

## 복합노화를 받는 EPDM 고무의 가속수명예측

한승욱\* · 광승범\*\* · 최낙삼\*\*

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 현, 삼성전자 LED사업부 개발실

### Accelerated Life Prediction of Ethylene-Propylene Diene Monomer Rubber Subjected to Combined Degradation

Seung Wook Han\*, Seung Bum Kwak\*\*, and Nak Sam Choi\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

\*\* LED Product & Technology, LED Business, Samsung Electronics Co., Ltd.

(Received September 23, 2013 ; Revised November 5, 2013 ; Accepted December 3, 2013)

**Key Words:** Electro-Chemical Degradation(전기화학적노화), Arrhenius Formula(아레니우스 관계식), Accelerated-Life Evaluation(가속수명평가), EPDM Rubber(EPDM 고무), Mechanical Strain(기계적변형률)

**초록:** 내연기관의 냉각기 고무호스에 사용되는 EPDM 고무는 열과 기계적 하중을 받는 동시에 국부적으로 형성된 전기적 스트레스를 받아 복합적인 노화가 발생한다. 본 연구에서는 EPDM 고무의 전기화학적 복합노화 시험을 하고, 아레니우스 관계식을 이용하여 노화온도(60°C, 80°C, 100°C)에 따른 가속수명 예측식을 구하였다. 수명에 영향을 미치는 인장변형률(5%, 10%)을 반영하여 예측식의 기울기( $E_a/R$ ) 및 아레니우스 상수(C)를 고려한 수정된 수명예측 식을 제안하였다. 이를 통해 노화온도와 인장변형률에 영향을 받은 EPDM 고무의 수명을 예측하였고, 수정된 수명예측 시간이 실제 실험결과의 편차 범위 내에서 일치함을 확인하였다.

**Abstract:** The EPDM(ethylene-propylene diene monomer) rubbers used for manufacturing engine radiator hoses can be degraded by locally generated electrical stress in addition to thermal and mechanical stresses. This study presents an accelerated life prediction of the EPDM rubber under electrochemical stresses using the Arrhenius formula under various aging temperatures(60°C, 80°C, and 100°C). The modified life prediction formula considers the relationship between the gradient( $E_a/R$ ) and the Arrhenius constant(C). The effects of tensile strain(5%, 10%) on the life of these rubbers were investigated. The aging temperature influences EPDM rubber life, and tensile strain was predicted. It was confirmed that the modified life prediction was within the data deviation level of the test.

### 1. 서론

고무부품의 수명을 판단하는 방법으로 많이 사용되는 것이 가속시험이다. 가속시험의 기본 개념은 특성저하 인자의 수준을 증가시켜 고무제품의 수명을 감소시키는 것으로 사용온도를 높게 하여 고무부품의 노화속도를 빠르게 하거나 온

도를 증가시켜 균열이 보다 빠르게 진행되도록 하는 것이다. 이러한 가속시험 방법은 비교적 빠른 시간에 제품의 수명을 판단할 수 있지만 예측 오차가 발생할 수 있다.

가속시험을 통하여 얻어진 데이터로 고무제품의 수명을 예측하는 방법에는 아레니우스(Arrhenius) 모델과 WLF(Williams Landel Ferry) 모델이 있다.<sup>(1)</sup>

아레니우스 모델은 여러 온도에서 고무제품의 초기 특성값의 일정변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 Master curve 및 관계

† Corresponding Author, nschoi@hanyang.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정온도에서 예측 수명을 계산할 수 있으며 상온에서의 자연노화(Natural aging)에 의한 수명을 가속시험 결과로 얻어진 데이터를 환산하여 예측할 수 있다.<sup>(2)</sup>

