

## 가속 열 노화시험에 의한 탄성받침용 합성고무의 수명예측에 관한 연구

박광화<sup>†</sup>, 박준형, 이하형 권영일<sup>\*</sup>

한국화학시험연구원 신뢰성평가팀,

\*청주대학교 산업정보시스템공학과

## Accelerated Heat Aging Test for Predicting Useful Lifetime of Elastomeric Bearing

K. H. Park<sup>†</sup>, J. H. Park, H. H. Lee Y. I. Kwon<sup>\*</sup>

Reliability Assesment team, Korea Testing and Research Institute for Chemical Industry

\*Department of Industrial and Information Systems Engineering, Cheongju University

### ABSTRACT

We performed the heat aging test to predict the useful lifetime of Elastomeric Bearing Chloroprene Rubber (CR) used for supporting bridge. During the test, we measured elongation that are influenced by temperature and aging time. The failure of a test piece is defined as the point at which the elongation reaches to

---

<sup>†</sup> 대표저자(E-mail : bable@kotric.or.kr)

75% of the initial value. This failure criterion is based on KS F 4420: 1998 (Elastomeric Bearing for bridge). Through the accelerated heat aging test, we found that the Arrhenius relationship and the Weibull lifetime distribution are appropriate as the life-temperature relationship and lifetime distribution of the CR, respectively. Using the Arrhenius -Weibull model, the parameters of the model are estimated and the lifetime of the CR at use condition is predicted.

## 1. 서 론

현재 우리나라에서 사용되고 있는 교량 지지용 받침은 크게 납면진고무받침, 탄성고무받침, 포트받침 등으로 나눌 수 있다. 그 중 교량지지용 탄성받침은 교량이나 건축물의 상부구조에서 작용하는 수직하중을 안전하게 지지함과 동시에 수평이동을 허용함으로써, 하부구조에 작용하는 과도한 수평력의 크기를 줄여주고 또한 완충효과의 기능도 수행하는 사각 또는 원형으로 제작되는 적층형(철판+고무) 고무탄성체를 말한다. 천연고무(Natural Rubber: NR), 합성고무(Chloroprene Rubber: CR) 또는 천연고무와 합성고무(NR+CR)를 일정비율 배합(Blending)한 재질로 만든 탄성받침은 별도의 다른 부품이 필요 없이 설치할 수 있는 매우 간단한 형식의 것이며, 설치 높이가 낮고 임의의 형상으로 제작이 가능하며 특히 설계가 매우 간단하다. 탄성받침은 차량의 주행하중 및 충격하중에 대한 완충효과가 우수하며 도시소음에 유리하다. 또한 모든 방향에 대한 신축 및 회전이 가능하여 사고 및 곡선교와 같이 상부구조의 온도신축에 대한 변화에 예측이 어려운 교량형식에 대해서도 온도변화에 기인한 응력을 최소화 시키는 장점이 있다.

최근 유럽이나 일본 등 외국의 경우, 제품에 대한 초기 성능이나 품질 뿐 아니라 제품을 언제까지 쓸 수 있는나라는 제품의 신뢰성에 대한 요구가 한층 높아져 가는 실정이다. 고무 제품에 대한 신뢰도 추정이나 수명예측은 사용 환경이나 조건이 매우 복잡하고 필드데이터(field data)가 외국에 비해 절대적으로 부족하기 때문에 사용수명을 예측하기란 쉬운 일이 아니다. 또한 고무제품의 성능과 수명은 온도, 습도, 오일, 오존, 기계 및 전기적 응력 등 특성인자와 사용조건, 배합조건 등 매우 다양한 인자의 영향에 민감하다. 다른 제품도 마찬가지겠지만 실제 사용 환경과 동일한 조건에서의 시험을 설계하기란 매우 어려운 문제이다.

본 연구에서는 교량지지용 합성고무(CR) 탄성받침의 사용수명을 평가하기 위해 가속 열 노화시험을 수행하였으며, 시험결과로부터 제품의 수명분포와 분포의 모수들을 추정하고 탄성받침의 사용수명을 예측하였다. 여기서 설계, 적용한 시험 및 평가 방법은 다른 고무제품의 수명을 평가하는데도 참고가 될 수 있을 것으로 기대한다.

제품의 수명을 정확히 평가하기 위해서는 실제 사용되는 환경에서의 고장자료로부터 제품의 수명을 추정하는 것이겠지만 이 방법은 너무 오랜 시간이 소요가 된다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 사용 환경이나 조건보다 가혹한 조건을 적용함으로써 고장시간

