

공기압 시스템의 누설 유량 계측법 Measurement Methods of Leak Flow-rate for Pneumatic System

지상원 · 장지성
S. W. Ji and J. S. Jang

1. 서 언

누설 시험은 시험체 내부와 외부의 압력차에 의해 시험체의 미세한 구멍이나 균열 또는 틈 등의 결함부위로 유체가 흘러들어가거나, 흘러나오는 성질을 이용하여 결함을 찾아내는 시험법이다. 누설시험으로 누설 여부, 누설부위와 누설량을 검출하여 시험체의 안정성을 확보 할 수 있으므로 각종 분야에서 널리 이용되고 있다.

특히, 공기압 부품 신뢰성평가시험의 국제표준인 ISO 19973시리즈가 2007년 확정, 공표되었으며, 밸브, 실린더, 레귤레이터의 신뢰성 판정을 위한 평가 지표로써 허용 누설량이 규정되어 있다. 그러나 상기의 규격에는 공기압 부품을 위한 누설시험방법에 대한 항목은 존재하지 않는다.

따라서 본 해설에서는 몇 가지 일반적인 누설계측법을 소개하고 공기압 시스템으로의 적용가능성에 대하여 고찰해 보고자 한다.

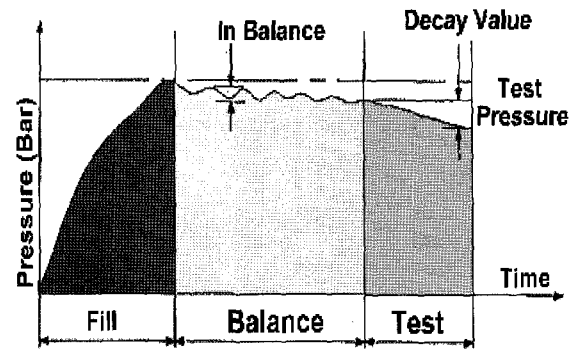
2. 기존 누설 계측법

공기압 시스템에서는 공기압 실린더 밸브, 압력조정기, 필터, 관로, 피팅 등의 거의 모든 부품에 누설 계측이 요구된다. 이러한 공기압 부품들은 시장 출하 전 전수기능검사, 자동화 라인 등에서의 공기압 부품 교체를 위한 고장판별검사, 수명평가를 위한 신뢰성 시험시의 성능저하검사 등에 누설계측이 반복적으로 시행되고 있으므로, 저비용, 고효율의 누설계측법이 필요하다. 따라서, 여러 누설계측법 중에서 공기압 시스템의 요구조건에 부합하는 누설계측법을 적용하는 것이 바람직하다.

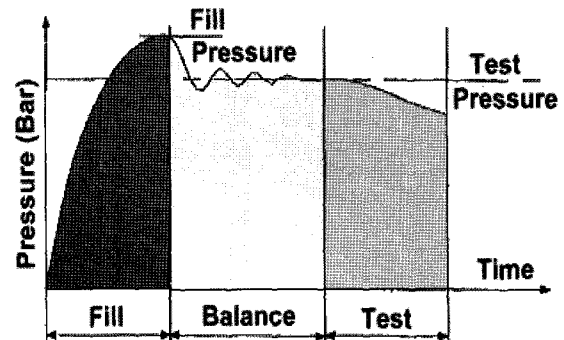
일반적으로 사용되는 누설시험법은 누설측정을 위해 공기를 사용하는 기포방출법(Bubble Test), 초음파법(Ultrasonics), 층류측정법(Laminar Flow), 질량유량법, 압력변화법(Pressure Decay), 차압법(Pressure Differential) 등과 비공기 시험법인 추적기체법 등이 있다. 공기시험법 중에서 기포방출법은

누설여부를 확인할 수는 있으나 누설량의 정량적 해석이 어렵고 부식이 발생할 수 있으므로 공기압 시스템에 적용하기는 곤란하다.

