

# 공기압 밸브의 수명 분석

강보식<sup>†</sup> · 이승훈\* · 김경수\*\* · 임남구\*\*\* · 김형의\*\*\*\*

## Life Analysis of Pneumatic Valve

Bo-Sik Kang, Seung-Hun Lee, Kyung-Soo Kim, Nam-Gu Lim and Hyoung-Eui Kim

**Key Words :** Distribution(와이블분포), Failure Mode(고장모드), Life Test(수명시험), Pneumatic valve(공기압 밸브), Weibull

### Abstract

In this study, we are to analyze the life and the main failure mode of pneumatic valves that are usually applied to the factory automation line. Pneumatic valves have complicated failure cause since they are organized as a complex of various elements. Therefore, in this paper, we analyzed the main failure mode of pneumatic valves, and then performed life test and performance test according to the international standards. On the basis of these processes, we estimated a shape parameter that is the main factor for the calculation of test time for the reliability of pneumatic valves by analyzing life distribution data.

기호설명  
 $\beta$ : 와이블 분포의 형상모수  
 $\eta$ : 와이블 분포의 척도모수  
 $f(t)$ : 확률밀도함수  
 $F(t)$ : 분포함수  
 $R(t)$ : 신뢰도함수  
 $\lambda(t)$ : 고장률함수

### 1. 서 론

공기압 시스템은 비용적 측면과 안정성 측면에서 산업현장의 자동화 라인에 폭넓게 사용되고 있고, 그 적용범위가 점차 확대되고 있다. 자동화 라인의 특성상, 관련 부품의 고장이 발생할 경우에는 생산 중단 등으로 인해 막대한 손실이 발생하

므로 고장이 발생하기 전에 미리 관련 부품의 수명을 예측하여 부품을 교체하여야 하지만, 공기압 부품의 수명예측 및 신뢰성 개선을 위한 데이터 확보와 분석이 활발히 진행되지 않고 있는 실정이다. 이에 따라 ISO/FDIS 19973-2에서는 공기압 밸브의 신뢰성 평가 관련 국제 규격<sup>(1)</sup>을 제정하기 위한 논의가 진행 중에 있다.

공기압 밸브는 공기압 회로에서 구동기인 실린더, 액추에이터 등에 공급되는 압축 공기의 방향을 제어하는 공기압 시스템의 핵심 요소이고, 스프링, 슬레노이드, 스프링 및 기밀을 위한 각종 씰 등으로 구성되어 있는 복합체이므로 각 구성요소의 성능변화에 의해 다양한 고장 원인을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 공기압 밸브의 주요 고장모드를 분석하고 국제 규격에 준하는 시험 기준을 적용하여 수명 시험 및 성능 시험을 수행하고, 이를 바탕으로 공기압 밸브 수명 분포 데이터를 분석하여 신뢰성 시험 시간 산출과 수명 예측을 위한 핵심 요소인 형상 모수 및 척도 모수를 제안하고자 한다.

---

<sup>†</sup> 강보식, 한국기계연구원 신뢰성평가센터  
E-mail : kbs668@kimm.re.kr  
TEL : (042)868-7156 FAX : (042)868-7186

\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

\*\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

\*\*\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

\*\*\*\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

---

## 2. 고장 모드 및 고장 분석

### 2.1 고장 모드 및 고장 분석 절차

ISO/FDIS 19973-1 에서 진행중인 공기압 부품의 신뢰성 평가 규격<sup>(1)</sup> 초안에 따르면 신뢰성 평가를 위한 최소 시료수를 7 개 이상으로 지정하고 있으므로, 본 논문에서는 Fig. 1 에 나타낸 5 포트 2 방향 밸브 9 개의 동일 모델을 사용하여 시험을 수행하였다.

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

### 2.2 고장 모드 및 고장 메커니즘 분석

Fig.1 과 같은 공기압 밸브는 몸체, 스푼, 스푼셀, 솔레노이드, 플런저, 스프링 등의 주요 부품으로 구성되어 있고, 대부분의 고장 형태는 누설로 나타났다. 주요 부품의 고장 모드 및 고장 메커니즘을 Table 1 에 나타내었다.

### 2.3 고장 심각도 및 발생 빈도 분석

고장 심각도를 중축으로, 발생 빈도를 횡축으로 하여 치명도 분석을 수행하였고, 그 결과를 Table 2 에 나타내었다.

