

유압구동장치 동력원용 고무 다이어프램 저유기의 수명 예측 연구 Life-Time Prediction of HNBR Diaphragm in Oil Reservoir

김솔아¹
 Sol A Kim

Received: 08 Mar. 2021, Accepted: 07 Apr. 2021

Key Words : Diaphragm(다이어프램), Life-Time Prediction(수명 예측), Arrhenius Law(아레니우스 법칙), Accelerated Life Test(가속노화시험), Time-Temperature Superposition(시간-온도 중첩법)

Abstract: The piston reservoir is mainly used in hydraulic blow-down system for aerospace engineering. The reservoir is heavy due to both hydraulic cylinder and piston in pressurization. The positive expulsion tank with rubber diaphragm has been mostly applied propellant and fuel tank at low pressure to satellites. To reduce weight, the reservoir that can be used at high pressure with rubber diaphragm was developed. In this research, the prediction of life-time for the rubber diaphragm was implemented through an accelerated life test, as a part of development of new reservoir. Also, the diaphragm was stored in an temperature chamber at the same condition as and operation with hydraulic oil. As a result, the life-time for a rubber diaphragm was successfully evaluated via Arrhenius law and Time-Temperature Superposition based on failure times over temperatures in the accelerated test.

기호 설명

- k : rate constant
- T : absolute temperature (K)
- A : pre-exponential factor
- E_a : activation energy (J/mol)
- R : universal gas constant (8.314J/mol·K)
- a_T : shift factor
- T_g : glass transition temperature

1. 서론

1.1 구동장치 동력원용 다이어프램 저유기 개발
 기존 축압식 유압구동장치 동력원의 저유기로 사용되던 피스톤 저유기는 금속 하우징과 피스톤으로

이루어져 무겁다는 단점이 있었다. 경량화를 위해 국내외 항공우주사업의 추진제 및 연료탱크로 오랫동안 적용되고 있는 Positive Expulsion Tank를 접목시킨 구동장치 동력원용 저유기를 개발하였다. 그러나 Positive Expulsion Tank는 현재까지 약 1,000 psi이하의 저압 환경에서만 일회성으로 사용되고 있으며 2,000~4,000psi의 고압에서 반복적으로 사용된 국내의 사례는 전무하다.

축압식 유압구동장치 동력원의 저유기로 적용하기 위해 개발된 Positive Expulsion Tank의 형상은 Fig.1과 같다. 경량화를 위해 얇은 구형의 금속 하우징에 복합재를 감아 고압에서도 변형 없이 견딜 수 있도록 하였다. 많은 시행착오 끝에 3,000psi 고압에서 100회 반복 사용이 가능한 고무 다이어프램 저유기를 개발하였다. 고무 다이어프램의 소재는 NBR보다 고온 특성에 강한 HNBR소재를 사용하였으며, 유압유는 MIL-PRE-87257를 적용하였다.

다이어프램 저유기의 작동원리는 다이어프램을 경계로 한쪽에는 유압유를 채워 저장 후 필요시점에 반대편에서 고압가스를 유입시켜 후단의 작동기에 일정 시간동안 고압의 유압유를 공급한다. 고압의 환경에서 요구 시간동안 저유기의 성능을 유지하기 위해서는 고무의 내구성과 수명예측은 아주 중요하다.

* Corresponding author: sol501@add.re.kr
 1 Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea
 Copyright © 2021, KSFC
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

