

# 공기압 실린더 가속시험 조건에 대한 연구

강보식<sup>†</sup> · 김형의<sup>\*</sup> · Remi Gobin<sup>\*\*</sup>

## Study on the Accelerated Test Condition of Pneumatic Cylinder

Bo-Sik kang, Hyoung-Eui Kim, Remi Gobin

**Key Words :** Pneumatic Cylinder(공기압 실린더), Life Test(수명시험), Accelerated Test(가속시험)

### Abstract

The goal of this paper is to introduce two methods to determine a model for the accelerated factor equation for pneumatic cylinder according to the Black equation shape. The loads consist of working pressure and temperature and we adjust these two parameters to reduce the test time but keeping the true behavior of deterioration. The first part will introduce a method using accelerated factor coming from experimental results to determine the coefficient of the Black equation by the method of the least square theory. The second part will introduce another method based on various conditions of test with the assumption that the effect of temperature and the effect of pressure on the life of pneumatic cylinder are independent. In these two cases, the results are the unknown coefficients of the Black equation.

### 기호설명

k : 볼츠만 상수( $8.6171 \times 10^{-5}$  eV/K)

$t_f$  : 고장 시간(hour)

A : 상수

$E_A$  : eV 에서의 활성화 에너지

p : Pa 에서의 압력

n : 압력 지수

### 1. 서론

공기압 실린더는 다양한 산업 분야에서 사용되고 있는 부품으로서, 이에 대한 신뢰성 연구는 기업체들에게 있어 간과할 수 없는 매우 중요한 부분이 되었다. 소비자들이 신뢰도가 높은 제품을 구입하는데 확신을 가질 수 있도록 연구가 수행되어야 하는데, 신뢰성 시험에는 많은 시간과 비용이 소모되고 있는 실정이다. 따라서, 경쟁력을 확보하기 위해 이러한 신뢰성 시험 시간을 줄여줄

수 있는 새로운 방법들이 개발되어 오고 있고, 이것이 근래에 들어 산업계에서 가속 시험, 특히 공기압 실린더에 대한 가속 시험을 개발하고 있는 이유이다.

본 논문에서는 공기압 실린더에 사용될 수 있는 모델 형태를 정확히 결정할 수 있는 두 가지 방법을 제안하고자 한다. 이 모델에서 알려지지 않은 계수는 일부 시험을 통한 가속 인자의 값을 구하여 찾아낼 수 있다. 이것이 첫 번째로 소개될 방법이다. 두 번째 방법에서는, 알려지지 않은 파라미터들을 독립화시키는 특별한 시험 조건을 사용하여 계수에 대한 계산을 수행할 것이다.



Fig. 1 The apparatus of life test

<sup>†</sup> 강보식, 한국기계연구원 신뢰성평가센터

E-mail : kbs668@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7156 FAX : (042)868-7186

<sup>\*</sup> 한국기계연구원 신뢰성평가센터

<sup>\*\*</sup> 한국기계연구원 신뢰성평가센터

우리는 다음과 같은 Black 방정식을 고려하고자 한다.

$$t_f = Ap^{-n} \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right)$$

여기서,

k: 볼츠만 상수(8.6171\*10<sup>-5</sup> eV/K)

t<sub>f</sub>: 고장 시간(hour)

A: 상수

E<sub>A</sub>: eV 에서의 활성화 에너지

p: Pa 에서의 압력

n: 압력 지수

이를 통해, 다음과 같은 가속 인자를 얻을 수 있다.

$$AF = \left(\frac{P_{test}}{P_{field}}\right)^n \exp\left(\frac{E_A}{kT} \left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right)$$

여기서, 알려지지 않은 계수는 E<sub>A</sub> 와 n 이다. Black 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln(t_f) = \ln(A) - n \cdot \ln(p) + \frac{E_A}{k} \cdot \frac{1}{T}$$

이러한 유형의 방정식을 얻게 된다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2$$

## 2. 방법 1: 시험에 의한 가속 인자 결정 방법

본 방법에서는, 최소 자승법을 통해 계수 값을 구하기 위해 정상 조건과 가속 조건에서 시험 계획을 수립하여 간단한 행렬 계산을 사용한다

### 2.1 시험 계획

**Table 1** Test plan – Method 1

Experimental run	Test conditions		Samples
	Pressure (bar)	Temperature (°C)	
1(normal conditions)	6.3	23	10
2	9	23	10
3	6.3	35	10
4	9	35	10
5	6.3	50	10
6	9	50	10

### 2.2 결과

통계적인 결과를 얻기 위해 각각의 경우 10 개의 부품에 대한 시험을 수행하고 나서 각 경우의 평균치를 계산한다. 이는 모든 조건에 대한 정확

한 값을 나타낸다.