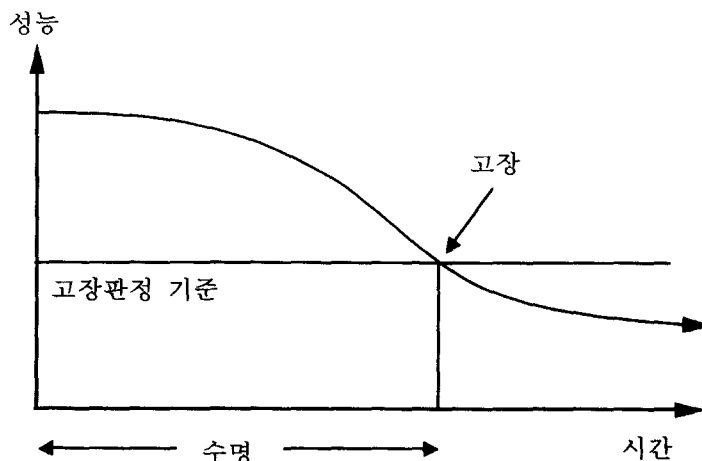
을 단축시키는 가속 수명 시험(accelerated life test)방법을 사용하여 사용조건에서의 수명을 추정하였다. 가속시험의 기본 개념은 제품의 특성저하에 영향을 미치는 주요 인자의 수준을 증가시켜 고무제품의 특성이나 성능의 열화를 촉진시키는 것으로, 사용온도를 높게 하여 고무제품의 노화속도를 증가시키거나 오존의 농도를 높여 균열이 빠르게 진행 되도록 하는 방법 등을 사용한다. 본 실험에서는 고무의 성능열화에 영향을 미치는 인자들 중 가장 주요한 인자인 온도를 선택하여, 실제 사용 환경보다 높은 온도에서 시험하는 가속 열 노화 시험(Accelerated heat aging test)방법을 적용하였다.

가속시험 방법 중 온도를 가속인자 사용할 때 적합한 것으로 알려진 모델로서 아레니우스(Arrhenius)모델과 아이링(Eyring)모델이 있다. 이 중 아레니우스 모델은 비교적 간단하면서도 효과적으로 수명을 예측 할 수 있어 본 연구에서는 아레니우스 모델의 적합성을 확인 하고, 이 모델을 사용하여 교량지지용 탄성받침 고무 중 합성고무(CR)로 만들어진 제품의 수명을 예측하였다. 탄성받침용 합성고무(CR)의 수명분포 및 수명과 스트레스 사이의 관계를 규명하고 사용온도에서의 수명을 예측하였다.

## 2. 시험 설계 및 방법

### 2.1 고장판정기준

고분자 재료나 고무와 같은 화학소재의 경우 고장이 어느 한순간에 일어나기보다는 <그림 1>과 같이 서서히 열화가 진행되면서 발생하는 것이므로 화학소재의 고장판정 기준을 명확히 규정할 필요가 있다. 일반적으로 ISO 11346[10]에 의하면 화학소재의 경우 특성 초기 물성 값의 50%로 저하되는 점을 고장시점으로 판정하고 있다.



<그림 1> 고분자 재료의 고장 메커니즘

하지만 교량지지용 탄성발침의 경우, pr EN1337-3[15]이나 KS F 4420[12], RS F 0001[16]에 의하면 합성고무(CR)인 경우 합격기준이 노화 후 신장률 변화율이  $\pm 25\%$  이내로 규정되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 신장률이 초기값에서 25% 저하되는 시점을 고장으로 판정한다.

## 2.2 가속수명 시험 방법

신장률시험은 ASTM D 412 (Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension) [8]에 근거하여 측정하였다. 그리고 위의 측정 데이터를 가지고 ISO 11346 (Rubber, Vulcanized or thermoplastic-Estimation of life-time and maximum temperature of use from an Arrhenius plot) [10], ISO 188 (Rubber, Vulcanized or thermoplastic-Accelerated ageing and heat resistance tests) [11]에 근거한 수명시험법으로 실제 사용온도보다 높은 온도(70°C, 100°C, 120°C)로 변화시키면서 가속 열 노화시험을 수행하였다.

## 2.3 가속모델

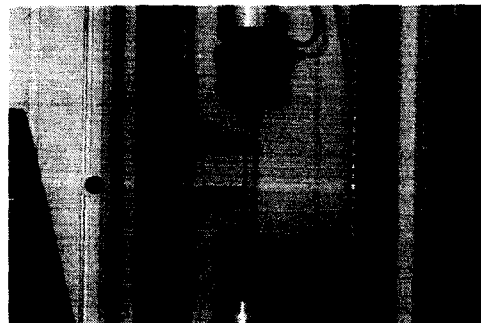
화학소재분야에서는 스트레스 수준을 온도로 사용하는 가속 열 노화시험의 경우 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 아레니우스 모델을 적용하였으며, 이는 ISO 11346 (Rubber, Vulcanized or thermoplastic-Estimation of life-time and maximum temperature of use from an Arrhenius plot) [10] 및 관련문헌에 근거하였다.

## 2.4 가속 열 노화시험

합성고무(CR)를 재질로 하는 교량지지용 탄성발침과 동일한 배합으로 시트(sheet)형 시험편을 만들어 ASTM D 412[8]의 인장시험편(Die C)으로 채취하여 각 온도별(70,100,120°C)로 가속 열 노화시험을 수행하였다. 이때 가속 열 노화시험 조건으로는 교량지지용 탄성발침의 사용온도보다 가속한 온도환경을 이용하여 ASTM D 412[8]의 시험방법에 따라 <그림 2>와 같이 시험편을 채취하여 일정 시간대별로 인장시험<그림 3>을 하여 신장률을 측정하였다.



<그림 2> 탄성발침고무(CR) 인장시험편



<그림 3> 인장시험 과정

또한, 신장률변화율 25%의 물성 저하점을 고장기준으로 하여 고장시점부분에서 더 많은 데이터를 얻기 위해 2차 가속 열 노화시험을 실시하였다.

