

등온화용기를 이용한 공기압 기기의 성능계측

Characteristics Measurement of Pneumatic Elements Using Isothermal Chamber

장 지 성

J. S. Jang

Key Words : Dynamic Characteristic Measurement(동특성계측), Flow Rate Measurement(유량 계측), Pneumatic Elements(공기압 기기), Isothermal Chamber(등온화 용기)

Abstract : In this study, methods for the characteristics measurement of pneumatic elements using isothermal chamber, the methods for the flow rate and dynamic characteristic measurement of pneumatic control valve, are proposed. An isothermal chamber is a chamber in which the steel wool is stuffed and isothermal condition can almost be realized. Therefore, the instantaneous flow rate could be measured only from the pressure response using the state equation of gas. Effectiveness and simplicity of the proposed method are confirmed by comparing the measured results obtained by proposed methods with the methods defined JIS and the ISO standards.

1. 서 론

공기압 구동장치를 구성하는 경우, 구동장치의 성능을 결정하는 중요한 요인은 구성 기기의 유량 특성 및 동특성이다. 유량특성의 계측방법으로는 JIS 표준 계측방법¹⁾, 동특성의 계측방법으로는 ISO 표준 계측방법²⁾이 사용되어져 왔고, JIS 및 ISO 표준 계측방법을 사용하는 기존의 계측 방법은 유량계와 압력계를 사용하여 계측 대상 기기를 통과하는 유량과 하류 압력의 관계를 계측하는 방법이다. 하지만 JIS 표준 계측방법 및 ISO 표준 계측방법을 이용하는 경우에는 공기의 온도 변화를 무시하고 있기 때문에 정확한 유량계측을 수행하기 위해서는 하류측의 압력뿐만 아니라 피 측정 기기를 통과하는 공기의 온도를 일정하게 유지해야 한다. 또한, 계측 대상 기기를 통과하는 유량에 대 용량일 경우에는 대용량의 유량계가 필요하기 때문에 계측장치를 구성하기 위해서는 많은 비용이 소모된다. 동특성을 계측하는 경우에도 비정상적으로 변화하는 공기의 온도 및 압력을 계측해야 하기 때문에, 유량계측에 의한 동특성의 계측이 용이하지 않으며, 유량계를 이용한 공기압 기기의 동

특성 계측에 관한 최근의 연구로는 黒下의 연구³⁾가 있지만, 고속으로 구동하는 제어밸브의 특성계측은 실현하지 못하였다.

본 논문에서는 용기내의 온도변화를 등온으로 유지하는 등온화용기⁴⁾ 내부의 압력 변화를 유량으로 환산하는 방법을 이용하여 공기압 기기의 유량 및 동특성을 용이하게 계측할 수 있는 방법을 제안하고, 기존의 계측법과의 비교를 통하여 본 논문에서 사용한 계측법의 유효성을 증명한다.

2. 등온화용기

본 실험에서 사용한 등온화용기는 금속면을 용기내부에 가득 채워서 열전달 면적과 열전달 계수를 크게 하여 압축공기가 용기 내로 공급되어지는 경우 및 용기 내의 압축공기를 방출하는 경우에 용기내부의 공기의 온도변화를 등온으로 유지할 수 있는 용기이다. 등온화용기 내부에 압축공기를 공급한 경우의 실험결과를 Fig. 1에 나타낸다.

Fig. 1의 결과는 직경49[mm], 높이90[mm]의 원통형용기내에 금속면30[g]을 넣은 후 용기내에 압축공기를 공급하고, 용기내의 압력이 27[kPa]에 도달했을 때 압축공기의 출입을 차단한 경우의 실험 및 해석 결과이다. Fig. 1에서 횡축은 시간을 나타내고, 종축의 좌측은 용기내의 압력, 종축의 우측

