

공압실린더의 누설유량 계측방법에 관한 연구

A Study on the Measurement Method of Leakage Flow-rate for Pneumatic Cylinder

장지성 · 지상원 · 정지현 · 강보식

J. S. Jang, S. W. Ji, J. H. Jeong and B. S. Kang

Key Words : Pneumatic Apparatus(공기압 구동장치), Leakage Flow-rate(누설 유량), Isothermal Chamber (등온화 용기), Reliability Test(신뢰성 시험)

Abstract: In this study, a measurement method of leakage flow-rate for pneumatic driving apparatus is proposed. The existing measurement methods of leakage flow-rate of air need disassemble the test component. Therefore, there is no effective method to measure the leakage flow-rate while operating pneumatic driving apparatus. In this study, the leakage flow-rate is measure from the pressure change in an isothermal chamber that can realize isothermal conditions by stuffing steel wool into it. Therefore, wide range of flow-rate could be measured only from the pressure response and the leakage flow-rate can be measured during operating pneumatic driving apparatus. The effectiveness of the proposed method is proved by experimental results.

1. 서 론

제어기술의 발달로 공기압 시스템의 적용범위가 점차 확대되고 고기능화 되어감에 따라 공기압 부품의 신뢰성 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. 공기압 시스템의 핵심 요소 부품인 공기압 실린더는 압축공기를 작동유체로 사용하는 공기압 구동장치로써, 피스톤의 왕복 운동으로 피스톤과 로드와 장착된 씰의 마모가 진행되어 누설이 발생하고, 이로 인한 누설은 실린더의 성능을 저하시키고 수명을 감소시키는 주요한 원인이 되고 있다.

그러나 압축성 유체의 특성상 유량을 직접적으로 정확히 계측하기는 어려우며 특히 누설 유량과 같이 극히 미소한 유량은 JIS표준 계측방법⁽¹⁾과 ISO 표준 계측방법⁽²⁾등으로 측정하기가 불가능하다. 그러므로 버블 테스트(Bubble Test)와 같은 간접적인 방법을 사용하여 누설 여부를 확인하거나 고가의 누설 측정용 디지털 질량 유량계를 이용하여 누설 유량을 측정하여 왔다.

하지만 버블 테스트는 물에 젖어서는 안 될 부위가 있는 경우에는 사용이 어렵고 누설 유량의 정량적인 해석이 곤란하므로 일반적으로 누설 측정용 디지털 질량 유량계를 사용하여 실린더의 누설을 측정하고 있다. 그러나 이와 같은 방식은 수명 시험 장치에서 장착된 실린더를 분리하여 누설을 측정해야 하므로 실린더의 탈·부착시에 피스톤 씰과 실린더 벽면의 접촉부위가 변경될 가능성이 존재하고 이로 인해 수명시험에 의해 발생하는 누설 유량의 평가가 정확히 이루어지기 어렵다.

본 논문에서는 용기내부의 온도변화를 등온으로 유지시키는 등온화용기⁽³⁾ 내부의 압력변화를 유량으로 환산하는 방법을 이용하여 공기압 실린더를 수명 시험 장치에서 분리하지 않고 누설 유량을 용이하게 계측할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 등온화용기

본 실험에서 사용한 용기는 금속면을 용기 내부에 가득 채워서 열전달 면적과 열전달 계수를 크게 하여 압축공기를 용기 내로 공급하는 경우 및 용기 내의 압축공기를 방출하는 경우에 공기의 온도변화를 등온으로 유지할 수 있는 용기이다. 일반 압력용기 및 등온화용기 내부에 압축공기를 공급한 경우의 실험 결과를 Fig. 1에 나타낸다.

