

기만기 적용 고무 O-ring의 온도에 따른 가속수명시험을 통한 수명예측에 관한 연구

조희진*, 김민우, 곽혜림
국방기술품질원 대구센터 1팀

A Study on the Life-time Prediction for the Rubber O-ring applied to decoy through the Accelerated Life Test

Hee-Jin Jo*, Minwoo Kim, Hyerim Gwak

The 1st Team of Deagu Center, Defense Agency for Technology and Quality

요약 어뢰회피용 기만기는 수중에서 적 어뢰의 공격으로부터 자함을 보호하는 무기체계로 유사 시 우리 군의 피해를 최소화하기 위해 운용 간 고장없이 정상적으로 임무를 수행하여야 한다. 기만기는 운영 특성 상 내부로 해수가 유입되면 정상적인 임무 수행이 불가하기 때문에 운용환경을 고려하여 외부로부터 해수유입 방지를 위한 완벽한 기밀이 요구된다. 일반적으로 기만기의 수밀성능 확보를 위해 고무재질의 오링을 사용하는데 이러한 고무재질의 제품들은 시간의 경과와 주변 환경의 영향을 받아 노화되어 고무 초기 특성이 상실되어진다. 따라서 요구되는 수밀성능을 유지하기 위해 오링에 대한 정비 또는 교체가 필수적이다. 본 논문에서는 기만기에 사용되는 오링의 대표적인 물성 지표인 경도와 신장률 값을 기준으로 오링의 가속수명시험 수행을 통한 시험데이터를 바탕으로 적합한 정비주기를 선정하는 것을 목적으로 한다. 기만기 수밀성능을 보장하기 위해 사용되는 오링의 재질은 NBR(Nitrile Butadiene Rubber)로써, 선행 연구 자료를 참고하여 주요 고장 환경 인자 온도도 선정하였으며, 고장의 기준은 대상 제품이 가지는 물성 값 중 경도와 신장률이 초기 대비 50%까지 저하되는 시점으로 선정하였다. 또한 시험에 사용되는 시편 준비 및 물성 값 측정방법은 KS M 6518 규격을 참고하여 진행하였다. 시험결과는 컴퓨터 프로그램을 통해 분석하여 기만기에 적용되는 오링의 수명을 예측하였으며, 이를 통해 오링에 대한 정비주기를 산출하였다.

Abstract A decoy is a weapon system that can protect vessels from an enemy's torpedo. Thus, the decoy should be able to operate in the field without any failure. Because the decoy can be inoperable once its sealing is broken and water permeates inside the system, the hermetic sealing capability considering the operational environment is mandatory. To be hermetically sealed, a rubber-type O-ring is generally used in a decoy system. The sealed performance of rubber-type products, however, tends to age and deteriorate with time. Therefore, the O-ring needs to be maintained or changed periodically. This paper proposes a method to estimate the proper maintenance period using the hardness and elongation percentage, which represents the performance of the O-ring product and test data from Accelerated Life Test (ALT) of the product. The O-ring used in this paper is a NBR type, and the temperature was chosen to be the main accelerating factor as referenced in many studies. The criteria for the failure of the O-ring was set for the product to be 50% degraded compared to the initial performance. In addition, the Korean standard KS M 6518 was adopted and referenced for the preparation of test samples and the calculation of estimates. The O-ring's predicted life was simulated by analyzing the test results from a computer program, and the optimized maintenance period for the product was determined.

Keywords : Accelerated life test, Arrhenius relation, Estimate life-time, maintenance period, O-ring

*Corresponding Author : Hee-Jin Jo(Defense Agency for Technology and Quality)

Tel: +82-53-757-3018 email: hjjo@daq.re.kr

Received September 6, 2016

Accepted October 7, 2016

Revised (1st September 30, 2016, 2nd October 6, 2016)

Published October 31, 2016

1. 서론

기만기는 어뢰음향대항체계의 한 구성요소로서 자함으로 공격해오는 적 어뢰를 유인 및 기만하기 위한 표적 신호를 발생시켜 함정이 안전하게 회피할 수 있도록 하는 장비이다. 함정에 탑재되어 자체 추진력에 의해 일정 거리를 비행한 후 목표지점에 입수하여 동작을 하도록 되어 있다. 함정에 탑재되는 무기체계 특성 상 외부에 노출되는 부분의 경우 해수 등의 유입을 방지하기 위해 수밀성능이 요구된다.