**Table 2** Example of Test result – Method 1

Case n°	Mean
1	1500 h
2	1200 h
3	1000 h
4	800 h
5	900 h
6	700 h

### 2.3 데이터 완성

시험을 통한 가속 인자는 정상 조건에서의 결과와의 비교를 통해 쉽게 계산할 수 있다.

$$AF_{test_i} = \frac{Mean_1}{Mean_i}$$

**Table 3** Acceleration Factor

Case n°	Mean	AF per case
1 reference case in normal conditions	1500 h	1
2	1200 h	1.25
3	1000 h	1.5
4	800 h	1.875
5	900 h	1.6
6	700 h	2.14

### 2.4 선택한 모델 사용

선택한 모델은 다음과 같다.

$$Y = \ln(AF) = n \cdot \ln\left(\frac{P_A}{P_F}\right) + K_A \frac{1}{k} \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_A}\right)$$

따라서, 시험 결과를 통해 본 방정식을 입증해야 한다. 이를 통해 6 개의 방정식 시스템을 도출해 낼 수 있다.

$$\text{압력이 9 bar 인 경우 : } \ln\left(\frac{9}{6.3}\right) = 0.36$$

온도가 35°인 경우:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_A}\right) = \frac{1}{8.617 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{296} - \frac{1}{308}\right) = 1.52$$

온도가 50°인 경우:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_A}\right) = \frac{1}{8.617 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{296} - \frac{1}{323}\right) = 3.28$$

**Table 4** Example of log (AF)

Case n°	Mean obtain	AF per case	Y
1 reference case in normal conditions	1500 h	1	0
2	1200 h	1.25	0.223
3	1000 h	1.5	0.41
4	800 h	1.875	0.628
5	900 h	1.6	0.51
6	700 h	2.14	0.762

$$0.223 = 0.36n + 0K_A$$

$$0.41 = 0n + 1.527K_A$$

$$0.628 = 0.36n + 1.527K_A$$

$$0.51 = 0n + 3.28K_A$$

$$0.762 = 0.36n + 3.28K_A$$

### 2.5 행렬 전개

이러한 데이터 계산을 간단하게 하기 위해, 본 방정식은 행렬식으로 바꾸어 표현할 수 있다.

$$Y_M = \begin{pmatrix} y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{pmatrix} \text{ 이고, } A \text{ 는 } \ln\left(\frac{P_A}{P_F}\right) \text{ 와}$$

$$\frac{1}{k} \left( \frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_A} \right) \text{로 전개되며, } C = \begin{pmatrix} n \\ K_A \end{pmatrix} \text{ 이다.}$$

$$Y_M = A.C$$

$$\begin{pmatrix} 0.223 \\ 0.41 \\ 0.628 \\ 0.51 \\ 0.762 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.36 & 0 \\ 0 & 1.523 \\ 0.36 & 1.523 \\ 0 & 3.28 \\ 0.36 & 3.28 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n \\ K_A \end{pmatrix}$$

### 2.6 계수 결과

이 시점에서, 우리는 최소 자승법을 사용하여 행렬 C 내의 Black 방정식에서 알려지지 않은 계수에 대해 상당히 정확한 값을 얻을 수 있다.

$$C = ({}^t A.A)^{-1} . {}^t A.Y$$

결과적으로, n 과 K<sub>A</sub> 의 값을 구하게 되었다.

$$\begin{pmatrix} n \\ K_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.36 & 0 & 0.36 & 0 & 0.36 \\ 0 & 1.523 & 1.523 & 3.28 & 3.28 \\ 0.36 & 1.523 & 0.36 & 3.28 & 0 \\ 0 & 3.28 & 0.36 & 3.28 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0.36 & 0 & 0.36 & 0 & 0.36 \\ 0 & 1.523 & 1.523 & 3.28 & 3.28 \\ 0.36 & 1.523 & 0.36 & 3.28 & 0 \\ 0 & 3.28 & 0.36 & 3.28 & 0 \\ 0.36 & 3.28 & 0.36 & 3.28 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.223 \\ 0.41 \\ 0.628 \\ 0.51 \\ 0.762 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n \\ K_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.7278 \\ 0.1717 \end{pmatrix}$$

### 3. 방법 2: 일정한 파라미터를 통한 다양한 조건의 시험

이 방법은 다양한 조건에서 더욱 적은 수의 시험을 사용하는 것인데, 일정한 파라미터를 사용하여 이들을 독립적으로 유지해야 한다.

#### 3.1 시험 계획

본 시험은 40 개의 공기압 실린더를 사용하는 데, 2 수준의 온도와 2 수준의 압력이 적용된다. 각각의 경우, 하나의 파라미터만 바꾸어, 그 파라미터가 수명 예측에 미치는 영향력에 대해 연구한다.

