

크랭크 레버형 평행개폐 공기압 척의 수명 분석

Life Analysis of Parallel Opening Type Pneumatic Chuck

강보식¹, 송창섭², 장지성³, 지상원^{3,✉}

Bo Sik Kang¹, Chang Seop Song², Ji Seong Jang³ and Sang Won Ji^{3,✉}

1 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 (Korea Institute of Machinery & Materials)

2 한양대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)

3 부경대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pukyong Univ.)

✉ Corresponding author: realpneumatic@gmail.com, Tel: 051-629-6196

Manuscript received: 2008.4.3 / Revised: 2009.1.7 / Accepted: 2009.5.11

In this study, performs analysis of the life of parallel opening type pneumatic chucks that are usually applied in the factory automation line. Pneumatic chucks have complicated failure cause because they are organized as a complex of various elements. Therefore, we analyzed the main failure mode of pneumatic chuck, and then performed life test and performance test according to the international standards. On the basis of these processes, shape parameter of pneumatic chuck is proposed that is the main factor for the calculation of zero failure test time for the reliability of pneumatic chuck and their data analysis of life distribution.

Key Words: Pneumatic Chuck (공기압척), Life Test (수명시험), Failure Mode (고장모드), Weibull Distribution (와이블분포), Shape Parameter (형상모수)

1. 서론

공기압 시스템은 비용적 측면과 안정성 측면에서 산업현장의 자동화 라인에 폭넓게 사용되고 있고, 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 자동화 라인의 특성상, 관련 부품의 고장이 발생할 경우에는 생산 중단 등으로 인해 막대한 손실이 발생하게 된다. 따라서 고장이 발생하기 전에 미리 관련 부품의 수명을 예측하여 부품을 교체하여야만 한다. 그러나 공기압 부품에 관한 수명예측 및 신뢰성 개선을 위한 데이터 확보와 분석이 활발히 진행되고 있지 않는 실정이다.¹

특히, 공기압 척은 반도체 등 자동화 라인의 전·후 공정 조립 라인에서 제품의 공급과 이송의 용도로 사용되는 시스템의 핵심구동 요소로서, 사이드 롤러, 핑거, 레버 및 왕복 작동부인 피스톤과

기밀을 위한 각종 셸 등으로 구성되어 있다. 따라서 구성요소의 성능변화에 의해 다양한 고장 원인을 가지고 있으며, 부품의 교체 주기를 결정하기 위해 수명 예측이 무엇보다 중요한 부품이다.

따라서 본 논문에서는 공기압 척의 주요 부품별 고장모드에 따른 신뢰성 시험 항목을 도출하고 도출된 시험 항목에 대하여 국제규격에 준하는 신뢰성 시험기준을 적용하여 수명 시험 및 성능평가 시험을 수행하였다. 이를 통해 얻어진 평행 개폐형 공기압 척의 수명분포 데이터를 분석하여 신뢰성 시험시간 산출과 수명예측을 위한 필수요소인 형상 모수를 제안하고자 한다.

2. 고장 모드 및 고장 분석

2.1 신뢰성 시험 대상품

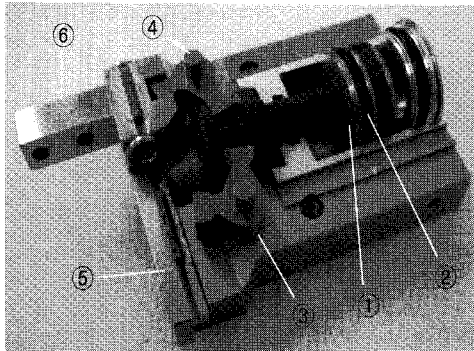


Fig.1 Structure of pneumatic parallel chuck (①piston, ②piston seal, ③lever, ④lever hinge, ⑤side roller guide, ⑥finger)

신뢰성 시험에 있어서 샘플 수의 증가는 시험 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있으나, 그에 따라 시험비용과 시험시간 역시 증가한다. 따라서 신뢰성 시험을 위한 샘플의 개수는 시험비용과 시험의 정확성을 고려하여 적절하게 선택하여야 한다.

