

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.10.1139

공기압 실린더 가속모형의 유효성 평가에 관한 연구

강보식[†] · 김형의* · 장무성* · 송창섭**

(2009년 7월 24일 접수, 2009년 9월 22일 수정, 2009년 9월 25일 심사완료)

A Study on Validation of Accelerated Model for Pneumatic Cylinder

Bo-Sik Kang, Hyoung-Eui Kim, Mu-Seong Chang and Chang-Seop Song

Key Words : Pneumatic Cylinder(공기압 실린더), Accelerated Model(가속 모형), Accelerated Model Validation(가속모형 유효성)

Abstract

Pneumatic cylinder is widely used as key component of various industry fields just like automation production line. Recently, people begin to pay attention to reduce development period and cost of pneumatic cylinder so research requirements of accelerated life test of pneumatic cylinder have been increased more than ever. In this research, we shall evaluate availability of acceleration model by statistical analysis of acceleration model's predicted value and life data which acquired in a real operation condition after finish accelerated life test of pneumatic cylinder. Also to predict the life of pneumatic cylinder in the operation condition we shall develop new acceleration model equations.

기호설명

- β : 와이블분포의 형상모수
- η : 와이블분포의 척도모수 (특성수명)
- τ : 명목수명 (와이블분포의 경우 특성수명)
- E : 활성화 에너지 (eV)
- k : 볼츠만상수 (8.6171×10^{-5})
- T : 절대온도 ($^{\circ}\text{C} + 273.16$)
- AF : 가속계수 (Acceleration Factor)

1. 서론

공기압 실린더는 자동화 생산라인 등의 다양한

산업분야에서 사용되고 있는 부품으로서 고장이 발생하면 전체 시스템에 막대한 손실을 야기 시킬 수 있다. 이로 인하여, 최근에는 신뢰성에 대한 중요성 및 소비자의 요구수준이 날로 증대되고 있는 추세이다. 그러나 공기압 실린더에 대한 기존의 연구들은 설계 관점에서의 연구나 특성 해석 및 구동 속도 등의 제어 관점에서의 연구가 대부분이며, 실린더의 수명과 신뢰성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 또한, 최근에는 실린더는 긴 수명시험시간을 가지고 있어 실제 환경조건 하에서 신뢰성 시험을 할 경우 많은 시간과 비용이 소모되므로, 시간과 비용을 줄여 경쟁력을 확보시킬 수 있는 가속시험과 해석모델에 대한 연구의 중요성이 크게 대두되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 공기압 액추에이터의 핵심 기기인 공기압 실린더를 대상으로 가속인자는 온도로 하여 가속수명시험을 실시하고 사용 조건의 수명을 예측한다. 그리고 사용조건의 데이터를 이용하여 가속모형에 대한 유효성을 통계적 검정을 통해 평가하고자 한다. 신뢰성 분석을 위해 MINITAB 소프트웨어를 활용하였다.

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 신뢰성평가센터
E-mail: kbs668@kimm.re.kr

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

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

** 한양대학교 기계설계메카트로닉스공학과

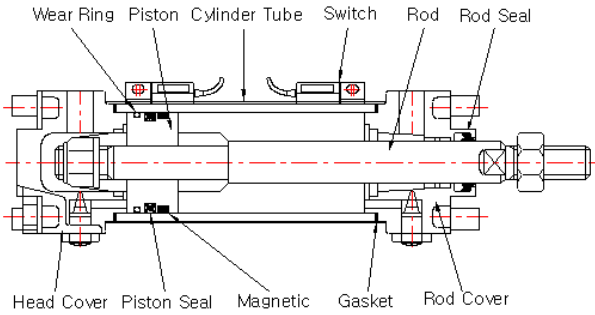


Fig. 1 Structure of Pneumatic Cylinder



Fig. 2 Life Tester of Pneumatic Cylinder



Fig. 3 Environment Chamber for the Accelerated Life Test

2. 공기압 실린더의 가속수명시험

2.1 시험 설계

공기압 실린더의 내부구조와 각 부분의 명칭은 Fig. 1 과 같다. 공기압 실린더의 주 고장모드 분석 결과, 실린더의 작동의 핵심부품인 씰은 무급유 상태에서 구동되며, 이때 씰의 내마모성 향상을 위해 씰의 고무물성에 윤활성분을 첨가하게 된다. 이때 고온하에서 실린더가 장기간 노출되어 작동하게 되면 윤활제의 빠른 이탈로 씰의 내마모성이 떨어지고 이로 인한 씰부 누설 발생으로 수명이 단축되어 가속수명시험의 스트레스 인자는 온도로 결정하였다. 온도의 수준은 공기압 실린더의 최고 온도범위인 90℃와 실린더 씰의 사용온도범위인 110℃, 씰부 최고온도인 130℃를 각각 고려하여, 3 가지 수준(90℃, 110℃, 130℃)을 결정하였다. 각 온도수준에서는 각각 2 개의 샘플을 시험하였다.

