

모터팬 방진고무부품의 노화수명 예측

김 완 두[†] · 김 완 수 · 우 창 수 · 조 상 준*

한국기계연구원 고무역학연구실, *신성이엔지 기술연구소
(2002년 2월 2일 접수, 2002년 2월 20일 수정, 2002년 2월 25일 채택)

Prediction of Useful Life by Heat Aging of Motor Fan Isolating Rubber

W. D. Kim, W. S. Kim, C. S. Woo, S. J. Cho*

Rubber Mechanics Lab., Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea

*R&D Center, Shinsung Eng Corporation, Seongnam 463-420, Korea

(Received February 2, 2002, Revised February 20, 2002, Accepted February 25, 2002)

요 약 : 청정실(Clean room)에 사용되는 환기팬용 모터의 방진고무부품의 수명을 예측하기 위해서 가속 열 노화 시험을 수행하였다. 방진고무부품은 EPDM으로 만들었다. 노화 수명을 판단하기 위한 한계점을 20%의 압축 영구 줄임률로 하여 절대 온도의 역수 값으로 아레니우스 선도를 유도하였다. 아레니우스 관계식으로부터 방진고무부품의 다양한 온도에서의 수명과 활성화에너지를 구하였다. 그리고 수명을 판단하는데 있어 상당한 시간을 대체할 수 있는 가속 시험법을 설계하였다. 또한 방진고무부품에 첨가되는 노화 방지제가 수명에 미치는 영향을 알아보았다.

ABSTRACT : This paper discusses the accelerated heat aging tests were carried out to predict the useful life of EPDM isolating rubber components of ventilation fan motor for clean room. 20% compression set results changes as the threshold are used for assessment of the useful life and the time to threshold value were plotted against reciprocal of absolute temperature to give the Arrhenius plot. The useful life at variable temperatures and activation energy are obtained from the Arrhenius relationship. An accelerated test program to assess useful life can be represented an appreciable investment in time was designed. We also considered the effect of antioxidant agents.

Keywords : Isolating Rubber Component, Compression Set, Arrhenius Relationship, Accelerated Test, Life Prediction

I. 서 론

고무제품에 대한 가장 많은 질문 중에 하나는 내구성에 대한 신뢰도 문제로 얼마나 오래 쓸 수 있는냐이다. 그러나, 일반적인 고무제품은 사용환경이나 조건이 복잡하고 수명 예측에 필요한 데이터가 절대적으로 부족하기 때문에 고무제품의 기

대 수명을 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 고무제품은 온도, 습도, 오존, 빛, 유체, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자(degradation factors), 사용조건(service condition)과 배합 조건(compound recipes) 등이 다양하다. 특히, 실제 사용될 때와 동일한 조건에서의 시험을 설계하여 수명을 예측하기란 매우 어려운 문제이다.¹

고무제품의 수명을 판단하는 방법에는 크게 세 가지가 있다. 첫째, 실제 고무제품을 필요한 곳에

[†]대표저자(e-mail : wdskim@kimm.re.kr)

사용하여 수명을 직접 판단하는 것인데 시간이 너무 많이 소요되는 단점이 있다. 둘째, 경험(experience)에 의한 방법으로 이는 오랜 시간 동안 관련된 고무제품을 다룬 기술자가 필요하다. 마지막으로, 실제 사용 환경이나 조건보다 가혹하게 시험을 수행하는 가속시험(accelerated test) 방법으로 비교적 빠른 시간에 제품의 수명을 판단할 수 있지만 예측 오차가 발생할 수 있다.

가속시험은 고무제품의 수명을 판단하는데 이용되기도 하지만 항상 수명을 예측하는 데에만 사용되지는 않는다. 실제로 가속시험이 주로 사용되는 곳은 고무제품이 요구조건(specifications)에 잘 부합하는지 즉, 고무제품의 품질을 판단하는데 더 많이 사용된다.

가속시험의 기본 개념은 특성저하 인자의 수준을 증가시켜 고무제품의 특성이나 성능을 감소시키는 것으로, 사용온도를 높게 하여 고무제품의 노화속도를 빠르게 하거나 오존농도를 증가시켜 균열이 보다 빠르게 진행되도록 하는 것이다. 본 논문에서는 여러 특성저하 인자 중에서 가장 주요한 인자인 온도만을 고려하여 실제 제품이 사용되는 곳의 온도 보다 높은 오븐에서 열 노화(heat aging)시키는 가속 시험 방법을 선택하였다.