공기압 부품의 ISO 신뢰성 평가규격²에 따르면 신뢰성 평가를 위한 최소 샘플 수(sample size)를 7 개 이상으로 지정하고 있다. 이는 확률분포지(probability paper)에서 고장데이터를 B_{10} 수명보다 아래에 위치시켜 B_{10} 수명 추정의 정확성을 향상시키고 특성수명 추정의 정확도를 보증하기 위함이다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1 에 나타난 피스톤 직경 25[mm], 개폐행정 16[mm]인 동일 타입의 크랭크 레버형 평행개폐 공기압 척 중에서 8 개를 무작위로 추출하여 시험을 수행하였다.

2.2 고장 모드 및 시험 항목 도출

Fig. 1 과 같은 평행 개폐형 공기압 척은 피스톤 쉘, 레버, 힌지, 핑거 및 사이드 롤러 가이드 등의 주요부품으로 구성되어 있다. 사용자 및 제조사를 대상으로 한 설문에 따르면 피스톤 쉘과 사이드롤러 가이드가 고장 발생 빈도 및 심각도 상에서 높은 점유율을 차지하고 있다는 의견이 우세하였다.

공기압 척의 시험항목을 선정하기 위해서 설문 결과에서 나타난 주요 구성품별 고장 메커니즘과 시험 항목들과의 관계를 평가하여 Table 1 과 같은 품질기능 전개표³를 작성하였다.

이를 통해 내구성 시험(endurance test), 파지력 시험(grip force test), 반복위치정밀도 시험(repeatability position precision test) 및 누설 시험(leakage test)순으로 신뢰성 시험 항목이 도출되었다.

Table 1 quality function deployment

Test	Repeatability position precision test	Grip force test	Leak test	Endurance test
Failure				
Piston Seal		◎	◎	◎
Lever	◎	○		◎
Finger	◎	○		○
Side roller guide	○	△		○
Priority	3	2	4	1

Most importance:◎, Importance:○, Commonness:△

3. 시험 기준 및 평가 방법

평행개폐형 공기압 척에 관련된 주요 국제 규격으로서는 ASTM⁴ 과 ISO⁵ 등이 있으므로, 본 시험에서는 공기압 척의 수명을 평가하기 위한 시험 기준으로 상기의 규격들을 채택하여 시험을 수행하였다.

각 시험항목에 대한 시험 수행 방법 및 판정기준은 다음과 같다.

1) 척 개방시 최대변위보다 5[mm] 작은 부하를 선정하여, Fig. 2 의 내구성 시험장치에 부착하고, 0.63 [MPa]의 공기압을 1.5 초간 인가한 후, 0.5 초간 개방하는 사이클을 적용하여, 최대개방변위에서 파지행정거리가 5[mm]가 되도록 내구성 시험을 수행한다. 또한, 내구성 시험중의 성능저하를 확인하기 위하여, 제조사의 보증거리를 5 회 분할하여, 매회 정해진 시점에서 성능시험을 실시하고, 실시된 성능시험의 결과가 그 판정기준을 만족하여야 한다.

2) 0.5[Mpa]의 공기압을 인가하여, Fig. 3 과 같은 파지력 시험장치에 부하물 대신 측정센서를 장착하고 평균행정속도가 1 초가 되도록 배기포트를 조정하여 파지력 시험을 수행한다. 본 시험에서는 척의 파지력이 12[kgf] 이상이어야 한다.

3) 시험대상 공기압 척 핑거의 한쪽 면에 측정 포인트를 결정하여 초기 세팅부위의 변위를 측정하고, 척을 10 회 작동시킨 후 세팅 포인트 부위의 변위를 재 측정하여 반복위치정밀도 시험을 수행한다. 이 때, 초기 변위와의 오차가 ±0.1[mm]이내 이어야 한다.