### 2.4 고장 모드의 영향 및 위험도 분석

Table 3 은 고장 모드에 대한 치명도 평가 결과를 나타낸다.

### 2.5 1-단계 품질기능 전개

공기압 실린더의 시험 항목을 선정하기 위해서 사용자의 요구 조건 또는 사양과 주요 구성품별 고장 모드와의 관계를 평가하여 1 단계 품질 기능 전개표를 작성하여 Table 4 에 나타내었다.

### 2.6 2-단계 품질기능 전개

주요 구성품별 고장 메커니즘과 시험 항목들과의 관계를 평가하여 Table 5 와 같은 2 단계 품질 기능 전개표를 작성하였다.

이를 통해 누설 시험(leakage measurement test), 최소 작동 압력 시험(Measurement minimum shifting pressure test), 최소 작동 전류 시험(Measurement minimum shifting current test)을 주요 성능 시험 항목으로 도출하였다.

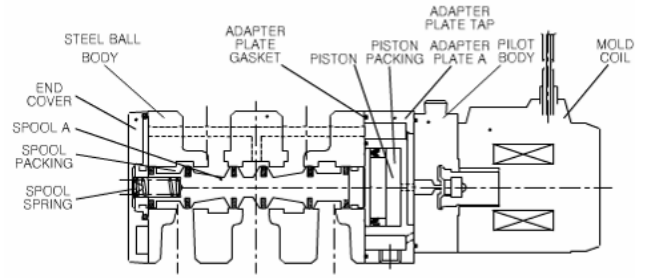


Fig. 1 Structure of Pneumatic Valve

Table 1 Analysis of failure mode and failure mechanism

Primary components	Function	Failure Mode	Failure Mechanism and Cause
Adapter	opening and closing pipeline	failure in change	① motion impossibility of piston
		leakage	② design inferiority
Spool	opening and closing pneumatic pipeline	impossibility of change / adhesion	③ inflow of foreign substance and adhesion
		leakage	④ wear and damage in seal
Plunger	changing valve port	impossibility of change / adhesion	⑤ inflow of foreign substance and corrosion
		impossibility of change / magnetization	⑥ change of magnetic characteristics
Solenoid coil	generating electromagnetic force	inferiority of applying an electric current	⑦ disconnection and electric leakage
		electric leakage	⑧ material inferiority
Spring	return	impossibility of change / transformation	⑨ degradation / corrosion

**Table 2** Criticality matrix analysis

Failure severity	High	②⑧	①③	④
	Medium		⑦⑨	⑤
	Low		⑥	
Failure frequency		Low	Medium	High

**Table 3** Failure mode effects & criticality analysis

Primary components	Failure Mode	Effects of failure	Evaluation		
			Frequency	Severity	Criticality
Adapter	failure in change	functional loss of directional control / deterioration of responding characteristics	high	high	9
	leakage	loss of efficiency	mid	mid	5
Spool	impossibility of change / adhesion	impossibility of directional control / deterioration of responding characteristics	high	high	9
	leakage	internal leakage	high	mid	7
Plunger	impossibility of change / adhesion	impossibility of directional control / deterioration of responding characteristics	high	high	9
	impossibility of change / magnetization	deterioration of responding characteristics	low	mid	3
Solenoid coil	inferiority of applying an electric current	impossibility of change	high	high	9
	electric leakage	casualties / generation of heat / functional deterioration	high	mid	7
Spring	impossibility of change / transformation	inferiority of change	mid	high	7

**Table 4** 1-stage quality function deployment

	Adapter	Spool	Plunger	Solenoid coil	Spring
Failure	failure in change / leakage	impossibility of change / adhesion	impossibility of change / adhesion / magnetization	inferiority of applying an electric current / electric leakage	impossibility of change / transformation
Function					
Anti-pressure	◎	◎	○	△	△
Anti-corrosion	○	◎	◎	△	◎
Anti-wear	△	◎	○	◎	○
Durability	◎	◎	◎	◎	◎
Score	14	20	16	12	14

Most importance ◎(5), Importance ○(3), Commonness △(1)

