

압축성유체 유량계측장치 설계 및 제작

Design and Building of Flow-rate Measurement Apparatus for Compressible Fluid

지상원¹ · 장지성^{1*}

S. W. Ji and J. S. Jang

Received: 04 Nov. 2013, Revised: 28 Nov. 2013, Accepted: 29 Nov. 2013

Key Words : Flow-rate Measurement(유량 계측), Isothermal Chamber(등온화 용기), Sonic Conductance(소닉 컨덕턴스), Critical Pressure Ratio(임계압력비)

Abstract: Pneumatic system is widely applied in various industry because it have a many advantage(low cost, high safety, etc..). For design of pneumatic system, accurate flow measurement is required. In this study, compressible fluid flow measurement apparatus was designed and built. It uses an isothermal chamber that can approximate isothermal condition. Therefore, it can be measured for flow-rate using pressure response of isothermal chamber. As a result, this apparatus can be measured for sonic conductance and critical pressure ratio of pneumatic components and it required less time and energy than conventional flow meter. The effectiveness of the designed apparatus is proved by experimental result.

기호설명

b : critical pressure ratio
 C : sonic conductance, $m^3/(s \cdot Pa)$ or $dm^3/(s \cdot bar)$
 P : pressure of air, Pa or bar
 R : gas constant, $J/(kg \cdot K)$
 T : temperature of air, K
 V : volume of air, m^3 or dm^3
 q_m : mass flow-rate, kg/s or g/s
 ρ : density of air, kg/m^3 or g/dm^3

1 : upstream
 2 : downstream
 ∞ : steady state
 s : supply

Subscripts

a : ambient
 0 : reference condition of air

공기압 시스템은 비용적 측면과 안정성 측면에서 산업현장의 자동화 라인에 폭넓게 사용되고 있고, 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다.¹⁾ 공기압 시스템은 일정압력하의 압축공기를 이용하여 동력을 전달하고 밸브 등을 이용하여 이를 제어하는 것이 일반적이다. 따라서 공기압 구동시스템에서 밸브를 통과하는 압축공기의 유량은 중요한 설계조건으로 정확한 계측이 선결되어야 한다.²⁾

압축성 유량계측과 관련된 국제표준 ISO 6358(1989)에 따르면 공기압 부품의 유량특성은 음속 컨덕턴스(sonic conductance)와 임계압력비(critical pressure ratio)에 결정된다.³⁾ 공기압 부품은 교축부의 형상이 다양하고 유로가 복잡하여 음속컨덕턴스와 임계압력비의 이론적 추정이 곤란하므로 계측을 통하여 도출하여야 한다. 그러나 ISO 6358에서 제안된 유량계측법은 많은 시간과 에너지가 소비되는 작업이며 계측정확도 확보도 용이하지 않다.⁴⁾

* Corresponding author: jangjs@pknu.ac.kr
 1 Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
 Copyright © 2013, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1970년대 Otis에 의해 축압기 내부에 등온용기가 적용된 사례가 유공압시스템에 등온용기를 적용한 최초의 시도였다.⁵⁾ 그러나 상기 사례는 등온용기를 이용하여 축압기의 에너지절감을 위해 활용되는 용도에 한정되어 압축성 유체의 유량계측에는 이를 활용하지 아니하다가 1990년대 후반에 이르러 Kagawa와 Kawashima에 의해 등온압력용기의 방출유량에 따른 압력응답을 이용한 공기압 밸브의 유량계측법이 최초 제안되었으며^{4), 6)} 본 연구팀은 등온용기 내부의 압력변화를 이용하여 밸브 및 실린더 등의 공기압 부품에서 발생하는 극미세 유량인 누설유량을 계측하는 방법을 제안한 바 있다.⁷⁻⁸⁾

따라서, 본 연구에서는 등온용기를 이용하여 각종 밸브 및 실린더, 피팅, 전달관로 등과 같은 공기압 부품의 통과유량 및 누설유량을 계측 할 수 있는 계측장치를 설계 제작하고자 한다.

2. 유량계측법

압축성 유체인 기체는 통상의 일반용기로부터 가압된 기체를 방출하는 경우, 급격한 체적팽창에 의해 용기 내부 온도가 강하하는 현상이 발생한다. 그러므로 압력변화를 이용한 누설유량계측법에 있어서는 용기 내부 상태 변화를 등온 변화로 유지하는 것이 중요하다. 등온화용기는 금속의 열용량이 기체와 비교하여 매우 크다는 점에 착안하여, 금속사(metal wool)를 용기 내부에 가득 채워 열전달 면적과 열전달 계수를 확장시킴으로써, 압축공기를 용기 내로 공급하는 경우 및 용기 내의 압축공기를 방출하는 경우에도 공기의 온도변화를 등온으로 유지할 수 있는 용기이다.

