

철도차량 완충기 패드용 고무소재 수명예측

Useful Lifetime Prediction of Coupling Rubber Pad for Railway Vehicles

우창수* 박현성* 박동철**
Woo, Chang-Su Park, Hyun-Sung Park, Dong-Chul

ABSTRACT

Coupling rubber pad are important components in railway vehicles. It can be used for reduce shock, vibration and noise. Simple tension, equi-biaxial tension and pure shear test were performed to acquire the coefficient of rubber material which were Mooney-Rivlin and Ogden model. The finite element analysis was executed to evaluate the behavior of deformation and stress distribution by using the commercial finite element analysis code. Useful life evaluation are very important in design procedure to assure the safety and reliability of the rubber components. In this paper, useful life prediction of rubber pad for railway vehicle were experimentally investigated. Accelerated heat-aging test for rubber material were carried. 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.

1. 서 론

철도차량에 사용되는 완충기는 주행 시 안정성과 충격흡수로 차량부품에 대한 손상을 방지하는 중요한 역할을 담당하며 승객과 차량의 안전운행에 직결되므로 신뢰성이 요구되는 부품이다. 본 연구에서는 완충기 패드에 사용되는 고무소재의 사용수명을 예측하기 위해 압축줄음률장치를 이용하여 두께 12.7mm, 지름 약 29mm의 원기둥형 고무시편의 초기 높이의 25%를 압축하여 영구 압축 줄음률시험을 수행하였다. 압축된 고무시편은 50°C, 70°C, 85°C, 100°C의 환경 챔버에서 90일 동안 방치하여 열 노화시킨 후, 주어진 시간이 경과한 뒤 고무시편을 챔버에서 꺼내어 압축장치로부터 분리 한 후 상온에서 4시간 방치하였다. 이 시간 동안 고무시편의 높이는 초기 압축 상태보다 일정량 회복하여 높이가 약간 증가하게 되는데 이때의 높이와 경도를 측정하여 영구 압축변화율과 경도변화율을 계산하였다. 노화온도가 높고 노화시간이 길수록 두께와 경도변화가 크게 나타남을 알 수 있었으며, 온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위하여 x축의 시간을 대수값으로 선형화 시켰으며 y축은 영구압축줄음률을 무차원화 시켜 초기상태를 기준으로 변화된 값을 나타내었다. 사용수명의 한계점을 15%의 압축 영구줄음률로 하여 절대온도의 역수 값으로 아레니우스 선도를 구할 수 있고 최소 자승법(least square method)으로부터 아레니우스 관계식을 도출하였다. 구해진 아레니우스 결과 식을 이용하여 임의의 온도에서 사용할 수 있는 실제 상당 년 수를 구 할 수 있는데, 상온 25°C에서 두께 변화율이 15%일 때 고무재료의 사용수명은 약 9.3년 정도로 예측할 수 있으며, 고무경도 변화에 따른 사용수명은 상온 25°C에서 경도 변화율이 10%일 때 고무재료의 사용수명은 약 5.2년 정도로 예측할 수 있었다. 본 연구를 통해 고무소재의 사용수명 예측방법을 정립하였으며 좀 더 많은 시험데이터와 실제 사용부품에 대한 특성 데이터가 축적된다면 고무부품의 사용수명 예측에 상당한 도움이 되리라 사료된다.

* 한국기계연구원, 나노공정장비연구센터,정희원

E-mail : cswoo@kimm.re.kr

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

** 디엠에스알(DMSR)

2. 고무소재 물성시험 및 완충기 패드 특성해석

2.1 변형률 에너지함수

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 데 변형 범위에서도 탄성 거동을 나타내는 초 탄성 특성을 지닌다. 이러한 고무재료의 특성은 수치적으로 고무재료의 거동을 나타내는 변형률에너지함수의 계수로 표현할 수 있다[2]. 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(strain energy function, W)는 연신률 불변량(strain invariant)의 함수와 주 연신률(principal stretch)의 함수로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (1)$$

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

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (2)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

대부분의 고무재료는 비압축성이므로 체적계수는 전단계수보다 상당히 크며 재료가 많이 구속되어 있지 않는 경우에는 비압축성의 가정이 타당함이 알려져 있다. 비압축성 고무의 변형 해석에 널리 쓰이는 변형률 에너지함수는 다음과 같이 연신률 불변량의 함수로 표시되는 무너-리블린(Mooney-Rivlin)의 다항식 형태와 주 연신률의 함수로 표시되는 오그덴(Ogden) 형태로 나타낼 수 있다.

