

공압 전자밸브 신뢰성 평가기준 개발

Reliability assessment standard development of pneumatic valves

강 보 식* 성 백 주* 김 도 식* 조 정 대* 김 형 의*

Bo-Sik KANG* Baek-Ju SUNG* Do-Sik KIM* Jeong-Dai CHO* Hyoung-Eui KIM*

* 한국기계연구원 기계류부품 신뢰성평가센터

Abstract

In this study, for improvement of pneumatic valve reliability, we grasped the falling-off problem in efficiency of domestic valve and performed detailed analysis the relating international standards, and we also decided sampling method and reliability evaluation items to be evaluated valves. And, in addition, we describe the developed evaluation standard to increase the competition power and to improve the reliability of domestic pneumatic valve manufacturers through deciding of test conditions and thesis of evaluation procedures to each evaluation items.

1. 서 론

공장자동화 시스템 및 일반 산업기계의 요소부품으로 사용되는 공압밸브는 공압 시스템에서 최종 액츄에이터의 속도 및 방향을 제어하는 방법으로 널리 사용되고 있다. 공압밸브는 구동방법에 따라 수동밸브, Air Operated 밸브, 전자밸브로 나뉘어지고, 제어 대상에 따라 방향제어, 압력제어, 유량제어 밸브로 구분되며 이 중에서 가장 많이 사용되고 있는 것은 방향제어용 공압 전자밸브이다.

한편 공압 전자밸브는 국내 산업계의 자동화 요구부응을 위해 매년 수요가 급증하고 있고 국산화를 위한 상당한 노력이 진행되고 있으나, 취약한 기반기술구조 개선과 설계·제조 기술발전을 동시에 유도할 수 있는 신뢰성 평가기준 정립이 매우 뒤떨어져 있다.

따라서 본 연구에서는 공압밸브의 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 국산밸브의 성능 저하 문제점 파악과 관련 국제규격의 분석을 세밀히 하였으며, 평가대상밸브의 샘플링 방법과 신뢰성평가 항목을 결정하였다. 또한 각 평가항목에 대한 시험조건 결정과 평가절차 정립을 통해 국내 공압밸브 생산업체의 경쟁력 향상과 신뢰성 개선에도모할 수 있는 개발된 평가기준을 기술하고자 한다.

더불어 평가대상인 밸브의 신뢰성 시험을 수행할 수 있는 평가장비를 설계 및 제작 완료하였으며, 이에 대한 개발결과를 기술하고자 한다.

2. 공압밸브의 판정기준 기본이론

공압밸브의 작동수명분포는 관련분야의 문헌에 따르면 $\beta = 1 \sim 1.1$ 로 지수분포를 따르고 밸브의 신뢰도(요구 신뢰도)를 나타내는 척도(즉, 기준)로 고장률 λ_1 또는 평균수명 $\theta_1 = \frac{1}{\lambda_1}$ 를 사용한다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

여기서 β : Shape parameter, θ : Scale parameter, t : 유공압밸브 수명

$f(t)$: 확률 밀도 함수

공압밸브의 종류에 따른 β 는 Control Valve의 경우 Low:0.5, typical:1, High:2, Solenoid Valve의 경우는 Low:0.5, typical:1.1, High:3 이다.

총 시험시간을 T, 합격판정 고장수를 c라 할 때 고장률이 λ_1 인 제품이 시험에 합격할 확률은 다음과 같다.

$$\Pr(\text{고장수} \leq c) = \sum_{r=0}^c (\lambda_1 T)^r \frac{e^{-\lambda_1 T}}{r!}$$

한편 요구신뢰도(고장률 λ_1 또는 평균수명 θ_1)에 미달되는 제품이 시험에서 합격될 확률을 δ 이내로 한정하는 시험방식, 즉 신뢰수준 $100(1-\delta)\%$ 를 보장하는 시험방식을 다음과 같이 결정하였다.

