

전투화용 고무의 가속수명예측

유건성^{*}, 이남례¹, 여용현¹, 이범철²
¹국방기술품질원, ²이스켄 주식회사 연구소

Accelerated Life Prediction of the Rubber for Combat Boots

Gun-Sung Yu^{*}, Nam-Rye Lee¹, Yong-Heon Yeo¹, Beom-Cheol Lee²

¹Defense Agency for Technology Quality

²Technical Research Center, Is-chem Co., Ltd.

요약 현재 군에 보급되고 있는 접착식 전투화용 고무의 대표적인 노화현상은 열에 의한 정기적인 스트레스 노화가 대표적이다. 본 연구에서는 전투화용 고무의 노화시험을 실시하고, 아레니우스 관계식을 이용하여 노화온도(60°C, 80°C, 100°C)에 따른 반응속도 상수 k 를 구하였다. 제품의 수명한계를 인장강도는 30% 감소시점, 신장률은 50% 감소시점, 내마모도는 380%로 가정하였으며, $\ln(P/P_0)$ 및 활성화 에너지와 상수를 고려한 수명예측을 하였다. 이를 통해 노화온도에 영향을 받은 전투화용 고무의 수명을 예측하였고, 그 결과 실온(20°C)에서 예상수명이 10년 이상임을 확인할 수 있었다.

Abstract Typical aging for the rubber using the current military adhesive combat boots was spread with a regular aging caused by heat stress. In this study, the aging test of the rubber for combat boots was carried out and the reaction rate constant, k was calculated at aging temperature 60°C, 80°C and 100°C, using the Arrhenius equation. The lifetime limit was assumed that the tensile strength of the product is reduced to 30%, the elongation is reduced to 50% and abrasion resistance ratio is 380%. $\ln(P/P_0)$ and the lifetime was predicted with the consideration of the activation energy constant. According to the above, the lifetime of the rubber for combat boots with influenced by aging temperature was predicted. As the result, the estimate lifetime at 20°C was confirmed more than 10 years.

Keywords : Accelerated life test, Arrhenius relation, Estimate lifetime, Reliability assurance, Rubber for combat boots

1. 서론

현재 군에 보급되는 전투화의 품질보증기간은 계약특수조건 상 1년으로 설정되어 있으나, 실제 사용자불만 발생시 군복무기간(2년)동안 관행적 또는 업체의 자발적 A/S가 적용되고 있는 실정이다. 하지만 사용자의 불만건 수가 많을 경우 업체의 자발적인 A/S를 기대하기 어려워 업체와 정부 간 이견이 발생될 수 있다. 이에 따라 근본적인 해결방안 제시가 필요하여 전투화고무의 수명평가를 실시하였다.

전투화의 주재료인 고무제품은 시간이 지남에 따라 환경조건(온도, 습도, 직사광선 등) 및 물리적 조건(활동

에 따른 굽힘성, 마모성 등)의 영향을 받게 된다. 이는 저장조건이나 작동조건에 따라 초기에 계획된 요구성능을 만족시키지 못하여 실제 동작 시 문제점 발생의 원인이 되기도 한다.

일반적인 고무제품은 온도, 습도, 오존, 빛, 유제, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자에 따라 다른 특성을 나타내게 된다. 이러한 문제로 인하여 현장 적용 시 동일한 조건에서의 시험을 설계하여 성능 실험을 실시하게 된다.

전투화의 물성변화를 판단하는 방법에는 크게 세 가지가 있다. 첫째, 같은 환경에 적용하여 수명을 직접 판단하는 것으로 시간이 너무 많이 소요되는 단점이 있다. 둘째, 경험에 의한 방법으로 이는 오랜 시간동안 관련된

본 논문은 국방기술품질원 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Gun-Sung Yu (Defense Agency for Technology and Quality)

Tel: +82-10-5085-1434 email: rootstarryu@dtaq.re.kr

Received October 22, 2015

Revised (1st November 18, 2015, 2nd November 26, 2015)

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

전투화를 다른 기술자가 필요하다. 마지막으로, 실제 사용환경이나 조건보다 가혹하게 실험을 수행하는 가속수명시험 방법(Accelerated Life Testing : ALT)으로 비교적 빠른 시간에 제품의 수명을 판단할 수 있지만, 예측 오차가 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 전투화의 수명을 평가하기 위해 비교적 빠른 시간에 제품수명을 예측할 수 있는 가속시험방법을 채택하였다.