가속 시험을 통하여 얻어진 데이터로 고무제품의 수명을 예측하는 방법에는 아레니우스(Arrhenius) 모델과 WLF(Williams Landel Ferry) 모델이 있다.² 아레니우스 모델은 여러 온도에서 고무제품의 초기 특성값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 master curve 및 관계식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정 온도에서 예측 수명을 계산할 수 있으며 상온에서의 자연노화(natural aging)에 의한 수명을 가속 시험 결과로 얻어진 데이터를 이용하여 예측할 수 있다.³

WLF 모델은 여러 온도에서의 시간-특성값의 데이터를 시간-온도 중첩(superposition)의 원리를 기본으로 하여 master curve를 구하는 것이다. 즉, 기준 온도(reference temperature)에서 시간-특성치의 관계를 얻는 것이다. 따라서 WLF는 수명시간을 직접 계산하여 예측하기보다는 기준 온도에서 시간에 따른 특성값의 변화를 알아보는데 유용한 모

델이다.

이 가운데 아레니우스 모델은 비교적 간단하면서 효과적으로 수명을 예측할 수 있어 본 논문에서는 청정실에 사용되는 환기팬용 모터의 방진고무부품(isolating rubber)의 수명을 아레니우스 모델에 적용하여 예측하였다. 그리고 얻어진 아레니우스식으로부터 새로운 가속 시험을 설계하였으며 제품에 첨가되는 노화방지제(antioxidant agent)가 수명에 어느 정도의 영향을 미치는 지를 알아보았다.

II. 아레니우스 관계식

가속 시험에 앞서 아레니우스 관계식에 대해서 알아보기 위해 노화 반응에서 고무의 특성값을 P 라고 하면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

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

P : 고무의 특성값,

P_0 : 노화전 고무의 특성값, t : 시간,

k : 반응속도정수(reaction rate)

식 (1)에서 반응속도정수 k 는 특성값 P 의 노화 반응을 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 (3)에서 $\ln k(T)$ 는 $1/T$ 와 기울기가 E/R 인 선형적인 관계를 보인다. 식 (1)에서 노화시킨 특성값 P 가 있는 시점을 수명이라고 하면 그 시점의 수명 t 는 식 (4)를 통하여 얻을 수 있다.

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

식 (4)에서 수명 t 는 반응속도정수 관계식 (2)로부터 온도의 관계로 표현되어 수명의 온도 환산이 가능해 진다. 특성값 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 (5)와 같다.

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

다시 말하면 저온-장시간의 변화는 고온-단시간의 변화와 같게 되어 상온에서 수년의 변화를 고온 가속 노화로 단 시간에 평가하는 것이 가능하다.

Ⅲ. 가속 시험

1. 재료 및 시편제작

Figure 1은 청정실에 사용되는 환기팬용 모터의 모습으로 바닥에 방진고무부품이 장착되어 있다. 방진고무부품은 EPDM으로 제조하였으며 모양은 Figure 2와 같으며 총 4개의 고무부품이 한 세트로 모터에 장착되어 있다. 고무 부품의 시편은 실제 방진고무부품을 실험의 편의상 두 부분으로 절단하여 그 중 한 쪽 부분을 시편으로 제작하였다. 이 시편을 실제 환기팬용 모터에 적용될 때와 같은 압축량을 주기 위하여 Figure 3과 같이 시편을 볼트와 와셔 사이에 삽입 후 너트를 조여 초기 두께로부터 2mm 압축하여 영구 줄음률 시험장치를 제작하였다.

2. 가속 열 노화 시험

압축된 시편은 시험 결과의 신뢰도를 위하여 3개씩 한 세트를 동일한 조건에서 시험을 하였다. 노화 시험기는 온도 오차가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내인 싱글 챔버(single chamber) 형식의 오븐(oven)을 사용 하였다. 설정 온도는 50, 70, 90, 110°C 에서 각각 1, 2, 3, 5, 7, 14, 30, 45, 60, 90여 일 까지 일정 기간 동안 압축 된 상태로 두어 열 노화(heat aging)시켰다.