1차 가속 열 노화시험에서 각 온도별로 총 100개의 시험편을 채취하여 24, 48, 72, 120, 168, 240, 360, 480, 720, 1080, 1440, 1800, 2160, 2880, 3600, 4320, 5760, 8760의 가속 열 노화 시간대 별로 시험편을 각각 5개씩 꺼내어 특성을 측정 하였다.

2차 가속 열 노화시험에서는 각 온도별로 총 80개의 시험편을 채취하여 70, 94, 120, 144, 164, 193, 213, 223, 237, 247, 255, 261의 가속 열 노화 시간대 별로 시험편을 각각 5개씩 꺼내어 특성을 측정 하였다. 신장률 시험은 시험편의 파괴 시까지의 늘어나는 변형량을 구하는 것이므로 재사용은 불가하였다.

## 2.5 물성변화 측정

일정 시간이 경과된 후 시험편을 노화기에서 꺼내어 상온에서 충분한 시간동안 방치하였다. 이 후 만능재료시험기(Instron 4465(USA))를 이용하여 신장률을 측정하였다. 신장률을 구하는 식은 식(1)과 같다. 시험결과는 ASTM D 412[8]에서 측정하는 방법으로 중앙값(Median)을 취하였다.

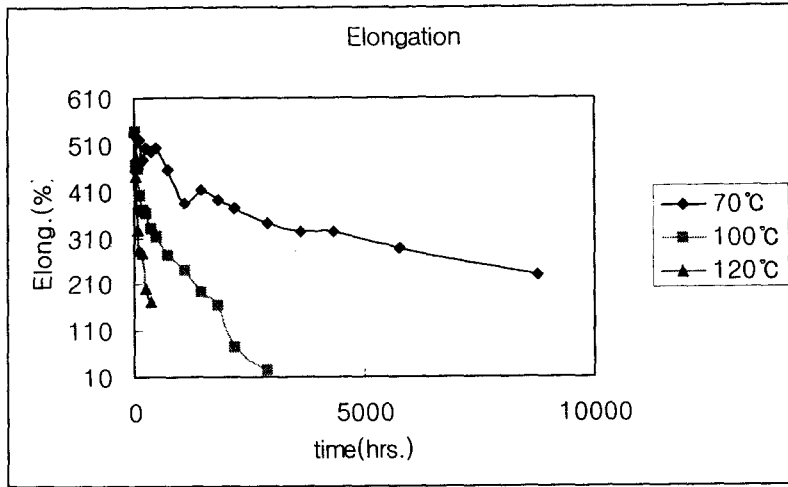
$$E = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (1) E$$

= 절단 시 신장률(%), L = 절단 시 시험편의 길이(mm), L<sub>0</sub> = 초기 시험편의 길이(mm)

## 3. 시험결과 분석

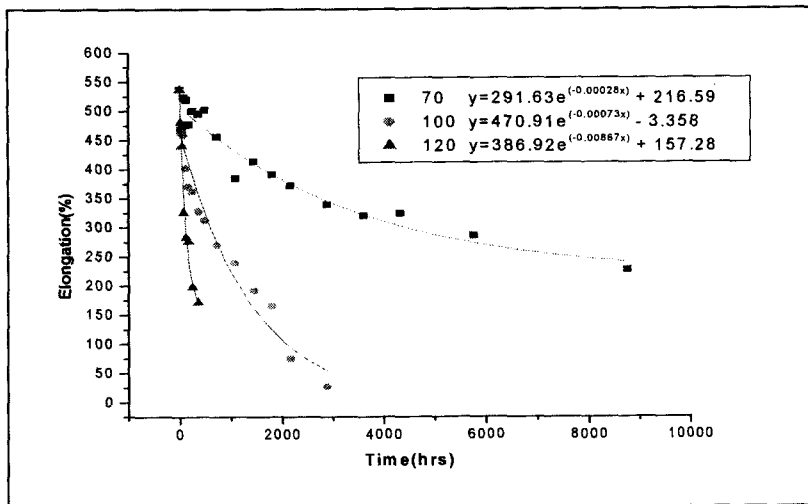
### 3.1 아레니우스모델(1차)

각각의 열 노화조건(70, 100, 120℃)에서 365일 동안 가속 열 노화를 시켜 노화시간별로 신장률을 측정하였다.



<그림 4> 온도와 시간에 의한 신장률 변화

신장률의 경우 <그림 4>에서 보는바와 같이 시간이 경과함에 따라 감소함을 볼 수 있다. 위에서 본 결과로는 열에 의해 시간이 지날수록 고무의 고유 특성인 탄성이 상실되어 지는 것으로 판단된다. 또한, 온도가 높을수록 노화진행이 빨리 되는 것을 알 수 있으며 그로인해 신장률 값이 급격히 저하되는 것을 볼 수 있다.