공기시험법을 이용한 누설측정은 Fig. 1과 같은 3 단계 과정을 거치게 된다.



a) Common fill pressurized



b) Overfill fill pressurized

Fig. 1 Three basic phases

Fig. 1에서 fill phase는 시험체가 시험압력으로 가압되는 단계이고, balance phase는 가압시 발생하는 온도효과에 의해 압력이 불안정한 상태가 나타나므로 이를 안정화키는 단계이며 상기의 두 과정을 거친 후, 실제 압력을 측정하여 누설을 계측하는 test phase에 도달하게 된다. 따라서 누설측정의 정확성과 신속성을 향상시키기 위해서는 balance phase를 제거하거나 최소화시켜야만 한다. 그러나

시험체 내부 공기의 상태변화는 폴리트로픽변화로써 온도효과가 반드시 발생하므로 balance phase를 완전히 제거하기는 곤란하다. 또한, 온도효과는 시험체의 온도, 주위온도 및 시험체 내부의 압축공기 온도에 따라 달라지며 시험압력 및 누설유량에 의해서도 영향을 받으므로 이에 따른 열역학적 보상이 반드시 필요하다.

공기시험법의 경우 누설시험 시간은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{Q \times t \times P_{atm}}{V \times 60} \quad (1)$$

식(1)에서 ΔP 는 누설에 의한 압력변화[mmH₂O], Q 는 누설유량[cm³/min], P_{atm} 은 대기압(10,332) [mmH₂O], V 는 시험체적[cm³]을 나타낸다.

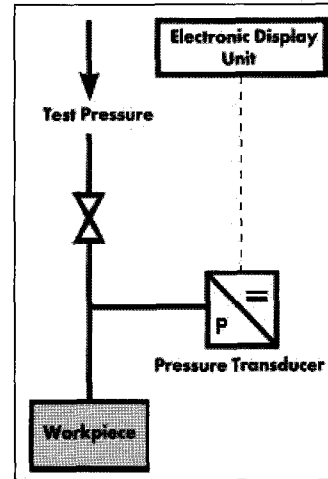
2.1 압력변화법

Fig. 2에서 나타낸 압력변화법은 시험대상품을 가압한 후 누설에 의해 발생하는 압력변화로 누설을 계측하는 방법이다.

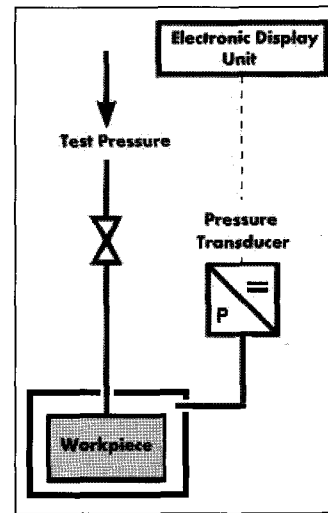
Fig. 2의 (a)는 가압된 시험대상품 내부의 압력변화를 계측하는 방법이고 (b)는 시험대상품을 둘러싼 캡슐의 압력변화를 계측하는 방법이다. Fig. 2의 (a)와 같은 계측법은 캡슐이 필요하지 않으며 시험대상품의 누설에 의한 압력변화를 직접적으로 계측할 수 있다. 그러나 시험압력이 고압인 경우에는 압력센서의 측정감도가 저하되므로 시험시간이 길어지는 단점이 있다. Fig. 2의 (b)와 같은 계측법은 시험대상품을 캡슐로 밀봉한 후, 시험대상품에서 캡슐로 흘러나오는 누설유량에 의해 발생하는 캡슐내부의 압력변화를 계측하는 방식으로 시험대상품 내의 압력이 고압이라 할지라도 캡슐 내부의 압력은 미압상태이므로 저압용 압력센서를 사용하여 센서의 측정감도를 향상시킬 수 있다. 그러나 상기의 방법은 시험대상품의 체적에 따라 캡슐을 별도로 제작하여야 하고 캡슐에서 외부로의 누설을 차단하여야 하므로 누설시험의 시간과 비용이 증가하는 단점이 있다.