3. 압축 영구 줄음률 측정

주어진 시간이 경과된 후 시편을 오븐에서 꺼내

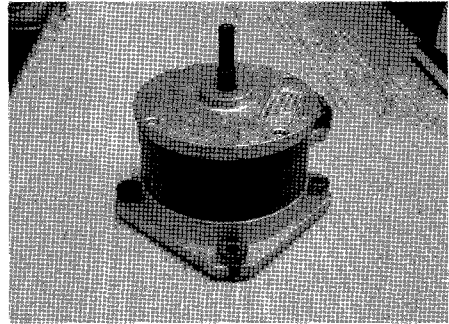


Figure 1. Cooling fan motor

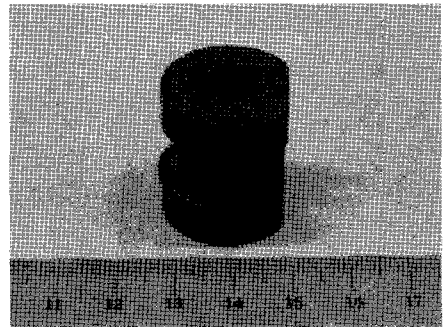


Figure 2. Isolating rubber component

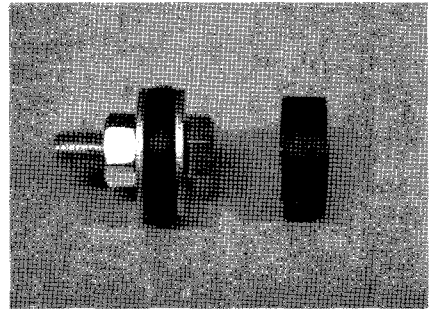


Figure 3. Compression set test device

어 압축 장치로부터 분리 한 후 상온에서 30분간 방치하였다. 이 시간 동안 부품의 두께는 초기 압축상태보다 일정량 회복하여 두께가 약간 증가하게 되는데 이 때의 두께를 측정하였다.⁴ 시편의 초기 두께와 노화시킨 후 두께를 이용하여 식 (6)과 같이 압축 영구 줄음률(compression set)을 계산하였다.

$$\text{compression set}(\%) = \frac{t_0 - t_r}{t_s} \times 100 \quad (6)$$

t_0 : 부품의 초기 두께(mm),

t_r : 노화시킨 후 두께(mm),

t_s : 초기 압축량(2mm)

IV. 결과 및 고찰

1. 시험결과 및 수명 예측

Figure 4는 먼저 가속 노화 실험 전의 시편의 경도(shore A)를 측정 한 것이다. 36 개의 시편을 측정 하였으며 값은 대략 53~60 정도로 시편 간 편차