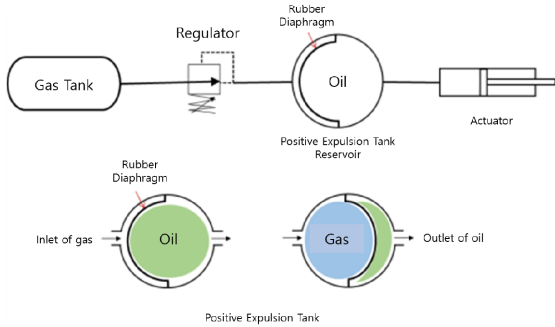


Fig. 1 Description of positive expulsion tank

1.2 고무 다이어프램의 수명예측 필요성

상용 고무 O링의 경우 제조사로부터 제공되는 고무의 수명 평가 자료가 있지만 실제 사용 환경에 따라 고무의 특성 변화가 있어 수명 차이가 생긴다. 고무 다이어프램 저유기의 경우 다이어프램의 한쪽 면은 유압유에 장시간 담겨 있고 다른 면은 공기와 접촉하고 있어 정확한 수명예측 실험이 필요하다고 판단하였다. 실제 사용 환경과 같이 다이어프램 저유기에 유압유를 충전한 상태로 고장시간 단축을 위해 온도 챔버에 저장하는 열가속 노화시험을 진행하였다. 시험 결과 데이터를 바탕으로 아레니우스 관계와 시간-온도 중첩법 (Time-Temperature superposition)을 이용하여 우리나라 평균 기온 23℃에서의 고무 다이어프램 저유기 수명을 예측하였다.

2. 본 론

2.1 아레니우스 관계(Arrhenius Theory)

고무 수명 예측 방법의 대표적인 이론인 아레니우스 관계를 이용하여 열가속 노화시험을 진행하였다. 아레니우스 관계는 노화반응 (k(T))이 $\exp(\frac{-E_a}{RT})$ 에 비례한다는 가정에 전제된 관계식이다. 식(1)에서 알 수 있듯이 반응 속도(k(T))와 온도(1/T)의 ln plot기울기 (-E_a/R)로 선형 관계임을 나타내며, 특정 온도의 외삽법을 통하여 수명을 예측할 수 있다.⁽¹⁾ 활성화 에너지(E_a)는 어떤 반응이 일어나기 위해 필요한 최소한의 에너지를 말한다.

$$k(T) = A \exp(\frac{-E_a}{RT}) \Leftrightarrow \ln k(T) = -\frac{E_a}{RT} + \ln A \quad (1)$$

그러나 시험적으로 고무의 노화반응(k(T))을 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 일반적으로 노화 반응을 대신하여 고무의 물리적 특성이 고장조건에 도

달하기까지 걸리는 시간을 측정하여 사용한다. 아레니우스 관계를 이용한 고무의 수명 예측법은 국제규격 ISO 11346에 표준 규격화 되어 있으며, 이를 이용한 많은 수명 예측 연구가 이루어져 왔다.⁽²⁾ 아레니우스 관계는 ‘사용 온도에서의 노화 반응과 가속노화 시험 온도에서의 노화반응이 동일하며, 활성화 에너지가 온도에 영향을 받지 않는다.’는 가정을 전제로 한다.

2.2 시간-온도 중첩법 (TTS)

시간-온도 중첩법(Time-Temperature Superposition)이란 비결정성 고분자의 점탄성 함수(탄성계수 등)의 시간에 대한 곡선을 여러 온도에서 측정하여 임의의 온도(T₀)를 기준으로 시간 축에 따라 수평으로 평행 이동 시키면 모든 곡선이 중첩되어 하나의 곡선이 되는 원리를 말한다. 이때 이 곡선을 마스터 곡선(master curve)이라고 하고, 주어진 온도에서의 마스터 곡선이 시프트 조작을 통해 다양한 온도에서 곡선을 예측하는 기준으로 사용될 수 있다. 예를 들어 열가속 노화시험을 통한 수명예측 시 고온에서 단기간에 얻은 데이터로 마스터 곡선을 그린 후 시간-온도 중첩법을 통해 이동하여 저온에서의 노화 그래프를 그려볼 수 있다. 식(2)와 같이 T에서 T₀까지의 온도변화가 시간 스케일에 일정한 인자 a_T(Shift factor)를 곱하는 것과 동일함을 나타낸다.

$$E(t, T) = E(a_t \times t, T_0) \quad (2)$$

Shift factor(a_T)를 구하기 위한 두 가지 모델이 존재한다. 먼저, 고분자의 공통특징으로 유리전이 온도(T_g, glass transition temperature)에 대해 알아야한다. 고분자 재료는 액체에서 온도를 내려 고체가 될 때, 비결정(유리와 같은 상태)과 결정이 혼재하게 되는데 이는 고체를 정의하는 화학 법칙에 맞지 않아 새로 정의된 개념이다.

