이용하였다. 경계조건은 3축 방향에 대한 강성을 고려하기 위해 달리하였는데 수직 방향 하중(vertical force, Fz), 길이 방향 하중(longitudinal force, Fx), 횡 방향 하중(lateral force, Fy)이 각각 작용할 때의 강성을 알아보았다. 세브론 스프링이 장착되는 철도차량은 바퀴 1개당 기관차(motor car)의 경우 공차(Tare) 상태일 때 4000kg, 만차(Crush) 상태 일 때 7500kg의 하중을 받고, 객차(trailer car)의 경우 공차 상태일 때 2950kg, 만차 상태일 때 6500kg의 하중을 받는다.



(a) Chevron rubber spring

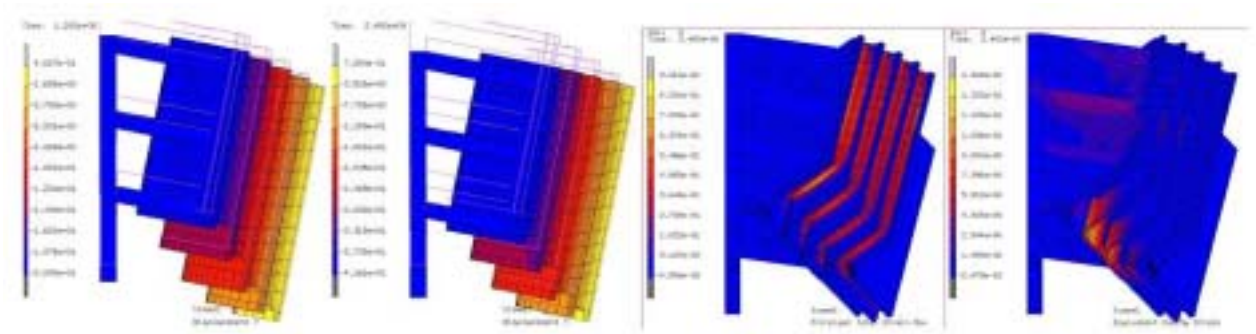


(b) Finite element model

Fig. 3 Configuration and finite element model of chevron rubber spring

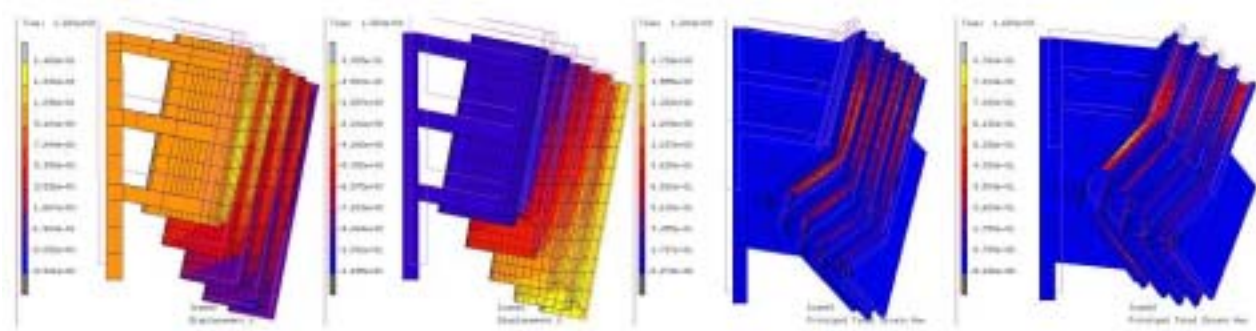
세브론 스프링의 해석은 각 방향의 강성을 구하기 위해서 우선 수직방향 강성을 구하고, 길이방향 강성과 횡 방향 강성은 각각 일정수준(공차, 만차)의 수직하중을 받은 상태에서 추가적인 하중(길이방향 하중, 횡 방향 하중)을 작용시켜 구하였다. 수직방향의 강성을 구하기 위해 대차 프레임 체결부의 상단 부분을 수직-압축방향으로 40mm의 변위를 주었다. Fig. 4(a), (b)는 각각 20mm와 40mm의 수직 압축 변위를 주었을 때의 수직방향 변형 분포이고 Fig. 4(c), (d)는 40mm의 수직 압축 변위를 주었을 때의 최대 주 변형률 및 응력 분포이다. 최대변형률은 Fig.4의 (c)에서 보는 바와 같이 하 단부 첫 번째의 적층 고무 중앙부에서 0.91로 가장 크게 나타났다.