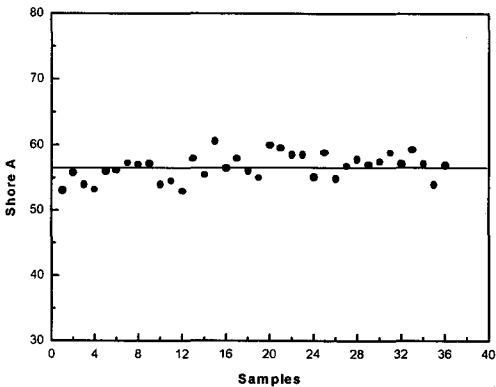


Figure 4. Distribution of shore A hardness of test specimen

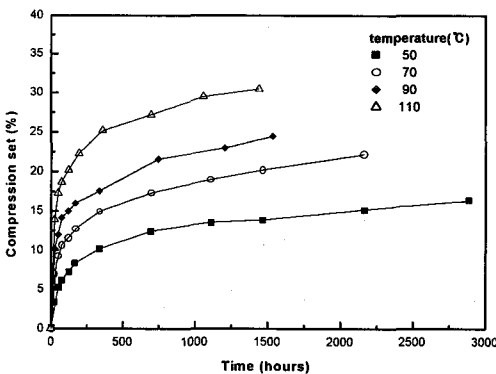


Figure 5. Compression set with time at four different exposure temperatures

가 약간 있었다. Figure 5는 각 온도에서 노화 시간에 따른 압축 영구 줄음률을 나타낸 것으로 시간이 증가하고 노화 온도가 높을수록 압축 영구 줄음률은 증가함을 알 수 있었다. 특히 노화 시작 후 500시간 이내에 압축 영구 줄음률이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위하여 Figure 5의 결과에서 x축은 시간의 자연 로그값으로 y축은 압축 영구 줄음률을 무차원화시켜 초기 상태를 기준으로 변화된 값을 Figure 6에 나타내었다. 본 연구에서는 모터 팬에 사용되는 방진고무부품의 수명을 초기 두께에서 압축 영구 줄음률이 20%에 도달하는 시간으로 보았다. 따라서 Figure 6에서 y축에서 초기 두께를 1.0으로 보았을 때 0.8에 이르는 시간은 Table 1과 같다. 이 때, 50°C에서의 수명은 시험데이터의 부족으로 외삽법(extrapolation)을 이용하여 예측하였으며 70, 90, 110°C에서는 내삽법(interpolation)을 이용하여 구하였다.

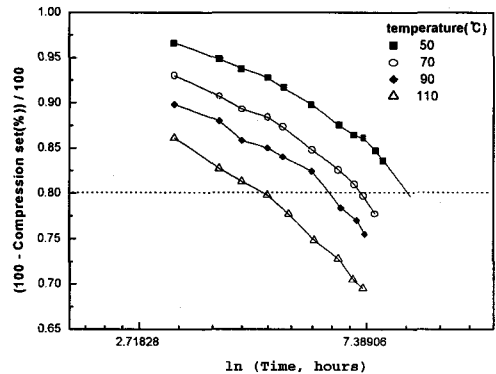


Figure 6. Change of compression set with time at four different exposure temperatures

Table 1. Heat Aging Temperature Life Time

Heat aging temp.($^{\circ}\text{C}$)	Life time		Fitting method
	$\ln(\text{time, hours})$	hours	
50	8.85	6974	extrapolation
70	7.20	1339	interpolation
90	6.25	518	interpolation
110	4.73	113	interpolation

시험데이터에서 노화 온도(heat aging temperature)와 수명 시간(life time)의 관계로부터 최소자승법(least square method)을 이용하여 Figure 7과 같이 아레니우스 선도(Arrhenius plot) 및 관계식 (7), (8)을 구할 수 있다. Figure 7에서 점선으로 된 곡선 1 및 식 (7)은 Table 1에서 70, 90, 110°C에서의 시험 결과를 이용하여 얻어진 식이며, 실선으로 된 곡선 2 및 식 (8)은 Table 1에서 50, 70, 90, 110°C에서의 시험 결과를 이용하여 구하였다. 이렇게 두 가지로 구분하여 아레니우스식을 구한 이유는 50°C에서의 수명시간의 경우는 데이터의 부족으로 내삽법을 이용하지 않고 외삽법을 이용하여 구하였기 때문이며 두 가지의 경우에서 예측수명결과를 비교하기 위해서다. 일반적으로 외삽법을 이용하여 수명시간을 예측하는 것은 다소 위험한 방법이지만 정해진 시간 내에 데이터 점(point)을 늘릴 수 있는 장점을 가지고 있다.

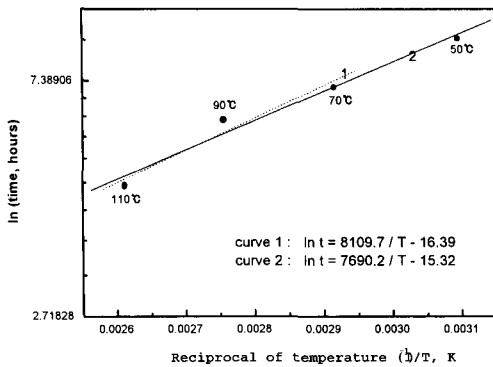


Figure 7. Arrhenius plot

$$\ln t = 8109.7/T - 16.39 \quad (7)$$

$$\ln t = 7690.2/T - 15.32 \quad (8)$$

t : 노출 시간(exposure time, hours),

T : 노화 온도(heat aging temperature, K)

이 시간 - 온도 관계식인 아레니우스 결과식을 이용하여 임의의 온도에서 사용할 수 있는 수명을 구할 수 있다. 식 (7) 및 (8)로부터 계산되어 예측된 수명은 Figure 8 및 Table 2와 같다.