한편, 공기압 시스템의 부품은 사이즈가 다양하고 생산현장에서는 시장 출시 전에 불량을 판별하기 위한 전수검사를 행하여야 하므로 허용누설량이 비교적 큰 밸브류와 실린더류는 Fig. 2의 b)보다는 a)에 나타낸 직접법의 적용이 타당하며 극미량의 누설량을 허용하는 압력조정기, 필터 및 피팅류의 누

설시험은 b)에 나타낸 캡슐법이 적합할 것으로 판단되어진다. 그러나 전술하였다시피 압력변화법은 공기시험법의 일종이므로 압력변화에 따른 온도보상 대책이 반드시 필요하다.



(a) Direct method



(b) Capsule method

Fig. 2 Pressure decay method

2.2 차압법

차압법은 누설이 없는 기준체적과 시험대상품을 동일압력으로 가압한 후 시험대상품에서 발생한 누설유량에 의해 발생하는 시험대상품의 압력변화량과 기준체적내의 기준압력과 압력차이를 이용하여 누설을 계측하는 방법이다. 차압법에 사용되는 차압센서는 미소한 압력차를 우수한 측정감도로 측정할 수 있고 안정화시간이 단축되므로 누설측정의 정확성을 향상시킬 수 있으며 시험압력이 미압인 경우에도 적용이 가능하다. 그러나 기준체적을 사용해야 하므로 회로가 복잡해지며 기준체적과 시

협대상품의 체적차가 클수록 열전달량의 차이도 커지므로 측정오차가 발생 할 수 있으며 기준체적과 시험대상품의 압력차이가 커지면 차압센서가 파손되므로 비교적 큰 누설을 측정하여야 하는 경우에는 이를 적용하기가 곤란하다. 또한 기준체적에서 누설이 발생하면 측정의 신뢰성이 저하되므로 정기적인 검사가 필요하다.

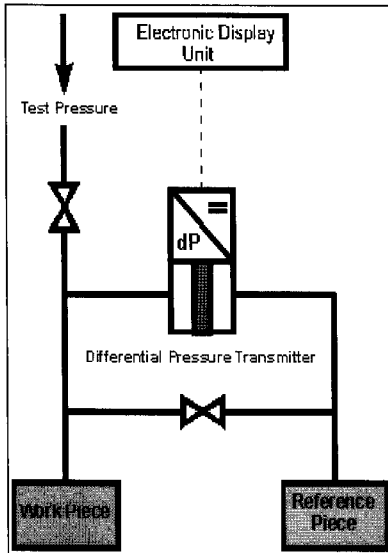


Fig. 3 Pressure differential method

2.3 총류측정법 및 질량유량법

총류측정법은 시험체에서 발생한 누설유량이 Fig. 4와 같이 총류식 유량계를 통과하게 하여 누설의 체적유량을 측정하는 방식이고 Fig. 5에 나타낸 질량유량법은 누설유량이 질량유량계를 통과하게 하여 누설의 질량유량을 측정하는 방식이다.