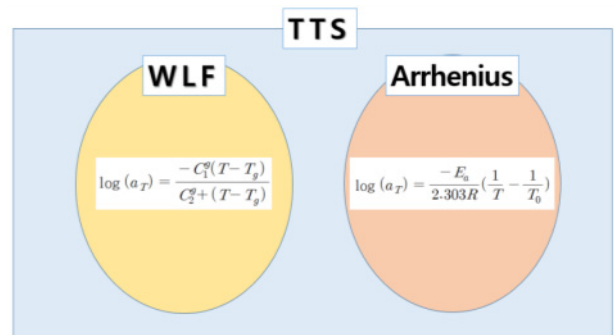


Fig. 2 TTS (Time-Temperature Superposition)

2.2.1 아레니우스 모델(Arrhenius model)

앞에서 언급한 아레니우스 관계로 Shift factor를 다음 식(3)처럼 활성화 에너지(E_a)를 이용하여 구할 수 있다. 이 식은 유리전이온도 영역 뿐 아니라 유리전 이온도 영역 밖에서도 사용 가능하다.

$$\log(a_T) = \frac{-E_a}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3)$$

2.2.2 WLF(William-Landel-Ferry) model

WLF는 아레니우스의 단점인 ‘활성화 에너지가 온도와 관계없이 일정하다.’라는 가정을 보완한 모델로 온도에 따른 노화거동을 고려하여 보다 보수적인 결과를 나타낸다. 시험을 통한 경험적 관계를 시간-온도 중첩 원리와 결합하여 유리전이온도(T_g) 근처에서 사용가능한 모델이다. WLF 모델 적용 시 고분자 재료의 유리전이온도를 알고 있어야 하며, $[T_g, T_g + 100^\circ\text{C}]$ 에서만 사용가능하다. C_g^1, C_g^2 는 물질 및 유리전이온도에 의존하는 양의 상수이며, 상수를 결정하기 위해서는 많은 시험 데이터가 필요하다. (3)

$$\log(a_T) = \frac{-C_1^g(T - T_g)}{C_2^g + (T - T_g)} \quad (4)$$

2.3 시험개요 및 방법

다이어프램의 수명 예측을 위해 15개월 동안 열가속 노화시험을 진행하였다. 본 시험 전 시편을 이용한 열가속 노화시험 후 압축력, 인장력을 측정하였다. 시편시험 전 O링부 압축력 약화로 누유가 발생하여 다이어프램 저유기의 제 기능을 수행하지 못할 것이라 예상하였다. 그러나 기름에 담겨진 상태로 저장시간이 늘어날수록 압축력이 점점 더 강화되는 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 인장력 약화로 인한 다이어프램 파손이 우려되었다. 그러나 저장 시간 별 일정치 않은 인장력 변화가 측정 되어 다이어프램의 파손 시점을 규정하기에는 어려움이 있었다. 이렇듯 시편시험을 통해 다이어 프램의 파손은 특정 값으로 파손을 규정하기 어려운 복합적인 원인에 의한 것이라고 판단되었다. 따라서 다이어프램 파손 여부는 사후시험 전, 후에 공압 포트부로 유압유가 새어나오는 현상과 사후 시험 후 분해하여 육안으로 확인하였다.