접수일 : 2006년 1월 31일

장지성(책임저자) : 부경대학교 기계공학부

E-mail : jangjs@pknu.ac.kr, Tel : 051-620-1583

지상원, 정지현 : 부경대학교 제어기계공학과

강보식 : 한국기계연구원

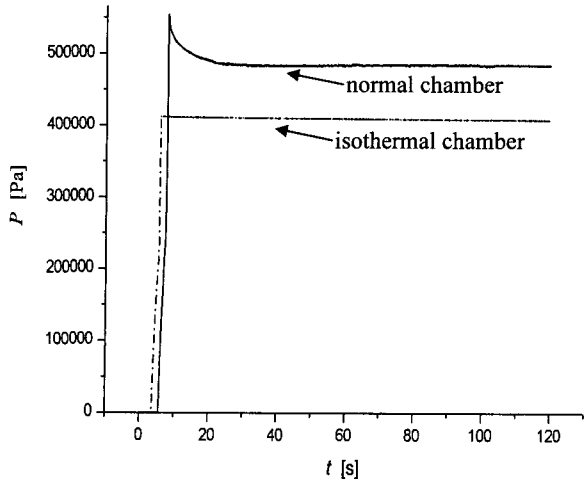


Fig. 1 Pressure change after stopping air charge in a normal chamber and an isothermal chamber

Fig. 1에서 실선은 직경 100[mm], 높이 100[mm]인 원통형용기내에 금속면 45[g]을 채워 넣은 후 용기 내부에 압축공기를 임의의 시간 동안 공급하여 임의의 압력을 인가하고, 압축공기의 출입을 차단한 경우의 실험 결과를 나타낸다. Fig. 1의 점선은 직경 100[mm], 높이 200[mm]인 원통형용기에 금속면을 채워 넣지 않고 내부를 비워둔 상태에서 위와 동일한 방법으로 실험한 결과이다. Fig. 1에서 횡축은 시간을 나타내고, 종축은 용기내의 압력을 나타낸다. 금속면을 넣지 않은 일반 압력용기의 경우에는 압축공기의 출입을 차단한 직후부터 압축공기의 온도 강하에 의하여 용기내의 압력이 변하지만, 금속면을 채운 등온화용기의 경우에는 공기의 출입을 차단한 직후에도 압력이 거의 변하지 않으므로 용기 내부의 온도변화가 억제되고 있는 것으로 해석 할 수 있다.

3. 누설유량 측정의 원리

공기의 유량과 압력 및 온도 변화와의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G = \frac{1}{RT} \left(V \frac{dP}{dt} - MR \frac{dT}{dt} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 G 는 공기의 질량유량[kg/s], R 은 기체상수[J/kg · K], P 는 용기내부 압력[Pa], M 은 용기 내부 공기의 질량[kg], T 는 용기내부의 공기온도[K]를 나타낸다.

등온 상태에서는 식 (1)의 우변 제2항을 무시 할 수 있으므로 유량은 압력변화의 함수로써 다음과 같이 표현된다.

$$G = \frac{V}{RT_a} \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

식 (2)에서 T_a 는 실험실내의 공기 온도[K]를 의미하므로 용기의 체적과 측정실의 온도를 알고 있다고 가정하면 용기내의 압력변화에 의하여 공기의 질량유량을 측정할 수 있음을 알 수 있다. 또한 압력의 변화는 고주파수 영역까지 용이하게 측정할 수 있으므로 식 (2)를 사용하면 극미량의 누설유량을 포함한 비교적 넓은 영역의 질량유량 측정이 가능하다.

본 논문에서의 유량측정 결과는 측정된 질량유량을 0[°C], 1기압하의 체적유량으로 환산한 결과를 나타낸다.

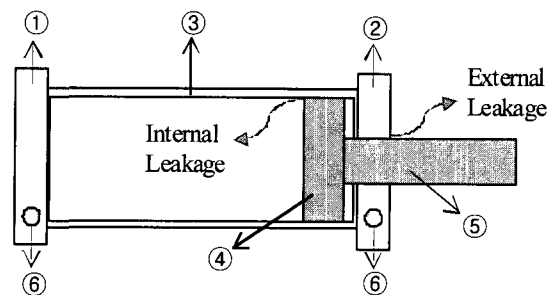
4. 실험 및 고찰

4.1 누설유량 측정 방법

Fig. 2에 나타난 공기압 실린더는 공장 자동화라인에서 주로 사용되어지는 왕복동 실린더로써, 실린더 내부에 공기압을 공급하거나 방출하여 반복적인 왕복직선운동을 수행한다.