2. 가속수명시험

2.1 개요

소비자의 생활 패턴이 급격히 빨라짐에 따라 제품의 개발기간이 단축되고 있다. 이러한 개발기간 단축으로 소비자의 만족도는 높일 수 있으나, 제품이 가지고 있는 미지의 불안정한 요소는 늘어나게 되고 소비자의 제품에 대한 신뢰성요구에 대해 정확한 해결책을 제시하지 못하여 시간이 지남에 따라 소비자의 불만은 높아져 기업에 큰 피해를 입히게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 신뢰성시험을 실시하게 된다.

신뢰성시험이란 제품의 사용 환경 조건에서 시간에 따른 안정성과 신뢰성을 평가하기 위해 계획되는 시험을 말한다. 이러한 신뢰성 시험은 제품 개발 및 제조 과정에서 신뢰성 향상, 평가, 인증 및 보증을 위하여 실시되는 모든 시험을 말하기도 한다. 미국방부규격 MIL-STD-721C에 따르면 신뢰성이란 어떤 아이템이 규정된 조건에서 정해진 기간 동안 의도한 기능을 만족할 수 있는 확률로 규정하고 있으며, 삼상전자에서는 눈에 보이지 않는 기본 품질로 정의되고 있다. 이러한 신뢰성 시험은 시험의 목적에 따라 다른 시험방법을 적용하며 신뢰성 시험 종류는 Table 1과 같다[1].

Table 1. The type of test for reliability

Purpose	The type of test for reliability
Reliability Improvement	- Reliability Growth Test - HALT(Highly Accelerated Lift Test)
Reliability Assurance	- Reliability Qualification Test - DVT/MVT - Production Reliability Acceptable Test - Accelerated Life Test
Initial Failure Prevention	- Burn-in/ESS/HASS

신뢰성시험 중 신뢰성 보증을 위한 시험방법인 가속시험은 KS규격 중 KS A 3004 부표 191-14-07에 따르면 시간을 단축할 목적으로 기준보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험으로 규정하고 있다. 가속시험을 통해 규정시간(시험시간)까지의 성능으로 최종고장시간까지의 시간을 예측하는 방법으로 시험제품에 대한 성능규격은 제품초기부터 제품고장시점까지의 시간으로 규정할 수 있다. 가속시험 방법은 높은 사용률을 통해 고장시간을 단축하는 방법, 과도한 스트레스를 가하는 방법, 열화현상을 이용하는 방법 등 여러 가지 방법이 있다.

가속수명시험은 사용조건보다 가혹한 환경(온도, 습도, 진동, 전압 등) 수준에서 시험하여 고장을 가속시키는 시험으로 가속조건에서 관측된 데이터로부터 수명과 스트레스와의 관계식을 추정하게 된다. 또한 수명과 스트레스 관계식을 사용조건(온도, 압력 등)으로 외삽(extrapolation)하여 원하는 사용조건에서의 수명을 추정하게 된다. Fig. 1은 가속수명-스트레스 관계를 이용한 수명예측 방법에 대하여 방법 상 처리형태를 나타낸 것이다[2].