접수일 : 1999년 10월 11일

장지성 : 부경대학교 공과대학 제어기계공학과

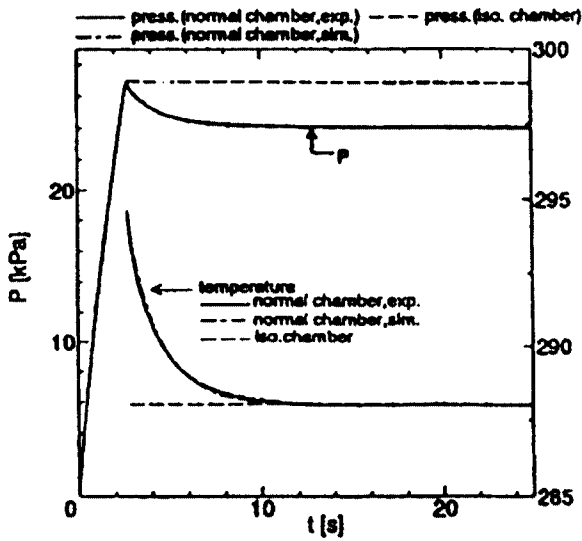


Fig. 1 Pressure and temperature change after stopping air charge in a normal chamber and an isothermal chamber

은 용기내의 절대온도를 나타낸다. 금속면을 넣지 않은 용기의 경우에는 압축공기의 출입을 차단한 직후부터 용기내의 압축공기의 온도강하에 의하여 압력이 변하지만, 금속면을 채운 용기의 경우에는 용기내의 온도가 일정하게 유지되기 때문에 압축공기의 출입을 차단한 직후에도 압력이 변화하지 않는 것을 알 수 있다.

3. 등온화용기를 이용한 유량계측의 원리

공기의 유량과 압력 및 온도변화와의 관계는 다음과 같이 표현되어 진다.

$$G = \frac{1}{R\theta} \left(V \frac{dP}{dt} - WR \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 G 는 공기의 질량 유량[kg/s], P 는 압력[Pa], t 는 시간[s], R 는기체 상수 [J/kgK], V 는 용기의 체적[m³], W 는용기내의 공기의 질량[kg], θ 는 용기내의 공기의 온도[K]를 나타낸다. 등온 상태에서는 식(1)의 우변 제2항을 무시할 수 있으므로 유량은 압력변화의 함수로써 다음과 같이 표현 되어진다.

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

식(2)에서 θ_a 는 측정실의 온도[K]를 나타내고,

용기의 체적과 측정실의 온도를 알고 있다고 가정하면 용기내의 압력변화에 의하여 공기의 질량 유량을 계측할 수 있음을 알 수 있다. 또한 압력의 변화는 고주파수까지 용이하게 계측할 수 있기 때문에 식(2)를 사용함으로써 측정 대상 기기의 동특성의 계측도 가능하다.

본 논문에서의 유량계측 결과는 계속되어진 질량유량을 0[°C], 1기압하의 체적유량으로 환산한 결과이다.

4. 유량특성 계측

공기압 유량 제어 기기는 공기가 통과하는 유로의 단면적이 일정한 것과 단면적이 가변인 2가지로 구분되어 진다. 본 논문에서는 단면적이 일정한 기기로는 감압밸브(AR 1000, SMC(社))를, 가변인 기기로는 스폴형 서보밸브(MPYE-5-1, FESTO(社))를 선정하여 정적인 유량특성의 실험을 수행하였다.

4.1 감압밸브의 유량특성 계측

4.1.1 유량특성 계측 방법

Fig. 2는 실험장치를 나타낸다. 감압밸브의 상류측 및 하류측에 압력용기가 설치되어져 있으며, 상류측의 압력용기는 공급압을 일정하게 유지할 목적으로, 하류측의 압력용기는 등온화 용기로서 감압밸브의 유량 계측을 위하여 설치되어져 있다. 계측방법은 다음과 같다.

- 1) 감압밸브의 상류측 압력용기내의 압력을 일정하게 유지하고 하류측 압력용기내의 압력을 대기압으로 설정한다.
- 2) 감압밸브의 압력조정 스크루를 회전시킨다.
- 3) 하류측 압력용기내의 압력이 일정압이 될 때까지 압력을 계측한 후, 식(2)를 이용하여 감압밸브를 통과하는 유량을 계측한다.
- 4) 하류측 압력용기내의 압력과 유량과의 관계를 이용하여 감압밸브의 유량특성도를 작성한다.