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

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

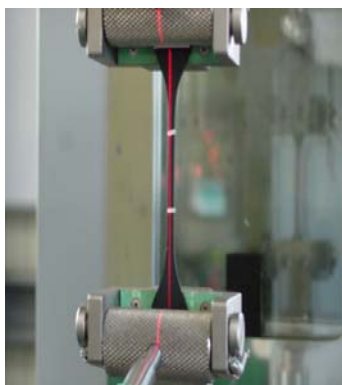
여기서, C_{ij}, μ_n, α_n 는 시험결과로부터 결정되는 재료상수로 단순한 변형을 포함하는 단축 인장시험, 이축인장시험, 전단시험 등으로 얻어지는 응력과 변형률 관계를 이용하여 정해진다.

2.2 고무소재 물성시험

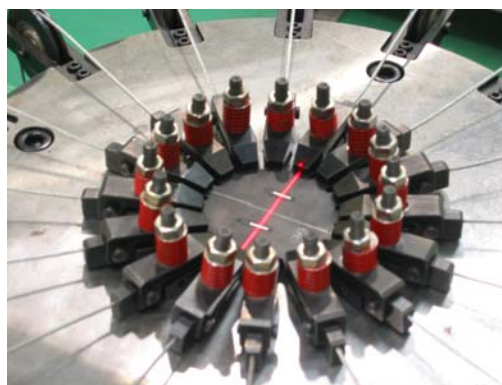
고무부품의 유한요소해석에 필수적인 고무물성 데이터로 이용되는 재료상수 값의 변화에 따라 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 정확성 및 수렴성에도 큰 영향을 끼치게 되므로 정확한 고무재료 물성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다[2]. 이러한 고무재료의 물성은 변형률 에너지함수의 계수 값으로 표현되는데, 이 계수 값들은 여러 가지 다른 하중상태에서의 재료시험을 통하여 구해진 응력-변형률의 시험결과를 변형률 에너지함수로부터 유도된 응력-변형률 곡선으로 모사하여 시험결과와 계산결과의 차이를 최소화함으로써 결정된다[3,4]. 본 연구에서는 전동차용 방진고무스프링에 적용되는 고무재료에 대해 그림 1에서 보는 바와 같이 단축인장시험과 이축인장시험 및 전단시험을 수행한 결과로부터 응력-변형률 데이터를 이용하여 비선형 재료상수를 결정하였다. 고무재료는 변형률 범위에 따라 물성이 달라지므로 그림 2에서와 같이 변형률 25%, 50%, 100%에 대하여 물성시험을 수행하여 각 변형률 범위에서의 물성을 파악하였다. 그림 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 그림 2(b) 같이 안정화된 응력-변형률 곡선을 선택하였다. 시험결과를 이용하여 표 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.

표 1. 고무재료의 비선형 재료상수

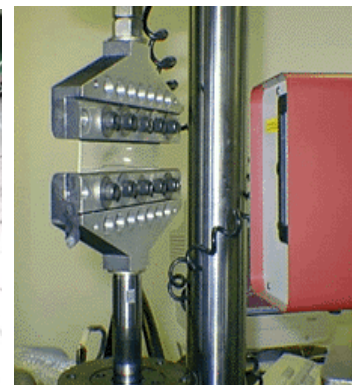
변형률	Mooney-Rivlin 2항			Ogden 3항						
	C10	C01	Gm	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	Go
25%	0.868	0	1.736	1.422	3.6e-6	1.471	2.1e-5	1.377	2.514	1.731
50%	0.743	0	1.486	4.8e-5	0.869	1.662	1.811	0.607	3.0e-4	1.505
100%	0.615	0.0523	1.334	0.078	4.543	6.874	0.083	1.410	1.234	1.334