총 시험시간 T 동안 무고장(고장수 $c=0$) 일 때 합격시킬 경우,

$$\sum_{r=0}^0 (\lambda_1 T)^r \frac{e^{-\lambda_1 T}}{r!} = \delta \text{ 에서}$$

$$e^{-\lambda_1 \cdot T} = \delta \rightarrow -\lambda_1 T = \ln \delta$$

$$\text{따라서 } T = -\frac{1}{\lambda_1} \ln \delta \text{ 또는 } T = -\theta_1 \ln \delta$$

여기서 T : Total Time on Test (누적시험시간)

한편 공압밸브의 경우 신뢰수준을 90%로 하면, δ 는 0.1 (10%)가 된다.

$$90 [\%] = 100(1-\delta) [\%]$$

시험 샘플 크기가 n 일때의 작동수명(실제시험작동횟수) t를 구하면,

$$T = nt \rightarrow t = \frac{T}{n} \text{ 이다.}$$

따라서 공압밸브의 평균수명(θ_1)이 10,000,000회를 보장한다고 할 경우, 합격판정 기준을 상세히 기술하면 다음과 같다.

$$\theta_1 = 10,000,000 \text{ 회}$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{10,000,000} = \frac{0.01\%}{1,000}$$

신뢰수준을 90%로 하면, $\delta = 0.1$ 이므로 누적 시험시간 T는

$$\begin{aligned} T &= -\frac{1}{\lambda_1} \ln \beta \\ &= -10,000,000 \times \ln 0.1 \\ &= 23,025,850 \text{ 회} \end{aligned}$$

여기서 공압밸브의 시험수량이 10개 이므로, 작동수명(실제시험작동횟수)은 다음과 같다.

$$t = \frac{T}{n} = \frac{23,025,850}{10} = 2,302,585 \text{ 회}$$

3. 신뢰성평가 항목 및 시험방법

3.1 국제규격 분석

공압전자밸브의 평가기준 정립을 위해 세계각국 규격(ISO, MIL, NFPA, SAE, JIS, CETOP, DIN 등)을 Worldwide Standards Index를 활용하여 조사하였으며, 이에 본 평가 대상 밸브의 직접적인 참조규격을 확보하였으며, 주요규격은 아래와 같다.

① KS B 0120(공기압 용어), ② JIS B 8372(공기압시스템 통칙), ③ JIS B 8373(공기압용 감압밸브), ④ JIS B 8373(공기압용 2 Port 전자밸브), ⑤ JIS B 8374(공기압용 3 Port 전자밸브), ⑥ JIS B 8375(공기압용 4 Port · 5 Port 전자밸브) ⑦ JIS C 0704 (제어기기의 절연저항 및 내전압), ⑧ JIS C 1302(전기기기 절연의 종류), ⑨ ISO 6358(Flow-rate 특성결정 시험방법), ⑩ CETOP RP82P(공압방향 제어밸브의 동적응답특성)

3.2 평가항목 및 시험방법

가. 작동시험

밸브 출구포트 A를 폐쇄한 상태에서 시험대상 밸브 입구포트에 최고사용 압력을 가한다. 이때 솔레노이드에는 정격전압의 90%의 전압을 공급하고 20회 작동시킨다.

나. 유량 특성 시험

내용적 V의 레저버에 압력 5bar를 충전 시킨다. 단 용기의 내용적 V는, 공기를 대기로 방출시 소요되는 시간이 10초 이내가 되도록 선정한다.

충전된 내용적 V의 용기에 밸브를 직결하고, 밸브를 열어 공기를 대기로 방출한후 용기의 압력이 2bar로 하강하는 순간에 밸브를 닫아 공기의 방출을 막는다.

이때의 공기 방출 시간 t 및 용기의 잔존압력 P를 측정하여 다음 식에 의해 밸브의 유효 단면적을 산출한다. 단 용기의 초기압력 및 잔존압력은 그 압력계의 지시가 일정하게 되는 정상상태로 되기를 기다려 측정한다.