등온 상태에서는 공기의 질량유량과 압력변화와의 관계는 식 (1) 같이 표현할 수 있다.

$$q_m = \frac{V}{RT_a} \frac{dP}{dt} \quad (1)$$

식 (1)에서 q_m 는 공기의 질량유량[kg/s], V 는 공기의 체적[m³], R 은 기체상수[J/(kg·K)], P 는 용기내부의 절대압력[Pa], T_a 는 계측실내의 공기온도[K]를 나타낸다.

따라서, 용기의 체적과 측정실의 온도를 알고 있다고 가정하면 용기내의 압력변화에 의하여 공기의 질량유량을 계측할 수 있음을 알 수 있다. 또한 압력의 변화는 고주파수 영역까지 용이하게 계측할 수 있으

므로 극미량의 누설유량을 포함한 비교적 넓은 영역의 질량유량 계측이 가능하다.

상기 방법에 따르면 ISO 6358에 규정된 음속컨덕턴스 C 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C = \frac{V}{R \rho_0 t \sqrt{T_0 T_a}} \ln\left(\frac{P_s}{P}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서 C 는 음속컨덕턴스[dm³/(s·bar)], V 는 공기의 체적[dm³], ρ_0 는 기준상태의 공기밀도[kg/m³], t 는 시간[s], T_0 는 기준상태의 온도[K]를 의미한다.

아음속류인 경우 ISO 6358에 규정된 질량유량식은 다음과 같다.

$$q_m = P_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_2}{P_1} - b}{1 - b}\right)^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 하첨자 1과 2는 각각 상류측과 하류측을 의미한다. 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{P C \rho_0 \sqrt{T_0 T_a}}{V} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_a}{P} - b}{1 - b}\right)^2} \quad (4)$$

식 (4)에서 P_a 는 대기압[bar], b 는 임계압력비를 나타낸다. 따라서, 측정된 용기내 압력변화값과 식 (4)를 이용하여 비선형회귀분석을 수행하면 임계압력비 b 를 근사적으로 구할 수 있다.

3. 유량계측장치 설계 및 제작

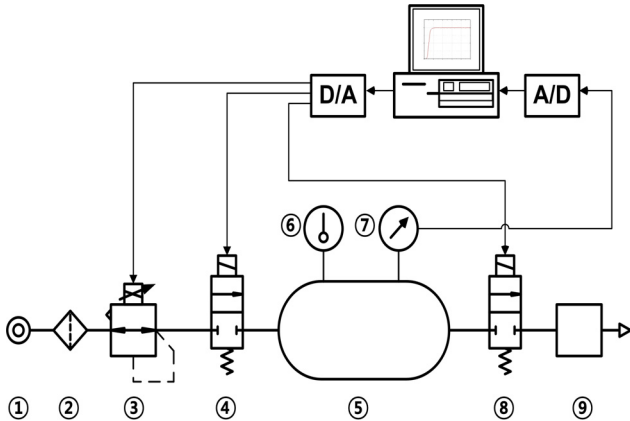
본 연구에서는, 압축성 유체의 음속컨덕턴스를 최대 6.343[dm³/(s·bar)] 계측할 수 있는 Fig. 1과 같은 유량 계측장치를 설계하였다.

Fig. 1에서, 전공 레귤레이터는 ITV 3050(SMC社), 2포트 솔레노이드 밸브는 음속컨덕턴스 8.5[dm³/(s·bar)], 임계압력비가 0.44인 차압 zero 작동형 VXZ2230-02(SMC社)를 선정하였고, 용기의 체적은 26.5[dm³]이고 지름 61[μm], 밀도 8.9[kg/dm³]인 구리 선을 용기내부에 10.05 [kg] 채워 넣었으므로 용기내부 공기의 체적은 25.3708[dm³]으로 산출되었다.

