

공압 실린더의 신뢰성 평가를 위한 형상모수 추정에 관한 연구 The Estimation of Shape Parameter of Pneumatic Cylinders

강보식·송창섭

B. S. Kang and C. S. Song

Key Words : Pneumatic Cylinder(공기압 실린더), Life Test(수명 시험), Shape Parameter(형상 모수), Failure Mode(고장 모드), Weibull Distribution(와이블 분포)

Abstract : Pneumatic cylinders that are usually applied in the factory automation line have complicated failure cause because they are composed of various elements. In this study, we performed life test and performance test of double acting pneumatic cylinders according to the international standards and then analyzed the life and the main failure mode of the cylinders in the same load condition. On the basis of these processes, we can estimate shape parameter for the reliability estimation of pneumatic cylinders and their data analysis of life distribution.

1. 서 론

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 발생하므로 고장이 발생하기 전에 미리 관련 부품의 수명을 예측하여 부품을 교체하여야 하지만, 공기압 부품의 수명 예측 및 신뢰성 개선을 위한 데이터 확보와 분석이 활발히 진행되지 않고 있는 실정이다. 이에 따라 ISO/TC 131에서는 공기압 부품의 신뢰성 평가 관련 국제규격¹⁾을 제정하기 위한 논의가 진행 중에 있다.

공기압 실린더는 작동 유체인 압축공기를 실린더에 공급하여 부하가 인가된 상태에서 왕복운동을 하는 공기압 시스템의 핵심구동 요소이고, 구동부인 피스톤과 피스톤 로드, 가이드 튜브 및 기밀을 위한 각종 씰 등으로 구성되어 있는 복합체이므로 각 구성요소의 성능변화에 의해 다양한 고장 원인을 가지고 있다.

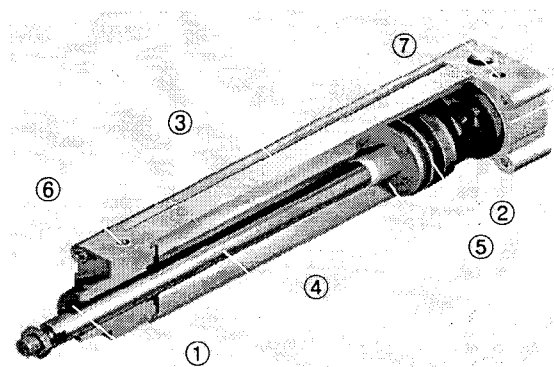
따라서 본 논문에서는 공기압 실린더의 주요 고장 모드를 분석하고 국제규격에 준하는 시험기준을 적용하여 수명 시험 및 성능 시험을 수행하고, 이

를 바탕으로 동일 부하 조건하에서의 공기압 실린더 수명분포 데이터를 분석하여 신뢰성 시험 시간 산출과 수명예측을 위한 핵심 요소인 형상 모수 및 척도 모수를 제안하고자 한다.

2. 고장모드 및 고장 분석

2.1 고장모드 및 고장분석 절차

ISO/TC 131에서 진행중인 공기압 부품의 신뢰성 평가 규격안¹⁾에 따르면 신뢰성 평가를 위한 최소 시료수를 7개 이상으로 지정하고 있으므로, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 직경50[mm], 행정거리 300[mm]인 8개의 동일 모델 편로드 왕복동 실린더를 사용하여 시험을 수행하였다.



①rod seal ②piston seal ③cylinder tube
④piston rod ⑤piston head ⑥rod cap ⑦head cap

Fig. 1 Structure of Pneumatic Cylinder

접수일 : 2006년 9월 11일, 채택확정 : 2006년 10월 12일
강보식(책임저자) : 한국기계연구원 유공압팀
E-mail : kbs668@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7156
송창섭: 한양대학교 기계공학부

본 논문에서는 고장 모드 및 고장 메커니즘 분석(FMMA: Failure Mode & Mechanism Analysis)⁴⁾과 치명도 매트릭스 분석(CMA: Criticality Matrix Analysis)⁴⁾을 통해 고장 메커니즘의 영향과 위험도 평가(FMECA: Failure Mode Effects & Critically Analysis)⁴⁾를 수행하였고, 2단계 품질기능 전개(QFD: 2-Stage Quality Function Development)⁴⁾를 통해 주요 시험 항목들을 선정하였다.

2.2 고장 모드 및 고장 메커니즘 분석

Fig. 1과 같은 공기압 실린더는 피스톤 셸, 로드 셸, 실린더 튜브, 피스톤 로드, 피스톤 헤드, 헤드 캡 및 로드 캡 등의 주요부품으로 구성되어 있고, 대부분의 고장형태는 누설로 나타난다. 주요 부품의 고장 모드 및 고장 메커니즘을 Table 1에 나타내었다.