이로 인해 실린더 구동시 접촉부의 마모가 진행되므로, 이와 같은 실린더에서 발생하는 주요누설은 피스톤 씬과 가이드 튜브사이의 틈새에서 발생하는 내부누설과 로드 씬과 로드사이의 틈새에서 발생하는 외부누설로 분류 할 수 있다.

공기압 부품의 신뢰성 국제규격 제정을 위해 진행 중인 ISO/FDIS 19973-3⁴⁾에 따르면 실린더의 고장 판정을 위한 주요 항목으로써 누설 유량의 허용치를 규정하고 누설을 측정할 부위로 실린더의 양쪽 끝단을 지정하고 있으나 누설 측정 방법에 대한 자세한 규정은 존재하지 않는다.



①end cap ②rod cap ③cylinder wall

④piston head ⑤piston rod ⑥inlet or outlet port

Fig. 2 Typical leakage flow-rate of pneumatic cylinder

현재 보편적으로 사용하는 방식인 누설 측정용 디지털 질량 유량계로 실린더 양 끝단의 누설을 측정하면 피스톤 씌에서 발생하는 내부누설 유량은 비교적 용이하게 계측할 수 있으나 로드 씌에서 발생하는 외부누설유량을 측정하기가 어렵고 실린더의 실질적 총 누설유량을 추정하기가 곤란하므로 고장모드 분석을 통한 신뢰성 개선이 용이하지 않다.

본 논문에서는 Fig. 3과 같이 수명시험 장치에 등온화 용기를 이용한 누설유량 계측장치를 부착하여 내부누설유량 및 외부누설유량을 정량적으로 계측하는 법을 제안하고자 한다.

실린더의 피스톤 씌에서 발생하는 내부 누설 유량의 계측방법은 다음과 같다.

- 1) 제어밸브의 상류측 공급압력을 0.6[MPa]로 설정하고 하류측 등온화용기내의 압력을 대기압으로 설정한다.
- 2) 제어밸브를 통해 등온화용기와 실린더실에 설정 압력 0.6[MPa]을 인가하여 피스톤 헤드를 실린더의 로드 캡 방향으로 전진시킨다.
- 3) 절환밸브를 사용하여 등온화용기와 제어밸브 사이의 압축공기 유동을 차단한다.
- 4) 등온화용기내의 압력변화를 계측한 후 식(2) 이용하여 내부 누설 유량을 구한다.

실린더의 피스톤 씌와 로드 씌에서 발생하는 총누설 유량의 계측방법은 다음과 같다.

- 1) 제어밸브의 상류측 공급압력을 0.6[MPa]로 설정하고 하류측 등온화용기내의 압력을 대기압으로 설정한다.

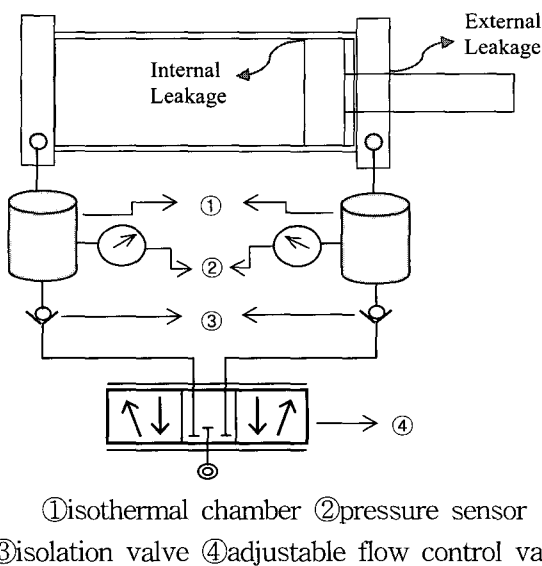


Fig. 3 Measurement apparatus of leakage flow-rate using isothermal chamber

- 2) 제어밸브를 통해 등온화용기와 실린더실에 설정 압력 0.6[MPa]을 인가하여 피스톤 헤드를 실린더의 엔드 캡 방향으로 후진시킨다.
- 3) 절환밸브를 사용하여 등온화용기와 제어밸브 사이의 압축공기 유동을 차단한다.
- 4) 등온화용기내의 압력변화를 계측한 후 식 (2)를 이용하여 실린더의 총 누설 유량을 구한다.