4) 공기압 척을 정지상태로 놓고, 척 바디부에 설치된 포트에 0.2[MPa]의 공기압을 인가하여, 가압되지 않은 포트부의 누설량을 측정한다. 상기와 동일한 방법으로 0.63[MPa]을 재 인가하여, 누설을 재 측정한다. 본 시험에서의 각 인가압력당 최대 누설유량은 2.375[cc/min]까지를 허용하였다.

상기의 시험항목 중 하나라도 합격하지 못할 경우 고장으로 판정하였다.

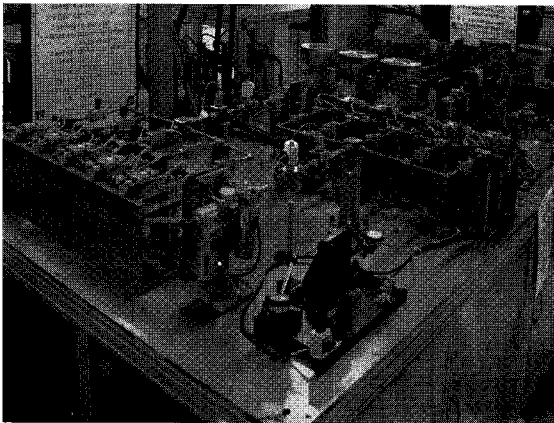


Fig. 2 Endurance test equipment of pneumatic chuck

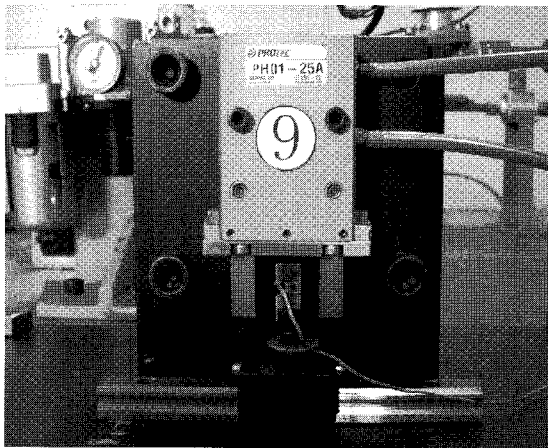


Fig. 3 Grip force test equipment of pneumatic chuck

4. 수명시험 결과 및 분석

4.1 수명시험 결과

앞서 언급된 시험방법 및 기준을 적용하여 공기압 척의 수명 시험을 수행한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 수명 데이터는 8개의 샘플 모두가 고장이 관측된 완전 데이터이다.

Table 2 Termination cycle count

Sample Number	Termination Cycle count
Sample 4	3,465,334
Sample 6	7,725,381
Sample 1	8,802,420
Sample 3	8,970,591
Sample 5	11,003,996
Sample 8	12,668,093
Sample 2	13,461,254
Sample 7	13,562,409

4.2 분포적합도 검정

획득된 수명데이터에 적합한 수명 분포를 확인하기 위하여 와이불(Weibull), 대수정규(Lognormal), 지수(Exponential) 및 대수로지스틱(Loglogistic) 분포에 대하여 최소제곱법⁶을 이용하여 확률분포지에 접합한 후 적합도 분석을 수행하였고, 분포의 적합성을 나타내는 척도로 상관계수(correlation coefficient)⁷ 및 Anderson-Darling⁸ 값을 사용하였다. 상관계수와 Anderson-Darling 값은 관측된 수명 데이터가 어떤 분포에 가장 적합 한지를 판단할 수 있는 정보를 제공하여 주며 동일한 수명데이터를 다수의 분포에 적용하였을 경우, 상관계수 값은 1에 가까울수록, Anderson-Darling 값은 작을수록 해당 분포에 적합하다는 것을 의미한다.

Fig. 4~7에 각 분포에 대한 적합도 분석 결과를 나타내었다. Fig. 4~7에서 C.C.는 상관계수 값을, A.D.는 Anderson-Darling 값을 나타낸다.