**Table 5** 2-stage quality function deployment

Test	Leakage	Minimum shifting pressure	Minimum shifting current	Endurance	
					Failure
Adapter	14	◎	○	◎	◎
Spool	20	◎	◎	△	◎
Plunger	16	◎	◎	△	◎
Solenoid coil	12	◎	△	◎	◎
Spring	14	△	△	△	◎
Score	324	248	180	380	
Priority	2	3	4	1	

Most importance ◎(5), Importance ○(3), Commonness △(1)

### 3. 시험 기준 및 평가 방법

공기압 밸브에 관한 주요 국제 규격으로서는 JIS<sup>(2)</sup>와 ISO<sup>(3)</sup> 등이 있고, 본 논문에서 ISO/FDIS 19973-2 의 수명 시험과 성능 시험에 대한 기준 및 평가 항목에 관련된 규격을 채택하여 시험을 수행하였다.

각 시험항목에 대한 시험 수행 방법 및 관정기준은 다음과 같다.

1) 수명 시험은 입구포트에 630 kPa 의 압력을 인가하고 최소 1 초당 1 회 이상으로 밸브의 절환

작동이 행해지도록 시험 장치를 설정한 후, Fig.2 과 같이 출구 포트에 부하를 가한 상태로 수명시험을 수행한다. 밸브 제조사의 보증거리를 10 회 분할하여, 매회 정해진 시점에서 성능시험을 실시하고, 실시된 성능시험의 결과가 그 판정기준을 만족하여야 한다.

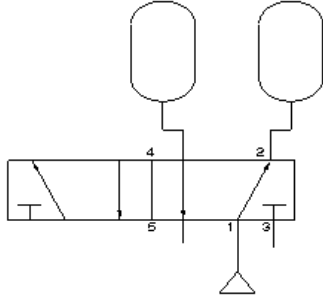


Fig. 2 circuit of endurance test

2) 누설 시험은 시험 밸브를 누설 측정기에 연결한 후, 시험 밸브에 3 분간 630 kPa 의 압력을 가한 상태에서 입력 포트와 배기 포트에서 누설을 측정하여 기록한 후, 합산한 값이 11 L/h 을 초과 하지 말아야 한다.

상기의 시험항목을 합격하지 못 할 경우 고장으로 판정하였다. 본 시험에서 사용된 수명시험 장치를 Fig.3 에 나타내었다

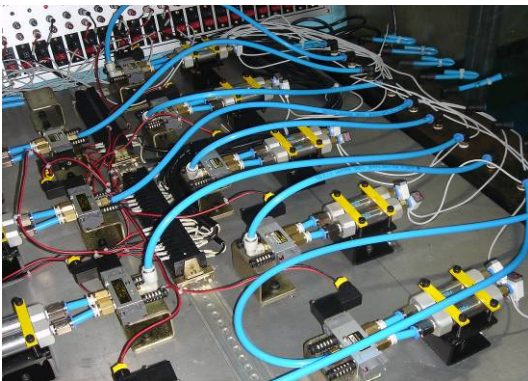


Fig. 3 The apparatus of life test

#### 4. 공기압 밸브의 수명분석

##### 4.1 공기압 밸브의 수명 이론

기계류 부품의 수명분포를 나타내는데 적합한 와이بل 분포(Weibull distribution)는 형상 모수(shape parameter), 척도 모수(scale parameter) 및 위치 모수(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. 특히 3-모수 와이بل 분포는 일정

기간이 지난후부터 고장이 발생하기 시작하는 기계류 부품의 고장 데이터 분석에 적용할 수 있다.

3-모수 와이블 분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(4)</sup>.

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

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

3-모수 와이블 수명분포에 대한 신뢰성 척도로서는 분포함수, 신뢰도 함수(reliability function), 고장률 함수(hazard function)가 있으며 각 함수를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다<sup>(4)</sup>.

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

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

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

##### 4.2 공기압 밸브의 수명시험 결과분석

공압 밸브에 대한 신뢰성 분석은 Minitab 6.0 과 Weibull++를 사용하였고, 누설 시험에 의해 측정된 자료를 이용하여, 누설자료를 수명자료로 변환한 뒤, 산출된 수명자료를 이용하여 수명분석을 하였다. Fig.4 은 시간에 따른 누설량 나타난 것이고, Table 6 은 Exponential 모형에 의한 수명시험예측 Data 를 나타낸 것이다.