실린더의 로드 씌에서 발생하는 외부 누설 유량은 계측된 내부 누설 유량과 총 누설 유량을 이용하여 추정한다.

본 실험에서 사용한 등온화용기의 체적은 $7.85 \times 10^{-4} [m^3]$ 이고, 내부에 스테인레스 스틸 430으로 구성된 금속면 0.045[kg]을 충전하였다. 공기압 관로는 직경 6.5[mm]의 나일론 튜브를 사용하였다. 용기 내부 압력은 스트레인 게이지 타입의 압력변환기를 사용하여 측정하였고, 샘플링 시간은 10[ms]로 설정하여 120[s]동안 실험하였다. 실험에 사용된 공기압 실린더는 10[kg]의 수직부하를 인가하여 1×10^6 [cycle] 이상 구동시킨 직경 50[mm], 행정길이 300[mm]의 편로드 복동형 공기압 실린더이다.

4.2 측정결과와 고찰

Fig. 4와 Fig. 5는 등온화용기를 각각 엔드캡 쪽과 로드캡 쪽에 연결하여 용기내부의 압력응답을 계측한 결과이다.

누설유량이 극미량일 경우 Fig. 4와 같이 누설 유량에 의한 압력변화가 크지 않으므로 노이즈의 영향을 많이 받게 되지만 총 실험시간 동안 압력이 누설 유량에 의해 거의 선형적으로 감소하고 있으며, Fig. 4에 비해 Fig. 5의 압력강하가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