아레니우스 관계식을 이용해 고무부품의 노화 수명을 예측한 연구를 살펴보면 Kim 등<sup>(3)</sup>은 EPDM(Ethylene-Propylene Diene Monomer) 고무로 만들어진 환기팬용 모터 방진고무 부품의 수명을 예측하기 위해 다양한 온도에서 가속 열 노화 시험을 수행하여 아레니우스 관계식으로부터 방진고무 부품의 수명과 활성화 에너지를 평가하는 가속시험법을 설계하였다. Woo 등<sup>(4)</sup>은 냉장고 콤프레샤 모터에서 발생하는 소음 및 진동 제어 목적으로 고무마운트에 사용되는 고무재료인 NBR(Acrylonitrile-butadiene rubber)과 EPDM에 대해 열 노화시험을 수행하여 물성을 평가하고 아레니우스 관계식으로 부터 고무소재의 노화수명을 예측하였다. Lee 등<sup>(5)</sup>은 선체 및 부두 안벽에 사용되는 고무 방현재의 노화에 따른 균열 및 변형에 대한 원인 분석을 위해 가속수명시험을 수행하여 사용수명을 예측하였다. Park<sup>(6)</sup>은 천연고무 레일패드의 열화모드와 메커니즘을 분석하여 적합한 시험방법을 결정하고 하중과 열에 의한 가속시험을 시행한 결과로부터 수명을 예측하여 고무 레일패드의 교환 주기를 파악하는 연구를 수행하였다. 저자들<sup>(7)</sup>은 자동차 냉각기용 고무호스를 사용하여 파손모드를 관찰하였는데, 전기화학적 노화시험에 의해 EPDM 고무의 표피층은 내부보다 더 많은 미소기공이 생성되어 냉각수를 흡수하였으며 내부에서도 부분적으로 많은 망상 미세결함(Defect network)이 형성되었음을 확인하였다. 또한, 고무에 인장응력이 가해질 경우 이들 미세결함에서 크랙이 발생하고 이 크랙이 합체(Coalescence)함으로써 거시적인 파단을 하였다.

본 연구에서는 자동차 냉각기 고무호스에 주로 사용되는 EPDM 고무의 고장에 크게 영향을 미치는 전기화학적 노화에 대해 가속수명 관계식을 구하고자 한다. 즉, 본 연구실에서 제작한 기계적 열적 부하를 동시에 가할 수 있는 전기화학적 복합노화 시험기로 노화온도(60°C, 80°C, 100°C)와 기계적 인장변형률(0%, 5%, 10%)에 따른 결과로부터 아레니우스(Arrhenius) 관계식을 이용해 가속수명 관계식을 제안하고자한다.

## 2. 아레니우스(Arrhenius) 관계식

아레니우스 관계식은 고분자소재의 온도-수명 관계를 나타내주며,<sup>(4)</sup> 일차 노화 반응에서 고무의 특성치를 P 라고 하면 다음 식이 나온다.

$$\ln \left[ \frac{P}{P_0} \right] = -kt \quad (1)$$

여기서, P는 고무의 특성치(신율, 인장강도 등), P<sub>0</sub>는 초기 값, t는 시간, k는 반응속도 정수(Reaction, 1/time)이다.

식 (1)에서 반응 속도 정수 k는 특성치 P의 노화 반응을 나타내는 정수로 Arrhenius의 실험식은 다음과 같다.

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

여기서, A, C는 상수(Constant), E<sub>a</sub>는 활성화 에너지(Activation energy, J/mol), R은 기체상수(Gas constant, 8.314J/mol·K), T는 섭씨온도(τ) + 273의 절대온도이다.

식 (1)에서 노화시킨 특성치 P 가 있는 시점을 수명이라고 하면, 그 시점의 수명 t는 식 (3)과 같다.

$$t = -\ln \left[ \frac{P}{P_0} \right] / k \quad (3)$$

식 (3)에서 수명 t는 반응속도 정수 관계인 식 (2)로부터 온도의 관계로 표현되어 수명과 온도 환산이 가능해 진다. 즉, 특성치 P로 온도 T<sub>1</sub>에서의 수명 t<sub>1</sub>은 온도 T<sub>2</sub>에서의 수명 t<sub>2</sub>에 대응하므로 이것은 다음 식으로 표현된다.

$$\ln \left[ \frac{t_1}{t_2} \right] = \frac{E_a}{R} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (4)$$

고무 노화로 발생하는 활성화 에너지는 Fig. 1<sup>(8)</sup>과 같이 초기상태로부터 노화 후의 상태로 될 때 필요로 하는 최소 에너지이다. 이 값은 고무 재료 및 노화모드에 따라 달라진다. 활성화 에너지(E<sub>a</sub>)를 구하기 위해서는 여러 온도에서 고무의 특성치 변화를 알아야 한다.

