

등온화용기를 이용한 누설유량 시뮬레이션에 관한 연구 A Study on the Simulation of Leak Flow-rate Using Isothermal Chamber

지상원 · 장지성
S. W. Ji and J. S. Jang

(접수일 : 2010년 7월 12일, 수정일 : 2010년 9월 17일, 채택확정 : 2010년 9월 17일)

Key Words : Numerical Simulation (수치시뮬레이션), Leak Flow-rate (누설유량), Isothermal Chamber (등온화용기), Stop Method(스톱법), Compressible Fluid (압축성유체)

Abstract : Leak detection technology is a challenging research until nowadays, because it has wide and various applications in industry. Furthermore pneumatic component reliability test based on ISO requires air leakage measurement. The conventional measurement methods need a complex operation and the calibration of leak detector. Tracing the history of our study, we proposed a new method for measurement of leak flow rate using isothermal chamber. In this study, propose a simulation model of isothermal chamber by infinitesimal flow -rate, such as a leak flow-rate. The effectiveness of the proposed simulation model is proved by simulation and experimental results. Base on the comparison results, proposed simulation model is good agreement with experimental results.

1. 서 론

공기압 시스템에서는 공기압 실린더, 밸브, 레귤레이터, 필터, 관로, 피팅 등 거의 모든 부품에 대한 누설 계측이 요구된다. 그러므로, 이러한 공기압 부품들은 시장 출하 전 전수기능검사, 자동화 라인에서의 공기압 부품 교체를 위한 고장판별검사, 수명평가를 위한 신뢰성 시험시의 성능저하검사 등에서 반복적으로 누설계측을 실시하고 있다^{1),2)}. 이때, 누설계측을 위한 시간과 비용의 문제는 누설계측법 선택을 위하여 반드시 고려되어야 할 사항이다³⁾.

저자의 선행연구에서는 용기내부의 온도변화를 등온으로 유지시키는 등온화용기를 이용하여 용기 내부의 압력변화를 유량으로 환산함으로써 공기압 기기의 누설을 계측할 수 있는 계측법을 제안한 바 있다⁴⁾.

이에 대한 후속연구로서, 본 논문에서는 누설유량과 같이 미소한 유량의 충전 혹은 방출에 의해 나타나는 등온화용기의 특성을 예측하기 위하여 간략한 시뮬레이션 모델을 제안하고자 한다. 제안한 시뮬레

이션 모델의 타당성은 실험결과와의 비교 분석을 통하여 검증하였다.

2. 등온화용기의 시뮬레이션 모델

2.1 모델의 제안

등온화용기는 용기 내부 충전재와 용기 내부 공기간의 전열면적이 용기 외부 면적보다 월등히 넓으므로 등온화용기의 용적이 동일할 경우, 용기의 형상이 등온성에 영향을 주지는 않으리라 사료된다. 또한 충전재와 공기의 간극이 매우 좁으므로 용기 내 공기와 충전재 사이의 열전달 현상에 대류는 거의 관여하지 않는 것으로 추정 할 수 있다.

따라서 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 모델에는 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- 1) 용기 내부의 열 이동은 열전도에 의해서만 이루어진다.
- 2) Fig. 1에 나타내었듯이 충전재를 원통 좌표계의 좌표 $r=0$ 에 배치하고, 그 주위에는 단위 체적당의 충전재 질량이 일정하도록 원통형의 공간을 설정한다.
- 3) 열전도는 충전재의 측면에서 수직인 방향만을 고려하여 충전재와 주위 공기간의 원통 좌표 열전

장지성(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : jangjs@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6196
지상원 : 부경대학교 기계시스템공학과

도 방정식을 사용한다.

- 4) 충전재의 열전도율은 공기와 비교하여 현저하게 크므로 충전재 내부의 온도 분포는 고려하지 않는다.