본 실험에서 상류측 압력은 592[kPa]로 설정하였고, 상류측 압력용기의 체적은 3.0×10^{-2} [m³]이다. 하류측의 등온화용기의 체적은 3.0×10^{-3} [m³]이고, 평균직경이 25[μm]인 금속면을 0.9[kg] 충전하였다. 공기압 관로는 직경6[mm]의 나일론 튜브를 사용하였다. 용기내 압력은 반도체식 압력변환기를 사용하여 측정하였고, 샘플링시간은 20[ms]로 설정하였다. 실험에 사용한 감압밸브는 직동형 감압밸브이다.(AR1000, SMC co.,)

4.1.2 측정결과와 고찰

Fig. 3은 등온화용기내의 압력응답을 측정한 결과이다. 위의 결과는 감압밸브의 압력조절나사의 회전각을 나타내고, 압력조절나사를 설정압력까지 회전시키는데 0.6[s]정도가 소요됨을 알 수 있다.

아래의 결과는 상류측 압력용기내의 압력변화(P_1) 및 등온화용기내의 압력변화(P_2)를 나타낸다. 상류측 압력용기내의 압력은 5[kPa]정도 하강하고 있으므로 유량측정에 약간의 오차를 유발하지만, 용기를 충분히 크게 하면 상류측 압력용기내의 압력변화를 억제할 수 있다.

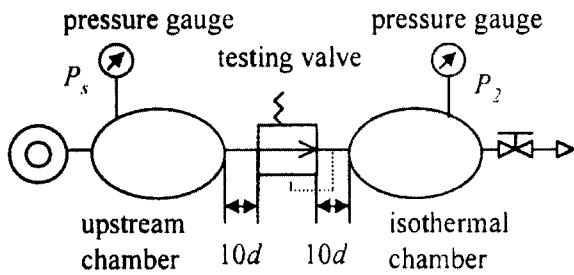


Fig. 2 Experimental apparatus for the flow characteristic measurement of the reducing valve

Fig. 4는 감압밸브의 설정압력을 295[kPa], 407[kPa], 504[kPa]로 설정하여 유량을 계측한 결과이다. Fig. 4에서 실선은 등온화용기를 사용하여 유량을 계측한 결과이고, 점은 유량계를 이용하여 계측한 결과이다. 유량계를 이용한 결과에서 하얀색 점은 감압밸브의 압력조절손잡이를 죄어서

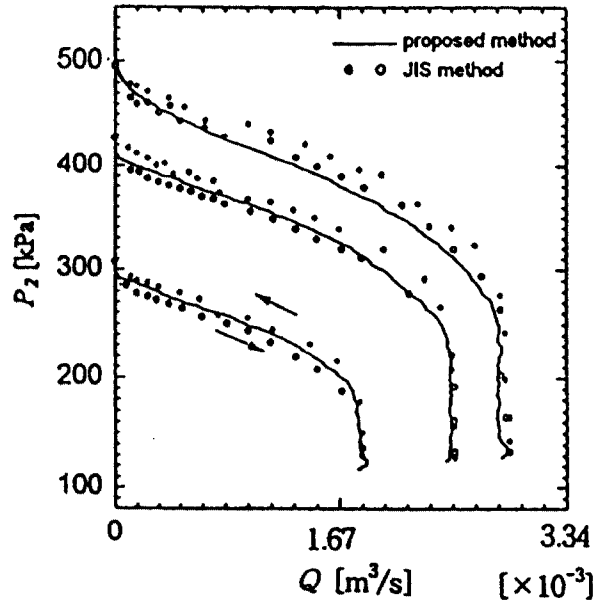


Fig. 4 P-Q characteristics of the reducing valve

하류압을 상승시킨 경우이고, 검은색 점은 감압밸브의 압력조절 손잡이를 풀어서 하류압을 감소시킨 경우의 결과이다. 하류압을 상승시킨 경우와 감소시킨 경우의 결과가 다른 것은 감압밸브에 히스테리시스가 존재한다는 것을 의미한다. 등온화용기를 이용하여 얻어진 결과는 유량계를 이용하여 얻어진 결과의 히스테리시스내에 존재하므로 본 연구에서 사용한 수법에 의하여 공기압 기기의 유량특성을 계측할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 사용한 방법을 이용하는 경우에는 1회의 계측에 의하여 유량특성을 파악할 수 있고, 등온화용기의 체적을 크게 함으로써 대용량의 공기압 기기의 유량을 계측하는 것도 가능하다.