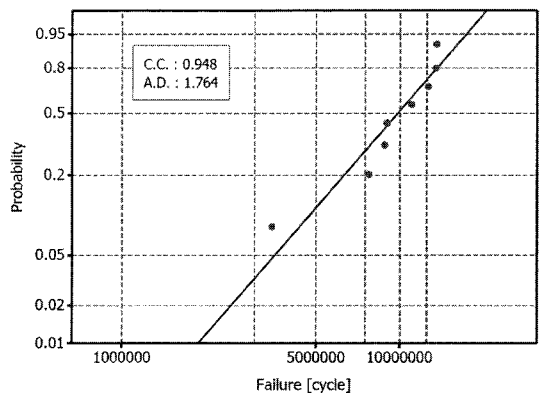


Fig. 4 The goodness of fitness-Weibull distribution

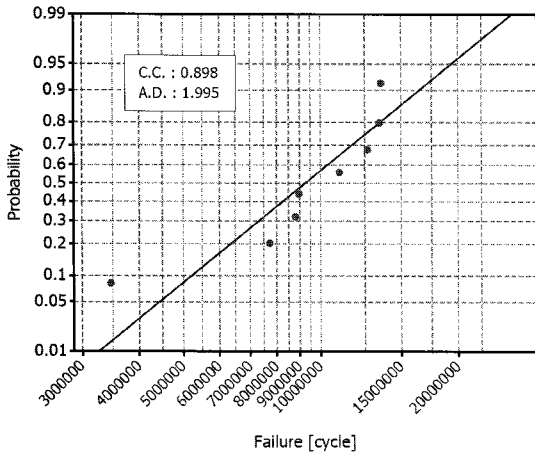


Fig. 5 The goodness of fitness-Lognormal distribution

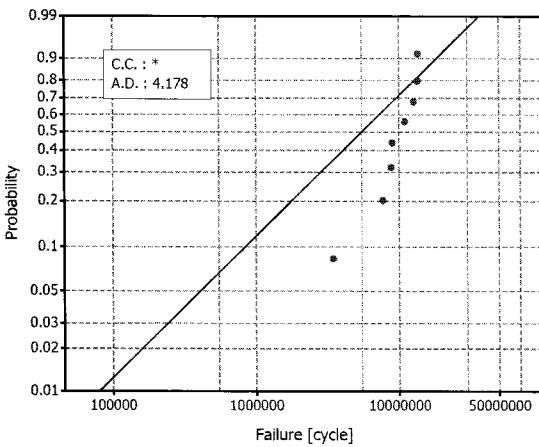


Fig. 6 The goodness of fitness-Exponential distribution

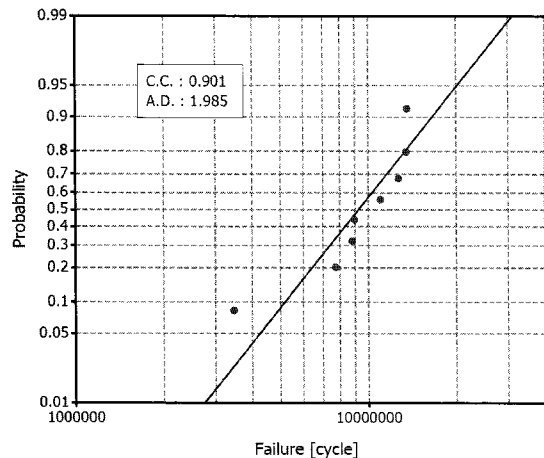


Fig. 7 The goodness of fitness-Loglogistic distribution

Fig. 4-7 의 적합도 분석결과에 따르면, 각 분포의 상관계수 값과 Anderson-Darling 값은 와이블 분포가 0.948 과 1.764 로, 대수정규 분포가 0.898 과 1.995 로, 대수로지스틱 분포가 0.901 과 1.985 로 각각 나타났으므로, 본 시험의 수명데이터 분포로서는 와이블 분포가 가장 적합하다고 판단할 수 있다.