예를 들어 Fig. 2는 60°C, 80°C, 100°C에서의 고무의 특성치 변화를 나타낸 것이다. 온도가 낮을 때는 특성치의 변화가 완만하게 변화하며 온도가 올라갈수록 급격한 변화를 보인다. 만일 고무제

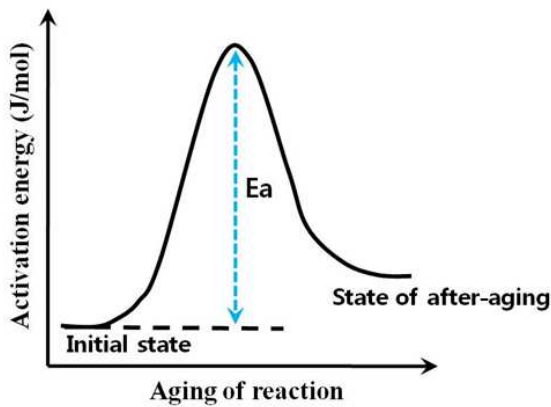


Fig. 1 Activation energy

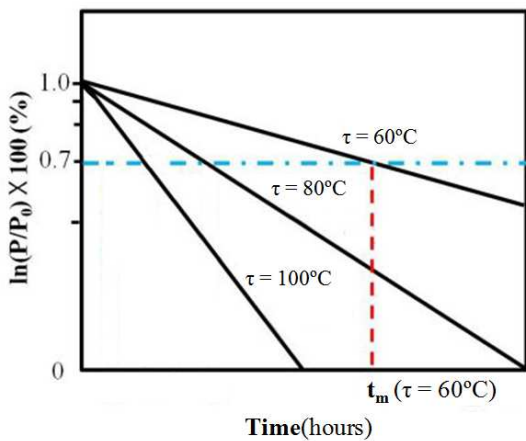


Fig. 2 Property change as a function of time and temperature

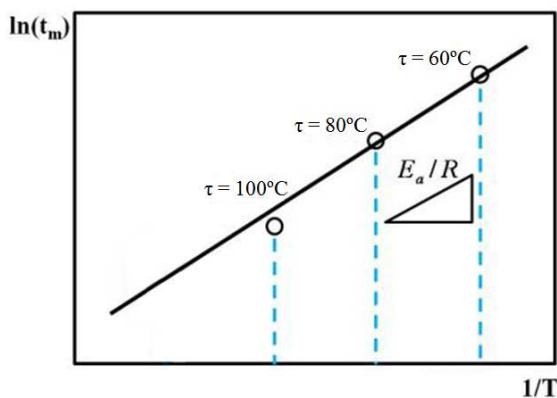


Fig. 3 Arrhenius curve

품의 사용수명을 초기상태의 특성보다 30% 감소 하였을 때라고 한다면 Fig. 2로부터 각 온도에서의 특성치 변화율이 0.7일 때의 시간을 구할 수 있다. 이것이 각 온도에서의 수명시간( $t_m$ )인 것이다. 세로축을 수명시간의 대수값( $\ln(t_m)$ )으로 하고 가로축을 절대온도의 역수( $1/T$ )로 변환시켜 Fig. 3

Table 1 ECD life time data at various temperatures and strains

Tensile strain	Temperature $\tau$ (°C)	Time(hours)					
		$\Delta I/I_0 = -50\%$		-70%		-90%	
0%	60	35	5 -9	81	14 -17	246	25 -12
	80	24	2 -5	73	14 -12	182	15 -18
	100	12	8 -6	39	10 -14	148	13 -12
5%	60	28	22 -18	68	13 -21	224	8 -17
	80	18	12 -7	58	18 -19	164	6 -12
	100	10	3 -4	32	4 -8	129	2 -14
10%	60	24	11 -7	59	17 -16	213	27 -11
	80	17	10 -4	49	21 -13	159	8 -7
	100	9	6 -4	27	13 -6	122	29 -20

과 같이 그릴 수 있다. 이때의 기울기로부터 활성화 에너지( $E_a$ )를 구하는 것이 가능한데 아레니우스 식 (2)에 자연대수를 취하면 식 (3)과 같이 기울기( $E_a/R$ ) =  $E_a/8.314$ 가 되어 결국, 활성화 에너지  $E_a = 8.314 \times$ 기울기가 구해진다.