다. 동적 성능 시험

시험대상밸브의 입구포트 P에 압력 5bar를 가한 상태에서, 출구포트 A 및 B에 압력 검출장치를 설치하고 유로는 차단한다. 밸브의 작동부인 솔레노이드에 정격전압을 공급하여 밸브의 출구포트 A 또는 B 중에서 압력 검출장치에서 압력이 검출되기까지의 시간을 측정한다.

라. 온도 상승 시험

시험대상 밸브의 솔레노이드에 정격전압을 연속 통전하고, 솔레노이드에 설치된 표면온도센서의 출력값을 비교하여 온도상승이 거의 안정되었을 때, 저항법에 의해 온도 상승치를 측정한다. 이때 측정환경 주변온도의 상한은 40℃로 한다.

마. 절연 저항 시험

JIS C 1302에 규정된 500V의 절연 저항계를 사용하고, 코일 단자와 누출한 비충전 금속부간의 절연저항을 측정한다. 절연저항치는 5MΩ으로 한다.

바. 내전압시험

시험대상 밸브인 솔레노이드부의 코일(coil) 단자와 누출된 비충전 금속부문에, 50 Hz 정현파(正弦波)에 가까운 시험전압을 1분간 가한다. 시험전압을 가하고난 뒤, 밸브를 5회 작동시켜, 밸브 입출구단의 사용압력이 정상적으로 측정되는지를 확인한다.

사. 공기누설 시험

밸브의 각 작동 위치에 있어서, 서로 차단되어 있는 포트간의 공기 누설을 측정하는 시험으로서, 시험대상 밸브의 배관 내용적을 똑같이 유지되도록 한후 시험밸브 및 표준밸브를 연결한다. 양단의 밸브 입구 포트에 압력 5bar를 가하고 출구포트에서 차압센서를 설치하고, 입구포트와의 누설을 측정한다.

아. 내압시험

밸브의 출구포트A에 플러그를 설치한 뒤 밸브를 연 상태에서 포트에 최고 사용압력의 1.5배의 압력을 가하여, 1분간 유지한다. 밸브 각부의 변형 및 균열 등을 관찰한다. 변형 등의 이상이 없는 경우, 누설시험을 실시하여 규정된 기준치를 만족하여야 한다.

자. 내구시험

입구포트에 압력 5bar를 가하고, 밸브 구동 정격전압을 1초당 1회로 밸브의 절환 작동이 될 수 있도록 설정한다. 실 사용조건을 위해 포트에는 적당한 부하를 접속하거나 또는 폐쇄한 상태로 평가를 실시한다.

3.3 평가대상밸브의 샘플링

평가를 받고자 하는 대상 밸브의 제조공정 관리 및 단위소요 부품의 성적서를 분석하고, 신뢰성시험에 사용될 방향제어밸브는 가장 최근에 같은 조건하에서 생산된 20개를 샘플한 후 상기 언급한 작동시험을 실시하여 시험결과 불량품이 0% 일 때, 10개의 제품을 최종 샘플링하여 평가시험을 실시한다.

4. 시험장치 구성

방향제어용 공압전자밸브의 시험장치 구성은 9개의 평가항목을 모두 만족할 수 있도록 국제규격에 의거 장치를 구성하였으며, 대표적인 유출특성 및 동적응답특성 성능평가항목의 시험회로는 그림1과 2에 나타내었다.