따라서 Fig. 1과 같은 유량계측장치의 등온화용기

내에 4[bar]를 인가하는 경우, 등온용기 내부의 등온성 유지에 관련한 식 (5)에 의해 최대 6.343 [dm³/(s·bar)]의 음속컨덕턴스를 계측 할 수 있도록 설계하였다.

$$C \leq \frac{V}{P_s} \quad (5)$$



① air source, ② filter, ③ electronic air pressure regulator, ④ 8/2 port solenoid valve, ⑤ isothermal chamber, ⑥ temperature gauges, ⑦ pressure sensor, ⑧ test component

Fig. 1 Schematic of a measurement apparatus

한편, 상기 설계된 계측장치에서 계측 대상품과 2 포트 솔레노이드 밸브가 직렬연결 되어 있으므로 계측시 이를 고려하여야 한다. 이를 위해 Fig. 2와 같은 방출시의 용기내부 압력변화와 식 (4)를 이용하여 전체 음속컨덕턴스를 추정하고 비선형 회귀분석을 통해 전체 임계압력비를 도출하면 식 (6)과 (7)에 의해 계측하고자 하는 대상품의 음속컨덕턴스와 임계압력비를 구할 수 있다.

$$C_2 = \frac{C_1 C_{1,2}}{C_1 - C_{1,2}} \quad (6)$$

$$b_2 = 1 + C_2^2 \left(\frac{b_{1,2} - 1}{C_{1,2}^2} + \frac{1 - b_1}{C_1^2} \right) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)의 하첨자 1과 2는 Fig. 1에서 ⑧과 ⑨를 각각 나타낸다.

전술된 설계 사양을 바탕으로 유량 계측장치를 제작하였고 이를 Fig. 2에 나타낸다.



Fig. 2 The measurement apparatus

4. 실험

제작된 유량 계측장치의 등온성을 확인하기 위하여 2포트 솔레노이드 밸브에 작동전압을 인가하여 최대유량을 방출 하였을 경우의 용기내부 평균온도를 계측하였고 그 방법은 다음과 같다.

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 샤를의 법칙을 이용하면 특정시점의 용기 내부의 평균온도를 다음 식으로 추정할 수 있다.⁹⁾

$$T(t) = \frac{P(t)}{P_\infty} T_a \quad (8)$$

따라서, 특정 시각이나 압력에서 상기의 실험을 반복하면 용기 내부 평균온도에 대한 시간응답을 도출할 수 있으며, 상기 방법을 사용하여 계측된 등온용기 내부의 평균온도 계측결과를 Fig. 3에 나타낸다.

Fig. 3의 결과로부터 최대유량을 방출하는 경우에도 용기내부 공기의 최대온도 변화량이 약 4[K]미만으로 억제되고 있음을 확인 할 수 있으므로 본 계측장치는 유량계측을 위한 등온성이 유지되고 있음을 확인 할 수 있다.

또한 본 계측장치의 유량방출 경로상에 연결된 밸브와 피팅 및 관로 등에 의해 영향을 받는 음속컨덕

턴스와 임계압력비를 확인하기 위하여 Fig. 4에 최대 방출유량에 따른 용기내 압력변화를 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 압력응답과 식 (2), (4)를 이용하면 본 계측장치의 임계압력비는 0.35, 음속컨덕턴스는 $7.320[\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{bar})]$ 로 계측되었다. 부착된 2포트 솔레노이드 밸브와 도출된 계측치와의 차이는 밸브와 용기 사이에 직렬 체결된 피팅과 관로에 의한 영향일 것으로 사료된다.