(a) 단축인장시험

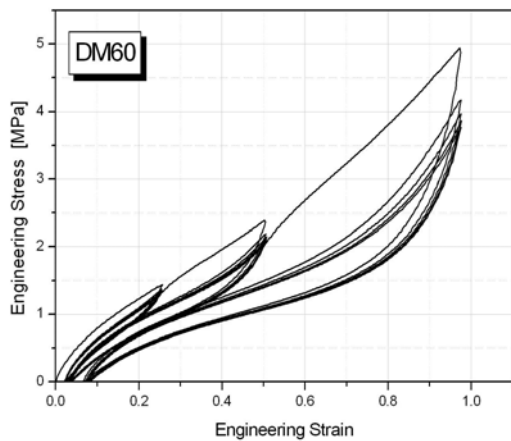


(b) 이축인장시험

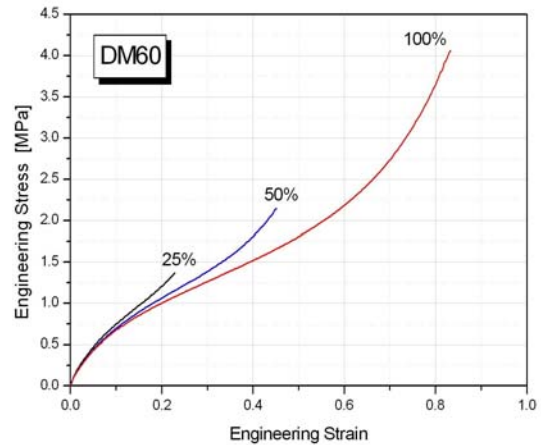


(c) 순수 전단시험

그림 1. 고무재료 물성시험



(a) 물린스 효과

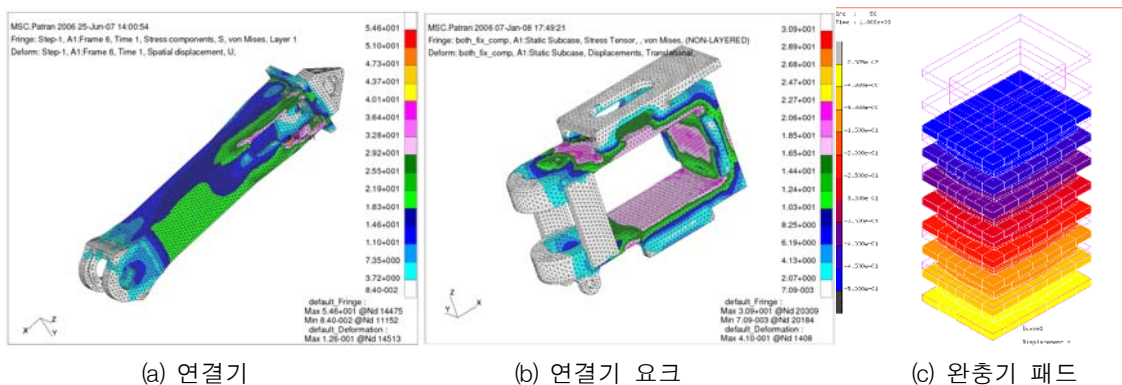


(b) 응력-변형을 선도

그림 2. 고무재료의 기계적 특성 선도

2.3 완충기 패드 특성해석

기계부품에 대한 구조 및 특성해석은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하고 최적설계를 하기 위해 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 철도차량에 사용되는 연결기 구조부품 및 완충기 패드에 대해 유한요소해석을 수행하여 강도 및 특성을 평가하였다. 그림 3(a)는 연결기에 100톤의 압축하중이 작용할 때 연결기의 응력분포를 나타낸 것으로 최대응력은 중앙 절단부위에서 5.46kg/mm^2 이 발생하였으며, 그림 3(b)는 연결기 요크에 발생하는 최대응력을 나타낸 것으로 압축하중이 작용하는 면에서 30.9 kg/mm^2 이 발생하였으나 연결기 소재인 SCC 60의 항복강도에 비하면 안전하게 나타나 정상적인 작동 하에서는 구조적으로 안전하리라 판단된다. 그림 3(c)는 하중조건에 따른 완충기 패드의 변형을 나타낸 것으로 형상 및 고무소재의 변화에 따라 완충기 특성을 파악하였다. 완충기 패드에 사용된 고무물성은 앞에서 구한 고무소재의 비선형 재료상수 값을 이용하였다.