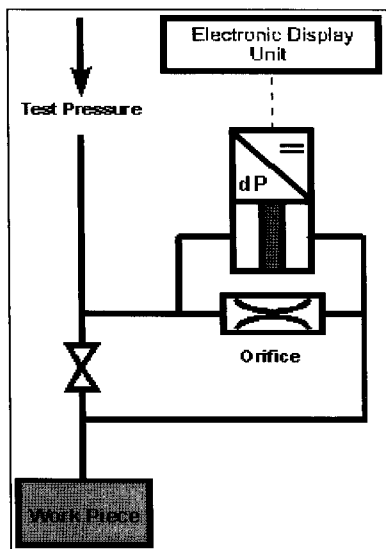


Fig. 4 Laminar flow method

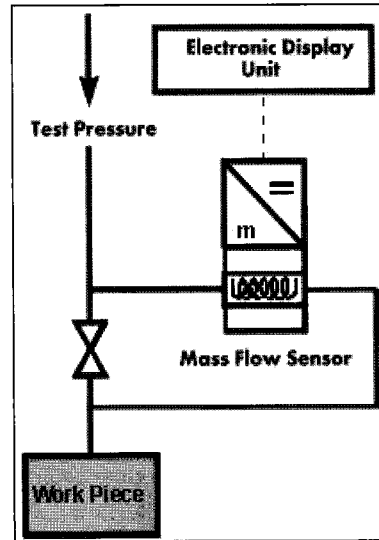


Fig. 5 Mass flow method

상기의 두 측정법은 압력변화로 누설을 추정하는 방식이 아니라 실제 누설유량을 직접적으로 측정할 수 있으나 총류식은 상대적으로 안정화 시간이 오래 걸리고 총류를 발생시키기 위해 국부적인 저항이 증가하여 압력손실이 발생하므로 전 측정영역에서 측정의 선형성이 보장되지 않는다. 또한, 질량식 계측법은 총류식에 비해 선형성은 우수하나 비교적 긴 안정화 시간이 요구되고 매우 미소한 누설의 측정은 불가능하다.

2.4 추적기체법

추적기체법은 크게 sniffer법과 tracer법으로 나뉘지며 전자는 시험대상품에 헬륨을 충전한 후, 누설에 의해 흘러나오는 헬륨을 진공프로브(probe)로 포집하여 질량분석기(mass spectrometer)에서 누설유량을 측정하는 방식이고, 후자는 시험대상품을 진공배기하고 헬륨이 시험대상품으로 흘러 들어가는 누설유량을 계측하는 방식이다.

상기의 측정방식은 극미량의 누설유량을 매우 정밀하게 측정할 수 있고 온도에 대한 영향을 받지 않으므로 온도보상 대책이 필요하지 않다. 또한 별도의 장치 없이 누설 부위를 찾아 낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 추적기체법은 일반적으로 긴 시험시간이 요구되며 시험대상품의 모든 부위를 측정하기에는 현실적으로 어려움이 따르는 방법이다. 또한, 비용적인 측면에서 시험기체인 헬륨과 측정회로 구축 비용이 매우 높다.

따라서, 공기압 시스템의 전수검사에 상기의 시험법을 적용하기에는 현실적으로 시간적 비용적 문제

가 있으므로, 공기압 부품제조업체에서는 사용하기가 곤란한 방법이라고 판단되어 진다.

3. 공기시험법의 문제점

공기압 시스템의 누설시험으로 주로 사용되는 기존 공기시험법의 일반적 문제점은 다음과 같다.

3.1 캘리브레이션

일반적으로 공기시험법에 사용되는 누설계측기는 측정성능 및 신뢰도를 유지하기 위해 Fig. 6에 과 같은 정기적인 캘리브레이션 과정이 요구된다. 이를 위해 미리 정의된 누설발생밸브(master valve)를 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 캘리브레이션은 ISO 17025를 참고할 수 있다.

3.2 온도효과보상

공기시험법에 있어 가장 중요한 고려사항은 온도보상 문제이다. 누설측정단계에서 발생하는 온도변화는 유체에 가해지는 마찰력에 의하여 발생되거나 공기와 시험대상품의 온도차이, 혹은 주위온도와 온도차이에 의해 나타나는 현상이다.

공기가 단열압축과정을 거치면 공기의 온도가 상승하게 되고, 역으로 단열팽창과정을 거치면 공기의 온도가 하강하게 되는데 전자의 경우에는 실제 누설유량보다 계측된 누설유량이 커지게 되며 이때

과계측된 누설량을 “simulating” 누설이라 한다. 또한, 역으로 후자의 경우에는 실제 누설유량과 비교하여 계측된 누설유량이 작아지게 되므로 이러한 누설오차량을 “masking” 누설이라 한다.

