

공기압 밸브의 유량특성 계측법

The Measurement Methods of Flow-rate Characteristics for Pneumatic Valves

장지성 · 지상원

J. S. Jang and S. W. Ji

1. 서 언

공기압 구동 장치를 설계할 때에는 구동 장치의 설계 사양을 만족할 수 있는 밸브, 배관 등의 각종 부품을 선정(또는 설계) 해야 한다. 이 때, 공기압 액추에이터에 설치되어 있는 부하물의 속도를 설계 사양에 부합하도록 하기 위해서는 적절한 유량을 확보 할 수 있는 부품을 선정해야 하고, 이 과정에서 설계자는 부품 제조업체의 카탈로그에 기재된 각종 부품의 제어가능 유량을 표시하는 계수를 참조하게 된다.

제조업체의 카탈로그에서는 공기의 제어가능 유량을 표시하는 계수로서 S , C 등 다양한 계수가 사용되고 있고, 각 계수를 이용한 유량계산식이 상이하므로 설계자가 상기한 계수의 의미 및 계수를 이용한 유량계산식을 정확하게 이해하지 못하고 있으면 적절하지 못한 밸브를 선정할 수도 있다.

본 해설에서는 ISO와 JIS에 기술되어 있는 공기압 밸브의 유량계산식 및 유량계측법을 소개하여 공기압 구동 장치에 익숙하지 못한 사용자도 부하물의 속도와 관련된 설계 사양을 만족할 수 있는 밸브를 용이하게 선정할 수 있도록 하고자 한다.

2. 유량특성의 정의

2.1 S 를 이용한 유량계산식¹⁾

JIS에 규정된 S 는 일본에서 주로 사용하는 계수로서 밸브를 통과하는 실제 공기유량을 근거로 밸브내부 유로의 상태를 이상적인 오리피스로 가정하여 도출한 밸브내부 유로의 단면적(유효단면적)을 의미한다.

비압축성 유체와 달리 압축성 유체의 경우, 질량 유량의 상한치가 존재한다. 즉 유속이 음속에 도달하면, 더 이상 유량이 증가하지 않는 영역인 "chocking"이 존재하고, Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 chocking이 최초로 발생하는 압력비를 임계압력

비라 한다. 따라서 공기압에서는 유량식이 음속영역과 아음속영역으로 구분되어 적용되어진다. JIS에서는 음속과 아음속을 구분 짓는 임계압력비를 약 0.5로 규정하고 있다.

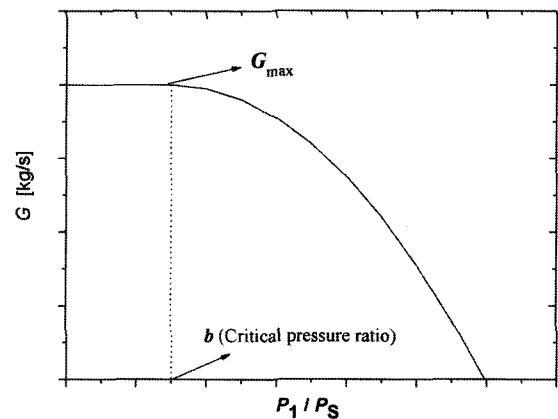


Fig. 1 Measurement result of a flow-rate characteristics in pneumatic valve using JIS method

2.1.1 음속 유동

$P_1/P_s \leq 0.5$ 일 때의 공기의 중량유량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$G_f = SP_s \sqrt{\frac{\kappa g}{RT_0} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (1)$$

식 (1)에서 G_f [kgf/s]: 중량유량, S [m²]: 유효단면적, P_s [kgf/m²]: 상류압력(절대압력), κ : 비열비, g [m/s²]: 중력가속도, R [J/(kg°K)]: 기체상수, T_0 [K]: 기준온도, T_1 [K]: 대기온도를 나타낸다.