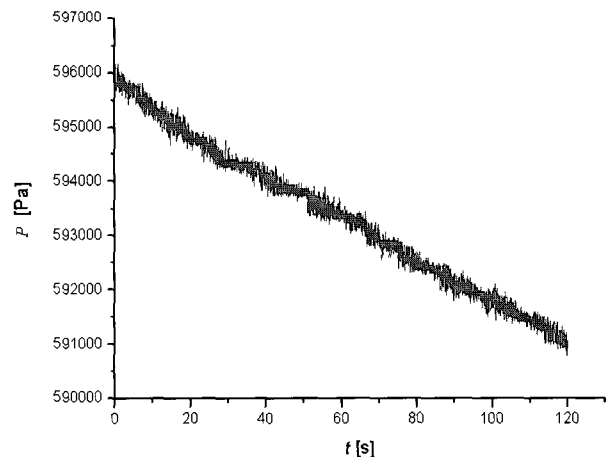


Fig. 4 Pressure response of end cap

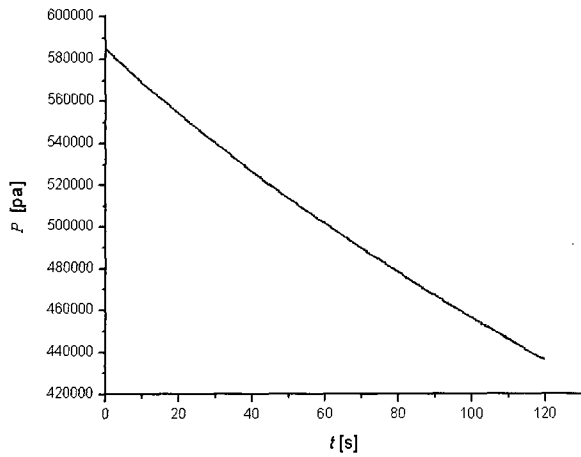


Fig. 5 Pressure response of rod cap

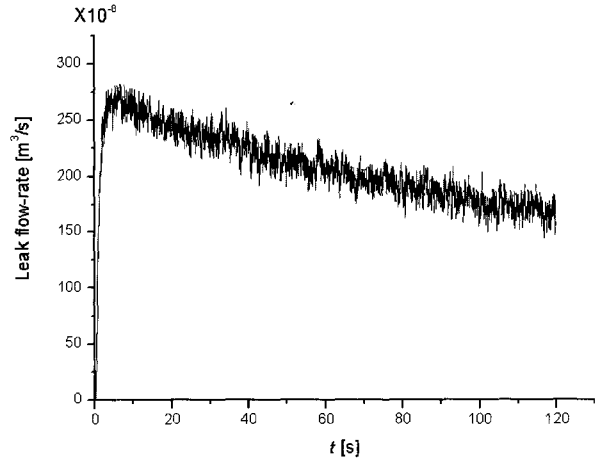


Fig. 7 Leakage Flow-rate in rod cap

식 (2)를 이용하여 Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸 압력 응답을 엔드 캡과 로드 캡의 누설유량으로 환산한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 6과 Fig. 7로부터 엔드 캡에서 측정되어진 평균 내부누설 유량은 약 $5.0 \times 10^{-8} [\text{m}^3/\text{s}] (\approx 0.003 [\ell/\text{min}])$ 이고, 로드 캡에서 측정되어진 평균 총 누설 유량은 약 $2.33 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}] (\approx 0.14 [\ell/\text{min}])$ 이므로 평균 외부 누설 유량은 약 $2.28 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}] (\approx 0.137 [\ell/\text{min}])$ 로 추정할 수 있다.

JIS의 공기압 실린더 누설규정⁵⁾에서는 본 실험에서 사용한 직경 50[mm]인 편로드 왕복동 실린더의 내부 누설을 $2.0 \times 10^{-7} [\text{m}^3/\text{s}] (\approx 0.012 [\ell/\text{min}])$, 외부누설을 $1.33 \times 10^{-7} [\text{m}^3/\text{s}] (\approx 0.008 [\ell/\text{min}])$ 까지 허용하고 있고, ISO의 공기압실린더 누설 규정⁶⁾에서는 내부, 외부 누설을 구분하지 않고 실린더의 총 누설 유량을 $3.33 \times 10^{-7} [\text{m}^3/\text{s}] (\approx 0.02 [\ell/\text{min}])$ 까지 허용하고 있으므로 본 실험에 사용된 실린더는 JIS 및 ISO의 누설 허용치를 모두 초과하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 총 실험 시간 동안 누설에 따른 용기 내의 압력 변화량이 미소하여 시간에 따른 누설유량의 변화가 크지 않으나, Fig. 7과 같이 누설유량이 비교적 큰 경우에는 누설유량에 의해 용기내의 압력이 정격압력 이하로 감소하게 되고, 감소된 압력에 의해 유량 역시 감소하게 되므로 누설유량을 정확히 평가하기 위해서는 압력을 기준으로 표현하는 것이 타당하다고 판단된다.