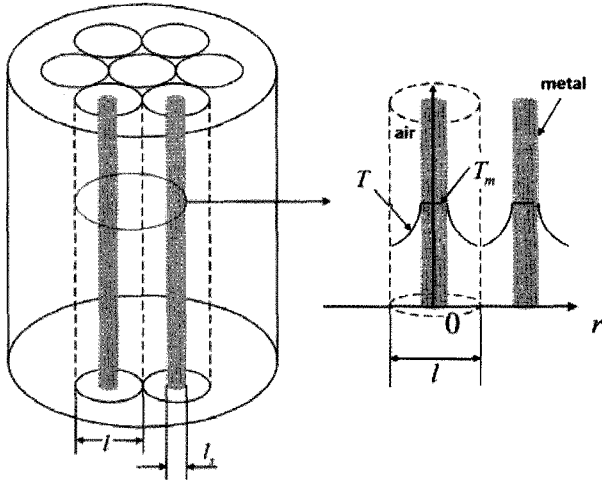


Fig. 1 Simplified model of the isothermal chamber

2.2 기초방정식

시뮬레이션에 이용한 기초식^{5),6)}은 다음과 같다.

공기의 비정상 열전도 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_g \quad (1)$$

식 (1)에서 T [K]는 공기온도, α [m²/s]는 온도전도율을 나타내고 공기의 압축 또는 팽창 효과를 나타내는 항 q_g 는 다음과 같이 주어진다.

$$\int_{l_1/2}^{l_2/2} q_g dr = \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

용기로부터 유량이 방출될 경우 용기내 공기의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$c_v W \frac{dT}{dt} = GRT + S_r \lambda_a \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3)$$

식 (3)에서 c_v [J/(kg·K)]는 공기의 정적비열, W [kg]는 용기내 공기의 질량, G [kg/s]는 방출되는 질량유량, R [J/(kg·K)]은 기체상수, S_r [m²]은 유효전열면적, λ_a [W/(m·K)]는 공기의 열전도율을 의미한다.

한편, 충전재의 온도변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\lambda_a \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) S_r = km \left(\frac{dT_m}{dt} \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 k 는 비례계수, m [kg]은 충전재의 질량, T_m [K]은 충전재의 온도를 나타낸다.

음속류 유동에 대한 질량 유량식⁷⁾은 다음과 같다.

$$G = P_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (5)$$

식 (5)에서 P_1 [Pa]은 용기내 압력, C [m³/(s·Pa)]는 소닉 컨덕턴스(sonic conductance), ρ_0 [kg/m³]는 표준상태에서의 공기밀도, T_0 [K]는 표준상태에서의 대기온도, T_1 [K]은 용기 내의 공기 온도를 의미한다.

한편, 등온화용기내에서는 충전재가 서로 상당부분 접촉하고 있을 것으로 판단된다. 따라서 실제의 유효전열면적 S_r 은 서로 접촉하지 않았다고 가정한 면적 S 에 보정계수 c 를 사용하여 다음과 같이 가정하였다.

$$S_r = cS \quad (6)$$

공기의 점도는 다음과 같은 Sutherland의 계산식⁸⁾에 의해 구할 수 있다.

$$\mu = \frac{1.458 \times 10^{-6} \times T^{1.5}}{T + 110.4} \quad (7)$$

Prandtl number P_r 은 다음과 같다.

$$P_r = \frac{c_p \mu}{\lambda_a} \quad (8)$$

식 (8)에서 c_p [J/(kg·K)]는 공기의 정압비열을 나타낸다.

따라서 P_r 을 0.72로 두면 식 (7)과 (8)에 의해 공기의 열전도율 λ_a 를 구할 수 있다.

2.3 시뮬레이션 방법

2.2절에 나타낸 기초방정식을 이용하여 Table 1에 나타낸 등온화용기를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1에서 V_0 [m³]는 충전재를 충전하지 않았을 경우의 용기내부 체적, V [m³]는 충전재를 충전하였을 경우의 용기내부 체적, S_h [m²]는 용기 외부면적을 나타낸다. 따라서, 용기 1과 용기 2는 충전재의 충전비율이 각각 용기체적의 4%, 10%가 되도록 충전한 등온화용기이다. 본 연구에 사용된 등온화용기의 재질은 스테인리스 스틸이며 충전재

로서는 직경 50[μm]의 구리선을 이용하였다.