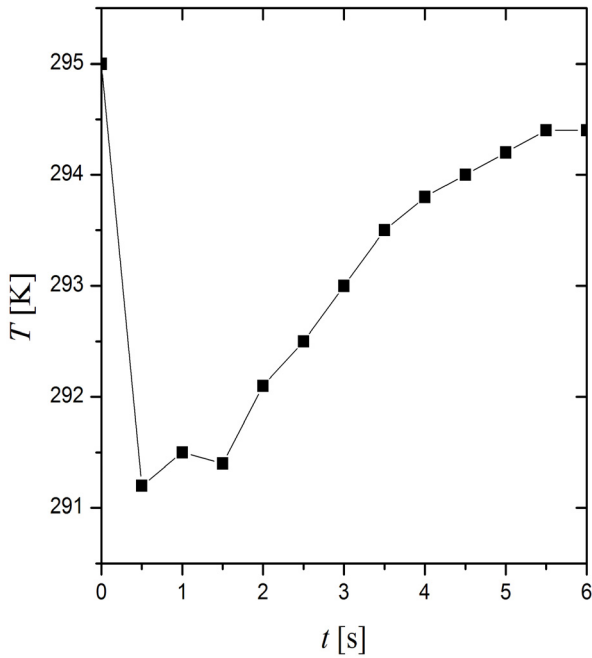


Fig. 3 Temperature in a chamber by discharge

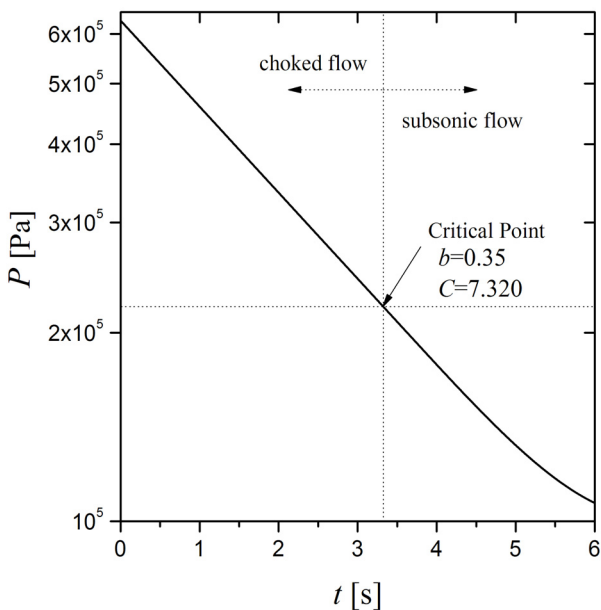


Fig. 4 Pressure response of discharge

5. 결 론

공기압 구동시스템에서 밸브를 통과하는 압축공기의 유량은 중요한 설계조건으로 정확한 계측이 선결되어야 한다. 그러나 ISO 6358에서 제안된 유량계측법은 많은 시간과 에너지가 소비되는 작업이며 계측정확도 확보도 용이하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 등온용기를 이용하여 각종 밸브 및 실린더, 피팅, 전달관로 등과 같은 공기압 부품의 통과유량 및 누설유량을 계측 할 수 있는 계측장치를 설계하였다. 설계된 계측장치는 최대 $6.343[\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{bar})]$ 의 음속컨덕턴스를 계측 할 수 있도록 설계하여 제작하였다.

제작된 계측장치의 등온성능 확인을 위하여 최대 유량을 인가하여 용기내부 온도변화를 계측한 결과, 용기내부 온도변화량이 4[K]미만으로 억제되고 있음을 확인하였다. 또한, 계측장치의 유량방출 경로상에 부착된 밸브와 피팅 및 관로 등에 의해 본 계측장비의 임계압력비는 0.35로 나타났고, 음속컨덕턴스는 $7.320 [\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{bar})]$ 로 나타났으므로, 본 계측장비로 설계목표치인 최대 음속컨덕턴스 $6.343[\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{bar})]$ 을 계측 할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- 1) B. S. Kang, C. S. Song, J. S. Jang and S. W. Ji, "Life Analysis of Parallel Opening Type Pneumatic Chuck", Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 9, pp. 96-102, 2009.
- 2) S. W. Ji, "Flow Equations of Pneumatic Valve", Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society, Vol.3, No.2, pp.20-25, 2006.
- 3) ISO/TC 131, "ISO 6358 Pneumatic fluid power - Components using compressible fluids- Determination of flow-rate characteristics", International Organization for Standardization, 1989.
- 4) D. R. Otis, "Thermal Damping in Gas-Filled Composite Materials during Impact Loading", ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.37, pp.38-44, 1970.
- 5) K. Kawashima, T. Fujita and T. Kagawa, "Characteristics Measurement of pneumatic

- Elements Using Isothermal Chamber”, 3rd JHPS International Symposium on Fluid Power, pp.253-258, 1996.
- 6) K. Kawashima, Y. Ishii, T. Funaki and T. Kagawa, "Determination of Flow Rate Characteristics of Pneumatic Solenoid Valves Using an Isothermal Chamber”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.126, pp.273-279, 2004.
- 7) J. S. Jang, S. W. Ji and T. Kagawa. "The Error Analysis of Leak Measurement for Pneumatic Cylinder Using Isothermal Chamber”, Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society, Vol.5, No.1, pp.6-12, 2008.
- 8) S. W. Ji and J. S. Jang, "A Study on the Simulation of Leak Flow-rate Using Isothermal Chamber”, Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol.14, No.5, pp.71~75, 2010.
- 9) A. Pourmovahed and D. R. Otis, "An experimental Thermal Time-Constant Correlation for Hydraulic Accumulators”, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 116 ~ 121, 1990.