4.2 제어밸브의 유량특성 계측

4.2.1 유량특성 계측방법

Fig. 5는 등온화용기를 이용하여 제어밸브의 유량을 계측하기 위한 실험장치를 나타내고, v 는 제어밸브로의 제어입력을 나타낸다. 유량특성의 계측 방법은 다음과 같다.

- 1) 제어밸브의 상류측 압력용기내의 공급압력을 설정하고 하류측 압력용기내의 압력을 대기압으로 설정한다.
- 2) 제어밸브에 제어전압을 입력한다.
- 3) 솔레노이드밸브에 제어전압을 인가하여 제어밸브를 통과하는 공기를 등온화용기로 공급한다.
- 4) 등온화용기내의 압력이 상류측 압력용기내의 압

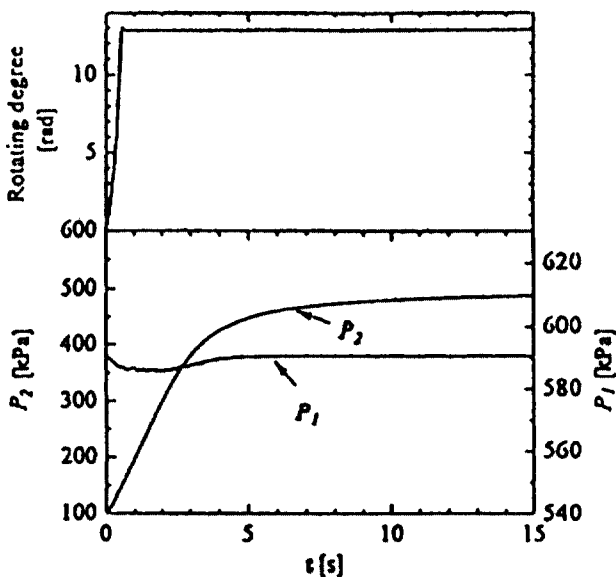


Fig. 3 Pressure response

력에 도달할 때까지 등온화용기내의 압력변화를 계측한 후, 식(2)를 이용하여 유량을 구한다.

실험에 사용되어진 제어밸브는 스폴형 서보밸브이고, 밸브의 제어전압은 0~10[V]이다.(MPYE-5-1/8, Festo co.,)

밸브를 통과하는 공기의 이론적 임계압력비는 0.528이지만, 실제의 임계압력비는 밸브스폴의 형상에 따라서 변화한다. 본 연구에서 사용한 밸브의 임계압력비는 실험에 의하여 0.3이 얻어졌고, 유량과 압력차를 이용하여 밸브의 유효단면적 및 밸브를 통과하는 유량을 산출하는 경우에는 다음의 식을 이용하였다.

$$Q = S_e P_1 \sqrt{273/\theta} \quad (0 < b < 0.3) \quad (3)$$

$$Q = S_e P_1 \sqrt{1 - \left(\frac{x-b}{1-b}\right)^2} \sqrt{\frac{273}{\theta}} \quad (x > b) \quad (4)$$

식(3) 및 (4)에서 S_e 는 밸브의 유효단면적[m²], P_1 은 상류측 압력용기내의 설정압력[Pa], b 는 임계압력비, x 는 P_1 과 등온화용기내의 압력과의 비 P_2/P_1 을 나타낸다.

4.2.2 측정결과와 고찰

Fig. 6은 제어입력을 6.1[V], 6.25[V], 6.5[V]로 설정한 경우의 유량 계측 결과이다. 검은색 점은 유량계를 이용하여 계측한 결과이고, 본 연구에서 이용한 방법에 의하여 얻어진 결과는 선에 의하여 나타내었다. 기존의 방법을 이용한 결과와 본 연구에서의 방법을 이용하여 얻어진 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. ISO표준 유량계측법을 이용하는 경우에는 압력비 P_2/P_1 를 변화시켜가면서 유량을 계측해야하지만, 본 논문의 계측법은 밸브를 통과하는 공기를 등온화용기내에 1회 충전시킴에 의하