### 3. 가속수명 평가

#### 3.1 Arrhenius 관계식을 이용한 수명평가

본 연구대상인 EPDM 고무는 자동차 냉각기 고무 호스의 소재로 많이 사용된다. EPDM 고무호스 소재의 전기화학적 복합노화에 따른 수명을 평가하기 위해 두께 2mm의 판상고무 형태의 압축 성형한 EPDM 고무 시험편을 제작하였으며, 자동차용 냉각기 호스의 정상적인 사용온도는 통상 75°C ~ 95°C로 신뢰성평가 인증기준(RS M0004)에서 기준으로 하는 노화 온도 100°C를 포함하여 노화 온도 60°C, 80°C를 추가하였다. 노화온도 60°C, 80°C, 100°C에서 기계적 인장변형률 0%, 5%, 10%의 조건으로 노화시험을 수행하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 최대 전류값을 기준으로 50%, 70%, 90% 저하된 시점의 노화시간( $t_{50}$ ,  $t_{70}$ ,  $t_{90}$ )을 수명결정 시간으로 가정하여 아레니우스 관계식을 구하였다.

기계적 인장변형률 0%, 5%, 10%하에서 온도에 따른 노화시간은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 시험편은 각 조건 당 10개씩 사용하였으나 고무시험편의 특성상 데이터의 편차가 심하게 나타났다. 따라서 10개의 시험편 중에서 최대값과 최소값 데이터와 특이 변형거동을 보이는 데이터를 제외하고 6개의 시험편 결과로부터 평균값을 구하여 노화시간을 선정하였다. 이와 같이 선정된 6개 시험편의 노화시간을 사용수명 시간으로 하여 아레니우스 선도와 관계식을 구하였다.

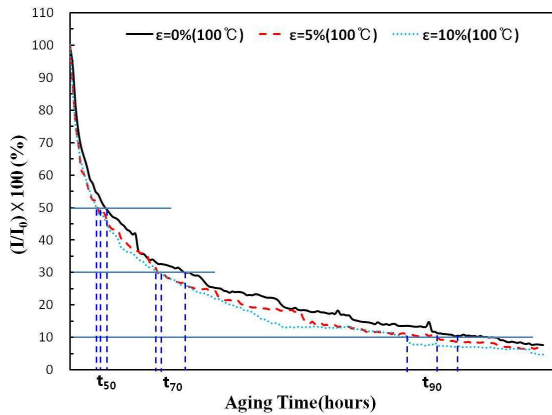


Fig. 4 Variation of the current with aging time under various tensile strains.

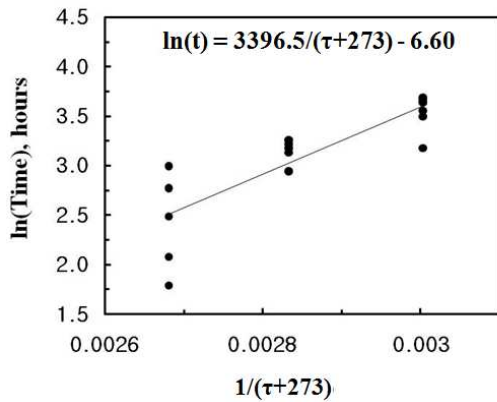


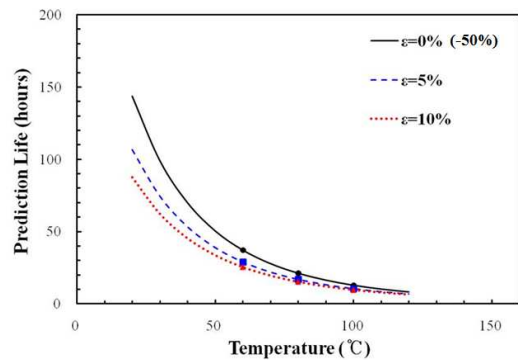
Fig. 5 Arrhenius plot at a current reduction 50% and a tensile strain 0%.