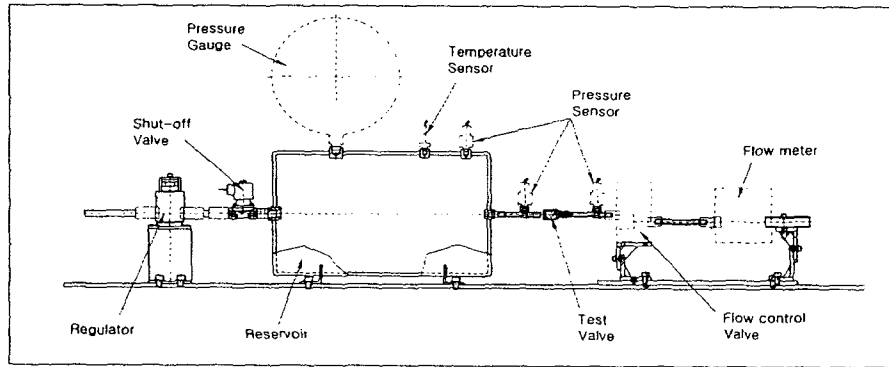


그림1. 유출특성 측정시험장치 회로

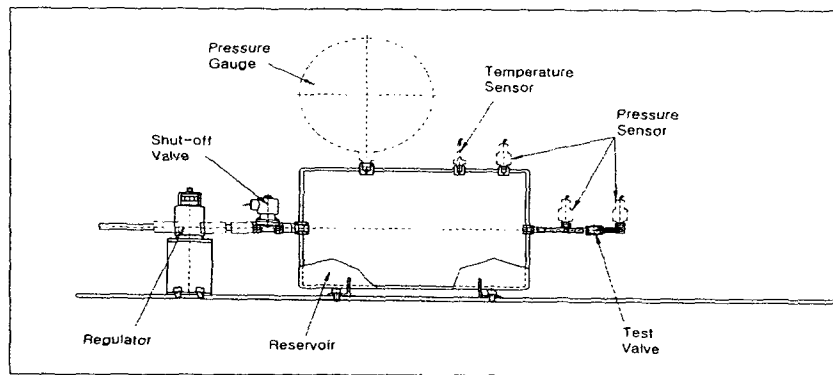


그림2. 동적응답특성 측정시험장치 회로

규격에 의거 최종완료된 평가장치의 측정 Mechanism과 제어반은 그림3과 같다.

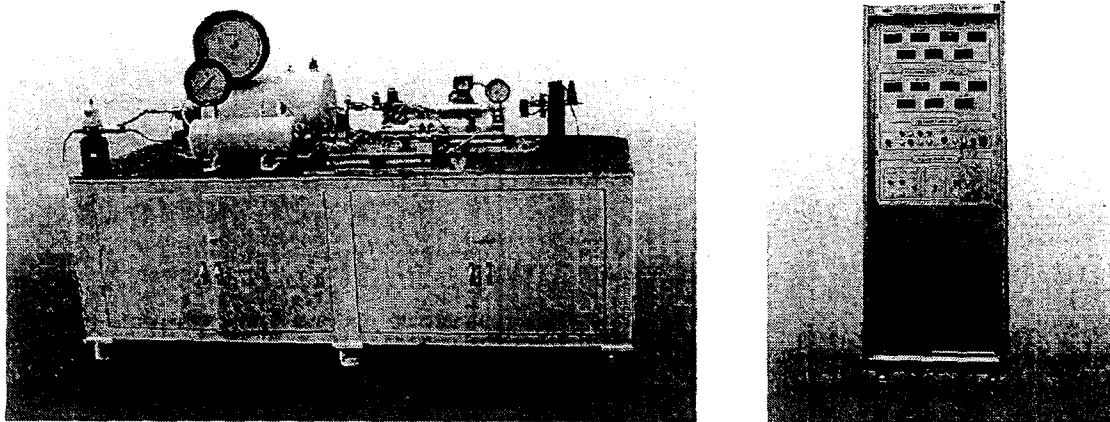


그림3 평가장치 측정 Mechanism과 제어반

5. 결과 및 고찰

평가대상밸브의 규격조사 및 신뢰성 평가관련 문헌 조사하고, 관련자료의 분석을 통하여, 각 평가항목에 대한 시험조건 결정과 평가절차 정립을 완료하였으며, 개발된 평가기준은 표1과 같다. 또한 밸브의 수명평가기준을 MIL-STD-690C 에 근거하여 정립하였으며, 표 2와 같다.