식 (1)에 나타낸 중량유량을 체적유량 Q [l/min]와 질량유량 G [kg/s]로 변환하면 각각 식(2),(3)으로 나타내어진다.

$$Q \approx 11.1SP_s \sqrt{T_0/T_1} \quad (2)$$

$$G \approx 2.15 \cdot 10^{-5} \cdot 11.1SP_s \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (3)$$

2.1.2 아음속 유동

$P_1/P_s > 0.5$ 일 때의 공기의 중량유량 G_f 는 다음과 같이 유도된다.

$$G_f = S \sqrt{2g \frac{P_1}{RT_0} (P_s - P_1)} \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (4)$$

식 (4)에 나타낸 중량유량을 체적유량 Q [l/min]와 질량유량 G [kg/s]로 변환하면 각각 식(5),(6)으로 나타 낼 수 있다.

$$Q = 22.2S \sqrt{P_1(P_s - P_1)} \sqrt{T_0/T_1} \quad (5)$$

$$G = 2.15 \cdot 10^{-5} \cdot 22.2S \sqrt{P_1(P_s - P_1)} \sqrt{T_0/T_1} \quad (6)$$

2.2 C와 b를 이용한 유량계산식²⁾

JIS에서는 임계압력비를 0.5로 가정하고 있지만, 실제로는 임계 압력비가 0.5이하인 경우가 많다. 실제로 공기압 유량비제어밸브의 임계 압력비를 측정해 보면 0.3~0.4정도로 이상적인 오리피스식의 임계 압력비와는 상이한 결과가 얻어진다.

이러한 오차를 감소시키기 위하여 제안된 식이 C와 b를 이용한 유량계산식이고, 이 식은 ISO 6358에 정의되어 있다.

ISO에서 C는 소닉 컨덕턴스(sonic conductance)로 정의되어 있고 교축부를 공기가 음속으로 흐를 때의 유량을 교축부 상류압력으로 나눈 값을 의미한다. b는 밸브의 임계압력비를 나타낸다.

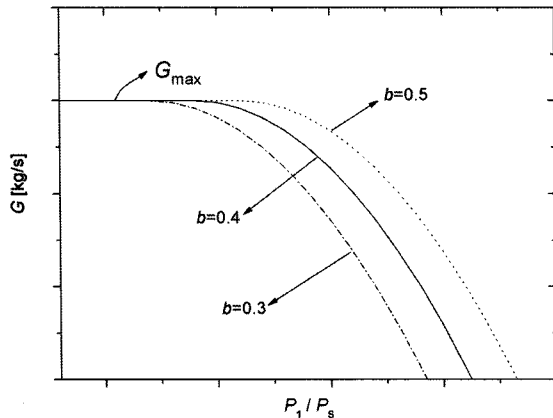


Fig. 2 Measurement result of a flow-rate characteristics in pneumatic valve using ISO method

2.2.1 음속 유동

$P_1/P_s \leq b$ 일 때의 공기의 유량은 다음 식으로 나타낸다.

$$Q = CP_s \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (7)$$

식 (7)에서 사용한 기호는 다음과 같다.

Q [l/s]: 유량, C [l/(s · bar)]: 소닉 컨덕턴스, P_s [bar]: 교축부 상류압력(절대압력), T_1 [K]: 교축부 하류 온도, T_0 [K]: 기준온도(ISO에서는 293.15[K]로 정의)

2.2.2 아음속 유동

$P_1/P_s > b$ 일 때의 공기의 유량은 다음 식으로 나타낸다.

$$Q = C \cdot P_s \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{P_s} - b\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (8)$$

식 (8)에서 P_1 [bar]는 교축부 하류압력(절대압력)을 나타낸다.

2.3 S와 C의 변환식

식 (2)와 (7)을 비교하면 S와 C의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

우선 식 (2)를 식 (7)의 기준상태(온도 293.15 [K], 압력 100[kPa])와 동일한 조건으로 환산하기 위하여 T_0 를 293.15[K], 밀도 ρ 를 1.188 [kg/m³]로 설정한 후, Q를 [l/s]로 환산하면

$$Q = 1.986 \cdot 10^{-3} \cdot S \cdot P_s \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (9)$$

이 되고, 식 (9)의 압력 P_s 단위를 [bar]로 수정하면 식 (10)과 같이 환산 할 수 있으므로 S와 c의 관계는 식 (11)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$Q \approx 0.2 \cdot S \cdot P_s \cdot \sqrt{T_0/T_1} \quad (10)$$

$$C = 0.2S, S = 5C \quad (11)$$

3. 유량특성 측정법

3.1 유량계를 이용한 측정법²⁾

유량계를 이용하여 공기의 유량을 측정하는 장치는 ISO에 Fig. 3과 같이 기술되어 있다.