(a) 연결기

(b) 연결기 요크

(c) 완충기 패드

그림 3. 연결기 구조부품의 유한요소 해석

3. 원충기 패드 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 및 사용조건과 배합조건 등이 다양하기 때문에 사용 수명을 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 가속 방법을 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.

$$-\frac{dP}{dt} = kP, \ln\left[\frac{P}{P_0}\right] = -kt \quad (4)$$

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

식(4)에서 반응속도정수 k 는 특성 값 P 의 노화반응을 나타내는 정수로 1889년 S. Arrhenius는 식(5) 및 (6)과 같은 실험식을 구하였다.

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (5)$$

$$\ln k(T) = -\frac{E}{RT} + C \quad (6)$$

여기서, A, C : 상수, E : 활성화 에너지(J/mol), R : 기체상수(8.314J/mol·K), T : 절대온도(K)

식(6)에서 $\ln k(T)$ 는 $1/T$ 와 기울기가 E/R 인 선형적인 관계를 보인다. 식(4)에서 노화시킨 특성값 P 가 있는 시점을 수명이라고 하면 그 시점의 수명 t 는 식(7)을 통하여 얻을 수 있다.

$$t = -\ln(P/P_0)/k \quad (7)$$

식(7)에서 수명 t 는 반응속도정수 관계식 (5)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(8)과 같다.

$$\ln\left[\frac{t_1}{t_2}\right] = \frac{E}{R}\left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right] \quad (8)$$

3.2 가속 열 노화시험

철도차량용 완충기 패드에 사용되는 고무소재에 대한 사용수명을 예측하기 위해 가속 열 노화시험을 위해 그림 4에서 보는 바와 같이 압축 줄음률 장치를 이용하여 고무시편 초기 높이의 25%를 압축하여 압축 영구 줄음률 시험을 수행하였다. 압축된 고무시편은 50°C, 70°C, 85°C, 100°C의 환경 챔버에서 90일까지 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 이때의 두께를 측정하였다. 시편의 초기 두께와 노화시킨 후 두께를 이용하여 식(9)와 같이 압축 영구 줄음률(compression set)을 계산하였다.

$$\text{Compression set} = \frac{t_0 - t_r}{t_s} \times 100 \quad (9)$$

여기서, t_0 : 초기 두께, t_r : 노화 후 두께, t_s : 초기 압축량

그림 5는 노화온도와 시간에 따른 두께변화를 나타낸 것으로 온도가 높고 노화시간이 길수록 두께변화가 크게 나타남을 알 수 있었으며, 온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위하여 그림 6과 같이 x축의 시간을 대수값으로 선형화 시켰으며 y축은 영구압축줄음률을 무차원화 시켜 초기상태를 기준으로 변화된 값을 나타내었다. 고무재료의 사용수명을 영구압축줄음률의 변화율이 10%라고 한다면 그림 7과 같은 아레니우스 선도를 구할 수 있고 최소 자승법(least square method)으로부터 아레니우스 관계식이 표 2와 같이 얻어진다. 구해진 아레니우스 결과 식을 이용하여 임의의 온도에서 사용할 수 있는 실제 상당 년 수를 구할 수 있으며, 상온 25°C에서 두께 변화율이 15%일 때 고무재료의 사용수명은 약 9.3년 정도로 예측할 수 있다. 다음은 고무경도 변화에 따른 사용수명을 예측하기 위해 두께변화에 따른 수명예측 방법을 이용하였다. 그림 8은 노화온도와 시간에 따른 경도변화를 나타낸 것으로 온도가 높고 시간이 길수록 경도가 증가함을 알 수 있었다. 아레니우스 관계식을 이용하여 경도변화에 따른 고무재료의 사용수명예측 선도를 그림 9와 같이 얻을 수 있으며 표 3에서 구해진 사용수명 예측식을 이용하면 상온 25°C에서 경도 변화율이 10%일 때 고무재료의 사용수명은 약 5.2년 정도로 예측할 수 있다.