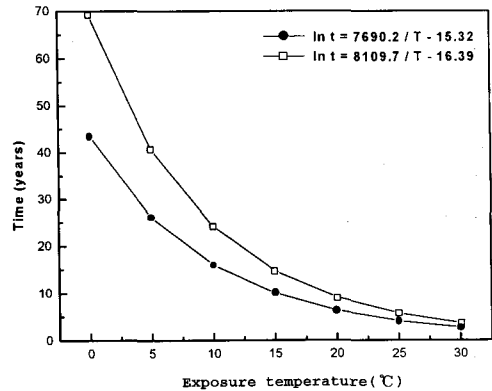


Figure 8. Predicted life time by each Arrhenius relationship

Table 2. Prediction of Life Time on Each Temperature

Exposure temperature	Life time	
	by equation (7)	by equation (8)
15°C	14.74 years	10.02 years
20°C	9.11 years	6.35 years
25°C	5.71 years	4.09 years

2. 활성화 에너지 및 가속 시험 설계

위 아레니우스 관계식을 이용하여 20%의 압축 영구 줄음률을 발생시킬 수 있는 최소화 에너지인 활성화 에너지(activation energy)를 구할 수 있다. 식 (3)과 식 (7) 및 (8)을 각각 이용하면 활성화 에너지는 63.9 kJ/mol 과 67.4 kJ/mol 이다.

아레니우스 온도 - 시간 환산식으로부터 보다 정확하고 시험 시간을 단축시킬 수 있는 새로운 가속 시험을 설계할 수 있다. 즉, 식 (7) 및 (8)로부터 100°C에서 1 일 동안의 노화에 해당하는 온도-시간 관계를 Figure 9 및 Figure 10에서 보여주고 있다. 이러한 열 이력 선도로부터 방진고무부품이 온도가 18°C에서 10 년 사용할 때와 동일한 가속 시험 조건은 식 (7) 및 (8)로부터 100°C에서 각각 10.9 일과 8.0 일 간 방치하는 것이 된다.

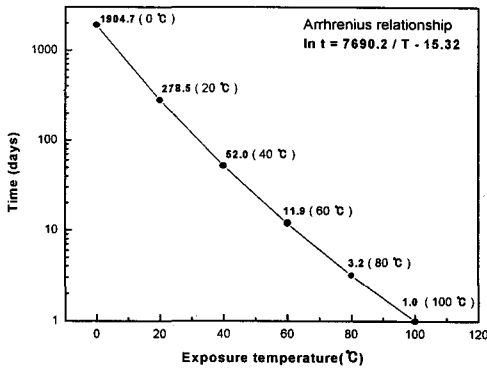


Figure 9. Exposure temperature and time relationship by equation (7)

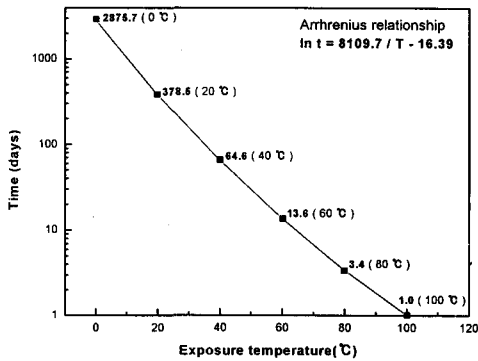


Figure 10. Exposure temperature and time relationship by equation (8)

3. 자연 노화 시험(Natural aging test)

가속 열 노화 조건에서 시험결과로부터 예측한 수명의 신뢰성을 확보하기 위하여 실온에서의 시험결과와 비교하였다. 여기서 실온은 일정 온도가 아닌 최저 0°C에서 최고 30°C의 분포를 보이는 실험실에서 최고 6개월 동안 방치하고 나서 영구 줄음률을 측정하였다. Figure 11은 시편을 상온에 두고 노화시켰을 때 압축 영구 줄음률 결과를 보여 준다. 방치 시간이 증가할수록 압축 영구 줄음률이 증가하는 것을 볼 수 있다. 6 개월이 경과 후 압축 영구 줄음률은 12% 정도였다. Table 3은 실제 청정실에서 6개월 동안 사용한 제품의 두께와 실온에서 압축 영구 줄음 시험후의 두께를 비교한 것이다. 청정실에서 사용한 제품의 두께가 실온에서