방향제어밸브의 수명(내구성) 시험은 3.2에서 언급한 시험항목 중 내구성시험을 실시하며, 솔레노이드 온도상승의 가혹조건을 형성을 위해 On Time 0.35sec, Wating Time 0.3sec, Off Time 0.35sec Cycle로 24시간 연속통전 시켜 시험을 행한다.

표 1. 공압 전자밸브의 평가기준

No.	평가 항목	시험 조건	평가 기준
1	작동시험	-공급압력 : 2 bar -작동횟수 : 20회 -공급전압 : 정격전압의 90% -유로조건 : 출구 Port 폐쇄	- 20회 작동동안 정상작동
2	유량특성 시험	-공급압력 : 5 bar -작동횟수 : 1회 -공급전압 : 정격전압을 공급하고 출구압력이 2bar될 때 전압차단	- M5 : S>3 - 1/8" : S>10 - 1/4" : S>20 - 3/8" : S>40 - 1/2" : S>60
3	동적성능시험	-공급압력 : 5 bar -공급전압 : 정격전압의 90% -유로조건 : 출구 Port 폐쇄	- M5 : S<0.04 sec - 1/8" : S<0.06 sec - 1/4" : S<0.06 sec - 3/8" : S<0.06 sec
4	온도상승 시험	-공급압력 : 5 bar -작동횟수 : 1회 -공급전압 : 정격전압을 연속통전	- A종 : 60℃ - B종 : 80℃ - F종 : 100℃ - H종 : 125℃
5	절연저항시험	-작동횟수 : 1회 -500V의 절연저항계 사용	- 절연저항치 5MΩ
6	내전압시험	-작동횟수 : 1회 -공급전압 : 1000V(DC전원일때) 1500V(AC전원일 때) -작동시간 : 1분	- 시험전압을 가한후 5회 작동시 정상작동
7	공기누설시험	-공급압력 : 5 bar -가압횟수 : 1회	- M5 : 10 cm ³ /min이하 - 1/8" : 10 cm ³ /min이하 - 1/4" : 10 cm ³ /min이하 - 3/8" : 10 cm ³ /min이하
8	내압시험	-공급압력 : 10 bar -작동횟수 : 1회 -공급전압 : 정격전압 -유로조건 : 출구 Port 폐쇄	- 밸브 각부의 변형 및 균열이 없어야 함.
9	수명 시험	-공급압력 : 5 bar -작동주기 : 1 sec -공급전압 : 정격전압	- M5 : 1,000 만회 - 1/8" : 1,000 만회 - 1/4" : 1,000 만회 - 3/8" : 1,000 만회

표 2. 공압전자밸브의 수명평가기준

수명분포	지수분포
판정기준	MIL-STD-690C
수명평가단위	회수
요구신뢰도	0.01%/1,000회
신뢰수준	90%
고장수(C) 적용기준	C = 0 (무고장시험의 경우)
시험제품 수 n (샘플 크기)	10
규격에서 요구하는 평균수명	10,000,000회
수명평가등급	3등급(A, A ⁺ , A ⁺⁺)으로 세분화하여 등급판정 (국내기술수준을 고려하여 평가등급을 분류함)

6. 결론

본 연구에서는 국내 공압 전자밸브의 신뢰성을 평가할 수 있는 기준 개발을 위해, 대상 밸브 평가와 관련된 각종 세계규격을 조사하고 신뢰성 평가항목 선정방법에 대해서 분석하여 9개 항목의 평가기준을 개발하였다. 또한 평가장치 제작으로 규격에 준한 공압밸브의 성능시험 및 신뢰성 평가를 할 수 있게 되었다.