길이 방향 해석에서는 20mm의 수직 변위를 갖는 공차와 37.5mm의 수직 변위를 갖는 만차 상태에서 길이 방향으로 압축 및 인장 변위가 각각 10mm일 때의 세브론 스프링의 지지 하중을 구한다. Fig. 5(a), (b)는 만차 상태에서 길이 방향으로 10mm를 각각 압축과 인장 시 변형 모습이고 Fig. 5(c), (d)는 각각의 최대 주 변형률 분포로 압축에서는 1.73, 인장에서는 0.88로 압축 과정에서 최대 주 변형률이 2 배 이상 크게 나왔다. 횡 방향 해석에서는 길이 방향 해석과 마찬가지로 공차 및 만차 상태의 수직하중이 작용하고 추가적으로 횡 방향 변위가 4mm일 때의 하중을 비교하였다. Fig. 6(a), (b)는 만차 시 횡 방향으로 4mm의 변위를 주었을 때의 변형 및 최대 주 변형률 분포이다. Fig. 6(c) 공차, 만차일 때의 횡 방향 강성은 횡 방향 변위가 커질수록 강성이 조금 증가하는 비선형 특성을 보이고 있지만 요구 특성에 잘 부합되고 있음을 볼 수가 있다.



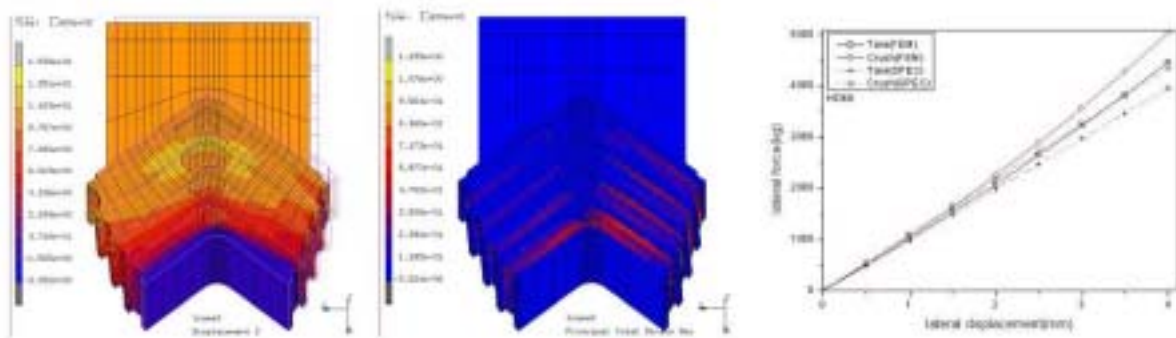
(a) 20mm (b) 40mm (c) Max. principal strain (d) Equivalent stress

Fig. 4 Distribution of strain and stress on vertical load



(a) Compression(10mm) (b) Tension(10mm) (c) Strain (compression) (d) Strain (tension)

Fig. 5 Distribution of strain and stress on longitudinal load



(a) Displacement (b) Max. principal strain (c) Load-displacement

Fig. 6 Distribution of strain and stress on transverse load

3. 방진고무재료 사용수명 예측

3.1 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 사용조건(service condition)과 배합조건(compound recipes) 등이 다양하기 때문에 사용수명을 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히, 실제 사용될 때와 동일한 조건에서의 시험을 설계하여 수명을 예측하기란 매우 어려운 문제이다.[7]

본 연구에서는 고무재료에 대한 수명예측을 위해 열 노화시키는 가속방법을 선택하여 가속시험을 통해 얻어진 데이터로 아레니우스(Arrhenius) 모델을 이용하여 수명을 예측하였다. 아레니우스 모델은 여러 온도에서 고무제품의 초기 특성 값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 마스터 커브 및 관계식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정 온도에서 예측 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(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{dP}{dt} = kP \quad \text{즉,} \quad \ln\left[\frac{P}{P_0}\right] = -kt \quad (5)$$

여기서, P : 고무특성 값, P_0 : 노화 전 고무특성 값, t : 시간, k : 반응속도정수(reaction rate)

식(5)에서 반응속도정수 k 는 특성 값 P 의 노화반응을 나타내는 정수로 1889년 S. Arrhenius는 식(6) 및 (7)과 같은 실험식을 구하였다.