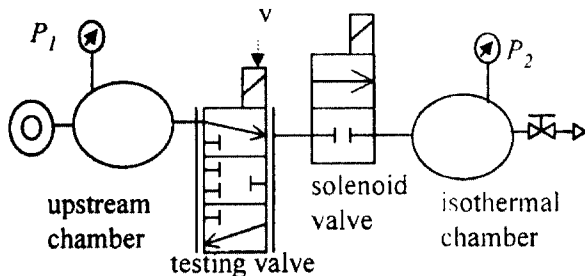


Fig. 5 Experimental apparatus for the flow characteristic measurement of the servo valve

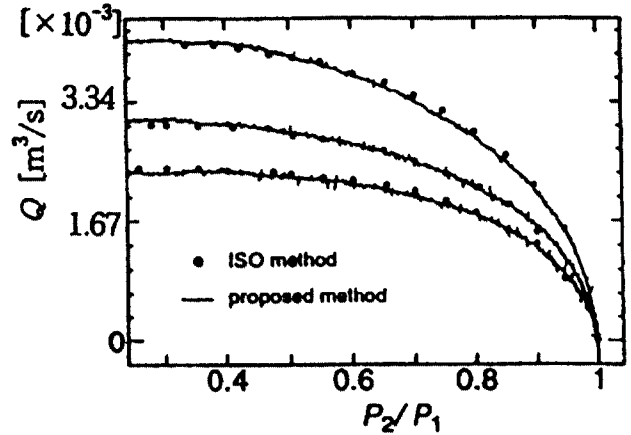


Fig. 6 P-Q characteristics of the servo valve

여 계측이 완료되므로, 신속하게 유량계측을 수행할 수 있다.

5. 제어밸브의 동특성 계측

5.1 등온화용기를 이용한 비정상 유량 계측

공기압 제어밸브의 동특성의 계측은 압축성 유체인 공기의 비정상 유량의 계측이 어렵기 때문에 용이하지 않다. 비정상 유량의 계측을 수행하는 경우에도 유량계를 이용하는 기존의 계측법은 식(3) 및 (4)를 이용하기 때문에 밸브를 통과하는 공기의 온도를 계측해야만 한다. 등온화용기를 이용하는 경우에는 밸브를 통과하는 공기의 온도가 거의 등온 상태로 유지되기 때문에 기존의 방법과 동일한 식(3) 및 (4)를 이용하여도 비정상 유량을 계측할 수 있다. Fig. 7은 동특성을 계측하기 위한 실험장치이다. 계측방법은 다음과 같다.

- 1) 제어밸브의 정적인 유량특성을 계측하고 (Fig. 6), 식(3) 및 (4)를 이용하여 전압으로 주어지는 제어입력과 유효단면적으로 주어지는 밸브스폴의 변위와의 관계를 구한다.(Fig. 8)

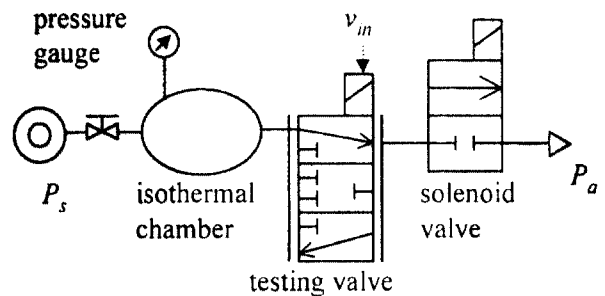


Fig. 7 Experimental apparatus for the dynamic characteristic measurement of the servo valve

- 2) 등온화용기내의 압력을 설정압으로 한 후 체크 밸브를 잠근다. 다음으로, 제어입력을 사인파로 가진하여, 제어밸브의 스톱을 가진한다. 단, 제어밸브로의 입력전압은 밸브가 한 방향으로만 개방되도록 설정해야 한다.(Fig. 7의 경우에는 0~5[V] 사이로 설정해야 한다.)
- 3) 솔레노이드밸브를 여자하여 제어밸브를 통과하는 공기를 대기중으로 방출하면서 등온화용기내의 압력 및 제어밸브로의 제어입력을 측정하고, Fig. 8과 식(3) 및 (4)를 이용하여 제어밸브를 통과하는 비정상유량을 구한다. 단, 식(3) 및 (4)를 이용하는 경우에는 용기내의 온도를 측정할 필요가 있으나, 등온화용기를 이용하므로 용기내의 온도는 측정실내의 온도와 동일하다고 가정한다.