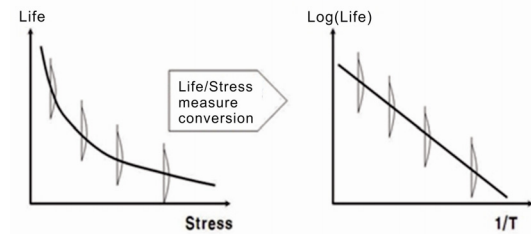


Fig. 1. The method for life estimate using accelerated life-stress relation

또한 가속시험은 크게 가속수명시험(Accelerated Life Testing : ALT)과 가속스트레스시험(Accelerated Stress Testing : AST)으로 구분할 수 있다. 두 가지 시험의 차이점은 스트레스수, 인가방법, 관측방법 등으로 시험방법을 구분할 수 있으며, 스트레스 인가방법으로 구분한다면 일정한 스트레스를 인가하는 방법과 단계적으로 상승/하강시키는 인가방법, 점진적으로 상승/하강시키는 스트레스 인가방법으로 나눌 수 있다. 가속수명시험을 통해 얻어진 시험데이터는 가속수명시험 모형으로 분석이 가능하며, 가속 수명시험 모형은 수명분포와 수명-스트레스 관계로 이루어져 있다. 수명분포는 지수분포, 와

이블분포, 대수정규 분포 등이 있으며, 수명-스트레스 관계는 아레니우스(Arrhenius), 역거듭제곱, Eyring 방식으로 분석이 가능하다[3].

본 연구에서는 시험시간을 최장 1개월 내외로 설정하였으며, 이 같은 제약조건을 만족시킬 수 있도록 가속시험을 활용하여 수명을 예측하였다. 또한 고무의 물성에 영향을 주는 특성저하 요인 중 가장 주요한 인자인 온도를 가속스트레스 조건으로 설정하고, 실제 제품이 사용되는 곳의 온도보다 높은 온도조건에서 열 노화시키는 가속노화시험을 선택하였다.

2.2 가속노화수명 예측 모델

일반적으로 가속노화수명 모델로 많이 이용되고 있는 아레니우스 모델은 유기재료의 장기간 내열성을 예측하기 위한 아레니우스 방식과 내열온도지수 등이 잘 알려져 있으며, 실제로 여러 연구자들의 실험식과 이 식이 잘 맞는다는 것이 확인되고 있다[4].

아레니우스 모델은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, P는 고무의 특성값(인장강도, 신장률 등), P₀는 초기 값, t는 시간, k는 반응속도 상수(Reaction rate constant)이다.

식 (1)에서 반응속도 상수 k는 특성값 P의 노화반응을 나타내는 정수이며, S. Arrhenius는 반응속도 상수 k와 활성화 에너지 E간에 식 (2), (3)과 같은 실험적 관계가 성립하고 있음을 발표하였다.

$$k = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

여기서, A는 반응상수, R은 기체상수(Gas constant, 1.987kcal·J/mol), T는 절대온도(Absolute temperature, K), E는 활성화 에너지(Activation energy, kcal/mol)이다.

식 (2)의 양변에 자연로그를 취하면,

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + \ln A \quad (3)$$

식 (3)에서 $\ln k$ 는 $-E/R$ 의 기울기를 갖는 $1/T$ 와의 선형적인 관계를 얻을 수 있다. 실험을 통해 활성화 에너지(E)와 반응상수(A)를 구하게 되면 각 온도에 대한 k값을 구할 수 있으며, 식 (1)에서 반응속도 상수 k값을 이용하여 원하는 온도에서의 성능유지시간 t를 예측할 수 있게 된다.

3. 가속수명평가

3.1 재료

본 연구대상인 전투화용 고무는 대개 열화현상에 의하여 노화가 촉진됨에 따라 가속변수를 온도로 설정하고 아레니우스 관계식에 적용하여 전투화용 고무의 수명을 예측하였다. 가속노화시험을 진행하기 위하여 현재 군에 납품되고 있는 고무를 두께가 각각 2mm, 6mm인 판상 고무시험편으로 준비하였으며, 2mm 고무시험편은 인장강도 및 신장률을, 6mm 고무시험편은 내마모도를 측정하는데 사용하였다.

3.2 시험방법

인장강도 및 신장률 시험은 KS M 6518(가황고무 물리시험 방법) 규격의 아령형 3호를 기준으로 실시하였으며, 내마모도는 KS M 6625(가교고무의 마모시험 방법) 규격에 의거하여 시험을 수행하였다.