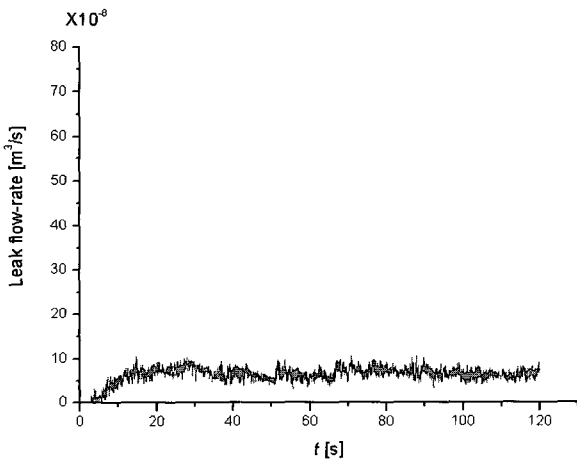


Fig. 6 Leakage Flow-rate in end cap

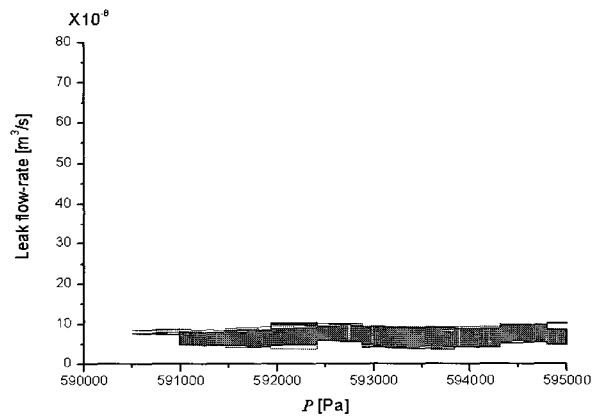


Fig. 8 Leakage Flow-rate in end cap

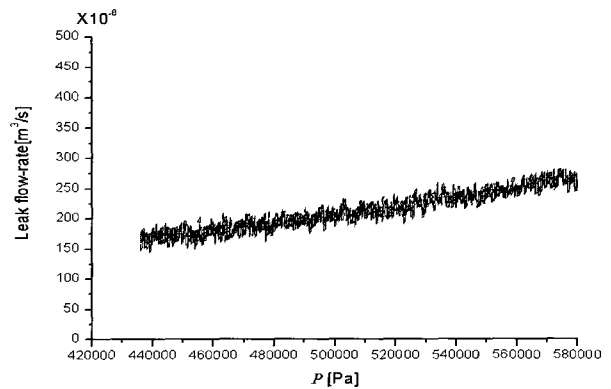


Fig. 9 Leakage Flow-rate in rod cap

Fig. 8과 Fig. 9는 엔드 캡에서 측정되어진 내부누설 유량 및 로드 캡에서 측정되어진 총 누설 유량을 압력을 기준으로 나타낸 결과이다.

Fig. 8로부터 누설 유량의 최대치와 최소치의 차이가 약 $5.0 \times 10^{-8} [\text{m}^3/\text{s}] (=0.003 [\text{l}/\text{min}])$ 임을 알 수 있다. 이는 본 실험에서 사용된 압력센서의 부정확성에 의한 오차이므로, 보다 정밀한 압력센서를 사용하면 이러한 오차를 크게 줄일 수 있어 실용적 사용이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 누설유량이 비교적 큰 경우이므로 누설유량에 따라서 용기내부의 압력이 변화하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 누설에 의하여 용기내부의 압력이 변화할 수 있는 한계를 사전에 결정한 후에 압력을 계측한다면 특정시간 이후의 압력을 계측하는 것만으로도 계측 대상기기의 누설 특성이 기준을 만족하는지 여부를 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 용기내부의 압력변화를 이용하여 대표적인 공기압 구동장치인 공기압 실린더의 누설 유량을 계측할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 누설유량 계측방법은 수명시험장치에서 장착된 실린더를 분리하지 않고 실린더와 연결된 용기를 가압하여 누설에 의해 발생하는 용기내의 압력변화를 유량으로 환산해서 누설을 계측하는 방법이다. 제안한 방법을 이용하여 누설 유량을 계측하면 누설 측정을 위하여 수명시험장치에서 실린더를 탈·부착할 필요가 없으므로 수명시험 도

중에 수명시험에 의해 발생하는 누설 유량을 정량적으로 평가할 수 있으며, 이를 바탕으로 공기압 실린더의 고장 분석을 통한 신뢰성 개선이 용이해진다. 또한 본 논문에서 제안한 누설유량 계측방법은 용기와 압력센서 이외의 누설측정을 위한 별도의 추가장치 없이도 내부 및 외부 누설유량을 계측 할 수 있으므로 기존 방법과 비교하여 누설유량 계측장치 구성을 위한 시간과 비용을 단축 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) JIS B 8390, "Pneumatic fluid power - Determination of flow-rate characteristics", 2000.
- 2) ISO 6358, "Pneumatic fluid power - Determination of flow-rate characteristics", 1989.
- 3) J. S. Jang, T. Kagawa, T. Fujita and K. Kawashima, "Characteristics of pressure control system with pneumatic vessel and proportional valve", Journal of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society, Vol. 27, No. 4, pp. 122~127, 1996.
- 4) ISO/FDIS 19973-3, "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing - cylinders with piston rod", 2006.
- 5) JIS B 8368, "Pneumatic fluid power - Pneumatic cylinders", 1999.
- 6) ISO 10099, "Pneumatic fluid power - Cylinders - Final examination and acceptance criteria", 2001.