2.3 고장 심각도 및 발생빈도 분석

고장 심각도를 중축으로, 발생 빈도를 횡축으로 하여 치명도 분석을 수행하였고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 피스톤 셸과 로드 셸에서 발생하는 고장이 심각도와 발생빈도 상에서 높은 점유율을 차지하고 있음을 알 수 있다.

2.4 고장 모드의 영향 및 위험도 분석

Table 3에는 Table 2에서 분석된 고장 심각도 및 발생빈도를 바탕으로 고장모드에 대한 치명도 평가결과를 계량화하여 나타내었고, 치명도 평가결과, 피스톤 셸과 로드 셸의 마찰력 증가 및 누설의 치명도 점수(criticality)는 각각 9점과 7점으로 확인 되었다.

2.5 1단계 품질기능 전개

공기압 실린더의 시험항목을 선정하기 위해서 사용자의 요구조건 또는 사양과 주요 구성품별 고장 모드와의 관계를 정량적으로 평가하고 이를 바탕으로 1단계 품질기능 전개표를 작성하여 Table 4에 나타내었다.

2.6 2단계 품질기능 전개

Table 2의 1단계 품질기능 전개표를 바탕으로 주요 구성품별 고장 메커니즘과 시험 항목들과의 관계를 평가하여 Table 5와 같은 2단계 품질기능 전개표를 작성하였고, 이 결과로부터 시험의 우선순위(priority)는 수명시험, 내부 및 외부 누설 시험,

시동압력 시험, 내압성 시험순으로 확인되었다.

Table 1 Analysis of Failure mode and failure mechanism

	Function	Failure Mode	Failure Mechanism and Cause	
Piston Seal	Prevention of internal leakage	Leakage	①	Wear & fracture of seal
		Increase of friction	②	Deterioration of lubrication
Rod Seal	Prevention of external leakage	Leakage	③	Wear & fracture of seal
		Increase of friction	④	Deterioration of lubrication
Cylinder Tube	Pressure chamber	Fracture	⑤	Overpressure
		Deformation	⑥	External shock
Head & Rod Cap	Airtight of cylinder tube	Fracture of assembling bolt	⑦	Overpressure

Table 2 Criticality matrix analysis

Failure severity	High		①, ③	②, ④
	Medium	⑤		
	Low	⑥, ⑦		
Failure frequency		Low	Medium	High

Table 3 Failure mode effects & criticality analysis

	Failure Mode	Effects of failure	Evaluation		
			Frequency	Sev erity	Criti cality
Piston Seal	Leakage	Decline of Starting Pressure	mid	high	7
	Increase of friction	Decrease of efficiency	high	high	9
Rod Seal	Leakage	Decline of Starting Pressure	mid	high	7
	Increase of friction	Decrease of efficiency	high	high	9
Cylinder Tube	Fracture	Disappearance of inner pressure	low	mid	3
	Deformation	Decrease of efficiency	low	low	1
Head & Rod Cap	Fracture of assembling bolt	Increase of external leakage	low	low	1

Table 4 1-stage quality function deployment

	Piston Seal	Rod Seal	Cylinder Tube	Head & Rod Cover
Failure Function	Leakage, Increase of friction	Leakage, Increase of friction	Fracture, Deformation	Fracture of assembling bolt
Starting pressure	○	○		
Internal & external leakage		○	△	
Endurance of pressure	△		△	△
Life	◎	◎		

Most importance ◎, Importance ○, Commonness △

Table 5 2-stage quality function deployment

Test Failure	Minimum working pressure	Leakage	Endurance pressure	Life
Piston Seal	○	◎	△	◎
Rod Seal	○	◎	△	◎
Cylinder Tube	○	△	○	○
Head & Rod Cover	△	△	○	△
Priority	3	2	4	1

Most importance ◎, Importance ○, Commonness △

3. 시험 기준 및 평가 방법

공기압 실린더에 관한 주요 국제 규격으로서는 JIS²⁾와 ISO³⁾ 등이 있고, 현재 ISO/TC 131에서는 본 논문에서 채택한 수명 시험과 성능 시험에 대한 기준 및 평가 항목에 관련된 규격 제정을 진행하고 있는 상황이므로, 현 ISO 규격³⁾에는 공기압 실린더의 신뢰성 평가 관련 항목이 존재하지 않는다. 그러므로 본 시험에서는 공기압 실린더의 수명을 평가하기 위한 시험기준으로 JIS²⁾의 규격을 채택하여 시험을 수행하였다.