전투화에 사용되는 고무는 천연고무(Natural Rubber : NR) 및 부타디엔고무(Butadiene Rubber : BR)로 이루어져 있고 사용가능한 온도범위는 각각 $-40\sim 60^\circ\text{C}$, $-45\sim 90^\circ\text{C}$ 이며, 가속시험시간을 고려하여 사용가능 온도조건보다 높은 100°C 를 가속노화시험의 최고온도로 설정하였다. 이는 여러 국제규격과 연구논문에서 고무의 가속수명에 사용되는 최고온도조건과 동일한 수준이다. ISO 11346에서 권장하는 노화시험 온도범위는 사용 최고온도이하에서 3, 4가지 온도로 시험조건을 정하게 되어 있으며, 본 연구에서는 60°C , 80°C , 100°C 를 가속조건으로 선정하였다.

온도수준별로 가속시간의 간격을 각각 4일, 3일, 1일 주기로 총 9회에 걸쳐 시험을 진행하였다. 1회 측정 시 인장강도 및 신장률은 5개의 시험편을, 내마모도는 1개의 시험편을 사용하였다. 노화수명관계 수준은 Table 2와 같이 ASTM D 2000과 군 규격을 참조하여 인장강도

는 30%감소 수준, 신장률은 50%감소 수준, 내마모도는 380% 미만일 때를 한계수명으로 설정하였다[5].

Table 2. The criteria for lifetime limit

Property	Lifetime limit	Reference
Tensile strength	± 30 %	ASTM D 2000
Elongation at break	- 50 %	
Abrasion resistance ratio	more than 380%	Military specifications

3.3 가속수명시험 결과

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4는 각각 인장강도, 신장률, 내마모도를 가속시간(Aging time)에 따라 $\ln(P/P_0)$ 로 나타낸 그래프이다. 각 그래프에 수명한계(Lifetime limit) 기준 선을 굵은 선으로 나타내었고, 이 기준선은 Table 2를 기준으로 수명한계 물성값과 초기값의 비(P/P_0)의 자연 대수를 나타낸 것이다. Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4에서 각 온도별 선형그래프의 기울기가 각 물성에 대한 반응속도 상수 k 이고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3을 식 (3)에 적용하여 y축을 $\ln k$, x축을 $-1/RT$ 로 하여 그래프화하면 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7을 얻을 수 있다[6]. 이때의 기울기는 식 (3)의 활성화 에너지 (E)와 같고, y절편은 $\ln A$ 에 해당되므로 Table 4와 같은 식을 얻을 수 있다. 최종적으로 Table 4를 식 (1)에 역으로 적용하면 $\ln t$ 의 수명식 Table 5를 얻을 수 있고, 전투화용 고무가 사용되는 온도를 적용하면 사용온도에서의 수명을 예측할 수 있게 된다.

도출된 수명예측식을 이용하여 전투화의 통상 사용온도인 20℃에서의 각 특성에 대한 열 노화 고장수명은 인장강도 13.5년, 신장률 12.5년, 내마모도 482년으로 예측되었다. 이는 현재 보급되고 있는 전투화용 고무의 열 노화에 의한 고장수명이 10년 이상임을 예측할 수 있으며, 군복무기간 동안 열 노화에 의한 고장은 없을 것으로 추측된다.

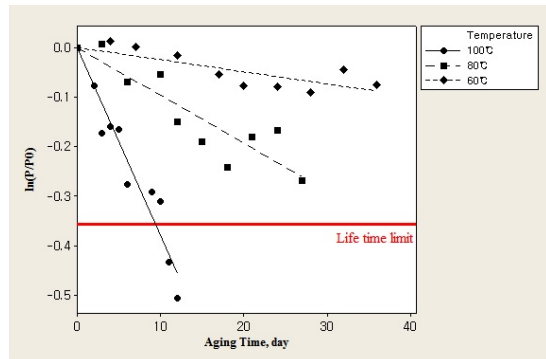


Fig. 2. Logarithmic of properties at specific time and initial of property values for tensile strength