열가속 노화의 챔버 온도 조건은 100°C 를 기준으로 고온영역 120°C , 저온영역 80°C 로 정했으며, 총

3대의 온도 챔버를 사용하였다. 저온영역의 온도를 낮게 잡을수록 시험기간이 길어지게 되어 기한 내 결과를 얻기 위해 온도를 80°C 로 선정하였다. 실제 용기 내부형상과 같은 지그(Fig.2)를 제작하여 고무 다이어프램의 피로에 의한 파손을 막기 위해 회차별로 다이어프램을 교체하였다. 예를 들어 120°C 온도 챔버에서 3일간의 1회차 시험 종료 후 사후 시험을 진행하였으며, 이후 새 다이어프램으로 교체하여 6일간의 2회차 시험을 진행하였다. 유압 포트부로 유압 유를 채운 후 온도 챔버에 저장하였으며, 고무 다이어프램의 파손 여부 판단을 위해 실제 사용 환경과 같이 공압 포트부로 $3,000\text{psi}$ 의 가스를 가압하여 사후시험을 진행하였다. 사후시험 주기를 정하기 위해 본 시험 전 예비시험을 진행하였으며, ‘Service life determination of nitrile o-rings in hydraulic fluid’⁽⁴⁾ 논문을 참고하였다. 고무의 소재와 유압유의 종류가 다르지만 초기 시험 조건을 정하기 위해 인장력의 활성화 에너지 59 kJ/mol 을 참고하여 23°C 기준 15년 수명 시 각 온도별 예상 파손 시점과 사후시험 주기를 계산하였다.

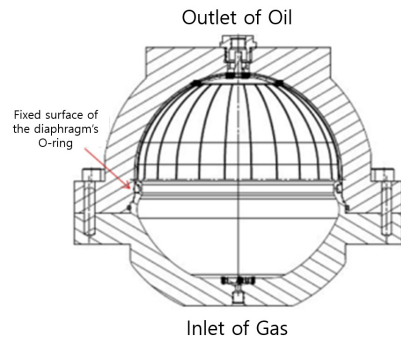


Fig. 3 The rig of diaphragm test

Table 1 Estimated time of failure and post test cycle

Storage Temperature ($^\circ\text{C}$)	Estimated time of failure (calculated value)	Post test cycle (23°C , 5years cycle)
120	12 days (about 2 weeks)	3 days
100	30 days (about 4 weeks)	7 days
80	89 days (about 13 weeks)	20 days

온도 챔버에 저장 후 사후시험 주기에 맞춰 저장을 중단한 후 사후시험을 진행하였다. 온도 챔버에서

지그를 꺼내 상온에서 일정시간 식힌 후 기름을 제거하였다. 고온 상태의 고무를 상온에서 20시간 이상 식힌 후 3회 사후 공압시험을 진행하였다.

2.4 시험결과

2.4.1 120℃ 열가속 노화시험

120℃의 온도 챔버에 6회차 (보관기간 총18일) 저장 후 공압 포트부로 약 300cc정도의 누유가 발생하여 분해 검사한 결과 다이어프램 전체적으로 영구변형이 있었으며, 고정 O링부 바로 윗부분이 심하게 손상되어 누유된 것을 확인하여 파손판정 하였다.

2.4.2 100℃ 열가속 노화시험

100℃의 온도 챔버에 10회차 (보관기간 총70일) 저장 종료 후 2차 사후시험을 위해 유압유 충전 중 공압 포트부로 누유가 발생하여 분해 검사를 하였다. 다이어프램 전체적으로 큰 변형 없이 깨끗했으나 고정 O링부 1.5cm 윗부분에 약 1cm의 찢어짐이 발견되어 시험을 종료하였다.