Fig. 5는 전류값 저하율( $\Delta I/I_0$ ) -50%를 고장수명으로 하고, 기계적 인장변형률 0%에서 노화온도와 수명시간을 이용하여 아레니우스 선도(Arrhenius plot)를 나타낸 것이다. 이 선도로부터 활성화 에너지( $E_a$ )/기체상수( $R$ )는 직선의 기울기 값이며 아레니우스 상수( $C$ )는 y축의 절편에 해당된다. 같은 방법으로 기계적 인장변형률 5%와 10%에서의 아레니우스 선도를 구하였으며, 아레니우스 선도로 부터 구한 수명예측 관계식은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

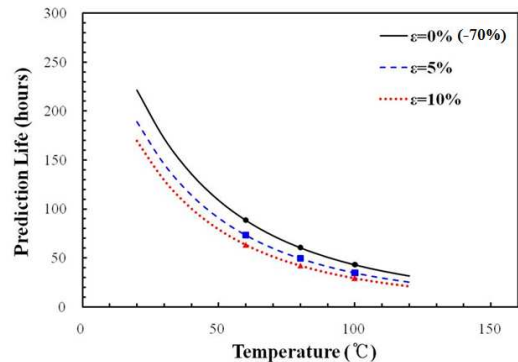
Fig. 6은 수명예측 관계식을 이용하여 노화온도 (20°C ~ 120°C)에 따른 계산 결과를 나타낸 것이다. 전류값 저하율 -50%(Fig. 6(a))를 고장수명으로 볼 경우 노화온도에 따라 예측수명이 노화온도 20°C에서 60°C까지는 온도에 따라 급격하게 낮아지다가 60°C 이후로는 완만하게 감소되는 경향을 보이고 있다. 수명예측 관계식은 ln함수로 계산한 결과인데, 이는 예측 식으로써 식 (4)의

Table 2 Data fitting equations of life time versus temperature at various strains

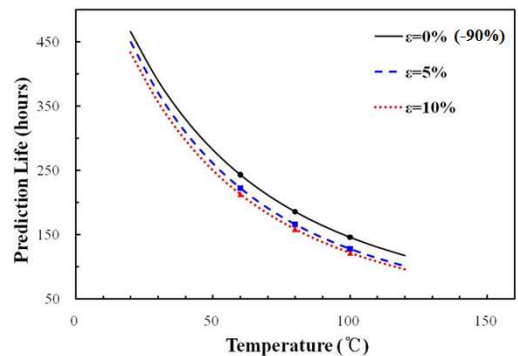
Tensile strain	Reduced current ( $\Delta I/I_0$ )	Fitting equation
0%	- 50%	$\ln(t) = 3396.5/(\tau+273) - 6.60$
	- 70%	$\ln(t) = 2236.5/(\tau+273) - 2.23$
	- 90%	$\ln(t) = 1581.7/(\tau+273) + 0.75$
5%	- 50%	$\ln(t) = 3185.2/(\tau+273) - 6.20$
	- 70%	$\ln(t) = 2312.6/(\tau+273) - 2.65$
	- 90%	$\ln(t) = 1715.9/(\tau+273) + 0.25$
10%	- 50%	$\ln(t) = 3025.4/(\tau+273) - 5.85$
	- 70%	$\ln(t) = 2400.7/(\tau+273) - 3.06$
	- 90%	$\ln(t) = 1730.2/(\tau+273) + 0.17$