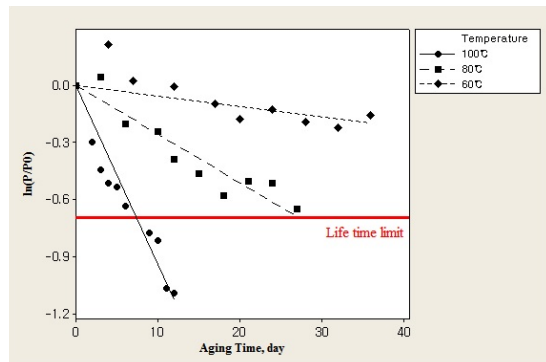


Fig. 3. Logarithmic of properties at specific time and initial of property values for elongation at break

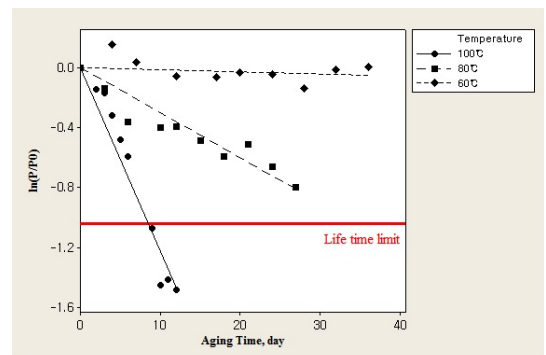


Fig. 4. Logarithmic of properties at specific time and initial of property values for abrasion resistance ratio

Table 3. Reaction rate constant for tensile strength, elongation at break and abrasion resistance ratio at 60°C, 80°C and 100°C

Property	Temperature	Reaction rate constant, k
Tensile strength	60°C	0.00244
	80°C	0.00966
	100°C	0.03797
Elongation at break	60°C	0.00554
	80°C	0.02558
	100°C	0.09399
Abrasion resistance ratio	60°C	0.00142
	80°C	0.03006
	100°C	0.12247

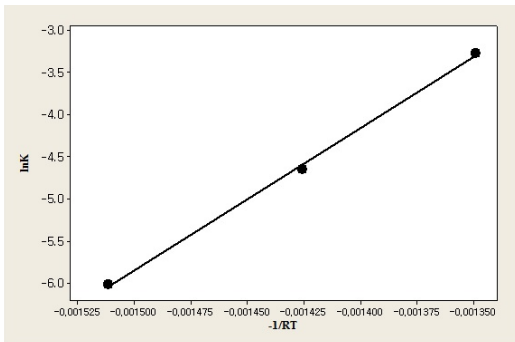


Fig. 5. Arrhenius plot for tensile strength at the reduced 30%

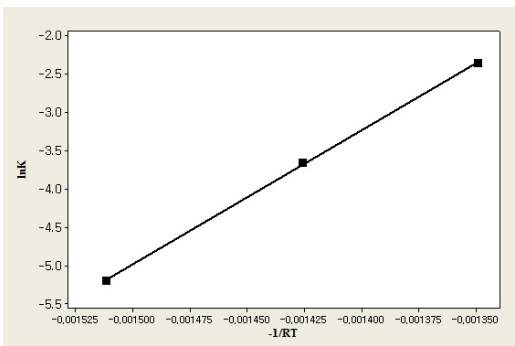


Fig. 6. Arrhenius plot for elongation at the reduced 50%

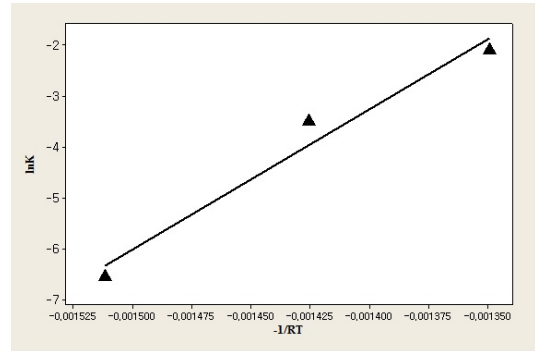


Fig. 7. Arrhenius plot for abrasion resistance ratio of 380%

Table 4. Arrhenius equation from activation energy, E and constant, ln A for tensile strength, elongation at break and abrasion resistance ratio