일반적으로 무기체계의 수밀성능이 요구되는 부분에 많이 사용되는 재료로는 고무재질의 오링이 사용된다. 하지만 이러한 고무재질의 제품들은 시간의 경과와 주변 환경의 영향으로 인해 노화가 진행되며 이로 인해 초기의 특성이 상실되어 수명이 저하된다. 따라서 고무제품의 경우에는 사용환경에 의한 수명특성을 예측하여 정비 또는 교체 주기를 설정해 주는 것이 무엇보다 중요하다.

흔히 고무제품의 수명을 예측하는 방법으로 많이 사용되는 것이 가속수명시험이다. 가속수명시험은 시험시간을 단축할 목적으로 기준보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험으로 빠른 시간 내에 수명을 평가하기 위한 시험이다. 기준조건보다 가혹한 조건의 인가를 통해 고장 매커니즘을 촉진시켜 초기에 고장을 유발함으로써 시험시간을 단축하는 방법이다.[1]

고무제품의 경우 온도에 따른 특성 저하 현상이 많이 발생한다고 알려져 있다.[2]이에 따라 온도에 따른 가속수명시험을 위한 대표적인 모델인 아레니우스 관계식을 이용하여 고무제품의 수명을 예측할 수 있다.[3, 4]

현재 기만기의 수밀성능 향상을 위해 적용 중인 오링의 경우 고무재질로 제작됨에도 불구하고 적용 재질에 대한 수명저하 특성에 관한 연구가 전무하여 해당 부품에 대한 정비 또는 교체 주기가 설정되어 있지 않다. 이로 인해 장기 사용 시 노화에 따른 기밀성능 저하가 발생할 가능성이 존재한다.

본 논문에서는 기만기의 수밀성능 향상을 위해 사용되는 오링의 재질인 NBR(Nitrile Butadiene Rubber)에 대한 가속수명시험을 통해 수명을 예측하여 정비 또는 교체 주기를 산출하였다. 우선 선행 연구자료와 사용되는 환경을 고려하여 고장 인자를 온도로 선정하였으며, 고장의 기준은 대상 제품이 가지는 물성값 중 경도 및 신장률이 초기 대비 50%까지 저하되는 시점으로 선정

하였다. 가속수명시험에 사용되는 온도 조건(가속조건)은 경도 값에 대한 열화 관측시험의 경우 80℃, 100℃, 120℃로 설정하였으며, 신장률에 대한 열화 관측시험의 경우 120℃, 140℃ 조건으로 설정하여 시험을 수행하였다. 또한 특성저하 인자인 온도에 대한 시간에 따른 물성값 특성 변화를 관측하기 위해 온도 조건 당 24시간을 한 주기로 설정하였고, 각 주기별 관측 시료 수는 5개로 선정하였다. 가속수명시험 결과는 컴퓨터 프로그램을 통해 분석한 후 수명을 예측하였고 이를 토대로 정비 및 교체주기를 산출하였다.

2. 가속수명시험 설계 및 시험환경

기만기 적용 고무재질(NBR)에 대한 가속수명시험 수행을 통한 내구성 확인을 위해 KS규격(KS M ISO 11346 : 2007)을 기준으로 시험편 채취 및 시험방법을 설계하여 시험을 수행하였다.[5]

2.1 가속수명시험

가속수명시험을 통한 수명예측을 위해 사용되는 모델은 표 1과 같이 스트레스 조건에 따라 다양한 모델 적용이 가능하며, 시험대상 부품의 사용환경과 고장 매커니즘 분석을 통해 노화인자를 식별하여 이에 적합한 가속 모델을 선정하는 것이 타당하다.

가속의 방법에는 여러 가지가 있으나 실 사용조건보다 가혹한 조건(온도, 습도, 진동, 전압, 전류 등)을 인가하여 고장 매커니즘을 촉진시켜 초기에 고장을 유발하는 “스트레스 가속” 방법과 실 사용조건보다 사용빈도를 높여서 사용함으로써 고장을 유발시키는 “빈도가속” 방법을 주로 활용한다.