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (6)$$

$$\ln k(T) = -\frac{E}{RT} + C \quad (7)$$

A , C : 상수, E : 활성화 에너지(activation energy, J/mol),

R : 기체상수(gas constant, 8.314J/mol·K), T : 절대온도(absolute temperature, K)

식(7)에서 $\ln k(T)$ 는 $1/T$ 와 기울기가 E/R 인 선형적인 관계를 보인다. 식(5)에서 노화시킨 특성값 P 가 있는 시점을 수명이라고 하면 그 시점의 수명 t 는 식(8)을 통하여 얻을 수 있다.

$$t = -\ln(P/P_0)/k \quad (8)$$

식(8)에서 수명 t 는 반응속도정수 관계식 (6)로부터 온도의 관계로 표현되어 수명의 온도 환산이 가능해진다. 특성 값 P 로 온도 T_1 에서의 수명 t_1 은 온도 T_2 에서의 수명 t_2 와 같은 것이 되어 이것을 식으로 표현하면 식(9)와 같다.

$$\ln\left[\frac{t_1}{t_2}\right] = \frac{E}{R}\left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right] \quad (9)$$

3.2 가속 열 노화시험

가속 열 노화시험을 위해 압축 줄음률 장치를 이용하여 시편 초기 높이의 25%를 압축하여 압축 영구 줄음률 시험을 수행하였다. 압축된 고무시편은 50°C, 70°C, 85°C, 100°C의 환경 챔버에서 180일까지 일정기간동안 압축된 상태로 두어 열 노화시켰다. 주어진 시간이 경과된 후 시편을 꺼내어 압축장치로부터 분리한 후 상온에서 30분간 방치하였다. 이 시간 동안 시편의 두께는 초기 압축상태보다 일정량 회복하여 두께가 약간 증가되는데 이 때의 두께를 측정하였다. 시편의 초기 두께와 노화시킨 후 두께를 이용하여 식(10)과 같이 압축 영구 줄음률(compression set)을 계산하였다.

$$\text{Compression Set}(\%) = \frac{t_0 - t_r}{t_s} \times 100 \quad (10)$$

t_0 : 초기 두께(mm), t_r : 노화 후 두께(mm), t_s : 초기 압축량

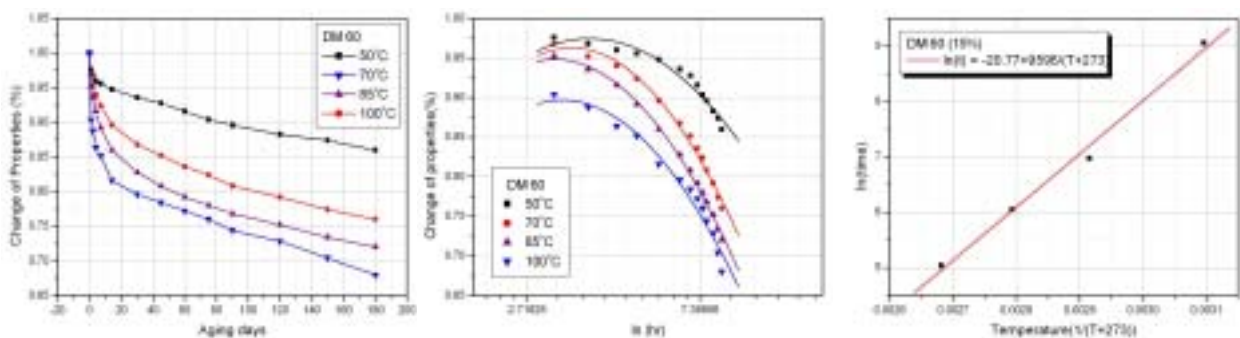
Fig. 7(a)는 노화일수와 온도변화에 따른 두께변화를 나타낸 것으로 온도가 높고 노화일수가 증가할수록 변화율이 증가하였으며, Fig. 7(b)는 온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위해 x축의 시간을 대수 값으로 선형화시켰으며 y축은 압축 영구 줄음률을 무 차원 시켜 초기상태를 기준으로 변화된 값을 나타내었다. 고무재료의 사용수명을 두께 변화율의 10%, 15%라고 한다면 온도와 시간 관계로부터 식(11), (12)와 같은 아레니우스 관계식을 얻을 수 있었다. 시간 - 온도 관계식인 아레니우스 결과 식을 이용하면 임의의 온도에서 사용할 수 있는 수명을 Table 2와 같이 구할 수 있다. 계산되어 예측된 고무재료의 노화수명은 상온 25°C에서 약 10년 정도임을 알 수 있었다.