<그림 5> 온도와 시간에 의한 신장률 변화율

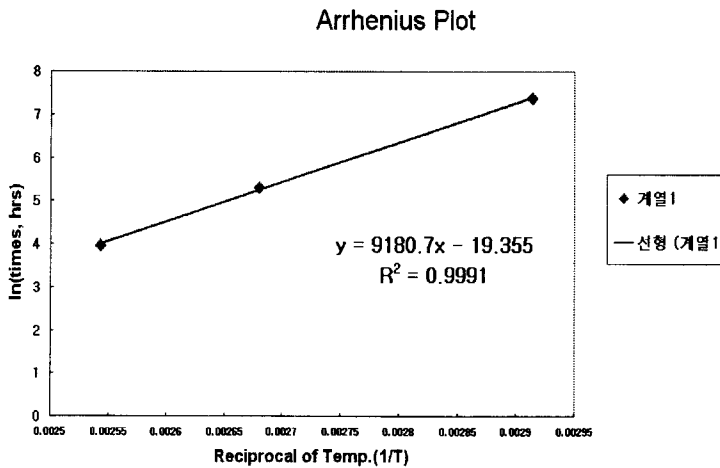
온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위하여 <그림 4>의 결과로 초기물성을 기준으로 변화된 값을 <그림 5>에서 나타내었다. 본 연구에서는 탄성발침용 합성고무(CR)의 수명을

초기 신장률 값이 25%저하되는 지점으로 규정하였다. <그림 5>에서부터 고장시간, 즉 초기신장률의 값에 75%에 이르는 시간은 <표 1>과 같다. 참고로 여기서 예측한 고장시간은 시험편의 중앙값(Median)이 고장판정시점에 도달하는 시간으로서 고장시간 분포는 고려하지 않은 결과이다.

<표 1> 각 온도별 신장률이 25%저하점에 도달하는 시간

온도 (°C)	시험편 수	ln(time, hrs)	분포
70°C	1598	7.376	0.002914
100°C	202	5.308	0.002680
120°C	52	3.958	0.002544

<표 1>의 데이터로 노화온도와 수명시간의 관계로부터 절대온도의 역수와 시간에 자연로그를 취한 값으로 아레니우스 선도(Arrhenius Plot) 및 관계식 (2)를 구할 수 있다.



<그림 6> 아레니우스 선도(Arrhenius Plot)

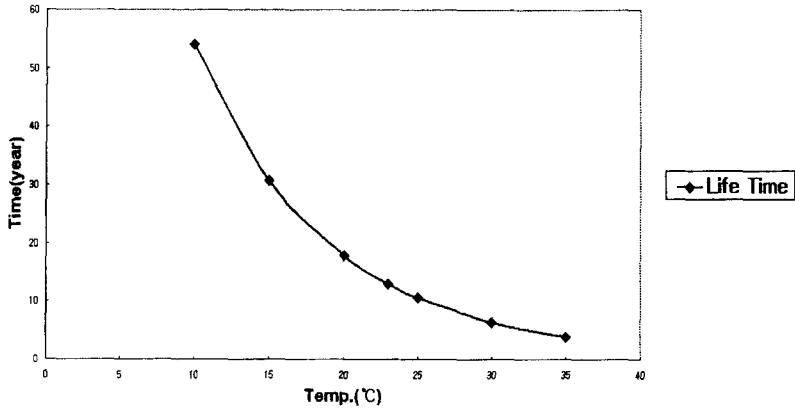
$$\ln(t) = 9180.7 / T - 19.355 \tag{2}$$

t : 열 노화 시간(hrs.)

T : 노화온도(절대온도, K)

이 시간과 온도의 방정식인 아레니우스 결과식을 이용하여 임의의 온도에서 사용할 수 있는 수명을 구할 수 있다. 위의 식 (2)으로부터 계산되어 예측된 수명은 <그림 7>과 <표 2>에 제시하였다.

Life Time



<그림 7> 각 온도별 수명예측 시간

<표 2> 각 온도별 수명예측 시간

20°C	11.962	17.89
23°C	11.645	13.03
25°C	11.437	10.58

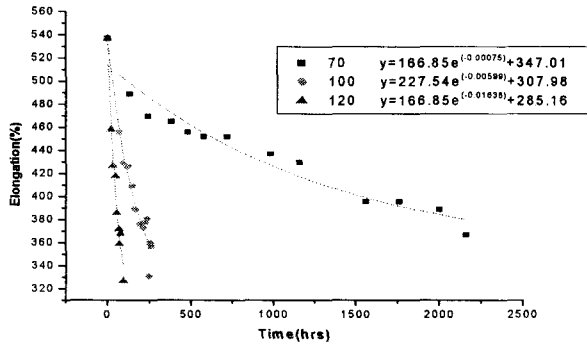
여기서 적용한 가속 열 노화시험의 결과가 아레니우스 모형에 적합함을 알 수 있으며, 이 모델을 사용하여 임의의 온도별로 수명을 예측할 수 있었다. 그러나 여기서 예측된 수명은 제품간의 산포는 고려하지 않은 확정적 수명을 나타낸다.

그러나 실제로는 <그림 5>에서 보는바와 같이 신장률 데이터의 편차가 크고 또한 시험시간의 간격을 크게 정하여 25%저하지점을 구하기엔 적합하지 않았다. 따라서 우리는 추가적인 가속 열 노화시험을 실시하여 고장시간(초기물성의 25% 저하지점)대에서 더 많은 데이터를 관측하여 1차 데이터의 신뢰도를 높이고자 하였고 1차 시험의 정확도를 판단 하고자 하였다. 또한 제품간의 산포를 반영하는 수명분포를 추정해 보기로 하였다. 일반적으로 알려져 있는 고무제품의 수명분포는 와이불 분포(Weibull Distribution)를 따르며 형상모수(shape parameter)가 1.1로 알려져 있다. 실험을 통해 이 가정이 과연 탄성받침용 합성고무(CR)에 부합 되는가를 알아볼 수 있고, 분포의 적합성 검토와 수명분포의 모수를 추정할 수 있으며 가속모델을 적용하여 좀 더 높은 신뢰수준에서 수명을 예측을 할 수 있을 것이다.