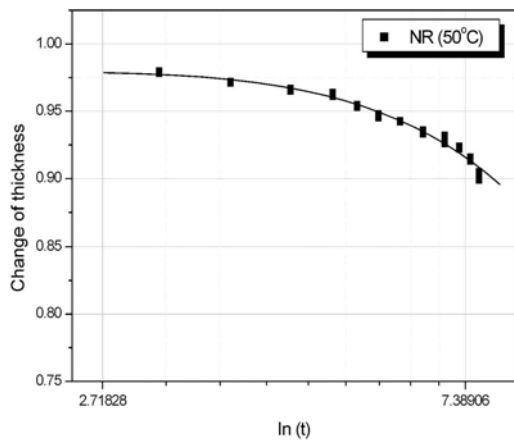


(a) 노화시험기

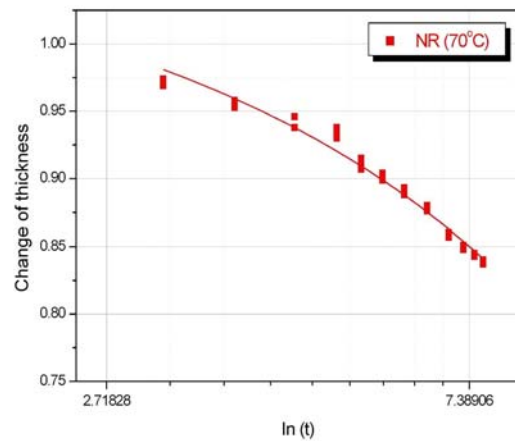


(b) 영구 압축 줄음률 시험장치

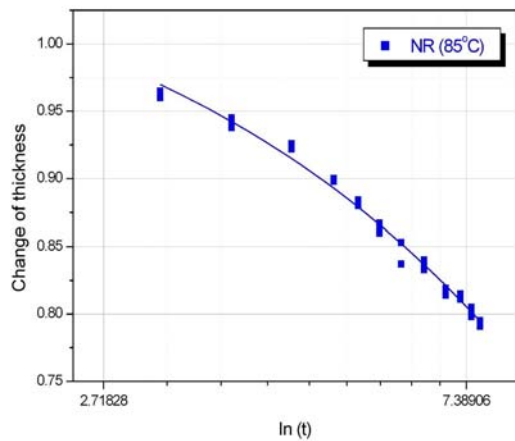
그림 4. 열 노화 가속시험



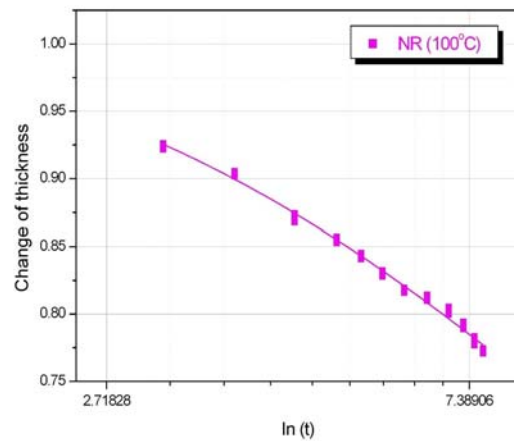
(a) 50°C



(b) 70°C

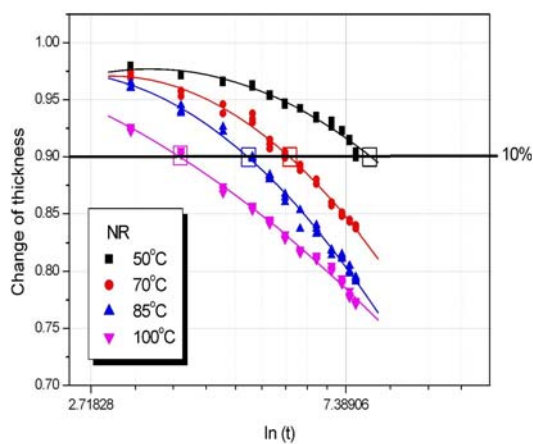


(c) 85°C

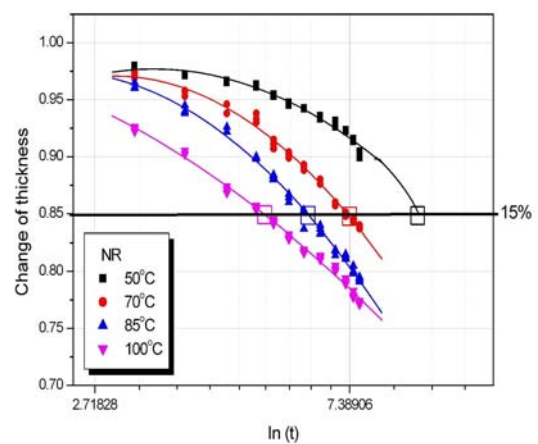


(d) 100°C

그림 5. 노화시간과 온도에 따른 두께변화

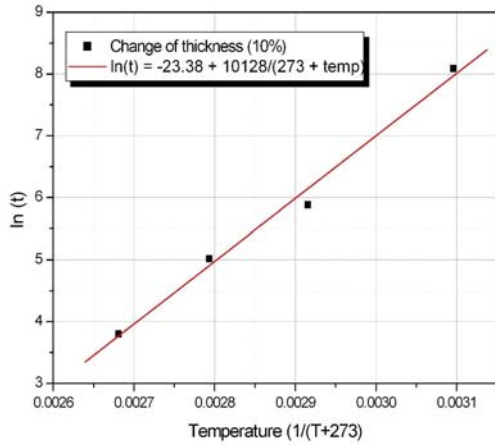


(a) 두께변화 10%

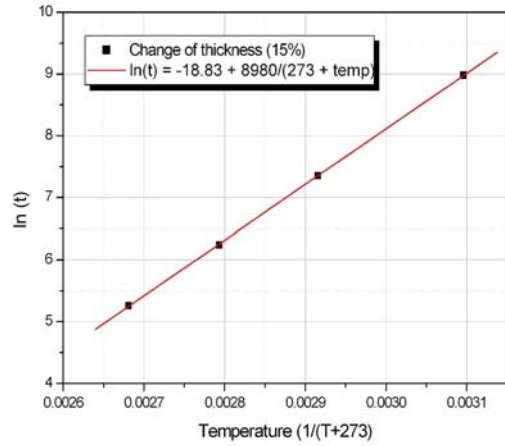


(b) 두께변화 15%

그림 6. 두께변화율과 사용시간과의 관계선도

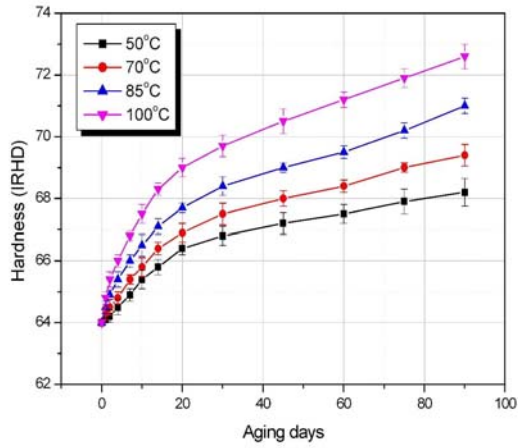


(a) 두께변화 10%

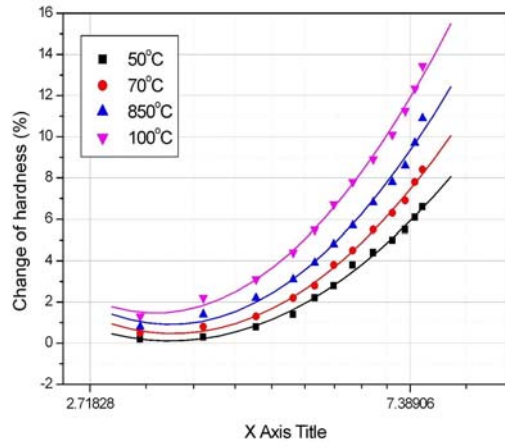


(b) 두께변화 15%

그림 7. 두께변화에 따른 고무소재 사용수명예측 선도

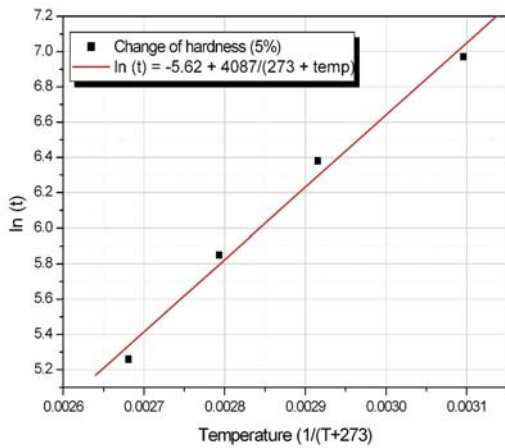