2.4.3 80℃ 열가속 노화시험

80℃온도 챔버 시험의 경우 사후시험 주기 20일로 회차별 새 다이어프램으로 교체 후 반복 저장 시 한정된 기간 내 시험 종료가 어려울 것으로 판단하였다. 선 진행한 100℃와 120℃의 가속노화시험 결과를 가지고 아레니우스 Plot를 그려 80℃온도 챔버에 저장된 다이어프램의 파손 예상 시점을 예측하였다. 120℃ 온도 챔버에 저장된 다이어프램의 경우 6회차 시험 종료 후 사후시험에서 파손이 확인되었으나 실제 파손시점은 5~6회차 사이로 정확한 파손시점은 알 수 없다. 그래서 가장 빠른 파손시점을 5회차 종료시점으로, 가장 늦은 파손시점을 6회차 종료시점으로 나누었다. 100℃ 열가속 노화시험 역시 가장 빠른 파손시점을 9회차 종료 시점, 가장 늦은 파손 시점을 10회차 종료 시점으로 가정 하였다. 가장 빠른 파손 시점을 ‘최소 수명’이라 하고, 가장 늦은 파손시점을 ‘최대수명’이라 명했다. 추가로 80℃ 종료 시점을 예측하기 위해 최종 목표인 23℃의 다이어프램 수명을 10년, 15년, 20년, 30년으로 가정하였다. Fig. 4, 5과 같이 아레니우스 Plot을 그려 Table 2와 같이 80℃의 파손시점을 예측하였다.

두 개의 80℃ 온도 챔버에 똑같이 준비된 다이어프램 시험 지그를 저장하였다. 하나는 9회차 (보관기간 총180일) 시험 종료 후 꺼내 사후시험을 진행하였

으며, 나머지 하나는 11회차(보관기간 총 220일) 시험 종료 후 사후시험을 진행하였다. 9회차와 11회차 다이어프램 모두 사후시험 시 이상 없었으며, 분해하여 육안검사를 진행한 결과 전반적인 영구변형은 있었으나 고정 O링부는 손상 없이 양호했다.

Table 2 Accelerated life test results(@100℃, 120℃) and estimated time of failure(@80℃)

Estimated time @23℃ (years)	Estimated time @80℃			
	Minimum Lifetime Results (120℃ 5 cycles, 100℃ 9 cycles)		Maximum Lifetime Results (120℃ 6 cycles, 100℃ 10 cycles)	
	days	cycles	days	cycles
10	121	6	134	7
15	136	7	151	8
20	148	8	164	9
30	166	9	184	10

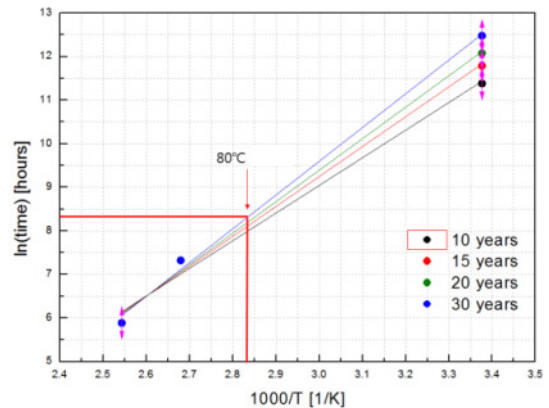


Fig. 4 Estimated time of failure(@80℃) with minimum lifetime results

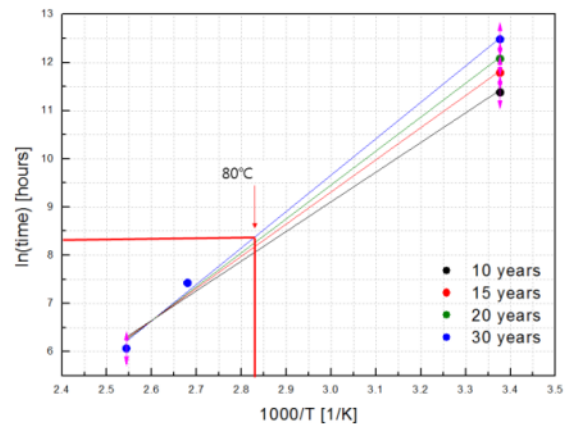


Fig. 5 Estimated time of failure (@80℃) with maximum lifetime results

2.5 수명예측

수명 예측 시 온도별 사후시험 결과로 얻은 파손 시점을 가지고 다이어프램의 수명 예측을 진행하였다. 앞에서 아레니우스 관계와 시간-온도 중첩법에 관해 알아보았고 시간-온도 중첩법을 위해 필요한 Shift factor(a_T)를 구하기 위한 두 가지 모델에 대해 알아보았다. 80°C 시험은 11회차 보관 후 사후시험 결과 이상이 없었으나 수명예측을 위해 11회차 파손으로 가정하여 23°C 수명을 예측하였다.