(a) Reduced current ( $\Delta I/I_0$ ) : - 50%



(b) Reduced current ( $\Delta I/I_0$ ) : - 70%



(c) Reduced current ( $\Delta I/I_0$ ) : - 90%

Fig. 6 Fitted life versus temperature at various tensile strains

아레니우스식을 도입한 결과로써 구한 것으로 고온영역에서 약간의 변동은 저온에서 예측수명의 변동이 매우 클 수 있음을 나타낸다. 기계적 인장변형률에 따른 수명감소 효과는 20℃에서 가장 크게 나타났으며 노화온도가 증가함에 따라 점차 줄어들면서 100℃ 이후에서는 거의 같아지고 있다. 전류값 저하율 -70%(Fig. 6(b))를 고장수명으로 볼 때, 노화온도에 따른 예측수명이 낮아지는 경향이 전체 온도영역에서 비슷하게 나타나고 있으며 기계적 인장변형률에 따른 수명감소 효과는 -50%의 경우(Fig. 6(a))와 마찬가지로 온도가 증가할수록 인장변형률에 대한 영향이 점차 줄어들고 있으나 100℃ 이후에도 인장변형률에 의한 차이는 나타나고 있다. 전류값 저하율 -90%(Fig. 6(c))를 고장수명으로 볼 때, 예측수명은 노화온도에 따라 전체적으로 급격하게 낮아지고 있으며 기계적 인장변형률에 의한 수명감소 효과는 5%와 10%의 차이가 점차 줄어들면서 100℃이후 거의 같아지고 있다. 전류값 저하율( $\Delta I/I_0$ ) -50%와 -90%(Fig.6(a), (c))를 기준으로 수명시간을 평가할 경우, 노화온도 60℃, 80℃, 100℃에서 수명예측 관계식으로부터 계산된 예측수명 시간을 실제 노화시험 시간의 결과(Table 1)와 비교하면 오차범위  $\pm 5$ 시간 이내로 잘 맞음을 알 수 있었다. 하지만, 전류값 저하율 -70%(Fig.6(b))의 경우 예측수명 시간이 실제 노화시험 시간 보다 최대 12시간 만큼 낮게 나타나, 실제 실험값의 편차범위 이내에 들어감을 알 수 있다.

3.2 기계적 인장변형률을 고려한 수명평가

3.1절의 결과로부터 EPDM 고무의 가속노화에 지배적인 영향을 미치는 것은 노화온도이나, 기계적 인장변형률에 의한 영향도 상당히 나타났다. 따라서 본 연구에서는 EPDM 고무의 수명예측에 온도와 기계적 인장변형률을 함께 고려한 수정된 수명예측 관계식을 만들고자한다.

Fig. 7은 전류값 저하율(-50%)를 고장수명으로 볼 때 3.1절에서 구한 수명예측 관계식(Table 2)으로부터 기계적 인장변형률(0%, 5%, 10%)과  $E_a/R$ 의 관계를 나타낸 것으로 기계적 인장변형률과  $E_a/R$ 은 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 같은 방법으로 전류값 저하율(-50%)에 대해 기계적 인장변형률과 아레니우스 상수(C)의 관계를 확인해본 결과 Fig. 8과 같이 선형적인 관계가 있

음을 알 수 있다. 이와 같이 기계적 인장변형률과  $E_a/R$  및 C 사이의 선형적인 관계로부터 전류값 저하율(-50%, -70%, -90%)에 대해 각각의 관계식을 만들었으며 이것을 Table 3에 나타내었다.

따라서 전류값 저하율 -50%를 고장수명으로 볼 때, 기계적 인장변형률을 고려할 수 있는 수명예측 관계식은 식 (2)의 아레니우스 관계식을 수정(\*)하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 3 Correction equations of  $E_a/R$  and C as a function of strain(  $\epsilon$  )

	Reduced current ( $\Delta I/I_0$ )	Equation
$E_a/R$	- 50%	$E_a/R = -37.11 \epsilon + 3387.9$
	- 70%	$E_a/R = 16.42 \epsilon + 2234.5$
	- 90%	$E_a/R = 14.85 \epsilon + 1601.7$
C	- 50%	$C = 0.072\epsilon - 6.57$
	- 70%	$C = -0.083\epsilon - 2.23$
	- 90%	$C = -0.058\epsilon + 0.68$