가속조건에서 관측된 시험데이터는 가속수명시험 모형으로 분석이 가능하며, 가속수명시험 모형은 수명분포와 수명-스트레스 관계로 이루어져 있다. 수명분포에는 지수분포, 와이블분포, 대수정규분포 등이 있으며, 수명-스트레스 관계는 표1과 같이 스트레스 조건에 따라 아레니우스(Arrhenius), 역거듭제곱(Inverse power) 등으로 분석이 가능하다.[4, 6]그림 1은 가속수명-스트레스 관계를 이용한 수명예측 방법에 대하여 방법 상 처리형태를 나타낸 것이다.[7]

기만기에 적용되는 오링의 경우 함상에 탑재되어 외

부에 노출되는 사용환경과 선행 연구자료 등을 고려하였을 때 노화특성이 온도에 의한 열 노화로 인해 수명의 저하가 발생할 것으로 예상하여 온도를 가속스트레스 조건으로 설정하여 가속수명시험을 설계하였으며, 아레니우스 관계식을 이용하여 시험데이터를 분석하였다.

2.2 가속수명시험 설계 및 시험환경

기판기에 적용되는 오링의 수명예측을 위해 앞서 언급한 것처럼 오링의 사용환경 및 선행 연구자료를 바탕으로 가속변수를 온도로 설정하여 아레니우스 관계식을 적용하여 오링의 재질인 고무에 대한 수명을 예측하였다.

Table 1. Model for relationship between life-time and stress

function type	stress type	model
exponential	temperature	Arrhenius relationship $L=A\exp[(E/kT)]$
	voltage	Inverse Power model $L=AV^{-n}$
power	temperature change	Coffin-Mason relationship $L=A(\Delta T)^{-n}$
	mechanical load	Palmgren's model $L=(C/P)^{-n}$
	rotational speed	Taylor's model $L=A/V^m$

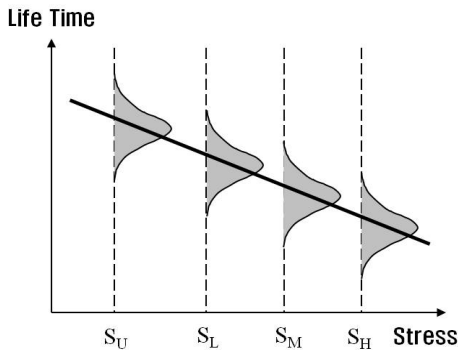


Fig. 1. The method for life estimate using accelerated life-stress relation

아레니우스 관계식은 온도에 따른 열 노화 특성을 가지는 재질에 대한 가속수명시험에서 널리 사용되는 수명-스트레스 모형으로 온도와 소재-부품간의 화학 반응 관계식을 나타낸다.[4]

아레니우스 모델은 1차 화학반응 모델에 있어서 반응 속도 상수가 온도에 의존하는 형태를 모델링하였으며, 일차 노화 반응에서 고무의 특성과 반응속도와와의 관계식은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, P는 고무의 특성값(신장률, 경도 등), P₀는 고무의 초기 특성치, t는 시간이며 k는 반응속도(reaction rate)이다.

식 (1)에서 반응속도 k는 고무의 특성치인 P의 노화 반응을 나타내는 정수이며, 스웨덴의 화학자 Arrhenius가 발표한 반응속도 정수 k와 온도와의 관계식은 식 (2)와 같다.

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT} \tag{2}$$

여기서, A는 상수, R은 기체상수(Gas constant, 8.314J/mol·K), T는 절대온도(Absolute temperature, K)이며 E_a는 활성화에너지(Activation Energy, J/mol)이다.

식 (2)에서 양변에 자연로그를 취하면,

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A \tag{3}$$

식 (3)과 같이 반응속도의 대수와 온도의 역수(1/T)의 관계는 기울기가 $-E_a/R$ 인 선형 관계가 됨을 알 수 있다. 이에 따라 실험을 통해 활성화 에너지(E_a)와 상수 A를 구하게 되면 원하는 온도에서의 반응속도를 구할 수 있으며, 식 (1)을 이용하여 특정 노화시점에서의 특성치 P가 있는 시점을 해당 제품의 수명으로 가정할 경우 해당 시점의 수명 t를 예측할 수 있다.