각 시험항목에 대한 시험 수행 방법 및 판정기준은 다음과 같다.

1) Fig. 2의 부하질량-속도선도²⁾에서 평가대상물의 직경 및 속도에 맞는 저항부하를 결정하여 실린더 로드(cylinder rod)측에 부하를 장착하고 실린더 헤드측과 로드측에 0.7[MPa]의 공급압력을 교대로 인가하여 수평방향으로 약 500[mm/s]의 속도로 왕복작동행정이 이루어지도록 수명시험을 수행한다. 실린더 제조사의 보증거리를 5회 분할하여, 매회 정해진 시점에서 성능시험을 실시하고, 실시된 성능시험의 결과가 그 판정기준을 만족하여야 한다. 본 시험에서는 10[kg]의 수평부하를 채택하였다.

2) 무부하 상태로 피스톤을 헤드측 위치에 놓고, 헤드쪽에 공기압을 인가하고, 실린더가 스틱 슬립(stick slip) 없이 동작을 시작하는 시점의 압력을 측정하여 시동압력시험을 수행한다. 본 시험에서 사용된 실린더의 경우, 0.2[MPa]이하의 압력에서 상기의 조건을 만족하여야 한다.

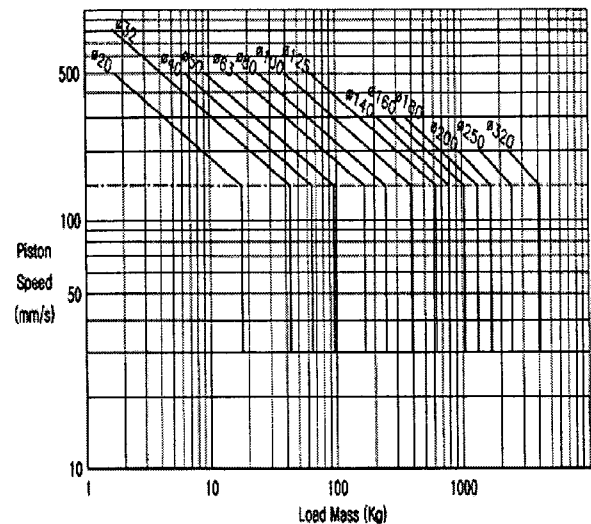


Fig. 2 Load mass and piston speed

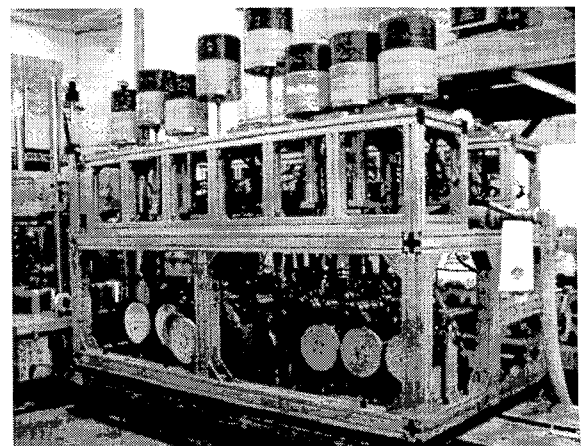


Fig. 3 The apparatus of life test

3) 무부하 상태로 실린더의 헤드측에 사용압력의 1.5배를 공급하여 3분동안 가압하고, 다시 로드측에도 동일하게 가압한 후 각 부의 가시적 손상(변형, 크랙, 체결부의 헐거움)을 조사하여 내압성 시험을 수행한다. 본 시험에서는 공급압력을 1.05 [MPa]로 채택하였다.

4) 내압성 시험을 실시한 실린더를 정지상태로 설정한 후, 헤드측에 0.7[MPa]의 공기압을 인가하여 배압측에 설치된 누설 측정기로 5분간 누설량을 조사하여 내부누설을 측정하고, 로드측에도 위와 동일한 방법으로 시험을 수행하여 외부누설을 측정하였다. 본 시험에서 사용된 직경 50[mm] 실린더의 내부누설은 2×10^{-7} [m³/s], 외부누설은 1.3×10^{-7} [m³/s] 이하까지 허용하였다.

상기의 시험항목 중 하나라도 합격하지 못 할 경우 고장으로 판정하였다. 본 시험에서 사용된 수명 시험 장치를 Fig. 3에 나타내었다.