2.2 시험 결과

공기압 실린더의 수명시험 장치는 Fig. 2 와

Table 1 Test Results

| 온도(℃) | 수명(사이클) |
|-------|---------|
| 90 | 42,238 |
| 90 | 88,563 |
| 110 | 12,536 |
| 110 | 23,564 |
| 130 | 3,138 |
| 130 | 7,423 |

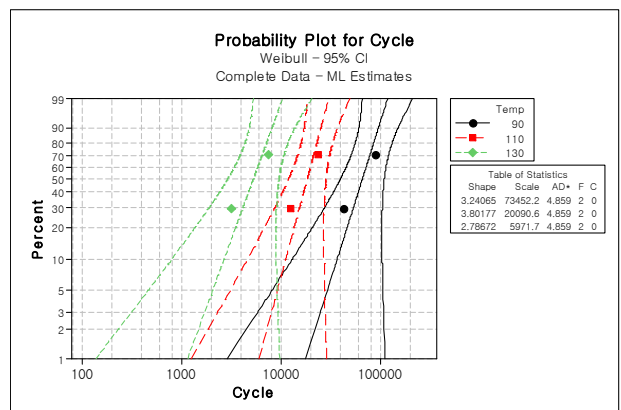


Fig. 4 Weibull Plots of Three Accelerated Levels

같이 총 60 개의 실린더를 동시에 수명시험을 할 수 있으며, 온도 가속시험은 Fig. 3 과 같이 환경챔버를 이용하여 가속시험을 실시하였다. 시험 결과는 Table 1 과 같으며, 모든 데이터는 고장이 발생한 완전 데이터이다.

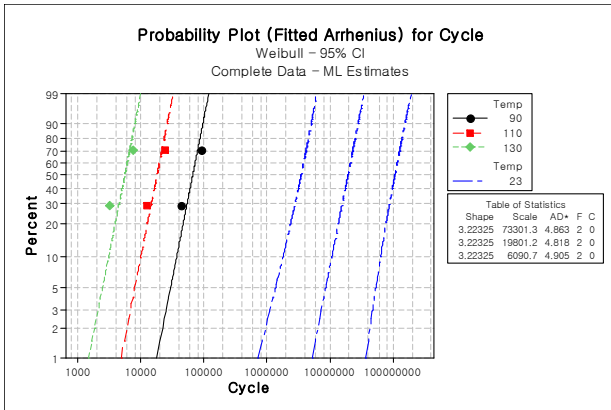


Fig. 5 Weibull-Arrhenius Plots

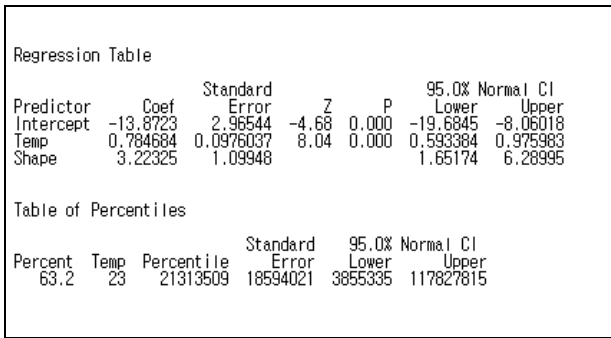


Fig. 6 Analysis Results of Weibull-Arrhenius Model

2.3 가속수명시험 분석결과

공기압 실린더의 수명분포는 와이블분포를 따르는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 온도 가속인자의 3 가지 수준에 대한 와이블 플롯은 Fig. 4 와 같다.

본 연구에서 공기압 실린더의 가속인자는 온도로 결정하였으므로, 가속모형은 아레니우스 모형을 적용할 수 있다. 아레니우스 모형은 식 (1)과 같다.⁽²⁾

$$\tau = A \cdot \exp\left[\frac{E}{k \cdot T}\right] \quad (1)$$

여기서, τ 는 명목수명으로서 와이블분포의 경우 특성수명(최도모수)으로 볼 수 있다. E 는 활성화 에너지(eV)이며, k 는 볼츠만 상수(8.6171×10^{-5}), 그리고 T 는 절대온도($^{\circ}\text{C} + 273.16$)이다.

3 가지 가속조건에서 얻은 수명데이터를 와이블-아레니우스 모형으로 분석하면 Fig. 5 와 Fig. 6 의 결과를 얻을 수 있다. 분석결과로부터 형상모수는 3.22 이며, 사용조건(23 $^{\circ}\text{C}$)의 특성수명은 21,313,509 사이클이다. 그리고 활성화 에너지 값은 0.785 를 얻었다.