### 3.2 아레니우스모델(2차)

1차 열 노화시험 데이터를 가지고 신장률의 초기치의 25%저하지점의 시간대를 알고 그 시간대에 시험시간의 간격을 줄여 좀 더 정확한 데이터를 구하였다.



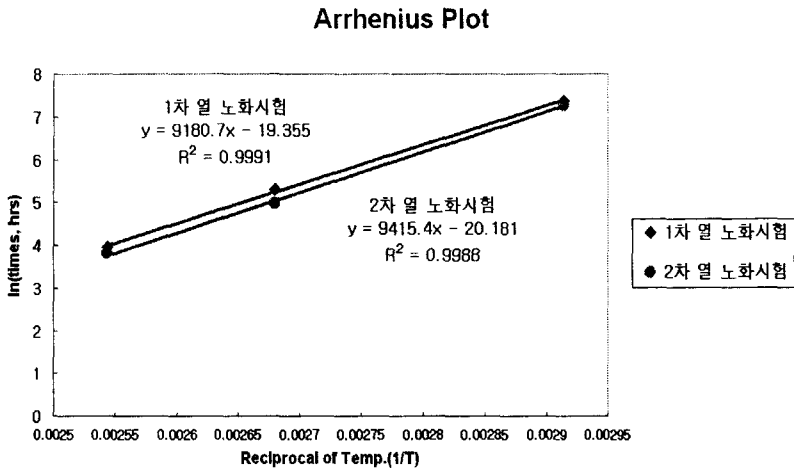
<그림 8> 각 온도별 수명예측 시간(2차)

위 시험 데이터를 가지고 아래의 표에 1차와 2차의 시험데이터를 비교하였다.

<표 3> 1, 2차 열 노화시험의 각 온도별 신장률이 25%저하지점에 도달하는 시간

노화온도 (°C)	시험 구분	25%저하지점시간 (hrs)	ln(time, hrs)	1/T (절대온도, K)
70°C	1차	1598	7.376	0.002914
	2차	1456	7.283	
100°C	1차	202	5.308	0.002680
	2차	146	4.982	
120°C	1차	52	3.958	0.002544
	2차	45	3.812	

<표 3>의 데이터로 노화온도와 수명시간의 관계로부터 절대온도의 역수와 시간에 자연로그를 취한 값으로 아레니우스 선도 및 관계식 (3),(4)를 구할 수 있다.

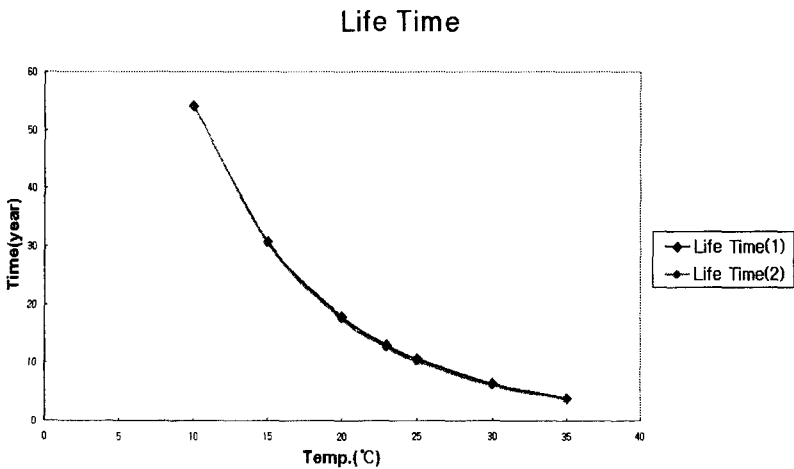


<그림 9> 아레니우스 선도(Arrhenius Plot)

$$\ln(t) = 9180.7 / T - 19.355 \tag{3}$$

$$\ln(t) = 9415.4 / T - 20.181 \tag{4}$$

이 시간과 온도의 방정식인 아레니우스 결과식을 이용하여 임의의 온도에서 사용할 수 있는 수명을 구할 수 있다. 위의 식 (3), (4)로부터 계산되어 예측된 수명은 <그림 10>과 <표 4>에 제시하였다.



<그림 10> 각 온도별 수명예측 시간(1, 2차)

&lt;표 4&gt; 각 온도별 수명예측 시간(1, 2차)

20℃	1차	11.962	17.89
	2차	11.937	17.44
23℃	1차	11.645	13.03
	2차	11.612	12.60
25℃	1차	11.437	10.58
	2차	11.398	10.18

<표 4>에서 보는바와 같이 기울기와 절편이 거의 동일하게 관측된다. 이는 1차시험과 2차시험의 거의 동일하게 이루어졌으며 각각의 시험이 매우 타당성이 있다고 볼 수 있다. 위의 1차, 2차에 걸친 시험 데이터를 가지고 판단하면 시험 시간의 간격은 아레니우스 관계식에서 큰 영향을 주지 않다는 것을 알 수 있었다. 또한 시험 데이터의 추세선을 되도록이면 데이터 관측점에 근사하게 맞추어 주어야 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 앞으로 하고자하는 수명분포 및 수명예측에서 좀 더 정확하게 예측하는데 근거가 될 수 있을 것으로 판단된다.