2.5.1 아레니우스 관계를 이용한 수명예측

120°C, 100°C, 80°C의 시험결과를 가지고 아레니우스 plot을 그려보았다. 아레니우스 관계와 같이 $\ln k(T)$ 와 $1/T$ 가 선형을 갖는다는 전제하에 23°C의 수명을 예측하였다. 120°C와 100°C로 외삽하여 얻은 결과 23°C의 수명은 265년으로 나타났다. 80°C 11회차 파손조건으로 예측 시 54년이 산출 되었으나, 80°C 시험의 파손시점이 가정이기 때문에 그 이상으로 예상된다. 아레니우스 관계식을 이용해 유도한 다음 식(7)에 따라 120°C와 100°C, 100°C와 80°C의 시험결과를 가지고 활성화 에너지를 산출해보았다. 120°C와 100°C의 시험결과로 산출한 활성화 에너지는 87.5184 kJ/mol, 100°C와 80°C의 시험결과로 산출한 활성화 에너지는 68.5021 kJ/mol로 계산되었다.

$$\ln k(T_1) = -\frac{E_a}{RT_1} + \ln A \Rightarrow \ln A = \ln k(T_1) + \frac{E_a}{RT_1} \quad (5)$$

$$\ln k(T_2) = -\frac{E_a}{RT_2} + \ln A \Rightarrow \ln A = \ln k(T_2) + \frac{E_a}{RT_2} \quad (6)$$

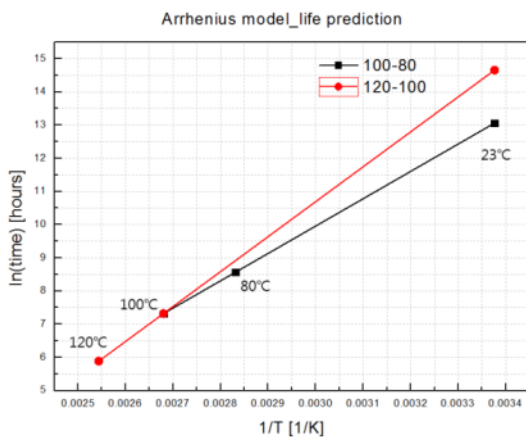


Fig. 6 Arrhenius plot

$$E_a = R \frac{\ln \frac{k(T_2)}{k(T_1)}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (7)$$

2.5.2 시간-온도 중첩법을 이용한 수명예측

앞에서 시간-온도 중첩법의 Shift factor(a_T)를 구하기 위한 두 가지 모델로 아레니우스 모델과 WLF 모델에 대해 알아보았다.

시간-온도 중첩법에서 아레니우스 모델을 이용한 Shift factor(a_T)를 산출하여 수명 예측하는 방법을 진행해보았다. 시간-온도 중첩법을 사용하기 위해 $a_T=1$ 인 기준온도를 100°C로 선정하여 앞서 아레니우스 관계에서 구한 활성화 에너지를 이용하여 식(8)을 통해 a_T 를 산출하였다. 120°C와 100°C의 시험결과로 산출한 활성화 에너지 87.5 kJ/mol를 식(8)에 넣어 $a_{T120°C}=4.1989$ 를 산출하였다. 같은 방법으로 100°C와 80°C의 시험결과로 산출한 활성화 에너지 68.5 kJ/mol를 대입하여 $a_{T80°C}=0.2864$ 를 산출 하였다. 산출된 값을 가지고 아래와 같이 y축이 $\log(a_T)$ 인 아레니우스 plot을 그리면 Fig. 7과 같이 나타난다. 이 그래프에서 외삽을 통해 상온 23°C의 a_T 를 얻을 수 있다. 여기서 얻은 $a_{T23°C}$ 의 역수를 기준 온도 100°C의 파손 시점에 곱하면 23°C의 수명을 구할 수 있다. 만약 본 논문처럼 활성화 에너지를 먼저 구하지 않은 경우 각 온도의 파손도달 시점의 비로 a_T 를 구한 후 아래 식(9)을 통해 활성화 에너지를 구할 수 있다.