4.3 수명 이론

적합도 분석에서 선정된 와이블 분포는 기계부품의 수명분포를 나타내는데 적합하다고 알려져 있으며 형상 모수(shape parameter), 척도 모수(scale parameter) 및 위치 모수(location parameter)의 값에 따라 감소형 고장률, 일정한 고장률, 증가형 고장률 등의 다양한 수명 분포를 표현 할 수 있어 신뢰성 데이터 분석에 가장 널리 사용된다.⁹

2 모수 와이블 분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{10,11}

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$$t \geq 0, \beta, \eta > 0$$

식 (1)에서 η 는 척도모수, β 는 형상모수를 각 나타낸다.

2 모수 와이블 수명분포에 대한 신뢰성 척도로서는 불신뢰도 함수(분포함수), 신뢰도 함수(생존 함수), 고장률 함수가 있으며 각 함수를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.^{10,11}

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

2 모수 와이블 분포에서는 누적고장 확률 $F(t)$ 와 $F(t) \times 100\%$ 백분위 수 t_F 사이에 식 (5)와 같은 관계가 성립한다.^{10,11}

$$\ln[-\ln(1 - F(t))] = \beta \cdot \ln(t_F) - \ln(t_0), \quad t_0 = \eta^\beta \quad (5)$$

4.4 수명 분석결과 및 고찰

Fig. 4~7 의 적합도 분석에서 선정된 와이블 분포에 대한 신뢰도 함수(reliability function) 및 고장률 함수(hazard function)를 각각 Fig. 8 과 Fig. 9 에 나타내었다.

Fig. 8 에서 공기압 척의 작동 사이클이 증가함에 따라 신뢰도가 감소하고 있고 Fig. 9 에서는 증가형 고장률 함수의 형태를 관찰할 수 있으므로 공기압 척의 고장유형은 시간이 경과함에 따라 성능이 저하되어 발생하는 열화고장으로 판단할 수 있다.

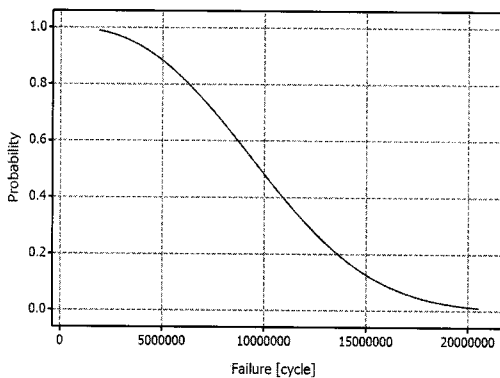


Fig. 8 Survivor function

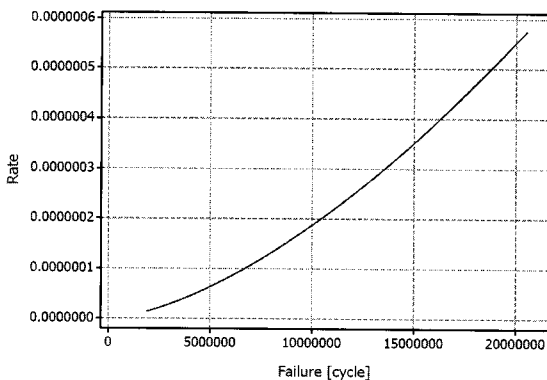


Fig. 9 Hazard function

Fig. 10 에 공기압 척 수명의 와이블 확률지도 시결과를 나타낸다. 상기의 도시결과를 바탕으로 와이블 분포의 모수를 추정하면 형상 모수 β 는 2.6, 척도 모수 η 는 11,310,101 사이클로 도출되었

다. 또한 평균수명(MTTF: Mean Time To Failure)은 10,041,561 사이클, 중앙값(median)은 9,802,860 사이클, B_{10} 수명은 4,699,939 사이클로 확인되었다.