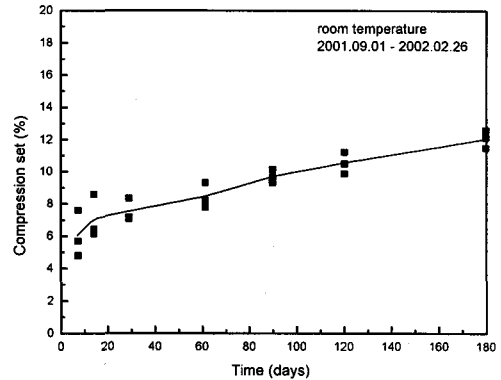


Figure 11. Compression set results at room temperature

Table 3. Comparison of Thickness After 6 Months

Environments	Specimen no.	Thickness (mm)
Room temperature (0~30°C)	1	7.28
	2	7.38
	3	7.33
Clean room (23±0.1°C, 45±0.1%)	1	7.08
	2	7.21
	3	7.15

의 시험한 시편의 두께에 비해서 좀 더 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 청정실의 온도가 23°C로 실온보다 높기 때문이라 사료된다.

4. 노화방지제의 영향

방진고무 부품에 첨가되는 노화 방지제가 수명에 얼마나 영향을 끼치는지 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다. 고무부품에 노화 방지제 양을 각각 1.0, 1.5, 2.0 wt.% 첨가시켰으며 노화 온도를 각각 60, 80, 100, 120°C에서 일정 기간 노화시킨 후 압축 영구 줄음률을 측정하였다(Figure 12(a), 13(a), 14(a)). 수명은 압축 영구 줄음률 변화율이 50%일 때로 가정하여 아래니우스 선도를 구하였다(Figure 12(b), 13(b), 14(b)). Table 4의 아래니우스 관계식으로부터 25°C 환경에서 노화 방지제가 1.0, 1.5, 2.0 wt.%일 때의 기대 수명은 각각 2.33, 2.96, 6.01년으로 노화 방지제가 수명에 중요한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

Table 4. Life Time with Antioxidant Agents

antioxidant agent (wt.%)	Arrhenius relationship (hours, K)	life time (at 25°C)
1.0	$\ln t = 9710/T - 22.66$	2.33 years
1.5	$\ln t = 9880/T - 22.99$	2.96 years
2.0	$\ln t = 10460/T - 24.23$	6.01 years

V. 결 론

본 연구는 청정실에 사용되는 모터팬 방진고무 부품의 기대 수명을 예측하기 위하여 50~110°C에서 가속 열 노화 시험을 하였다. 이 때 수명 예측을 위한 시험 파라미터(test parameter)로써 압축 영구 줄임률을 선택하였다. 고무부품의 수명을 압축

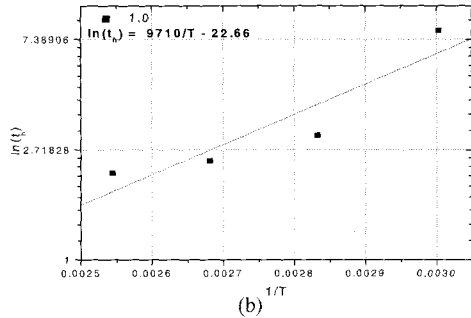
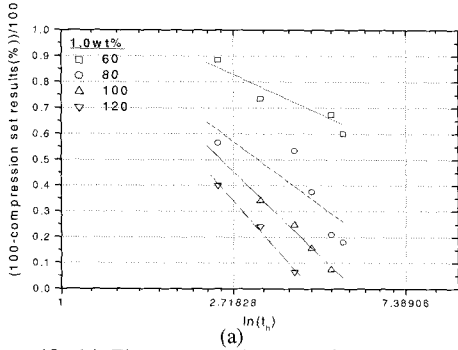


Figure 12. (a) The compression set of isolating rubber with antioxidant 1.0wt.% plotted against time at different exposure temperatures, (b) Arrhenius plot.