$$\log(a_T) = \frac{-E_a}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (8)$$

$$E_a = -2.303R \frac{\log(a_T)}{\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (9)$$

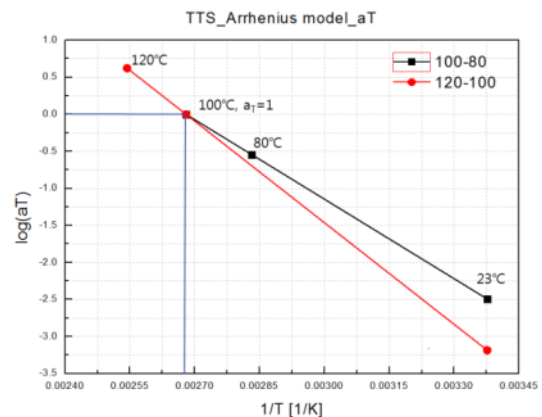


Fig. 7 Arrhenius plot of shift factor a_T

WLF 모델을 이용한 수명예측의 경우 다이아프램의 소재로 사용된 HNBR의 정확한 유리전이온도를 알 수 없었고, C_1 , C_2 를 구하기 위해 더 많은 시험 데이터가 필요로 하여 이번 시험결과 만으로 WLF 모델을 이용한 수명예측이 어려웠다.

3. 결론

아레니우스 관계를 이용하여 시험을 통해 얻은 온도별 파손시점을 가지고 23℃에서의 수명예측을 진행해보았다. 100℃를 기준으로 고온영역 120℃, 저온영역 80℃로 나눠 23℃의 수명을 분석한 결과 활성화 에너지 값이 상이함을 알 수 있었다.

고온영역의 활성화 에너지 값보다 저온영역에서의 활성화 에너지 값이 작아져 수명이 더 단축되는 현상을 볼 수 있다. 보고된 바와 같이 아레니우스 관계의 전제인 ‘활성화 에너지가 온도에 영향을 받지 않는다.’는 이론이 시험을 통해 일치하지 않음을 확인하였다. 가속노화시험을 통한 수명예측 시 되도록 낮은 온도에서 시험을 긴 시간동안 할수록 정확한 수명예측이 가능함을 알 수 있었다.

본 시험 결과는 다이아프램 저유기의 수명예측 자료로 저유기 교체시점을 결정하는 중요한 자료로 사용될 예정이다. 추후 열가속 노화시험을 반복하여 추가로 데이터를 얻어 본 시험과 비교할 계획이며,

HNBR 소재에 대한 유리전이온도 등 관련 자료를 찾아 WLF 모델을 통해 얻은 Shift factor로 시간-온도 중첩법을 통한 수명평가 연구를 계속 진행할 계획이다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) J. H. Lee et al., “Predicting the Life-time of NBR O-rings Using Intermittent Compression Stress Relaxation(CSR) Techniques”, Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, pp. 621-624, 2015.
- 2) ISO 11346, “Rubber, Vulcanized or Thermoplastic - Estimation of Life-time and Maximum Temperature of Use”, 2004.
- 3) J. W. Lee and W. H. Jung, “Polymer Properties and Physical Chemistry”, Cyplus, p.545-561, 2009.
- 4) R. J. Pazur, J. G. Cormier and K. Korhan-Taymaz, “Service Life Determination of Nitrile O-rings in Hydraulic Fluid”, Rubber Chemistry and Technology, Vol. 87, No. 2, p.239-249, 2014.