4. 공기압 실린더의 수명분석

4.1 공기압 실린더의 수명 이론

기계부품의 수명분포를 나타내는데 적합한 와이블 분포는 형상 모수(shape parameter), 척도 모수(scale parameter) 및 위치모수(location parameter)의 값에 따라 감소형 고장률, 일정형 고장률, 증가형 고장률 등의 다양한 수명 분포를 표현 할 수 있어 신뢰성 데이터 분석에 가장 널리 사용된다.

2모수 와이블 분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁴⁾.

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

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

2모수 와이블 수명분포에 대한 신뢰성 척도로서는 불신뢰도 함수(분포함수), 신뢰도 함수(생존함수), 고장률 함수가 있으며 각 함수를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁴⁾.

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

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

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

2 모수 와이블 분포에서는 누적고장 확률 $F(t)$ 와 $F(t) \times 100\%$ 백분위 수 t_F 사이에 식 (5)와 같은 관계가 성립한다⁴⁾.

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

$$t_0 = \eta^\beta$$

식(1)~(5)에서 β 는 와이블 분포의 형상모수, η 는 척도모수, $f(t)$ 는 확률밀도함수, $F(t)$ 는 분포함수, $R(t)$ 는 신뢰도함수, $\lambda(t)$ 는 고장률 함수를 나타낸다.

4.2 공기압 실린더의 수명시험 결과분석

앞서 언급된 시험방법 및 기준을 적용하여 공기압 실린더의 시험을 수행한 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6의 수명데이터는 8개의 시료수 모두 고장이 관측된 완전 데이터이다.

Table 6 Termination cycle count

Termination cycle count	Internal leakage	External leakage	Endurance inner pressure	Starting pressure
822,456	unit NO.2			unit NO.2
937,574	unit NO.1			unit NO.1
1,043,803	unit NO.3			
1,385,404	unit NO.7			
1,660,171	unit NO.5			unit NO.5
1,713,796	unit NO.6	unit NO.6		unit NO.6
1,839,030		unit NO.8		
1,913,248		unit NO.4		

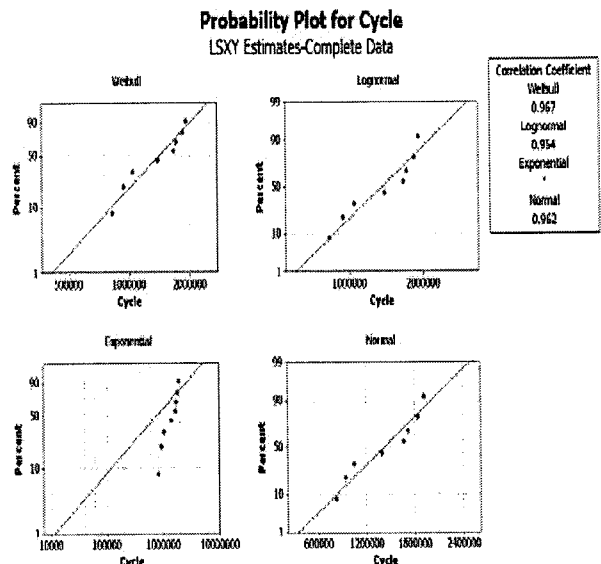


Fig. 4 The analysis goodness of fitness

획득된 수명데이터에 적합한 수명분포를 확인하기 위하여 와이블 분포(weibull distribution), 대수 정규분포(lognormal distribution), 지수분포(exponential distribution) 및 정규분포(normal distribution)에 대하여 적합도 분석을 수행하였고, 분포의 적합성을 나타내는 척도로 상관계수(correlation coefficient)값을 사용하였다. 상관계수 값은 관측된 수명 데이터가 어떤 분포에 가장 적합한지를 판단할 수 있는 정보를 제공하여 주며 동일한 수명데이터를 다수의 분포에 적용하였을 경우, 상관계수 값이 1에 가까울수록 해당 분포에 적합함을 의미한다.

Fig. 4에 적합도 분석결과를 나타내었다. Fig. 4의 적합도 분석결과 와이블 분포의 상관 계수값은 0.967로 1에 가장 근접하였으므로 본 시험의 수명 데이터는 와이블 분포가 가장 적합한 수명분포임을 알 수 있다.

Fig. 4의 적합도 분석에서 선정된 와이블 분포에 대한 확률밀도 함수(probability density function), 와이블 확률지(weibull probability plot), 신뢰도 함수(reliability function) 및 고장률 함수(hazard function)를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6은 공기압 실린더 수명의 와이블 확률지도 시결과를 나타낸다. 상기의 도시결과를 바탕으로 와이블 분포의 모수를 추정하면 형상 모수 β 는 3.4, 척도 모수 η 는 1,570,912사이클로 추정되었다. 또한 평균수명(MTTF)은 1,411,822사이클, 중앙값(median)은 1,411,502사이클, B_{10} 수명은 814,379사이클로 확인되었다.