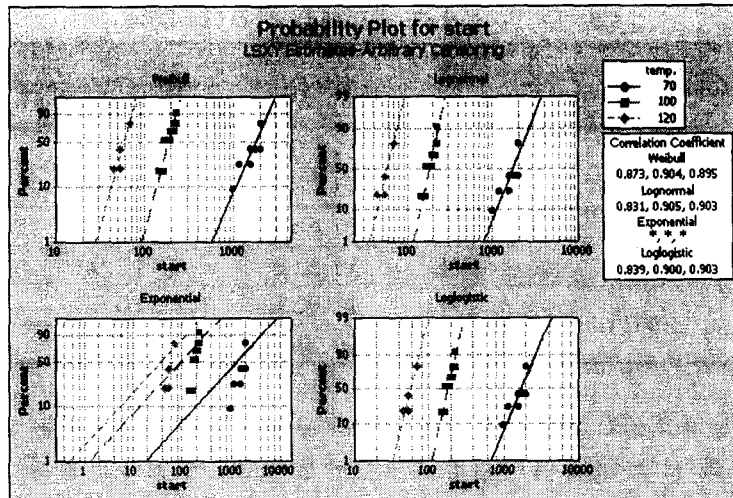
### 3.3 수명분포 검토 및 수명예측

#### 3.3.1 시험 데이터의 분석

시험 데이터는 통계적인 분야에 많이 활용되고 있는 미니탭(MINITAB)을 이용하여 분석하였다.

##### 3.3.1.1 분포의 적합성 검토

시험온도에 따른 물성변화를 기준으로 분포의 적합성을 검토하였다. 미니탭(MINITAB)의 분석기법 중 분포를 추정하는 대표적인 방법 중에 하나인 최소자승법(LSE)을 이용하여 <그림 11>과 같이 해당 고장 데이터에 적합한 분포를 검토하였다.

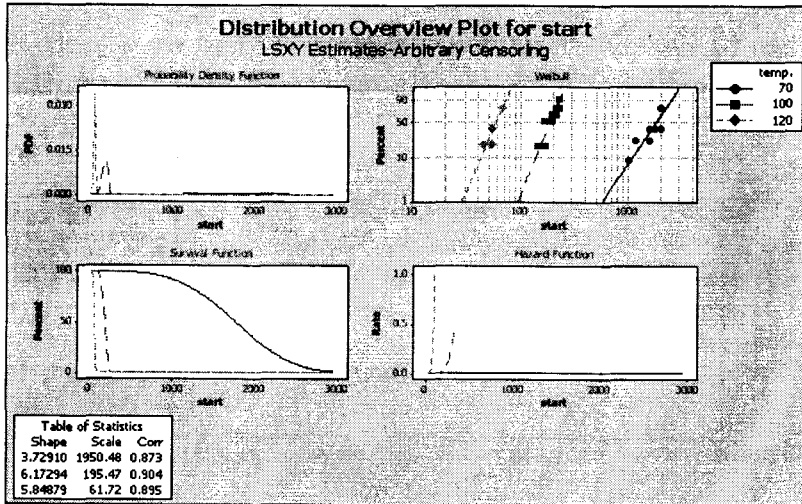


<그림 11> 수명분포의 적합성 검토

분포의 적합성은 Anderson Darling (adj)값으로 판단하였다. 이 값은 분석자에게 관측된 자료가 어떤 분포에 가장 잘 적합한지를 판단하는 정보를 제공해 주며 동일한 수명자료를 대상으로 다수의 분포를 적합시켰을 경우 이 값이 가장 작은 값을 갖는 분포가 제일 적합하다는 것을 의미한다. 여기서는 와이블 분포가 수명 데이터에 가장 적합한 분포임을 보여주고 있다.

### 3.3.1.2 수명분포의 모수 추정

와이블 분포를 적용하여 가속수명시험 데이터를 최소자승법을 이용하여 각각의 가속조건별 형상모수 및 척도모수(scale parameter)를 추정해 본 결과 <그림 12>와 같은 그래프와 값을 얻었다.



<그림 12> 스트레스 수준별 모수의 추정

그 결과 형상모수는 70℃ 100℃ 120℃에서 각각 3.72910, 6.17294, 5.84879의 값을 가지며 척도모수는 1950.48, 195.47, 61.72의 값을 가짐을 알 수 있다.

각 온도별 형상모수와 척도모수에 대한 동일성 검정결과가 각각 <표 5, 6>에 주어져 있다. P-값이 각각 0.781, 0.000 으로서 형상모수는 온도와 관계없이 일정하며, 척도모수는 온도의 증가에 따라 감소하여 가속성이 성립함을 보여주고 있다. 참고로 3수준이 아닌 각각의 2수준으로 동일성 검정을 한 결과도 3수준과 마찬가지로의 결과를 얻을 수 있었다.