기판기의 수밀성능 향상을 위해 적용한 오링의 가속수명시험 수행을 위해 먼저 고장 메커니즘은 온도에 의한 노화로 가정하였으며, 고장 판정을 위한 고무의 특성은 오링의 국방규격에서 요구하는 신장률 및 경도값으로 선정하였다. 또한, 고무와 같은 화학소재의 경우 고장은 서서히 열화가 진행되므로 명확한 고장판정 기준이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서 고장판정을 위한 고장의 기준은 KS ISO 11346:2007에 명시된 기준인 초기 물성치의 50% 저하 시점을 고장 시점으로 설정하였다.

가속수명시험을 위한 온도 조건은 오링이 사용되는

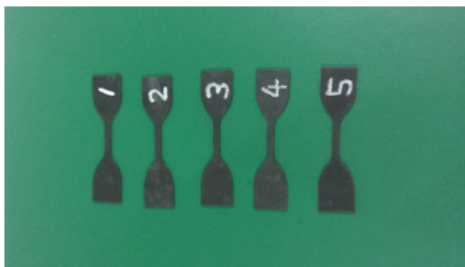
운용환경과 선행 연구 및 고무류 적용사례와 가속수명시험 관련 문헌 조사 등을 통해 설정하였다. 이에 따라 본 연구에서는 온도조건을 KS ISO 11346를 참고하여 정하였으며, 고무의 물성치별 가속온도조건은 표 2와 같이 경도 측정시에는 80℃, 100℃, 120℃로 선정하였으며, 신장률 측정시에는 120℃, 140℃로 선정하였다.

Table 2. Test condition(temperature) for ALT

material property	test condition(temperature)
elongation	120℃, 140℃
hardness	80℃, 100℃, 120℃



(a)



(b)

Fig. 2. The test piece for the Accelerated Life Test(ALT)

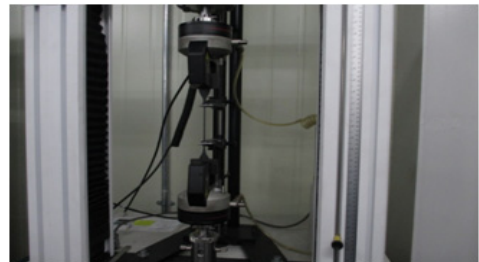
가속수명시험을 위한 시편은 KS M 6518 규격에 명시된 인장시험 및 경도 시험을 위한 시편제작 기준에 따라 준비하였다.[8]이에 따라 신장률 특성 확인을 위한 시편은 아령형 시편을 온도조건별 각 관측주기당 5개로 선정하였으며, 경도 특성 확인을 위한 시편은 그림2의 (a)와 같이 제작하였으며, 온도조건별 각 관측주기당 시험편 수는 신장률 특성 확인시험편 수와 동일하게 5개로 선정하였다.

경도 및 신장률 시험을 위한 시험기는 그림 3 (a)의 듀로미터경도 A형 시험기와 (b)의 만능재료시험기를 사

용하였으며, 온도 인자에 대한 시간에 따른 물성치 특성 변화를 관찰하기 위해 온도 조건 당 24시간을 한 주기로 설정하여 시험을 수행하였다.

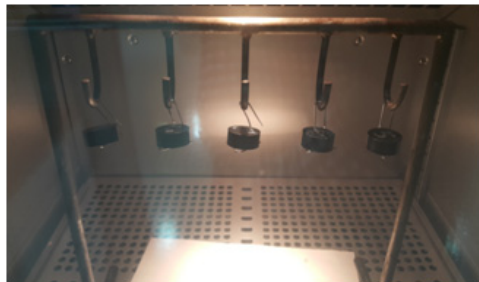


(a)

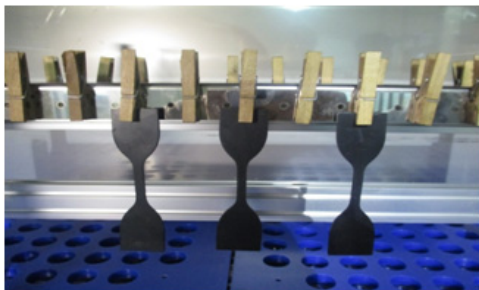


(b)

Fig. 3. The equipment to measure material property



(a)



(b)

Fig. 4. The test environment for ALT

3. 가속수명시험 결과 분석

고무 오링에 대한 가속수명시험을 통한 데이터 분석을 위해 먼저 획득한 고장데이터에 적합한 수명분포를 확인하였다. 수명분포 확인을 위해 컴퓨터 프로그램을 이용하였으며, 여러 통계적 추정방법 중 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 이용하여 분석을 수행하였다. 이러한 분석적 방법을 통해 정규분포, 지수분포, 와이블분포 및 로그 정규분포 중 가장 적합한 수명분포를 확인하였다. 그림 5는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 4가지 수명분포에 대한 적합성을 분석한 결과이다.