**Table 5** Test plan – Method 2

Experimental run	Test conditions		Samples
	Pressure (bar)	Temperature (°C)	
1	9	35	10
2	12	35	10
3	9	50	10
4	12	50	10

#### 3.2 시험 결과

이러한 시험의 결과로서, 각 샘플에 대한 고장 시간을 알 수 있다. 따라서, 각각의 시험에 대한 평균 고장 시간인 t<sub>f1</sub>, t<sub>f2</sub>, t<sub>f3</sub>, t<sub>f4</sub> 를 쉽게 계산할 수 있다. 본 단계의 목표는 통계적인 방법을 통해 상당히 정확한 값을 구하는 것이다.

**Table 6** Example of Test results – Method 2

$t_{f1}$	1000 h
$t_{f2}$	700 h
$t_{f3}$	900 h
$t_{f4}$	500 h

### 3.3 결과 분석

#### 3.3.1 파라미터 $n$ 결정

Table 5 에 제시된 시험 계획에서 1, 2 번 항목을 고려해 보자.

이 두 가지 경우에서, 온도는 동일하다.

따라서, 우리는  $\left[ \ln(A) + \frac{E_A}{k} \cdot \frac{1}{T} \right]$  이 상수가 되는 두 개의 방정식을 얻을 수 있다:

$$\ln(t_{f1}) = \left[ \ln(A) + \frac{E_A}{k} \cdot \frac{1}{T} \right] - n \cdot \ln(p_1)$$

$$\ln(t_{f2}) = \left[ \ln(A) + \frac{E_A}{k} \cdot \frac{1}{T} \right] - n \cdot \ln(p_2)$$

$$\text{따라서, } n = \frac{\ln t_{f1} - \ln t_{f2}}{\ln p_2 - \ln p_1}$$

또한, 동일한 온도에 있는 3 번과 4 번 항목에 대해서도 동일한 계산을 수행하여 이 결과를 체크해 볼 수 있다.

$$n = \frac{\ln 1000 - \ln 700}{\ln 12 - \ln 9} = 1.24$$

#### 3.3.2 파라미터 $E_A$ 결정

제시된 시험 계획에서 1 번과 3 번 항목을 고려해 보자.

Table 5 의 두 가지 항목에서 압력은 동일하다.

따라서,  $[\ln(A) - n \cdot \ln(p)]$  가 상수가 되는 두 개의 방정식을 얻을 수 있다:

$$\ln(t_{f1}) = [\ln(A) - n \cdot \ln(p)] + \frac{E_A}{k} \cdot \frac{1}{T_1}$$

$$\ln(t_{f3}) = [\ln(A) - n \cdot \ln(p)] + \frac{E_A}{k} \cdot \frac{1}{T_3}$$

$$\text{따라서, } E_A = \frac{\ln t_{f1} - \ln t_{f3}}{\frac{1}{kT_1} - \frac{1}{kT_3}}$$

또한, 동일한 압력에 있는 2 번과 4 번 항목에 대해서도 동일한 계산을 수행하여 이 결과를 체크해 볼 수 있다.

$$E_A = \frac{\ln 1000 - \ln 900}{\frac{1}{k \cdot 35} - \frac{1}{k \cdot 50}} = 0.06eV$$

## 4. 결론

위와 같은 내용을 통해, 공기압 실린더의 신뢰성을 더욱 잘 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 통해 시험 장비 사용 시간 및 계산 시간을 현저히 줄여줄 수 있을 것이며, 이는 결국 기업체에 입장에서는 자원 관리 효율의 개선, 소비자의 입장에서는 수명이 긴 제품의 구입이라는 결과를 이끌어 내 줄 것이다. 수명 조건은 보존되고, 제조업체는 신뢰성이 보장되는 공기압 실린더를 소비자들에게 제공할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 두 가지 방법을 제시하였다. 첫 번째 방법은 정상 조건에서도 시험을 수행해야 하기 때문에 많은 시간이 걸린다. 그러나 기업체의 입장에서는 이러한 방법이 유용한지를 확인하기 위해서 이를 꼭 수행해야 하며, 이는 단 한번만 수행하면 되는 것이다. 두 번째 방법에서는 매우 엄격하고 특별한 조건을 사용해야 하는데, 가속 시험의 결과만을 제시하면 된다는 장점을 지니고 있으며, 결과적으로 이는 시간을 절약할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Wayne Nelson, 2004, *Accelerated Testing*, WILEY INTERSCIENCE
- (2) NSWC, 1998, *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*, Naval Surface Warfare Center Carderock Division
- (3) Evans, J, Hoang H., Evans J., 1989, *Statistical Experimental Design and Multivariable Analysis for Kinetic Studies in Electromigration*, Proc. IPFA, Singapore
- (4) Evans and Evans, 2001, *Product Integrity in Design*, Springer