일반적으로 상기의 누설오차는 시험체적, 주위온도등의 열전달 조건에 따라 상이하나 시험체적이 1[liter], 초기온도가 20[°C], 시험압력1[bar], 시험시간 10[s]이고, 누설계측 도중에 온도가 1[°C] 변화하였다면 simulating 누설오차가 약 3.7 [cm³/min] 가량 발생하므로 이러한 오차를 무시하였을 경우 심각한 오류를 범할 수 있다. 따라서 온도보상대책은 반드시 필요하며, 이를 위해 계측기내에 온도보상회로를 삽입하여야 한다.

3.3 공기압 시스템의 적용

ISO 10099(2001)와 ISO 19973(2007) 시리즈에 따르면 밸브, 실린더, 압력조정기의 누설측정부위와 허용누설량이 종류 및 사이즈별로 규정되어 있으며 특히 실린더의 누설측정시험에서는 0.63 [bar]와 1.5[bar]의 압력에서 동시에 누설을 측정하도록 규정되어 있다.

Table 1에 ISO에 규정된 각 부품의 허용누설량, 즉 최소 누설측정범위를 나타내었다. Table 1에서 나타낸 누설 측정범위는 각 공기압 부품별로 최소 사이즈의 누설허용치와 최대사이즈의 누설허용치를 나타내었다.

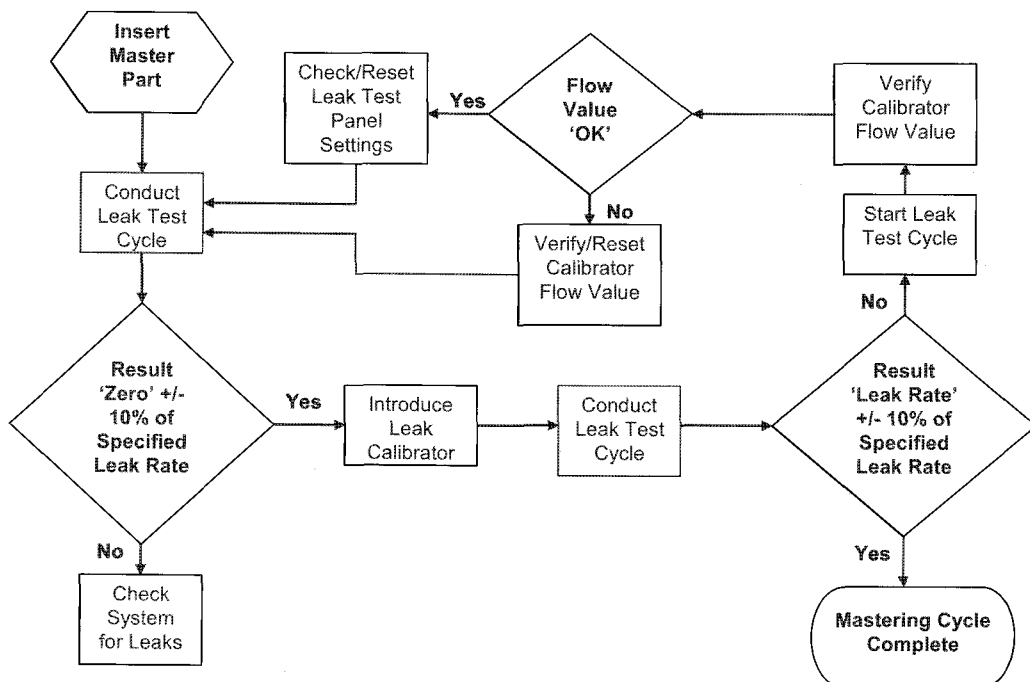


Fig. 6 Flow Diagram for Fixture Verification

따라서 실제 누설시험에서는 누설측정기의 측정 가능범위가 규정된 누설허용치보다 넓어야 하는 점을 고려한다면, 공기압시스템의 누설시험에 기존시험법을 일괄적으로 단일 적용하기는 곤란할 것으로 판단된다.