Fig. 9는 제어밸브의 가진 주파수를 100[Hz]로 설정하여 상기 1)~3)의 순서로 서보밸브를 통과하는 유량을 측정한 결과를 나타낸다. Fig. 9에서 위의 그림은 제어밸브로의 제어입력과 전압 v 로 환산한 밸브스풀의 변위 및 등온화용기내의 압력변화를 나타내고, 종축의 왼쪽은 압력, 오른쪽은 전

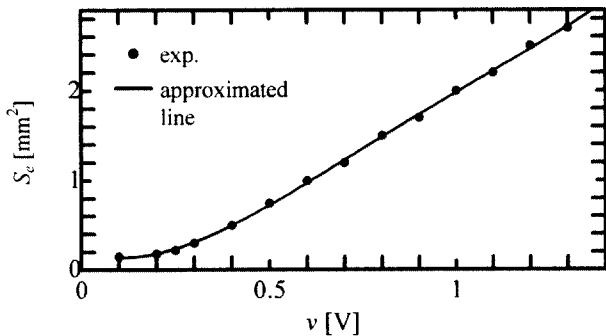


Fig. 8 Relation between effective area and control input of the servo valve

압을 의미한다. 아래의 그림은 제어밸브를 통과하는 유량을 나타내고, Q_s 는 실험에 의하여 측정한 유량, Q_p 는 온도변화를 등온으로 가정하여 수치해석에 의하여 얻어진 유량을 나타낸다. Q_p 와 Q_s 의 계인 및 위상은 잘 일치하지만, 유량곡선의 정점부근에서 약간의 차이가 보여진다. 이 차이는 등온화용기내의 압력변화의 속도가 빨라질 때 용기내의 온도가 약간 변화하기 때문이고, 저주파수로 가진하면 오차가 줄어든다. Fig. 9에서 최대 오차는 5%정도로서 측정의 정밀성에는 약간의 문제가 있지만, 압축성유체의 비정상유량을 측정할 수 있는 용이한 방법이 없다는 사실을 고려하면, 이 정도의

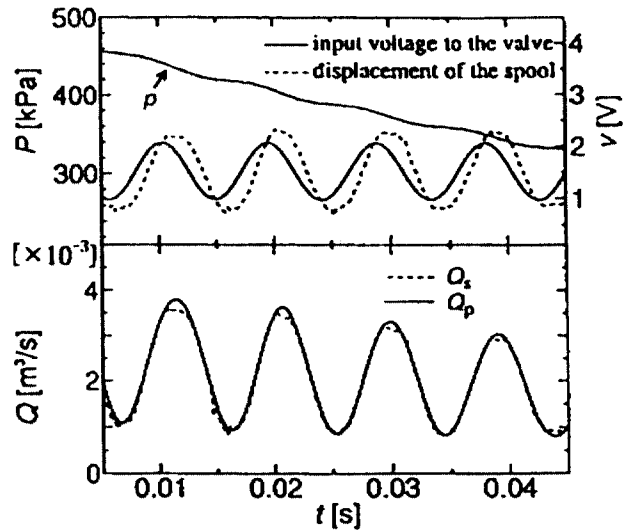


Fig. 9 An example of the measured results of the unsteady flow rate of the servo valve

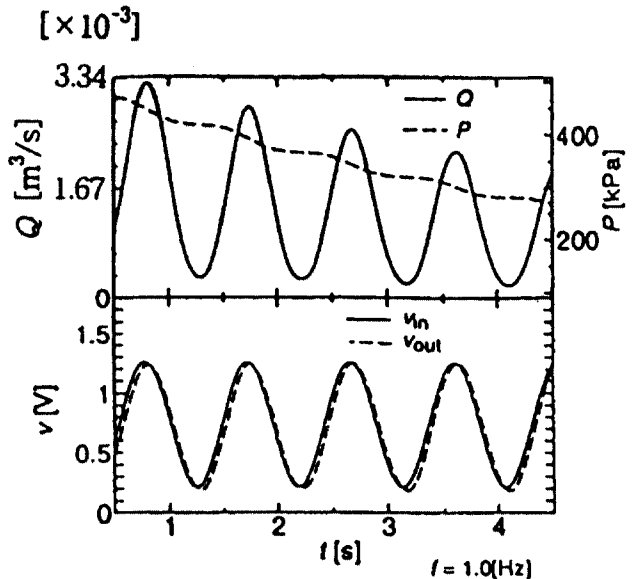


Fig. 10 An example of the measured results of the unsteady flow rate of the proportional control valve

정밀성으로도 실용적으로 사용할 수 있다.