(a) 경도변화

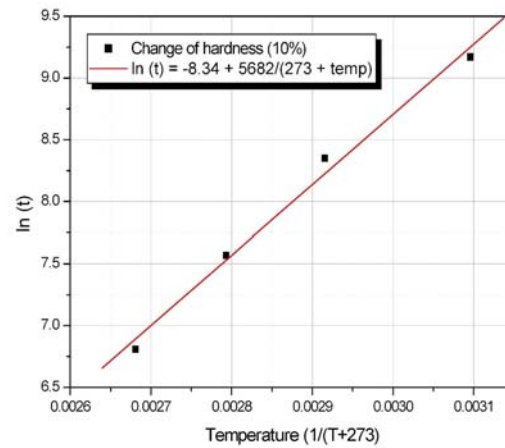


(b) 경도변화율

그림 8. 노화온도 및 시간에 따른 경도변화



(a) 경도변화 5%



(b) 경도변화 10%

그림 9. 경도변화에 따른 고무소재 사용수명예측 선도

표 2. 두께변화에 따른 고무소재 사용 수명예측

소재	두께변화율	사용 수명예측식	사용온도 (25°C)		
			시간	일수	년수
완충기패드 (NR)	10%	$\ln(t) = -23.38 + 10128/(T+273)$	43,477	1,811	5.0
	15%	$\ln(t) = -18.83 + 8980/(T+273)$	80,821	3,367	9.3

표 3. 경도변화에 따른 고무소재 사용 수명예측

소재	경도변화율	사용 수명예측식	사용온도 (25°C)		
			시간	일수	년수
완충기패드 (NR)	5%	$\ln(t) = -5.62 + 4087/(T+273)$	3,278	136	0.5
	10%	$\ln(t) = -8.34 + 5682/(T+273)$	45,569	1,898	5.2

4. 결론

철도차량용 연결기 및 완충기 패드의 특성 및 사용수명 예측에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 완충기 패드에 사용되는 고무소재에 대한 단순인장시험과 이축이장시험 및 전단시험을 수행하여 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 구하였다.