$$\ln(t) = -22.08 + \frac{9564}{(T+273)} \quad (11)$$

$$\ln(t) = -20.77 + \frac{9596}{(T+273)} \quad (12)$$

Table 2 Prediction useful life of rubber material from Arrhenius equation

Material	Change of properties (%)	Useful life (room temperature)		
		Life (hr)	Life (days)	Life (years)
DM 60	10	22,247	927	2.5
	15	920,419	3,835	10.5



(a) Thickness

(b) Change of properties

(c) Arrhenius plot

Fig. 7 Arrhenius plot of rubber material

4. 결론

전동차용 방진고무스프링 특성평가 및 사용수명 예측에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방진고무스프링에 적용되는 고무재료에 대한 단순인장시험과 이축이장시험 및 전단시험을 수행하여 물성을 파악하였으며 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 구하였다.
- (2) 전동차용 세브론 스프링에 대한 유한요소해석을 통하여 수직방향, 길이방향, 횡 방향의 특성을 예측하였으며 최대변형률과 최대응력이 발생하는 취약부위를 파악하였다.
- (3) 고무재료에 대한 수명예측을 위해 열 노화시키는 가속방법을 선택하여 가속시험을 통해 얻어진 데이터로 아레니우스 모델을 이용하여 수명을 예측하였다
- (4) 고무재료의 두께 변화율이 15%일 때를 사용수명으로 정의하면 아레니우스 관계식으로부터 상온 25°C에서 약 10년 정도임을 알 수 있었다
- (5) 본 연구를 통하여 전량 외국에서 수입하여 사용되는 전동차용 방진고무스프링에 대해 전산 시뮬레이션을 통해 미리 스프링 특성을 예측하고 평가하는 해석기술 확보로 독자적인 설계능력 향상으로 시제품 제작에 드는 막대한 시간과 경비를 줄일 수 있었고, 또한 고무부품의 사용수명 예측기술 확보로 성능 및 신뢰성 향상에 크게 기여하리라 사료된다.

후 기

본 연구는 중소기업청 산학연 공동기술개발사업 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

- [1] A. N. Gent, R. P. Champion, G. J. Lake, etc., "Engineering with Rubber", Hanser Pub., 1992.
- [2] Treloar L. R. G., "The Physics of Rubber Elasticity", 3rd ed., Clarendon press-Oxford, 1975.
- [3] Brown R. P, "Physical Testing of Rubber", 3rd ed., Chapman & Hall, 1990.
- [4] Mal Ajiz K, "Deformation of Elastic Solids", Prentice Hall, p. 162, 1990.
- [5] Antoun N, etc., "Applications of a Major FEM Code to the Stress Analysis of Rubber Parts", KGK 48, 1995.
- [6] Kurt Miller, "Testing Elastomers for Hyper elastic Material Models in Finite Element Analysis", Axel Products Testing and Analysis Report, 2000.
- [7] R. P. Brown, T. Burtler and S. W. Hawley, "Ageing of Rubber-Accelerated Heat Ageing test Results", RAPRA Technology. 2001.