5.2 동특성 측정

실험장치는 Fig. 7과 동일하고, 가진주파수를 변경시켜 가면서 5.1절의 1)~3)의 순서로 제어밸브를 통과하는 비정상유량을 구한다. 다음으로 등온화용기내의 압력과 식(3), (4) 및 제어입력과 유량 단면적으로 주어지는 밸브스풀의 변위와의 관계를

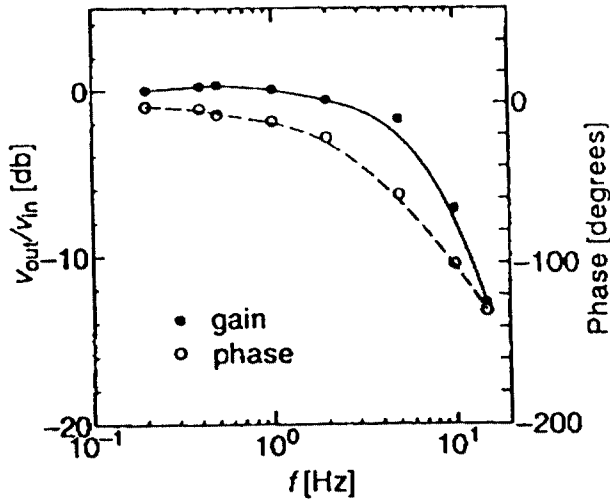


Fig. 11 Bode diagram of the proportional control valve

이용하여 밸브스풀의 변위를 구하고, 제어입력과 밸브스풀의 변위와의 관계에서 제어밸브의 주파수 응답을 구한다. 동특성계측에 사용한 제어 밸브는 스프링 비례밸브이다.(VEA252, SMC co.) Fig. 10은 가진주파수를 1[Hz]로 설정한 경우의 실험결과이다. 위의 그림은 압력 및 유량곡선을 나타내고, 아래의 그림은 위의 그림의 유량곡선으로부터 산출한 제어밸브스풀의 변위 v_{in} 및 제어밸브로의 입력전압 v_{out} 의 파형을 나타낸다. 아래의 그림으로부터 1[Hz]의 가진주파수에서 제어밸브 출력의 위상이 지연되어짐을 알 수 있다.

Fig. 11은 주파수를 변경시켜가면서 Fig. 10과 같은 실험을 반복해서 수행하여 제어밸브의 동특성을 보드선도로 나타낸 결과이다.

6. 결론

본 연구에서는 공기압 기기의 유량특성 및 동특성의 계측법을 제안하였다. 제안한 방법은 용기내의 압력을 등온으로 유지할 수 있는 등온화용기를 이용하여 용기내의 압력변화를 유량으로 환산하는 방법이다.

본 논문에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 등온화용기를 이용한 공기압 유량제어 밸브 및 서보밸브의 입출력특성과 주파수특성의 시험방법을 제안했다.
- 2) 유량계를 이용하는 기존 방법과의 비교에 의하여 제안한 방법의 유효성을 확인했다.
- 3) 본 논문에서 제안한 방법은 유량과 압력을 반복하여 측정할 필요가 없고 용기내의 압력을

측정하여 특성을 계측할 수 있기 때문에 계측법이 간단하고, 계측시간을 단축할 수 있다.

참고문헌

1. JIS B8373, “空氣壓2ポート電磁弁”, 1982
2. DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS6358 “Measurement of fluid flow by means of orifice”, 1981
3. 黒下, 村松, “空氣壓流量比例制御弁の動特性評價法”, 油壓と空氣壓, Vol. 24, No. 4, pp. 74~80, 1993
4. J. S. Jang, T. Kagawa, T. Fujita, 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