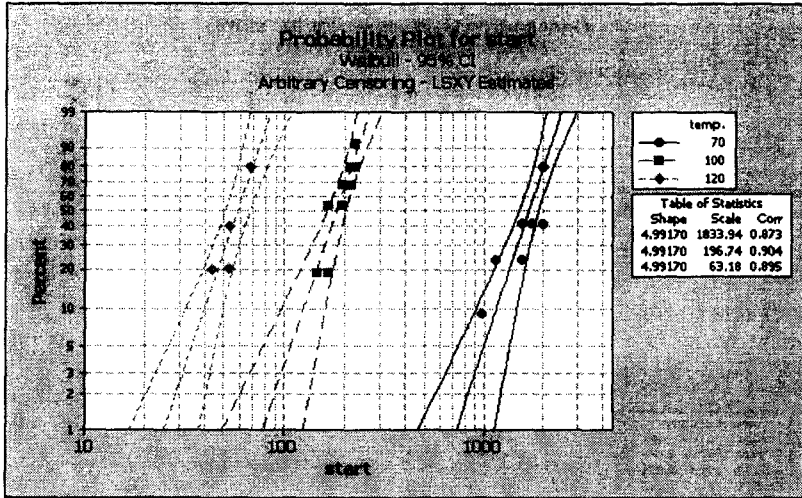
<표 5> 형상모수의 동일성 검정

Chi-Square	DF	P-Value
0.495134	2	0.781

<표 6> 척도모수의 동일성 검정

Chi-Square	DF	P-Value
637.209	2	0.000

<그림 13>은 공통의 형상모수 값을 보여준다.



<그림 13> 분포의 파라메타(parameter) 분석

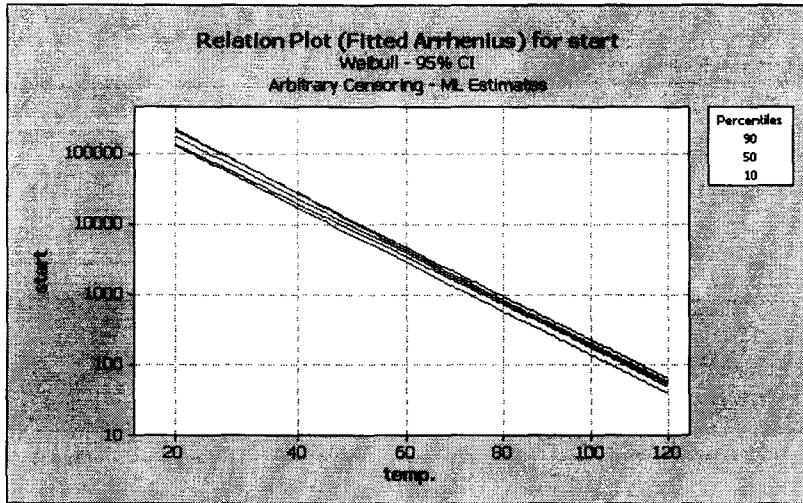
<표 7> 형상모수( $\beta=1.1$ )간의 동일성 검정

40.4749	1	0.000
---------	---	-------

<표 7>은 <그림 13>에서 분석된 탄성받침용 합성고무(CR)의 형상모수 값이 기존에 널리 알려져 있던 고무부품의 형상모수 값인  $\beta=1.1$ 과 동일한지 동일성 검정을 한 결과이다. 유의수준 5%에서 P-값이 0.000이므로 동일하지 않음을 알 수 있다.

### 3.3.1.3 아레니우스-와이블 모델

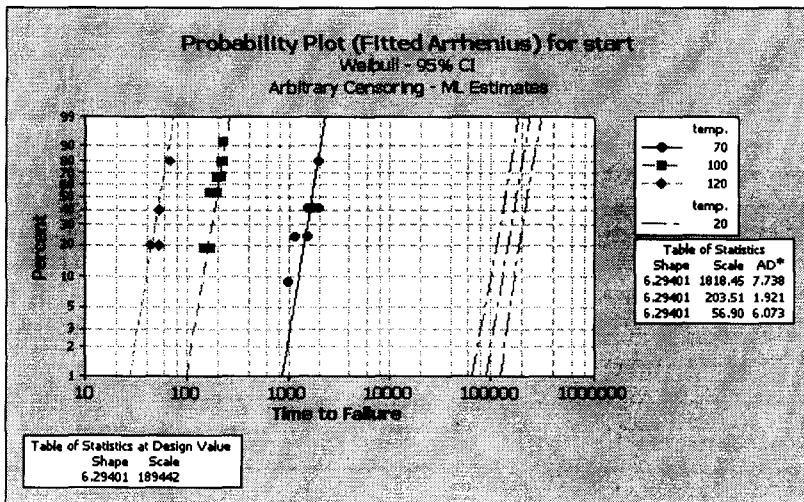
앞에서 확인 된 바와 같이 가속인자와 와이블 분포의 척도모수와의 관계로서 아레니우스 관계식을 적용하여 두 변수 간(수명시간과 노화온도)의 선형관계를 나타내면 <그림 14>와 같다.



<그림 14> 아레니우스 모델 및 백분위수 도식 결과

그림에서 두 변수(수명시간과 노화온도)간의 관계가 거의 직선을 만족함을 알 수 있으며, 그 결과 아레니우스 모델이 적합한 것으로 판단 할 수 있다.

<그림 15>은 아레니우스 모델을 적용하여 공통의 형상모수와 사용조건에서의 수명분포를 추정한 결과이다.



<그림 15> 사용수준의 모수추정과 신뢰구간 도식

아레니우스 모델을 적용하여 구한 수명분포의 형상모수가  $\beta = 6.29401$ 로서, 앞에서 3수준의 온도에서의 수명데이터로부터 구한 공통의 형상모수 값인 4.99170과 약간 다른 것을 볼 수 있다.

또한 형상모수의 값이 1보다 큰 값을 가짐으로 고장이 시간의 경과함으로 인해 증가하는 증가고장률 함수의 형태를 가짐을 알 수 있다.