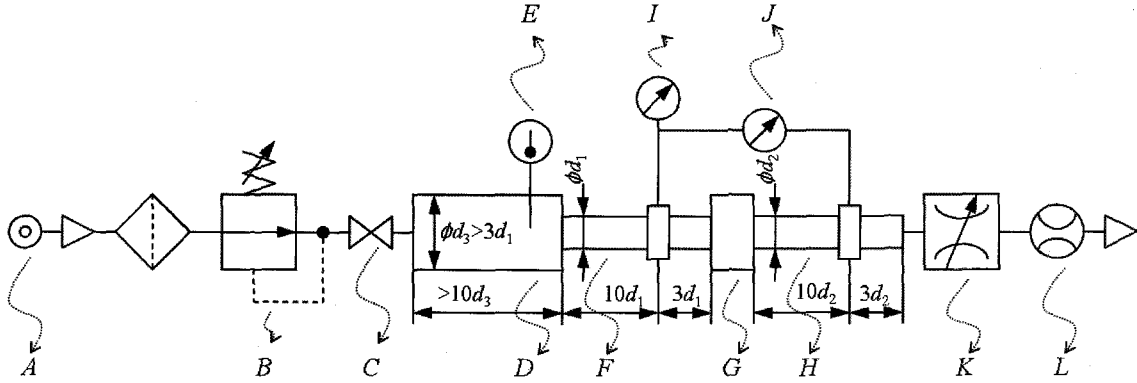


Fig. 3 Test circuit for components with inlet and outlet ports

Table 1 Key to test circuit components in Fig. 3

A	압축공기 발생장치
B	압력 조절 밸브
C	스톱 밸브
D	온도 측정용 튜브
E	온도 측정용 기기, 온도 측정용 튜브의 축상에 설치해야 하고, 온도 측정용 튜브의 우단에서 $3d_3$ 이상 떨어진 곳에 위치해야 한다.
F	상류측(고압측) 압력 측정용 튜브
G	측정대상 부품
H	하류측(저압측) 압력 측정용 튜브
I	상류측(고압측) 압력 측정용 기기
J	차압 측정용 기기, 측정대상 부품 양단의 압력 차이가 $100[\text{kPa}]$ 이상이면 차압 측정용 기기를 하류측(저압측) 압력 측정용 기기로 교체해도 무방함.
K	유량 조절 밸브
L	유량 측정 기기
ϕd_1	상류측(고압측) 압력 측정용 튜브의 직경
ϕd_2	하류측(저압측) 압력 측정용 튜브의 직경
ϕd_3	온도 측정용 튜브의 직경

Table 1에 Fig. 3에서 사용한 기호의 의미를 나타낸다. Fig. 3에서 A ~ H는 그림에 나타난 바와 같이 설치해야 하고, I ~ L은 Table 1을 참조하여 유량측정이 가능하도록 적절히 선택하면 된다.

유량측정 절차는 다음과 같다.

- ① 유량 조절 밸브 K를 폐쇄 상태로 유지한다.
- ② 스톱 밸브 A를 개방한다.
- ③ 상류측 압력 P_1 (I를 이용한 측정값)이 $400[\text{kPa}]$ (게이지압) 이상이 되도록 압력 조절 밸브 B를 조작한다.

④ 유량 조절 밸브 K를 약간 개방하고, 이때의 하기의 각 측정값을 기록한다.

- 온도 측정용 기기 K에서 측정한 상류측 온도 T
- 상류측 압력 P_1 (I를 이용한 측정값)
- 하류측 압력 P_2 (H를 이용한 측정값, P_2 또는 $P_1 - \Delta P$)
- 측정대상 부품을 통과하여 대기로 방출되는 유량 Q (L을 이용한 측정값)
- 상기 측정 값들은 각 측정 값이 정상상태에 도달한 이후의 수치를 기록해야 한다. 일반적인 공기압 부품의 유량을 측정하는 경우에 측정 값의 정상상태 도달 여부에 대한 판단 기준은 다음과 같다.

$$T: \text{특정값} \pm 2[\text{K}]$$

$$P_1, P_2: \text{특정값} \pm 2[\%]$$

$$Q: \text{특정값} \pm [4\%]$$

⑤ P_2 가 게이지압으로 0이 될 때까지 유량 조절 밸브 K의 개도를 서서히 증가시키면서 ④에서 기술한 방법으로 측정한 각 측정값을 기록한다.