Table 2 Acceleration Factor

| 온도($^{\circ}\text{C}$) | 특성수명(η) | 가속계수(AF) |
|--------------------------|----------------|----------|
| 23 | 21,313,509 | 1 |
| 90 | 73,294 | 291 |
| 110 | 19,799 | 1076 |
| 130 | 6,090 | 3500 |

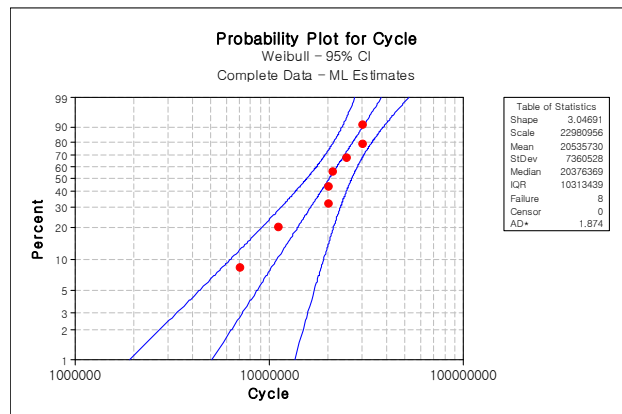


Fig. 7 Weibull Plots of Use Condition

와이블-아레니우스 모형의 MINITAB 분석결과를 설명하기 전에 우선 식 (1)의 양변에 자연로그를 취하면 $\ln(\tau) = \ln(A) + E/k \cdot T$ 와 같다. Fig. 6 의 Intercept 는 $\ln(A)$ 가 되고, Temp 의 계수는 활성화 에너지 E 가 된다. 온도가 수명에 영향을 주는지 확인은 Fig. 6 의 $P < 0.05$ 이면 가속인자(온도)가 수명에 영향을 준다고 판단한다. 그리고 온도가 23 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 Percent 63.2 의 Percentile 가 21,313,509 라는 것은 $B_{63.2}$ 수명(특성수명)을 나타낸다. 95.0% Normal CI 는 각 계수의 95% 신뢰구간을 의미한다.

Fig. 6 의 결과를 이용하면 $A = \exp(\text{intercept})$ 가 되므로 명목수명 τ 는 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.⁽³⁾

$$\tau = \exp\left[-13.87 + \frac{0.785}{[8.617 \times 10^{-5} \times (^{\circ}\text{C} + 273.16)]}\right] \quad (2)$$

가속계수⁽⁴⁾는 식 (3)과 같이 구할 수 있으며, 사용조건 23 $^{\circ}\text{C}$ 와 90 $^{\circ}\text{C}$, 110 $^{\circ}\text{C}$, 130 $^{\circ}\text{C}$ 와의 가속계수를 계산하면 Table 2 와 같다.

$$AF = \frac{\tau_{\text{사용조건}}}{\tau_{\text{가속조건}}} = \exp\left[\frac{E}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{사용조건}}} - \frac{1}{T_{\text{가속조건}}}\right)\right] \quad (3)$$

Test for Shape and Scale Equal to 3.22 and 21313509

```

=====
Chi-Square DF P
0.532098 2 0.766
=====
    
```

Test for Shape Equal to 3.22

```

=====
Chi-Square DF P
0.0341529 1 0.853
=====
    
```

Test for Scale Equal to 21313509

```

=====
Chi-Square DF P
0.385363 1 0.535
=====
    
```

Fig. 8 Equality Test Results of Shape & Scale Parameters

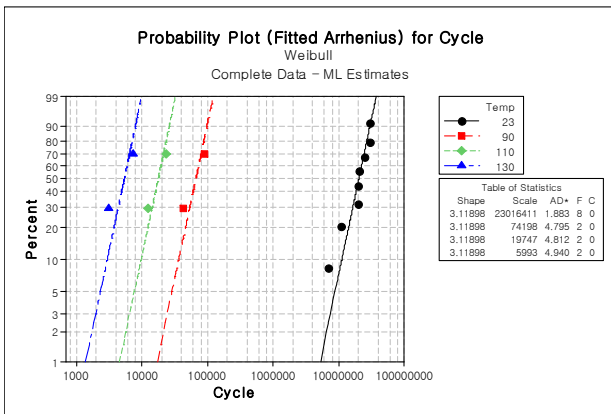


Fig. 9 Weibull-Arrhenius Plots with Use Condition Data

3. 가속모형의 유효성 평가

본 장에서는 공기압 실린더가 현장에서 사용되고 있는 조건에서 실시한 수명시험 결과와 가속모형으로부터 추정된 결과를 비교하여 가속모형의 유효성을 평가하고자 한다.