Table 1 Specifications of isothermal chamber

| | V_0 | V | S_h | m |
|--------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| tank 1 | 1.0×10^{-4} | 1.06×10^{-4} | 14.9×10^{-3} | 0.039 |
| tank 2 | 1.0×10^{-4} | 1.00×10^{-4} | 14.9×10^{-3} | 0.098 |

구체적인 시뮬레이션 방법을 이하에 나타낸다.

해의 안정성을 위해 식 (1)은 내재적 오일러법(implicit Euler method)을 이용하였고, 나머지 식들은 외재적 오일러법(explicit Euler method)⁹⁾을 이용하여 계산하였다.

식 (2)에서는 $(l-l_s)/2$ 를 20구간으로 분할하여 계산하였다.

용기 2의 경우에는 체적 1[m³]당 충전재가 986[kg] 충전되어 있고, 충전재인 구리선의 직경이 50[μm]이므로 식 (9)에 의해 전열거리 r 은 0.15[mm]로 계산되었다.

$$\frac{m}{V} = \frac{\rho_s \times l^2}{l_s^2} \quad (9)$$

또한, 충전재의 직경, 밀도, 질량을 이용하면 용기 2의 전열면적 S 는 체적 1[m³]당 8×10^3 [m²]으로 계산되었다. 따라서, 전열면적의 보정 계수 c 를 0.12로 두는 경우, 식 (6)에 의해 유효전열면적 S_r 은 체적 1[m³]당 0.96×10^3 [m²]이 된다.

시뮬레이션 시간 간격은 1[ms]으로 설정하였고 그 실행순서는 다음과 같다.

우선 식 (5)를 이용하여 유량 G 를 계산한다. 이때, 용기내부의 초기상태를 단일변화로 가정한다. 따라서, 초기상태에서는 에너지방정식 (3)의 우변 최종항을 무시할 수 있다. 초기상태에서 최종항이 무시된 식 (3)을 식 (1)과 (2)에 대입하면 초기상태에서의 온도 경계층이 주어진다.

주어진 온도 경계층으로부터 경계부의 온도구배를 에너지 방정식의 최종항에 대입하여 용기내 평균온도를 계산한다.

용기내 평균온도와 식 (4)로부터 충전재의 온도변화를 계산할 수 있고, 식 (10)과 같은 이상기체상태 방정식을 이용하면 용기내 압력을 계산할 수 있다.

$$PV = WRT \quad (10)$$

dt 이후의 유량은 용기내 평균온도와 식 (5)를 이

용하여 계산하고, 용기내 온도분포는 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 계산한다. 이상의 과정을 반복하면 용기내 평균온도에 대한 시간응답을 구할 수 있다.

3. 등온화용기 내부공기의 평균온도 계측

3.1 계측 방법

등온화용기의 온도 특성을 평가하기 위하여 압축 공기를 용기로부터 방출했을 경우의 용기의 압력응답 및 평균온도를 계측하였다. 계측에 이용된 유체는 모두 이슬점 253[K]로 제습된 압축 공기를 사용하였다.

용기 내부의 평균온도는 다음과 같은 방법으로 계측하였다.

등온화용기의 특정 압력에서 유량의 방출을 중지시키고 그 시점에서의 용기 내부 압력 P 를 확인한다. 충분한 시간이 경과한 후에는 용기 내부의 평균온도가 측정실의 온도로 회복되므로 이와 더불어 압력도 정상상태에 도달하게 된다. 따라서, 유량방출 종료 직후의 압력 P , 정상상태 압력 P_∞ , 측정실 온도 T_a 와 샤틀의 법칙을 이용하면 특정시점의 용기 내부의 평균온도를 다음 식으로 추정할 수 있다¹⁰⁾.

$$T(t) = \frac{P(t)}{P_\infty} T_a \quad (11)$$

따라서, 특정 시각이나 압력에서 상기의 실험을 반복하면 용기 내부 평균온도에 대한 시간응답을 도출할 수 있다. 이하에서는 이러한 방법을 스톱법(stop method)이라고 정의한다.