그림 5의 (a)는 고무의 물성치 중 경도의 노화특성 수명데이터에 대한 수명분포 적합성 분석 결과이며, (b)는 신장률에 대한 수명분포 적합성 분석 결과이다. 분석 결과, 경도와 신장률에 대한 수명데이터 모두 와이블분포가 적합한 수명분포인 것으로 확인되었다.

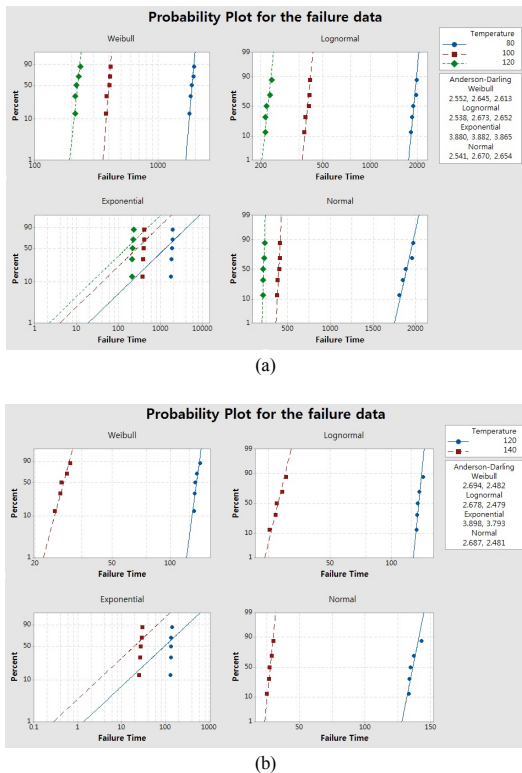


Fig. 5. The Probability plot for the failure data

앞서 분석한 와이블분포를 적용하여 아래니우스 관계

식을 이용하여 가속모형을 분석하였다. 수명분포가 와이블분포일 때 아래니우스 모형은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha(T)}\right)^\beta\right],$$

$$\alpha(T) = A \cdot \exp\left(\frac{E_a \times 11,604.84}{T}\right) \quad (4)$$

여기서 A는 상수이며, E_a는 활성화에너지, T는 절대온도를 나타낸다.

고무 오링에 대한 가속모형 분석은 최우추정법을 사용하여 획득한 수명데이터를 활용하여 미지의 모수인 A, E_a, β를 추정한 후 예상되는 수명을 예측하였다.

가속모형 분석은 먼저 시험조건(온도) 간의 가속성 검증 실시하여 조건별 가속성 성립 여부를 먼저 확인하였다. 와이블분포에서의 가속성 검증은 형상모수 β가 시험조건에 걸쳐 동일한가를 통계적으로 검증하는 과정이다.