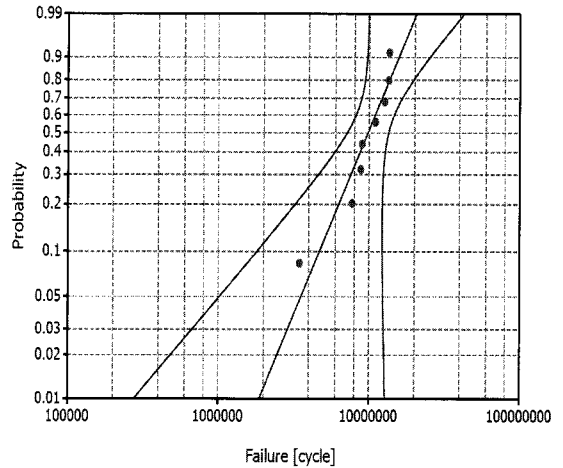


Fig. 10 Weibull probability paper

Table 3 에 95% 신뢰구간에서의 와이블 분포의 모수 및 수명의 추정치를 표시하였다. 형상 모수의 하한 값은 0.9 이고 상한 값은 7.5 로 추정되었으며, 척도 모수의 하한 값은 8,445,176 사이클, 상한 값은 15,146,917 사이클로 나타났다.

Table 3 Estimation value of reliability

	Estimated value	Confidence level 95%	
		lower	upper
Shape parameter	2.6	0.9	7.5
Scale parameter	11,310,101	8,445,176	15,146,917
MTTF	10,041,561	7,509,303	13,443,434
B_{10} life	4,699,939	1,804,781	12,239,394

공기압 척과 같이 긴 수명을 보유한 제품의 수명추정은 많은 시간과 비용이 소모된다. 상당수의 공기압 부품은 수년 혹은 그 이상 고장없이 사용이 가능하도록 설계되고 있다. 그러므로 일반 사용조건에서는 실용적인 시험기간 내에 고장을 관측하기가 불가능할 수도 있다. 따라서, 완전 고장 시험에 비하여 수명시험 시간 및 비용을 획기적으로 단축시킬 수 있는 신뢰성 입증시험(reliability

substantiation test)¹² 이 국내의 신뢰성 인증기관 등에서 수명 평가시험에 널리 사용되고 있다.

대표적인 신뢰성 입증시험인 무고장 시험(zero failure test)은 어떤 신뢰수준에 대해 제품의 신뢰도가 주어진 기준, 즉 보증수명을 만족하였는지 입증하기 위한 시험으로 정의된다. 그러므로 무고장 시험은 정해진 시간 동안 고장을 일으키지 않는 샘플을 요구한다.

시험대상품의 고장분포가 와이블 분포를 따른다면 무고장 시험의 시험시간 산출은 다음 식을 따른다.

$$t_n = B_i \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{1/\beta} \quad (6)$$

식 (6)에서 t_n 은 무고장 시험시간, B_i 는 보증수명, CL 은 신뢰수준, n 은 샘플수, p 는 백분위수, β 는 와이블 분포의 형상 모수를 나타낸다.

식 (6)에 나타낸 바와 같이 무고장 시험시간을 결정하기 위해서는 시험대상품의 특성에 따른 보증수명, 신뢰수준 및 샘플수를 선정하여야 한다. 또한, 시험대상품의 형상 모수도 미리 알고 있어야만 한다.

그러나 시험 대상품의 형상 모수는 임의로 선정하여서는 곤란하므로 반드시 시험에 근거하여 결정하여야 한다. 하지만 현재까지 공기압 척을 포함한 공기압 부품류의 형상 모수는 전혀 보고된 바가 없었으므로, Barringer¹³에 의해 보고된 씰(seal)의 형상 모수를 차용하여 공기압 척에 관한 무고장 수명시험의 시험 시간을 계산하여 왔다. 그러므로 차용된 형상 모수의 값에 따라 공기압 척의 수명이 과소평가 또는 과대평가될 가능성이 존재한다.

예를 들어 씰의 형상 모수 1.1을 차용하면 신뢰수준 90%, 시료수 8개로 공기압 척의 B_{10} 수명 4,699,939 사이클을 보증할 수 있는 무고장 시험시간은 식 (6)에 의해 11,718,255 사이클로 계산된다. 그러나 본 논문에서 시험에 의해 도출된 공기압 척의 형상 모수 2.6을 적용하여 무고장 시험시간을 계산하면 6,917,621 사이클로 나타난다.