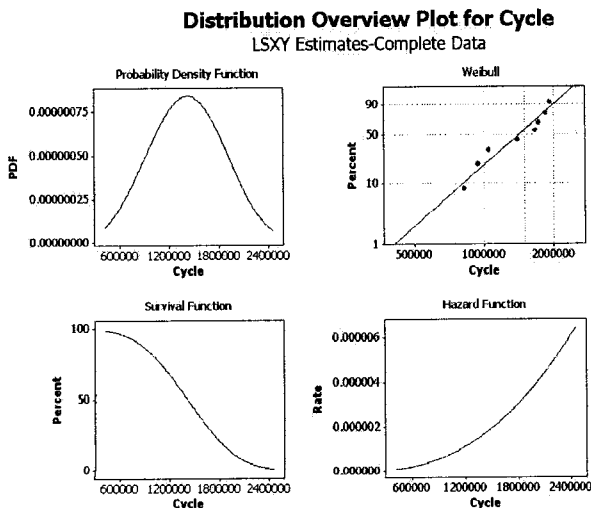


Fig. 5 Overview of weibull distribution

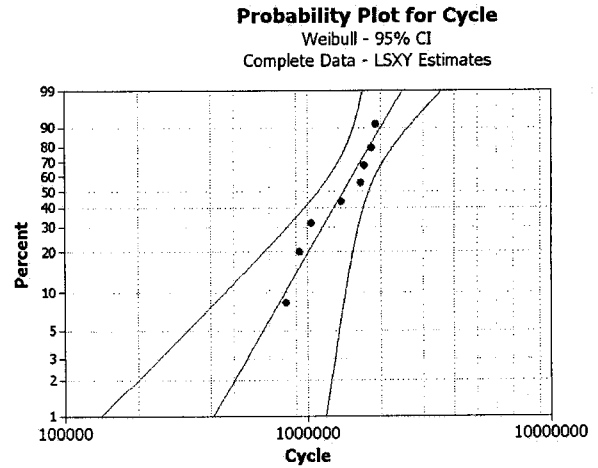


Fig. 6 Weibull probability plot

Table 7 Estimation value of reliability

	Estimated value	Confidence level 95%	
		lower	upper
Shape parameter	3.42529	1.60772	7.29767
Scale parameter	1,570,912	1,269,752	1,943,503
MTTF	1,411,822	1,130,213	1,763,599
B_{10} life	814,379	460,268	1,440,930

Table 7에 95% 신뢰구간에서의 와이블 분포의 모수 및 수명의 추정치를 표시하였다. 형상 모수의 하한 값은 1.60772이고 상한 값은 7.29767로 추정되었고, 척도 모수의 하한 값은 1,269,752사이클, 상한 값은 1,943,503사이클로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 공기압 실린더의 수명분포 분석을 통하여 신뢰성 시험 시간 산출과 수명예측을 위한 주요 요소인 형상 모수를 제안하였다.

와이블 수명분포의 형상 모수는 실험적 방법을 통하여 추정해야 하므로 형상 모수 추정을 위한 성능시험 항목을 선정하고자 주요 고장 모드 및 고장 모드의 영향과 위험도 분석을 수행하였고, 2단계 품질기능 전개를 통하여 시동압력 시험, 내압성 시험, 내부 및 외부 누설 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 실린더의 수명분포로 선정하였다.

채택된 와이블 분포의 와이블 확률지 도시결과를 바탕으로 형상모수 β 는 3.4, 척도모수 η 는 1,570,912 사이클, 평균수명 (MTTF)는 1,411,822 사이클, B_{10} 수명은 814,379사이클로 추정하였다. 95% 신뢰구간에서 형상 모수의 하한 값과 상한 값은 각각 1.60772, 7.29767로, 척도 모수의 하한 값은 1,269,752사이클, 상한 값은 1,943,503사이클로 나타났다.

참고 문헌

1. ISO/FDIS 19973-1, 2006, "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing - General procedures".
2. JIS B 8368, 1999, "Pneumatic fluid power -Pneumatic cylinders".
3. ISO 10099, 2001, "Pneumatic fluid power - Cylinders - Final examination and acceptance criteria".
4. 김윤광 외 13인, 2005, "신뢰성 용어 해설서", 산업자원부 기술표준원, pp. 46 ~ 53, pp. 102 ~ 117.