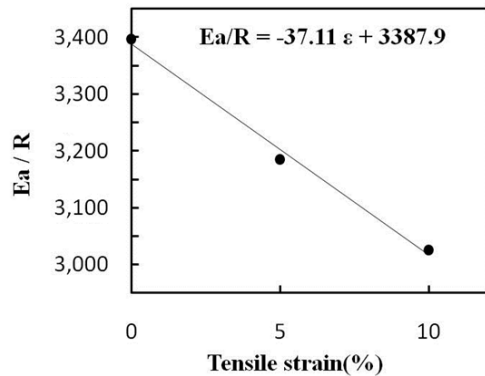


Fig. 7 Relation between  $E_a/R$  and tensile strains

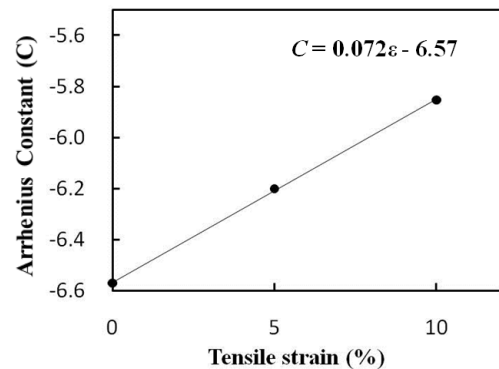


Fig. 8 Relation between C and tensile strains

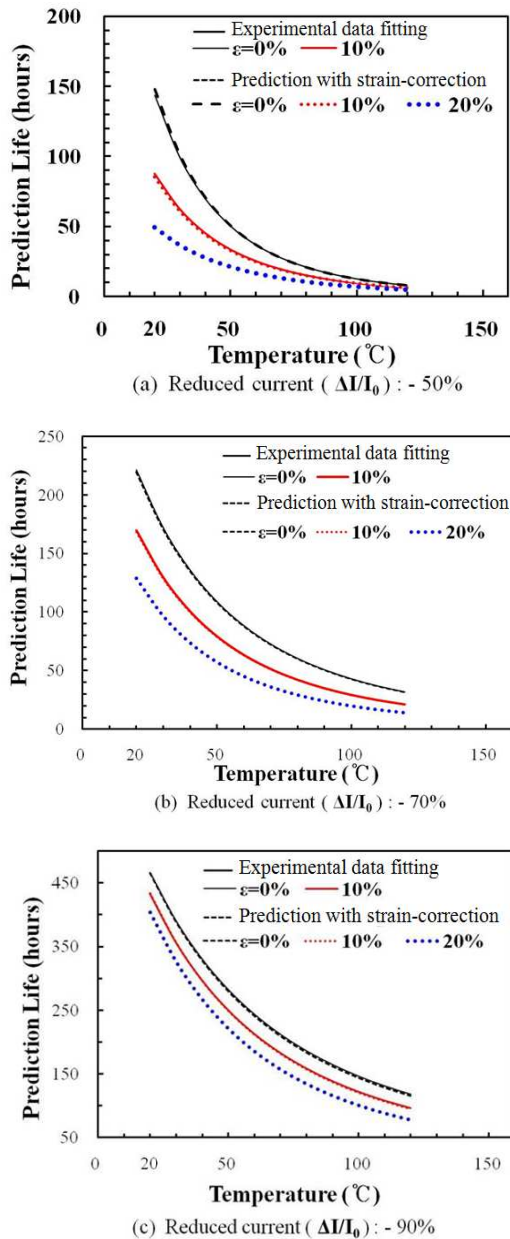


Fig. 9 Prediction life versus temperature at various tensile strains

$$\ln k(T) = -\left(\frac{E_a}{R}\right)^* \cdot \frac{1}{T} + C^* \quad (5)$$

$$\left(\frac{E_a}{R}\right)^* = -37.11 \cdot \varepsilon + 3387.9$$

$$C^* = 0.072 \cdot \varepsilon - 6.57$$

변형률을 고려할 수 있도록 수정된 수명예측 관계식(Table 3)을 이용해 계산한 결과와 Table 2

의 수명예측 관계식으로부터 계산된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 실선은 Table 2의 관계식에서 기계적 인장변형률 0%와 10%에 대해 계산된 결과이고 점선은 수정된 수명예측 관계식(Table 3)에서 기계적 인장변형률 0%, 10%, 20%의 계산 결과를 나타낸 것이다. 실선과 점선의 예측식은 아레니우스식을 함께 사용하였지만, 점선으로 표시된 변형률로 수정된 수명예측 관계식으로 계산된 결과( $\varepsilon=0\%$ , 10%)를 실선으로 표시된 Table 2의 수명예측 관계식으로 계산된 결과와 비교해 보면 조금씩 차이는 나지만 전반적으로 잘 일치하였다. 이 결과에서 나타난 차이는 실제 실험 결과의 편차(Table 1 참조)에 비해 작은 편이므로 계산된 예측수명이 적정함을 알 수 있다. 전류값 저하율 -50%와 -70%를 고장수명으로 볼 경우(Fig. 9(a), (b)) 노화온도가 낮을수록 기계적 인장변형률에 따른 예측수명 시간의 차이가 상당히 커지면서 노화온도 20°C에서는 약 40~50시간의 차이를 보이고 있다. 반면에 전류값 저하율 -90%(Fig. 9(c))에서는 기계적 인장변형률에 따른 영향이 노화온도에 따라 전체적으로 비슷한 감소거동을 나타내고 있다.