<표 8>는 <그림 17>의 그래프로부터 임의의 온도에서 10%, 5% 백분위수를 분석한 결과이다. 이와 같은 결과로부터 신뢰수준 95%에서 B<sub>10</sub> 수명은 20℃일때는 신뢰구간이 11.61년에서 19.68년, 25℃일때는 6.92년에서 11.33년 사이임을 확인 할 수 있다.

<표 8> 사용수준의 백분위수

B10(10%)	20	15.12	2.03	11.61	19.68
B10(10%)	25	8.86	1.11	6.92	11.33
B5(5%)	20	13.49	1.92	10.20	17.83
B5(5%)	25	7.90	1.06	6.07	10.28

분석결과로부터 특성수명(B<sub>10</sub>수명:제10백분위수)은  $\eta_{70}=1102.18, \eta_{100}=124.389, \eta_{120}=34.2056$ , 또한 사용조건하에서의 수명은 101780시간이다. 이를 토대로 각 온도별 가속계수를 <표 9>에서 나타내었다.

<표 9> 가속 조건별 가속계수

70℃	92.3
100℃	818.2
120℃	2975.5



## 4. 결 론

본 연구에서는 교량지지용으로 사용되는 탄성받침용 고무 중 합성고무(CR)의 유효 수명을 예측하기 위하여 70, 100, 120℃에서 가속 열 노화시험을 실시하였다. 여기서 수명을 판단하기 위한 주요특성으로서 신장률을 선택하였다. 탄성받침용 합성고무(CR)의 신장률이 25%이하 되는 시점을 고장으로 규정하고, 시험 결과로부터 수명-온도의 관계를 나타내는 아레니우스 관계식을 확인하였다.

다음, 제품간의 산포를 반영하는 수명분포를 구하기 위해 추가적인 2차 시험을 실시하여 수명분포와 관련 모수, 아레니우스 모델의 관계식을 구하고 이로부터 사용조건에서의 B<sub>10</sub>수명과 신뢰구간을 추정하였다. 탄성받침용 합성고무(CR)의 수명이 와이블 분포를 따른다는 것을 알 수 있었으며 와이블 분포의 형상모수 값이  $\beta=4.9917$ 로서 기존에 널리 알려져 있던 고무부품의 형상모수 값인  $\beta=1.1$ 과는 크게 차이가 남을 알 수 있었다.

그리고 탄성받침용 합성고무(CR)를 100℃에서 124시간 (B<sub>10</sub>수명:95%CL)동안 열 노화 시험을 하면 20℃에서 11.6년 (B<sub>10</sub>수명:95%CL)이라는 시간과 동일한 시험이 된다는 것을 알 수 있다.

사용조건인 온도가 20℃ (B<sub>10</sub>수명:95%CL)일때 가속조건에서 온도별 가속계수는 AF<sub>70</sub>=92.3, AF<sub>100</sub>=818.2, AF<sub>120</sub>=2975.5 임을 확인 할 수 있었다. 또한, 1차시험과 2차 시험에서의 아레니우스 관계식을 비교하여 본 결과 기울기와 절편이 거의 동일하므로 각각의 시험이 매우 유효함을 알 수 있다.

현재 교량지지용 탄성받침고무의 보증기간은 각각의 기업체마다 다르겠지만 대부분 10년으로 알려져 있다. 본 연구에서 사용조건을 20℃로볼때 B<sub>10</sub>수명은 11년으로서 본 연구에서의 B<sub>10</sub>수명과 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 본 연구는 95%신뢰수준에서 B<sub>10</sub>수명을 제시한 것이다. 마지막으로 향후 신장률만이 아닌 인장강도나 경도에 대한 상관성도 고려 대상이 될 수 있을 것이다. 또한 고온만이 아닌 저온에서의 관계식도 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 권영일외, 고무O링의 가속열화시험 분석사례, 가속수명시험 데이터 분석 표준매뉴얼, 산업자원부, 2004
- [2] 권영일, 가속수명시험 설계 및 분석, 신뢰성평가 전문인력 양성과정 교재, 2002
- [3] 김우철 외7인, 통계학 개론, 영지문화사, 1998
- [4] 김완두외 3인, 모터팬 방진고무부품의 노화 수명 예측
- [5] 서순근, MINITAB 신뢰성 분석, 이레테크, 2002
- [6] 이레테크 미니랩 사업부, MINITAB 실무완성, 이레테크, 2001

- [7] 정재흠외 4인, 자동차용 방진고무 수명예측에 관한 연구
- [8] ASTM D 412 (Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension)
- [9] ASTM D 2240 (Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness)
- [10] ISO 11346 (Rubber, Vulcanized or thermoplastic-Estimation of life-time and maximum temperature of use from an Arrhenius plot)
- [11] ISO 188 (Rubber, Vulcanized or thermoplastic-Accelerated ageing and heat resistance tests)
- [12] KS F 4420 : 1998, 교량지지용 탄성받침
- [13] Lawless, J.F.(1982), Statistical models and Methods for lifetime data, Wiley, New York.
- [14] Nelson, W(1990)., Accelerated Testing-Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses, Wiley, New York.
- [15] pr EN1337-3, Construction Standardisation Structural Bearings Part 3 : Elastomeric Bearing
- [16] RS F 0001 : 2001, 교량지지용 탄성받침(합성고무)