3.1 사용조건 수명데이터 분석

공기압 실린더의 사용조건에서 얻는 8 개의 수명데이터를 이용하여 분석한 와이블플롯은 Fig. 7 과 같다. 분석결과 사용조건 수명데이터의 형상모수는 3.05 이며, 특성수명은 22,980,956 사이클이다.

3.2 사용조건과 가속조건 수 비교

사용조건 수명데이터와 와이블-아레니우스 모형의 모수(형상모수와 척도모수) 추정 값의

Regression Table

| Predictor | Coef | Standard Error | Z | P | 95.0% Normal CI Lower | Upper |
|-----------|----------|----------------|--------|-------|-----------------------|----------|
| Intercept | -14.1458 | 0.683869 | -20.68 | 0.000 | -15.4861 | -12.8054 |
| Temp | 0.793620 | 0.0191450 | 41.45 | 0.000 | 0.756097 | 0.831144 |
| Shape | 3.11898 | 0.700015 | | | 2.00896 | 4.84232 |

Table of Percentiles

| Percent | Temp | Percentile | Standard Error | 95.0% Normal CI Lower | Upper |
|---------|------|------------|----------------|-----------------------|----------|
| 63.2 | 23 | 23013993 | 2655062 | 18356554 | 28853120 |

Fig. 10 Analysis Results of Weibull-Arrhenius Model with Use Condition Data

비교를 위해 동일성 검정을 실시하였다.

Fig. 8 의 동일성 검정 결과로부터 사용조건 수명데이터의 형상모수와 척도모수는 가속모형으로부터 추정된 형상모수(3.22), 척도모수(21,313,509)와 통계적으로 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 동일성 검정의 판단기준은 P 값이 0.1 보다 크면 사용조건 수명데이터가 가속모형으로부터 추정된 모수와 통계적으로 서로 다르지 않다는 의미이다.

3.3 사용조건 데이터가 포함된 가속모형

3.2 절에서 사용조건과 가속조건 수명데이터의 모수들이 통계적으로 서로 다르지 않다는 결론을 얻었기 때문에 사용조건 수명데이터를 포함하여 새로운 와이블-아레니우스 모형을 얻을 수 있다.

사용조건 수명데이터를 포함하여 분석한 결과는 Fig. 9 와 Fig. 10 과 같으며 와이블-아레니우스 모형의 형상모수는 3.12 이며, 사용조건(23°C)의 특성수명은 23,013,993 사이클이다. 활성화 에너지 값은 0.794 이다. 새로운 가속모형은 식 (4)와 같다.

$$\tau = \exp \left[-14.15 + \frac{0.794}{[8.617 \times 10^{-5} \times (C + 273.16)]} \right] \quad (4)$$

4. 결론

본 연구에서는 공기압 실린더의 가속수명시험을 실시한 후 가속모형으로부터 얻은 추정 결과와 사용조건에서 수명시험을 실시한 후 얻은 결과를 통계적으로 비교하여 가속모형의 유효성을 평가하였다.

(1) 온도 가속인자를 포함한 와이블-아레니우스 모형으로부터 추정된 형상모수는 3.22 이며, 사용조건 수명데이터의 특성수명은 21,313,509 사이클이었다.

(2) 가속모형으로부터 추정된 모수와 사용조건

의 수명시험으로부터 얻은 수명데이터에 대해 동일성 검정을 실시한 결과, 통계적으로 서로 차이가 없다는 것을 알게 되었다. 즉, 가속모형의 추정값과 실제 사용조건의 수명데이터는 서로 다르지 않다는 것을 확인하였다.

(3) 사용조건과 가속조건의 수명데이터를 모두 이용한 와이블-아레니우스 모형으로부터 추정된 형상모수는 3.12 이며, 사용조건의 특성수명은 23,013,993 사이클, 활성화 에너지는 0.794 임을 확인하였다.

(4) 공기압 실린더의 경우 온도인자만을 고려한 와이블-아레니우스 모형은 사용조건의 수명을 잘 예측하는 것으로 볼 수 있다. 공기압 실린더의 새

로운 가속모형 식[3.3 절의 식 (4)]을 도출하였다.

참고문헌

- (1) Bo-Sik Kang, Hyung-Eui Kim, Yung-Chul Yoo, 2008, "Research on Accelerated Life Test of Pneumatic Cylinder Using Two-Way Factorial Design," Proceedings of the KSME 2008 Fall Annual Meeting, pp. 1303~1308.
- (2) Nelson W., 1990, "Accelerated Testing," *WILEY*, pp. 75~77.
- (3) MINITAB Inc., 2006, "MINITAB 15 Software Help Function."
- (4) Elsayed A. Elsayed, 1996, "Reliability Engineering," *Addison Wesley*, pp. 354~379.