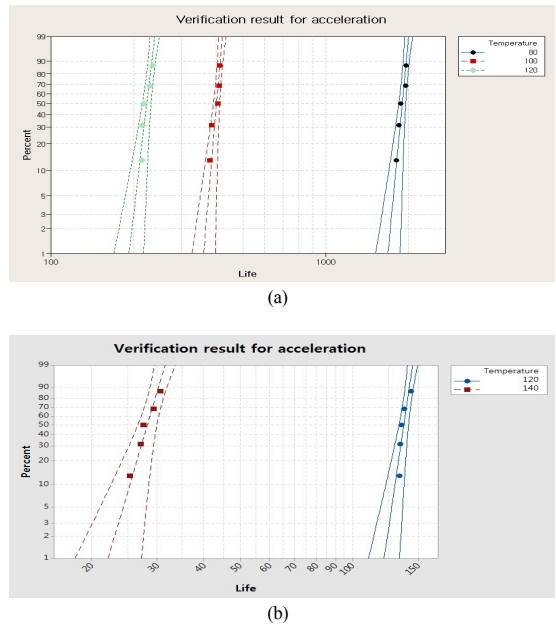


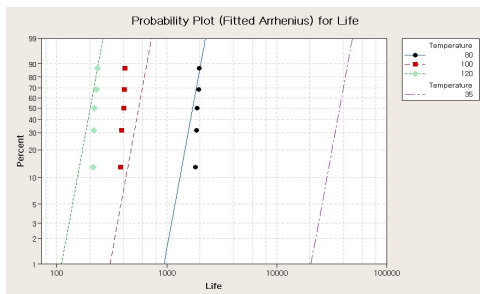
Fig. 6. The verification result of the acceleration according to temperature condition

본 연구에서 가속성 검증은 경도 및 신장률 수명데이터 분석을 통해 식 (4)에서 형상모수 β값을 확인하여 유의수준 5%에서 카이-제곱 검정을 통해 시험조건별 형상모수 β값의 동일성 여부를 검증하였으며, 이를 통하여 온도조건별 가속성 성립 여부를 확인하였다.

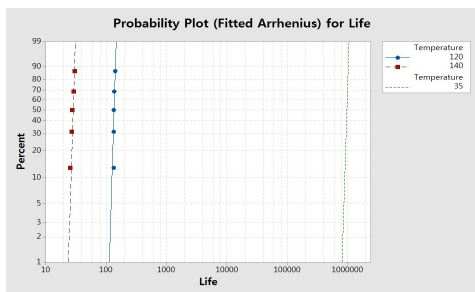
위 절차에 따른 가속성 검증은 컴퓨터 프로그램을 통해 수행하였으며, 그림 6의 (a)와 (b)는 각각 경도 및 신장률 수명데이터에 대한 가속성 검증 결과이다.

가속성 검증 결과 경도 및 신장률 수명데이터에 대한 향상모수 β 값이 온도조건에 따라 동일하다는 검증 결과를 도출하였으며, 이에 따라 온도조건별 가속성이 성립한다고 판단하였다.

그림 6을 통해 온도조건별 경도 및 신장률에 대한 수명데이터의 가속성이 성립됨을 확인한 후 실 사용온도에서의 수명을 예측하기 위하여 가속모형 분석을 수행하였다. 그림 7의 (a)와 (b)는 각각 경도 및 신장률 수명데이터에 대한 온도조건에 따른 백분위 수명에 대한 분석 결과이다. 수명 분석을 위한 수명분포는 와이블 분포로 선정하였으며, 신뢰수준은 95%로 분석하였다.



(a)



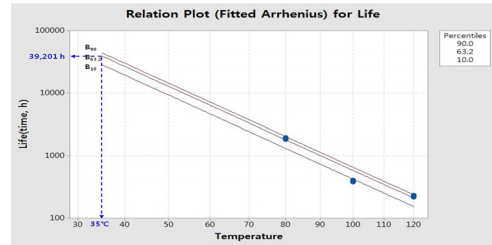
(b)

Fig. 7. The probability plot for life according to temperature condition

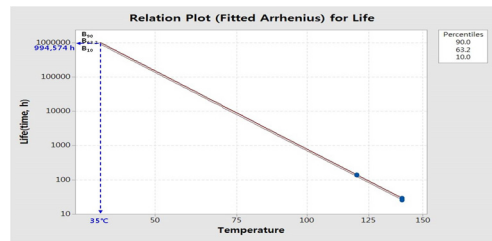
그림 8은 본 연구에서 수행한 수명데이터를 기반으로 예측한 B_p 수명과 스트레스 관계로 (a)는 고무의 물성치인 경도값을 기준으로 한 수명-스트레스 관계이며, (b)는 신장률값을 기준으로 한 수명-스트레스 관계이다.

기반기에 적용되는 오링이 노출되는 환경에서의 예상 운용온도 조건인 35°C에서 63.2%가 고장나는 시점을 평

균수명이라고 가정했을 때 그림 7, 8의 (a), (b)를 통해 예측된 수명은 경도의 경우 4.4년으로 예측되었으며 신장률의 경우에는 113년으로 예측되었다. 이를 통하여 기판기의 수밀성능 향상을 위해 적용되는 고무 오링의 교체 주기를 4년으로 설정하는 것이 필요함을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 8. The relation plot between life and stress (temperature)

4. 결론

본 논문에서는 기판기의 수밀성능 향상을 위해 적용한 고무 오링에 대한 수명예측에 관한 연구를 수행하였다.