Table 1 Threshold leak of ISO

Components	Threshold leak [cm ³ /min]
Valves	10~833
Cylinders	10~10500
Regulators	5~625

Fig. 7에 기존 시험법의 누설측정 가능범위와 ISO에서 요구되는 공기압 부품의 누설허용치를 나타내었다.

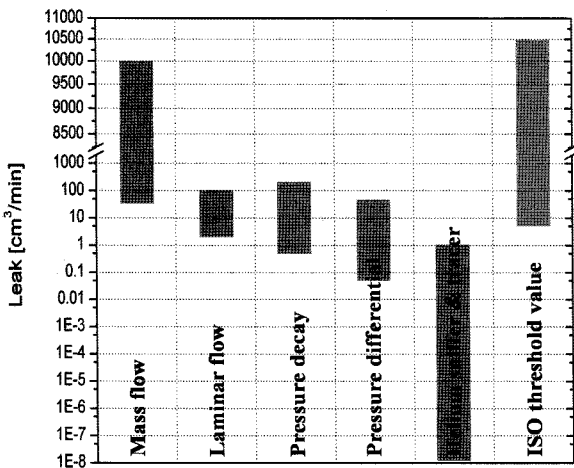


Fig. 7 Leak measurement ranges

Fig. 7에서 알 수 있듯이 ISO 누설허용치에 해당하는 누설량을 기존의 단일측정법으로는 측정이 곤란하며, 누설측정을 위한 시간과 비용을 고려한다면 선택의 폭이 더욱 좁아 질 수밖에 없다.

4. 결 언

본 해설에서는 ISO에 규정된 공기압 부품의 누설 시험을 위한 시험법들과 적용한계를 기술하였다. 공기압 부품의 누설시험은 제조업체에서의 출하 전 불량검사와 신뢰성평가를 위한 목적으로 사용되고 있으므로 저비용 고효율의 시험법이 요구된다. 또한, 공기압 부품의 누설시험은 시험압력범위와 유량

측정 영역이 비교적 넓으므로 이에 상응하는 시험법이 필요하다.

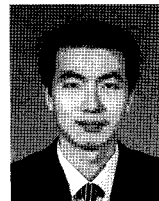
그러나, 공기압 시스템에 기존 누설시험법들을 채택하려면 단일 시험법만으로는 상기의 사항을 모두 만족시키기 어려우므로 측정범위와 시험압력에 따라 적합한 시험법을 적용하는 것이 중요하다.

따라서, 본 해설에서 소개된 각종 누설 시험법의 특성을 참고한다면 공기압 부품의 누설시험을 수행함에 있어 큰 어려움 없이 신뢰성 있는 누설 시험을 할 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

- 1) ISO 10099, "Pneumatic fluid power - Cylinders - Final examination and acceptance criteria", 2001.
- 2) ISO 19973, "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing", 2007.
- 3) JW Froehlich Ltd., 기술자료.

[저자 소개]



지상원 (책임저자)

E-mail: realpneumatic@gmail.com

Tel: 051-620-1583

1977년 4월 5일생(음)

2004년 부경대학교 기계공학부 기계시스템 전공 학사 과정 졸업, 2006년 부경대학교 제어기계공학과 석사 과정 졸업, 2007년 현재 부경대학교 제어기계공학과 박사 과정 재학, 2004년~2007년 한국기계연구원 유공압팀 근무, 유공압시스템학회, 한국동력기계공학회, 대한기계학회 등의 회원

[저자 소개]



장지성

E-mail: jangjis@pknu.ac.kr

Tel: 051-620-1583

1968년 1월 14일생(음)

1990년 부경대학교 기관공학과 학사 과정 졸업, 1994년 부경대학교 기관공학과 석사 과정 졸업, 1998년 동경공업대학 제어공학과 박사 과정 졸업, 1998년~1999년 (株)京一セラ(Kyocera) FC 개발부 근무, 1999년 부경대학교 제어기계공학과 전임강사, 2005년 동 대학 기계공학부 부교수, 유공압시스템학회, 대한기계학회, 일본유공압학회, SICE 등의 회원