3.2 평균온도 계측을 위한 실험장치

스톱법을 이용하여 용기내부의 평균온도를 계측하기 위한 실험장치의 구성을 Fig. 2에 나타낸다.

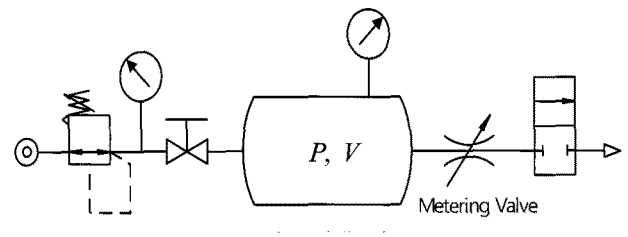


Fig. 2 Experimental apparatus for the temperature measurement

등온화용기의 등온성과 유량에 따른 압력변화속도의 관계를 조사하기 위해서, 미터링 밸브(metering

valve, Parker: 4170-HR)를 이용하여 방출 유량을 조절하였다. 압력의 계측에는 반도체식 압력 센서 (Keller PA-23S)를, 측정실 온도의 계측에는 알코올 식 온도계를 사용했다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과 고찰

시뮬레이션 모델의 타당성 및 유효성을 확인하기 위하여 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하였다.

등온화용기에 충전한 충전재의 질량이 다른 용기 1과 용기 2에 대하여 제안한 수치모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 나타난 시뮬레이션 결과와 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 결과는 공급압력을 730[abs:kPa]로 설정하고 미터링 밸브의 C_v 를 4.0×10^{-4} 으로 조정하여 누설 유량을 방출한 경우를 비교한 것이다. Fig. 3에서 횡축은 유량방출시간, 종축은 온도를 나타내고 있다. 용기 2의 경우에는 실험결과에 의한 평균온도가 시뮬레이션결과보다 높게 나타나고 있으나 일반적인 경향은 양호한 일치를 보이고 있다. 또한, 용기 1은 실험결과와 시뮬레이션 결과의 평균 온도값과 온도변화 기울기가 비교적 잘 일치 하고 있음을 확인 할 수 있다. 그러므로 충전재의 질량이 변화하더라도 제안된 수치모델이 타당하다고 판단 할 수 있다.

또한, 유량의 변화에 따른 등온화용기의 온도특성을 비교하기 위하여 용기 1을 대상으로 제안한 모델의 시뮬레이션 결과와 실험결과를 Fig. 4에 나타낸다. 시뮬레이션과 실험에서는 공급압력을 730[abs:kPa]로

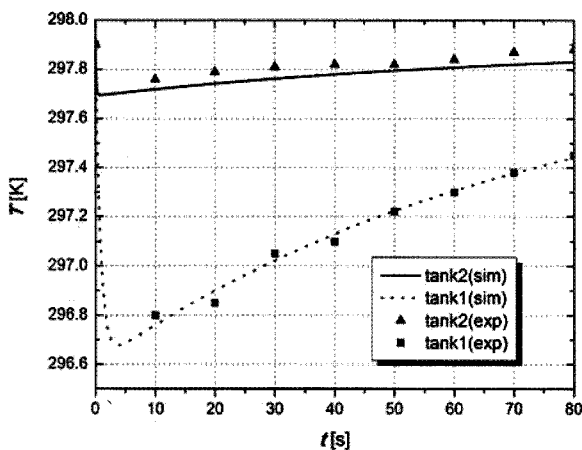


Fig. 3 Comparison results of experiments and simulations (changed by the mass of a stuffed material)