고무 오링에 대한 수명예측을 위해 먼저 사용환경에 대한 사전조사 및 관련문헌 연구를 통해 고장인자를 온도조건으로 선정하였다. 또한 온도에 따른 노화특성은 국방규격에 명시된 오링의 물성치인 신장률과 경도값을 측정을 통해 확인하였다. 고장의 기준은 KS ISO 11346:2007에 명시된 기준인 초기 물성 값의 50% 저하시점을 고장 시점으로 설정하였다.

이러한 기준을 기반으로 가속수명시험을 설계하였고 수명예측을 위해 온도조건별 수명데이터를 획득하였다. 획득한 데이터는 여러 가속모형 중 온도-스트레스 관계에 가장 적합한 아레니우스 관계식을 적용하여 분석하였으며 분석 시에는 컴퓨터 프로그램을 이용하였다.

획득한 수명데이터를 이용하여 수명분포를 분석하여

와이블 분포가 가장 적합한 분포로 확인되었으며, 와이블 분포를 적용한 후 아레니우스 관계식을 이용하여 가속도형 분석을 수행하였다. 온도조건별 가속성이 성립됨을 확인한 후 예상 운용온도에서의 수명을 예측하였다.

수명예측 결과 예상 운용온도에서의 수명(B_{63.2})은 신장률값을 기준으로 한 경우에는 113년, 경도값을 기준으로 한 경우에는 4.4년으로 예측되었다.

본 연구결과를 통하여 기판기의 수밀성능 향상을 위해 적용한 고무 오링에 대한 열 노화특성에 따른 수명을 예측할 수 있으며, 이를 기반으로 운용환경을 고려한 정비주기 설정이 가능하다. 그리고 이러한 정비주기를 정비교범에 반영하여 부품의 적기 교체가 가능토록 하는 것이 필요하다. 또한, 이러한 정비주기 설정에 따른 해당 부품의 적기 교체 또는 정비를 통해 소요군에서 기판기 체계 운용 시 발생가능한 실패비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] R. P. Brown, *Practical Guide to the Assessment of the Useful life of Rubbers*, Rapra Technology, 2001
- [2] Seung Wook Han, Seung Bum Kwak, Nak Sam Choi, "Accelerated Life Prediction of Ethylene-Propylene Diene Monomer Rubber Subjected to Combined Degradation", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, vol. 38, no. 5, pp. 505-511, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.5.505>
- [3] Jin Hyok Lee, Jong Woo Bae, Jung Su Kim, Tae Jun Hwang, Sung Doo Park, "Life-time Prediction of a FKM O-ring using Intermittent Compression Stress Relaxation (CSR) and Time-temperature Superposition (TTS) Principle", *Elastomers and Composites*, vol. 45, no. 4, pp. 263-271, 2010.
- [4] R. P. Brown, *Physical Testing of Rubber*, 3rd, Chapman & Hall, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0529-3>
- [5] KS M ISO 11346, *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Estimation of life-time and maximum temperature of use*, Korea Agency for Technology and Standards, 2007
- [6] Won Sik Hong, Chul-Min Oh, "PoF Based Accelerated Life Prediction with 3 Dimensional Packaging Technology Development", *Journal of KWJS*, vol. 27, no. 3, June, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.3.010>
- [7] 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.
- [8] KS M 6518, *Physical test methods for vulcanized*

rubber, Korea Agency for Technology and Standards, 2006.

조 희 진(Hee-Jin Jo)

[정회원]



- 2013년 2월 : 포항공과대학교 전자과 (전자공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 국방기술품절원 연구원

<관심분야>
전자회로, 신호처리

김 민 우(Minwoo Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학 박사수료
- 2012년 12월 ~ 현재 : 국방기술품절원 연구원

<관심분야>
전자회로, 신뢰성 평가

곽 헤 림(Hyerim Gwak)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자과 (전자공학석사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 국방기술품절원 연구원

<관심분야>
전자회로, 신호처리