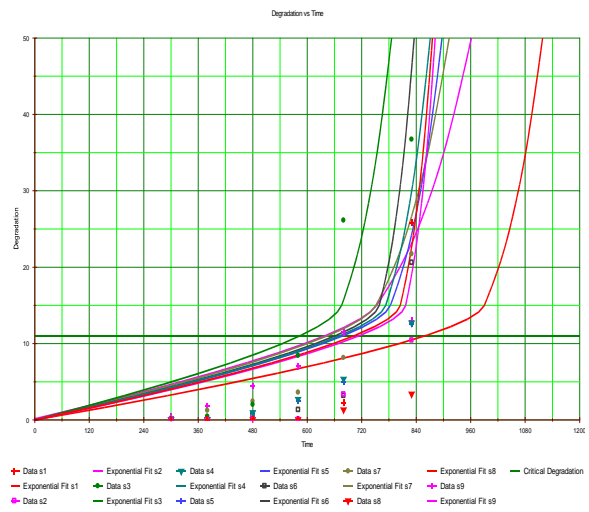
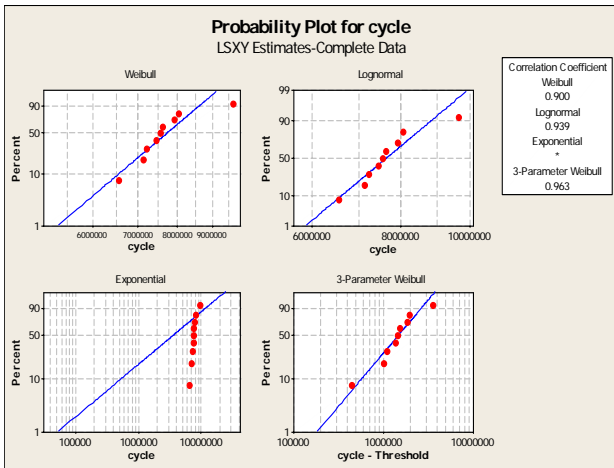


Fig. 4 The degradation analysis of leakage data

**Table 6** Termination cycle count

No	Termination Cycle Count	Sample Number
1	6,538,331	unitNO.3
2	7,109,514	unitNO.9
3	7,190,672	unitNO.7
4	7,433,200	unitNO.6
5	7,532,352	unitNO.4
6	7,606,662	unitNO.5
7	7,907,989	unitNO.1
8	8,037,692	unitNO.2
9	9,644,651	unitNO.8



**Fig. 5** The analysis goodness of fitness

획득된 수명데이터에 적합한 수명분포를 확인하기 위하여 와이불 분포(weibull distribution), 대수정규분포(lognormal distribution), 지수분포(exponential distribution) 및 3-모수 와이불 분포(3-parameter weibull 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 제공해 주며, 동일한 수명데이터를 다수의 분포에 적용하였을 경우, 상관계수 값이 1에 가까울수록 해당 분포에 적합함을 의미한다.

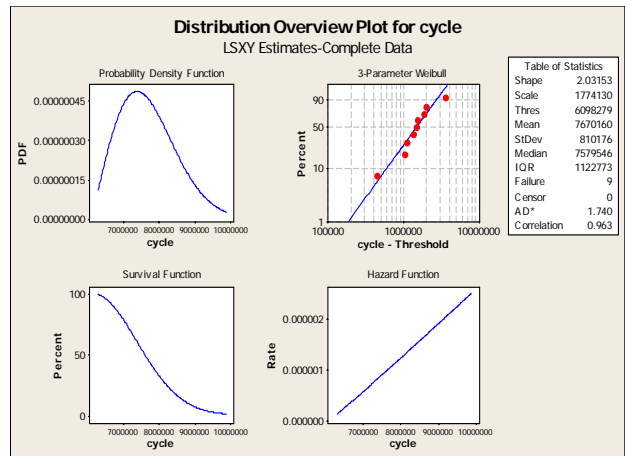
Fig. 5에 적합도 분석결과를 나타내었다. Fig.4의 적합도 분석결과 3-모수 와이불 분포의 상관 계수 값은 0.963으로 1에 가장 근접하였으므로, 본 시험의 수명데이터는 3-모수 와이불 분포가 가장 적

합한 수명분포임을 알 수 있다.