⑥ ④, ⑤의 측정값을 이용하여 유효단면적 S 와 임계압력비 b 를 구한다.

3.2 동온화 용기를 이용한 측정법³⁾

ISO에서 공기압 유량특성규격이 1989년 개정된 이후로 주요선진국에서 다양한 측정법을 제안하였고 현재 몇 가지 측정법이 TC/131에서 심사 중에 있다. 그 중에서 일본의 Kagawa교수팀에 의해 제시된 동온화용기법은 유량을 고속으로 측정할 수 있으므로 공기압 부품의 동특성을 측정 해석할 수 있는 효율적인 측정법이다. 더불어, 본 저자들과 일본의 Kagawa교수팀과의 공동연구로 이를 누설측정에 적용하는 연구를 현재 수행 중에 있다.

동온화 용기는 동선(銅線)을 용기 내부에 가득 채

$$\frac{5 \cdot 10^8 \cdot V_1}{P_s \cdot C} \leq dt \leq \frac{10 \cdot 10^8 \cdot V_1}{P_s \cdot C} \quad (17)$$

③ 압력 조절 밸브 B를 조절하여 공급압력 P_s [Pa]를 설정한다.

④ 솔레노이드 밸브를 개방함과 동시에 용기 H 내부의 압력 변화를 디지털 기록계에 기록한다.

⑤ 디지털 기록계에 저장된 계측결과와 식 (16)을 이용하여 계측 대상 부품의 유량특성을 구한다.

⑥ 계측 대상 부품의 유량 특성으로부터 계측 대상 부품의 소닉 컨덕턴스와 임계 압력비를 분석한다.

Table 2 Key to test circuit components in Fig. 4

A	압축공기 발생장치
B	압력 조절 밸브
C	솔레노이드 밸브
D	정류관(압력 맥동 제거용)
E	계측대상 부품
F	정류관(압력 맥동 제거용)
G	온도 계측용 기기
H	등온화 용기
I	압력 계측용 센서
J	디지털 기록계(P.C. 등)
K	스톱 밸브
ϕd_1	정류관 D의 직경
ϕd_2	정류관 F의 직경
ϕd_3	등온화 용기의 직경

4. 결 언

본 해설에서는 JIS 및 ISO에 규정된 공기압 유량 특성에 관한 유량계수 및 유량계측법을 기술하였다. 또한, JIS와 ISO의 유량계수 변환관계를 기술하여 업체별로 선호하는 방식으로 상이하게 표기되어 왔던 S와 C의 변환을 손쉽게 할 수 있도록 하였다.

더불어, 유량특성 및 계측에 관한 ISO의 최신규격안인 등온화 용기법을 소개하였다. 소개된 등온화 용기법은 비교적 저렴한 비용과 짧은 시간에 공기압 부품의 유량특성을 고속으로 계측할 수 있는 혁신적인 방법이다.

따라서, 본 해설에서 소개된 각종 유량계수의 정

의와 그에 따른 유량식을 참고한다면 공기압 부품의 유량특성을 정의하고 계측하는데 많은 도움이 될 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

- 1) JIS B 8390, "Pneumatic fluid power - Components using compressible fluids - Determination of flow-rate characteristics", 2000.
- 2) ISO 6358, "Pneumatic fluid power - Components using compressible fluids - Determination of flow-rate characteristics", 1989.
- 3) ISO/DIS 6358-3, "Pneumatic fluid power - Components using compressible fluids - Determination of flow-rate characteristics - Part3: Alternative test methods- Isothermal discharge test", 2007.

[저자 소개]



장지성 (책임저자)

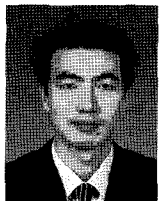
E-mail: jangjs@pknu.ac.kr

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

[저자 소개]



지상원

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