Fig. 9에서 기계적 인장변형률 20%의 결과는 수정된 수명예측 관계식을 이용해 계산된 것으로 인장변형률 0%, 10%의 결과와 온도에 따른 감소 경향은 유사하나, 수정값 자체는 크게 작아졌다. 이렇게 수정된 수명예측 관계식을 이용하면 임의의 노화온도와 기계적 인장변형률을 동시에 고려하여 전기화학적 복합노화에 따른 수명시간을 예측할 수 있게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 EPDM 고무의 고장에 크게 영향을 미치는 전기화학적 복합노화에 대해 온도-시간 관계식인 아레니우스 관계식을 이용하여 수명예측 관계식을 만들었다.

전류값 저하율 -50%, -70%, -90%를 고장수명으로 가정하고, 노화온도 60°C, 80°C, 100°C에서 기계적 인장변형률 0%, 5%, 10%의 조건으로 각각의 수명예측 관계식을 구하였다. 이를 통해 노화온도 60°C, 80°C, 100°C에서 계산된 예측수명 시간은 실제 노화시험 시간과 비교했을 때 상당히 일치함을 보였다.

아레니우스 관계식을 이용한 수명예측 식으로부

터 기계적 인장변형률(0%, 5%, 10%)과 기율기 ( $E_a/R$ ) 및 아레니우스 상수( $C$ )의 관계를 확인해본 결과 선형적인 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 노화온도와 기계적 인장변형률을 고려한 수정된 복합노화 가속수명예측 관계식을 도출하였다. 수정된 복합노화 가속수명예측 식의 예측수명 시간은 실제 노화시험 시간 결과와 편차 범위 내에서 일치함을 확인하였다. 따라서 수정된 수명예측 관계식을 이용하면 노화온도와 기계적 인장변형률에 영향을 받은 EPDM 고무의 노화수명을 예측할 수 있다.

본 연구에서 제안한 복합노화 가속수명예측 관계식은 EPDM 고무 시험편을 이용한 실험실 레벨에서의 예측수명이다. 실제 산업현장에서 사용되는 고무부품의 고장 수명과 연관성을 찾기 위해서는 사용시간, 주변 환경 등이 잘 기록된 고무부품을 입수하여 물성의 변화거동을 측정하고 시험편 레벨에서의 결과와 비교분석 함으로써 실제 고무부품의 고장수명을 예측할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2012년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(NRF-2011-0021764)

## 참고문헌 (References)

- (1) Brown, R. P., 1996, "Physical Testing of Rubber," 3rd, Chapman & Hall.
- (2) Brown, R. P., 2001, "Practical Guide to the Assessment of the Useful life of Rubbers," Rapra Technology.
- (3) Kim, W. D., Kim, W. S., Woo, C. S. and Cho, S. J., 2002, "Prediction of Useful Life by Heat Aging of Motor Fan Isolating Rubber," *Elastomer*, Vol. 37, No. 2, pp. 107~114.
- (4) Woo, C. S. and Choi, S. S., 2005, "Effects of Thermal Aging on Properties and Life-Time Prediction of NBR and EPDM Vulcanizates," *Elastomer*, Vol. 40, No. 2, pp. 119~127.
- (5) Lee, S. H., Park, J. H. and Kim, G. S., 2008, "Prediction of Service Life of Rubber Fender," *Journal of the applied reliability*, Vol. 8, No. 2, pp. 87~100.
- (6) Park, D. K., 2010, "A Study for Life Prediction of the NR Rubber Railpad Based on Degradation Mechanism," *Doctorate Thesis*, Korea University Graduate school, Seoul.
- (7) Kwak, S. B., Choi, N. S. and Shin, S. M., 2013, "Electrochemical Combined-Stress Degradation Test and Failure Mechanisms of EPDM Rubber for Automotive Radiator Hoses," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 1, pp. 1~8.
- (8) Kim, W. D., Nah, C. W., Koh, S. K. and Lee, S. B., 2004, "Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components," *Ministry of Science and Technology*.

(1) Brown, R. P., 1996, "Physical Testing of