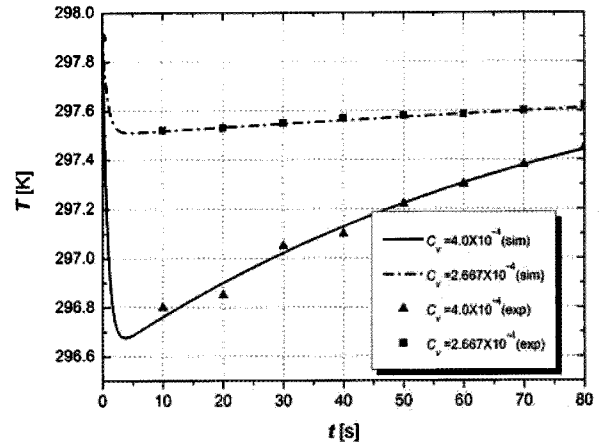


Fig. 4 Comparison results experiments and simulations (changed by the speed of discharge)

설정하고 미터링 밸브의 C_v 를 2.267×10^{-4} , 4.0×10^{-4} 으로 각각 설정하여 방출 유량을 달리하였다. Fig. 4로부터 실험결과와 시뮬레이션 결과가 양호한 일치를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4에서는 Fig. 3과 달리 평균온도와 온도변화의 경향에 대한 시뮬레이션 값과 실험 값의 명확한 차이를 관찰 할 수 없다. 따라서 방출 유량이 변화하더라도 제안된 시뮬레이션 모델이 유효함을 확인할 수 있다.

이상의 시뮬레이션결과 및 실험결과로부터 제안한 수치모델이 미소유량의 방출에 따른 등온화용기의 온도특성을 효과적으로 반영하고 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 누설유량과 같이 미소한 유량의 충전 혹은 방출에 의해 나타나는 등온화용기의 특성을 예측하기 위하여 간략한 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 제안한 시뮬레이션 모델은 공기에 관한 비정상 열전도 방정식, 에너지 방정식, 음속류의 질량유량식 등으로 구성하였으며 제안한 시뮬레이션 모델을 이용하여 충전재의 질량을 달리한 경우와 방출유량을 변화시킨 경우에 관해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위하여 스톱법을 이용하여 상기 시뮬레이션 조건과 동일한 조건으로 용기내부 공기의 평균온도를 계측하여 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

이를 통해, 제안한 시뮬레이션 모델이 미소유량의 방출에 따른 등온화용기의 온도특성을 효과적으로 반영하고 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 시뮬레이션 모델을 이용한다면 누설유량 등

의 조건이 변화하는 경우에도 등온화용기의 온도특성에 관한 예측이 가능하여 지므로 제안한 모델이 누설계측장치의 설계에 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 강보식 외 4인, 2009, "크랭크 레버형 평행개폐 공기압 척의 수명분석", 한국정밀공학회, 제26권, 제9호, pp. 96~102.
2. ISO 19973, 2007, "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing", International Organization for Standardization.
3. 지상원, 장지성, 2007, "공기압시스템의 누설유량 계측법", 유공압시스템학회논문집, 제4권, 제3호, pp. 33~37.
4. S. W. Ji, J. S. Jang and T. Kagawa, 2008, "The Error Analysis of Leak Measurement for Pneumatic Cylinder using Isothermal Chamber", Journal of the Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 5, No. 1, pp. 6~12.
5. F. B. Daniels, 1947, "Acoustical Impedance of Enclosures", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 19, No. 4, pp. 569~571.
6. J. P. Holman, 1997, "Heat Transfer(8th Edition)", McGraw-Hill, Inc(New York).
7. ISO 6358, 1989, "Pneumatic fluid power - Components using compressible fluids - Determination of flow-rate characteristics", International Organization for Standardization.
8. ISO 2533, 1975, "Standard Atmosphere", International Organization for Standardization.
9. S. T. Chapra, 2008, "Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists", McGraw-Hill, Inc(New York).
10. A. Pourmovahed and D. R. Otis, 1990, "An experimental Thermal Time-Constant Correlation for Hydraulic Accumulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 116~121.