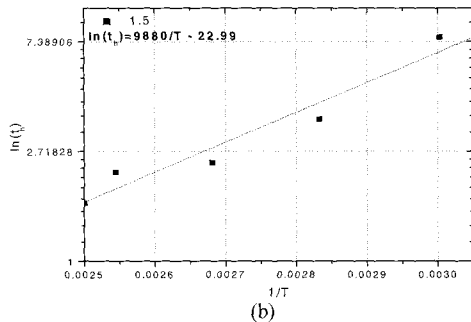
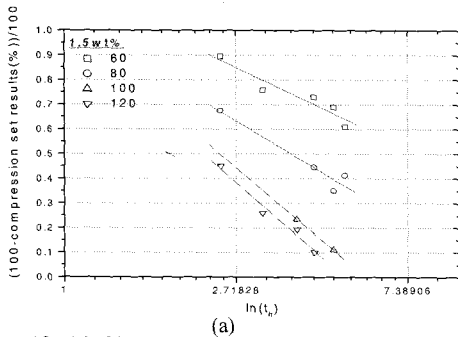


Figure 13. (a) The compression set of isolating rubber with antioxidant 1.5wt.% plotted against time at different exposure temperatures, (b) Arrhenius plot.

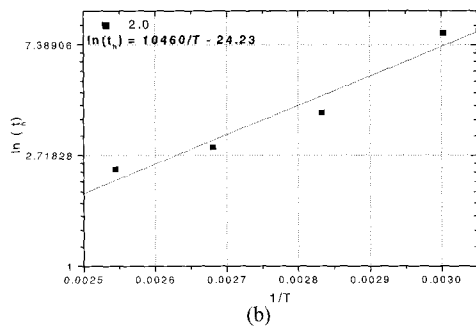
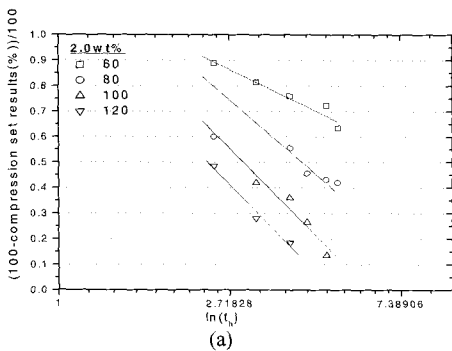


Figure 14. (a) The compression set of isolating rubber with antioxidant 2.0wt.% plotted against time at different exposure temperatures, (b) Arrhenius plot.

영구 줄임률이 20%가 되는 시점으로 규정하여 시간-온도 환산식인 아레니우스 관계식을 구하였다. 이 관계식으로부터 15℃에서 사용 가능한 수명은 10.02년으로 예측되었으며 20%의 압축 영구 줄임률을 발생시키는데 필요한 최소에너지인 활성화에너지는 67.4 kJ/mol로 나타났다. 또한 도출한 아레니우스 관계식으로부터 시간과 비용을 절감할 수 있는 새로운 가속 시험을 설계하여 18℃에서 10년 사용할 때와 동일한 가속 시험은 100℃에서 약 8일간 열 노화시켜야 하는 것으로 나타났다. 그리고 방진고무부품에 첨가되는 노화방지제 양에 따른 기대 수명을 예측한 결과 첨가되는 노화방지제의 양이 수명에 상당한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 가속 시험 시 시편, 장치 및 시험자에 의한 측정오차가 아레니우스 모델을 이용한 수명예측에 많은 영향을 주게되므로 재현성(reproducibility)을 위해서는 보다 정확한 시험과정과 균일한 시편이 필요하다는 것을 알았다.

마지막으로 좀 더 정확하고 새로운 수명예측법의 연구 및 제품이 사용되는 환경과 유사한 조건

에서 좀 더 많은 시험 데이터 수집이 이루어진다면 고무부품의 수명예측에 상당한 도움을 줄 수 있으리라 본다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행한 국가지정연구실사업의 연구결과의 일부이며 시편제공에 협조해주신 (주)신성이엔지 기술연구소에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. R. P. Brown, T. Burtler and S. W. Hawley, "Ageing of Rubber - Accelerated Heat Ageing Test Results", Rapra Technology, 2001.
2. R. P. Brown, "Physical Testing of Rubber", Chapman & Hall, 3rd, 1996.
3. R. P. Brown, "Practical Guide to the Assessment of the Useful life of Rubbers", Rapra Technology, 2001.
4. KS M6518, "가황 고무 물리 시험 방법 - (7) 압축 영구 줄임률 시험", 1996.