Property	Arrhenius equation	E (kcal/mol)	ln A
Tensile strength	$\ln k = -\frac{16,921}{RT} + 19.534$	16,921	19.534
Elongation at break	$\ln k = -\frac{17,481}{RT} + 21.233$	17,481	21.233
Abrasion resistance ratio	$\ln k = -\frac{27,647}{RT} + 35.449$	27,647	35.449

Table 5. Estimate lifetime at 20°C for tensile strength, elongation at break and abrasion resistance ratio

Property	Equation for lifetime	Estimate lifetime at 20°C
Tensile strength	$\ln(t_t) = \frac{8,516}{T} - 20.565$	More than 10 years (13.5)
Elongation at break	$\ln(t_e) = \frac{8,797.5}{T} - 21.6$	More than 10 years (12.5)
Abrasion resistance ratio	$\ln(t_a) = \frac{13,914}{T} - 35.411$	More than 10 years (482.0)

4. 결론

본 연구에서는 전투화용 고무의 열에 의한 노화수명을 아레니우스 모델을 이용하여 예측하였다. 전투화용 고무의 수명단계 기준은 ASTM D 2000 규격에 따라 인장강도는 30%, 신장률은 50% 감소되는 시점을 기준으로 하였다. 내마모도의 경우 군 규격을 참조하여 수명한계를 380%로 가정한 후, 노화온도를 일반적인 고무의

노화조건인 60℃, 80℃, 100℃ 에서 시행하였다.

아래니우스 관계식을 이용하여 Table 5의 수명식을 최종적으로 얻었으며, 전투화용 고무의 실제 사용온도를 실온(20℃)으로 가정한 후 수명을 예측한 결과, 세 가지 물성에 대한 예상수명이 10년 이상임을 확인할 수 있었다. 이는 일반병사의 전투화보급 후 예비군 완료시까지의 충분한 기간에 해당되어 전투화용 고무의 열 노화에 대한 신뢰성이 입증됨을 알 수 있다.

본 연구결과를 토대로 열 노화에 의한 전투화의 고장시기를 예측할 수 있었으며, 업체와 정부 간 이견의 차를 해소하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] R. P. Brown, "Aging of Rubber: Accelerated Heat Aging Test Results", pp. 37~41, pp. 69~73, Rapra Technology, 2001.
- [2] D. K. Park, "A Study for Life Prediction of the NR Rubber Railpad Based on Degradation Mechanism", Doctorate Thesis, Korea University Graduate school, Seoul, 2010.
- [3] R. P. Brown, "Physical Testing of Rubber", 3rd, pp. 287~316, Chapman & Hall, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0529-3>
- [4] R. P. Brown, "Practical Guide to the Assessment of the Useful life of Rubbers", pp. 70~72, Rapra Technology, 2001.
- [5] ASTM D 2000, "Standard Classification System for Rubber Products in Automotive Applications", pp. 491, 1987.
- [6] W. D. Kim, W. S. Kim, C. S. Woo and S. J. Cho, "Prediction of Useful Life by Heat Aging of Motor Fan Isolating Rubber", Elastomer, Vol. 37, No. 2, pp. 107~114, 2002.

유 건 성(Gun-Sung Yu) [정회원]



- 1991년 2월 : 충북대학교 화학공학 (공학학사)
- 1993년 2월 : 충북대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1995년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

신뢰성평가, 품질관리, 생산공학

이 남 례(Nam-Rye Lee) [정회원]



- 1993년 2월 : 경희대학교 화학과 (이학학사)
- 1995년 2월 : 경희대학교 화학과 (이학석사)
- 2015년 11월 : 충남대학교 식품영양학과 (박사수료)
- 1995년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

신뢰성평가, 품질관리, 식품공학

여 용 헌(Yong-Heon Yeo) [정회원]



- 2013년 2월 : 부산대학교 유기고재시스템공학과 (공학학사)
- 2015년 11월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

신뢰성평가, 품질관리, 생산공학

이 범 철(Beom-Cheol Lee) [정회원]



- 1992년 3월 : 전북대학교 고분자공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 이스켄 대표이사

<관심분야>

고무/복합소재, 신뢰성평가