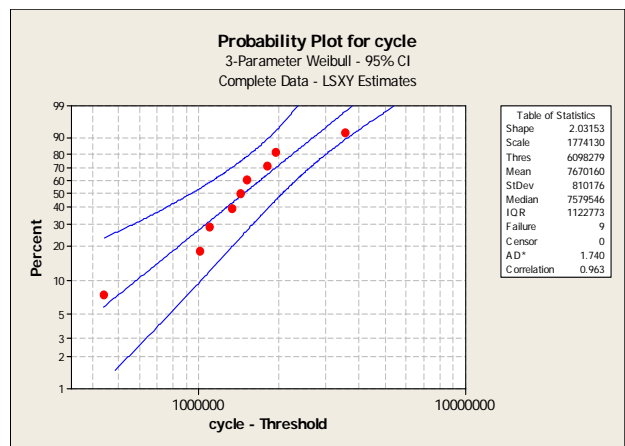
Fig. 5의 적합도 분석에서 선정된 3-모수 와이불 분포에 대한 확률밀도 함수(probability density function), 3-모수 와이불 확률지(3-parameter weibull probability plot), 신뢰도 함수(reliability function) 및 고장률 함수(hazard function)를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 7은 공기압 밸브 수명의 3-모수 와이불 확률지 도시결과를 나타낸다. 상기의 도시결과를 바탕으로 와이불 분포의 모수를 추정하면 형상 모수(Shape parameter)  $\beta$ 는 2.03, 척도 모수(Scale parameter)  $\eta$ 는 1,774,130 Cycles, 위치모수(Location parameter)  $\gamma$ 는 6,098,279 Cycles이 된다.

또한 평균수명(MTTF)은 7,670,160 Cycles, 중앙값(median)은 7,579,546 Cycles,  $B_{10}$  수명은 6,684,294 Cycles로 확인되었다.



**Fig. 6** Overview of 3-parameter weibull distribution



**Fig. 7** 3-parameter weibull probability plot

**Table 7** Estimation value of reliability

참고문헌

	Estimated value	Confidence level 95%	
		lower	upper
Shape parameter	2.03	1.25596	3.28604
Scale parameter	1,774,130	1,262,097	2,493,896
Location parameter	6,098,279	-	-
MTTF	7,670,160	7,156,378	8,220,828
$B_{10}$ life	6,684,294	6,275,067	7,120,208

Table 7 에 95% 신뢰구간에서의 와이블 분포의 모수 및 수명의 추정치를 표시하였다. 형상 모수 (Shape parameter)  $\beta$  의 하한 값은 1.25596 이고 상한 값은 3.28604 로 추정되었고, 척도 모수 (Scale parameter)  $\eta$  의 하한 값은 1,262,097 Cycles, 상한 값은 2,493,896 Cycles 로 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서는 공기압 밸브의 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, 2 단계 품질기능 전개를 통하여 누설 시험, 최소 작동 압력 시험, 최소 작동 전압 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  $\beta$  는 2.03, 척도모수  $\eta$  는 1,774,130 Cycles, 평균수명 (MTTF)는 7,670,160 Cycles,  $B_{10}$  수명은 6,684,294 Cycles 로 추정하였다. 95% 신뢰구간에서 형상 모수의 하한 값과 상한 값은 각각 1.25596, 3.28604 로, 척도 모수의 하한 값은 1,262,097 Cycles, 상한 값은 2,493,896 Cycles 로 나타났다.

- (1) ISO/FDIS 19973-1, 2006, "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing - General procedures."
- (2) JIS B 8375, 2000, " Pneumatic fluid power - Five-port directional control valves "
- (3) ISO 15407, 2000, " Pneumatic fluid power - Five-port directional control valves"
- (4) 김윤광 외 13 인, 2005, "신뢰성 용어 해설서", 산업자원부 기술표준원, pp. 46~53.
- (5) Robert B. Abernethy, 2003, "The New Weibull Handbook"
- (6) Gary S, Wasserman, 2003, "Reliability Verification Testing, and Analysis in Engineering Design", Marcel Dekker, New York.
- (7) Dimitri Kececioglu, 1993, "Reliability & Life Testing Handbook", Prentice Hall, New Jersey.
- (8) NSWC, 1998, "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", Naval Surface Warfare Center Carderock Division