- (2) 철도차량용 연결기 구조부품에 대한 구조해석을 수행하여 강도를 평가한 결과, 정상적인 작동 하에서는 구조적으로 안전하리라 판단되며, 완충기 패드의 형상과 고무소재의 변화에 따른 특성해석을 수행하여 완충기 패드의 변형 및 특성을 파악하였다.
- (3) 완충기 패드에 사용되는 고무소재에 대한 수명예측을 위해 열 노화 가속시험을 통해 얻어진 데이터로 아레니우스 모델을 이용하여 사용수명 식을 도출하였다. 고무 두께변화율이 15%일 때를 사용수명으로 정의하면 아레니우스 관계식으로부터 상온 25°C에서 약 9.3년 정도임을 알 수 있었으며, 경도변화율이 10%일 때 사용수명은 약 5.2년 정도로 예측할 수 있었다.
- (4) 철도차량용 구조부품 및 완충기 패드에 대한 특성을 예측하고 평가하는 해석기술 확보로 제품개발에 드는 막대한 시간과 경비를 줄일 수 있었고, 또한 완충기 패드의 사용수명 예측기술 확보로 성능 및 신뢰성 향상에 크게 기여하리라 사료된다.

감사의글

본 연구는 중소기업청에서 시행한 산학연 공동기술개발사업결과의 일부임을 밝히며 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

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