따라서, 본 논문에서 도출된 공기압 척의 형상 모수 2.6을 적용하게 될 경우, 씰의 형상 모수 1.1을 차용한 경우와 비교하여 시험시간을 약 59% 감소시킬 수 있으므로 시험비용을 절감할 수 있으

며 수명평가에 관한 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 평행 개폐형 공기압 척의 수명 분포 분석을 통하여 신뢰성 시험시간 산출과 수명 예측을 위한 주요 요소인 형상 모수를 제안하였다.

와이블 수명분포의 형상 모수는 실험적 방법을 통하여 추정해야 하므로 형상 모수 추정을 위한 성능시험 항목을 선정하고자 사용자 및 제조사를 대상으로 주요 고장 모드 및 심각도에 대한 설문을 수행하였고, 설문 결과를 바탕으로 한 품질기능 전개를 통하여 반복위치정도 시험, 내압성 시험, 파괴력 시험을 주요 성능 시험 항목으로 도출하였다.

또한 국제규격에 준하는 시험기준 및 평가방법을 상기의 시험항목에 적용하여 고장을 관측하였으며 관측된 수명데이터의 적합도 분석을 수행하여 와이블 분포를 공기압 척의 수명분포로 선정하였다.

채택된 와이블 분포의 와이블 확률지 도시결과를 바탕으로 형상모수 β 는 2.6, 척도모수 η 는 11,310,101 사이클, 평균수명 (MTTF)는 10,041,561 사이클, B_{10} 수명은 4,699,939 사이클로 도출되었다. 95% 신뢰구간에서 형상 모수의 하한 값과 상한 값은 각각 0.9 와 7.5 로, 척도 모수의 하한 값은 8,445,176 사이클, 상한 값은 15,146,917 사이클로 나타났다.

따라서 본 논문에서 도출된 형상모수를 이용하면 씰의 형상모수를 차용해오던 과거의 경우와 비교하여 공기압 척의 신뢰성 시험 시간 산출과 수명평가에 관한 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kang, B. S., Ji, S. W., Song, C. S. and Jang, J. S., "Analysis Life of Pneumatic Cylinder," Proc. of the KSME Spring Annual Meeting, pp. 3914-3919, 2006.
2. ISO T. C. 131 Fluid Power Systems, "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing -General procedures," ISO 19973-1, 2007.
3. Kim, Y. G., "Reliability Terminology Guide," Korea Agency for Technology and Standards, pp. 102-121,

2005.

4. ASTM D 4688, "Standard test method for evaluating structural adhesives for finger jointing," ASTM, 2005.
5. ISO T. C. 108 Mechanical Vibration, Shock and Condition Monitoring, "Mechanical vibration-Vibrotactile perception thresholds for the assessment of nerve dysfunction - Part 1: Methods of measurement at the fingertips," ISO 13091-1, 2001.
6. Chapra, S. T., "Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists," McGraw-Hill, pp. 284-311, 2008.
7. Abernethy, R. B., "The New Weibull Handbook, Fourth Edition," Abernethy, R. B, pp. 3.1-3.24, 2000.
8. Anderson, T. W. and Darling, D. A., "Asymptotic theory of certain goodness-of-fit criteria based on stochastic processes," Annals of Mathematical Statistics, Vol. 23, pp. 193-212, 1952.
9. Murthy, D. N. P., Xie, M. and Jiang, R., "Weibull Models," Wiley Inc., pp. 12-15, 2003.
10. Ramakumar, R., "Engineering reliability fundamentals and applications," Prentice-Hall, pp. 108-114, 1993.
11. Hisada, K. and Arizino, I., "Reliability Tests for Weibull Distribution With Varying Shape-Parameter, Based on Complete Data," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 51, No. 3, pp. 331-336, 2002.
12. Seo, S. G., "Minitab Reliability Analysis," ERETEC Inc., pp. 260-276, 2006.
13. Barringer & Associate Inc., <http://www.barringer1.com>