

열량형 질량유량계에 대한 압력과 비열 영향

최용문* · 박경암* · 최해만* · 이기성*

The Effects of Pressure and Specific Heat on the Performance of Thermal Mass Flowmeter

Y. M. Choi*, K. A. Park*, H. M. Choi*, and K. S. Lee*

Key Words: Thermal Mass Flowmeter(열량형 질량유량계), Pressure effect(압력 영향), Specific Heat effect(비열 영향)

ABSTRACT

Thermal mass flow meter (TMF) is used measuring the small mass flow rate of gases. Generally, flow rate measuring accuracy of TMF is $\pm 2\%$ of full scale. TMF is manufactured for specified working pressure and specified working gas by customer. If it were applied for different working pressure and gases, flow rate measurement accuracy decreased dramatically. In this study, a TMF tested with three different gases and pressure range of 0.2 MPa to 1.0 MPa. Effect of specific heat cause to increase flow measurement error as much as ratio of specific heat compare with reference gas. Pressure change cause to increase flowrate measurement deviation about -0.2% as the working pressure decreased 0.1 MPa.

1. 서 론

열량형 질량유량계(TMF: thermal mass flow meter)는 기체가 흐르는 주관에 모세관을 부착하고 열선을 감은 형태로 구성되어 있다. 열선의 전 후단에 온도차를 측정하는 센서를 설치하여 열선에 가해진 열량을 일정하게 유지할 때 온도차와 기체 유량과의 관계를 이용하여 유량을 측정한다. TMF는 각종 기체 유동을 측정과 혼합 기체 제조 및 기체 유량을 제어하는데 유용하다. 따라서 TMF는 미소 유량 제어에 주로 사용되고 있으며 반도체 제조 공정의 공정 가스 유량 제어와 원자력 발전소의 누설 가스 유량 측정 및 환경 측정 기기의 가스 유량 측정에 대량으로 사용되고 있다.

TMF의 측정 정확도는 제조회사에 따라 다르지만 일반형은 약 $\pm 2\%$ 이고 정밀형은 $\pm 1\%$ 이내이다.

국내에서 사용되는 대부분의 TMF는 대부분 수입 완제품의 형태로 도입되어 사용되고 있으며 특히 반도체 제조 장비에는 장비의 일부로 장착되어 도입되고 있고 소량이 국내에서 조립 생산되고 있다. TMF는 대부분 0°C 에서 20°C 까지 온도 범위에서 사용되며 일반적인 사용 압력 범위는 0.2 MPa에서 0.3 MPa 이다.

일반적으로 TMF는 제조회사에서 사용 기체와 사용 압력에 맞추어 생산되고 있다. 즉 TMF 내부의 오리피스 직경이나 층류 격자를 사용 조건에 맞추어 선정하여 조립하는 것이다. 만약 실제 사용 기체가 제조 당시의 기체와 다른 경우에는 공기의 정압 비열을 기준으로 정압 비열비를 이용하여 계산된 보정 계수를 사용하도록 권장하고 있다. 그러나 정압 비열비를 사용

* 한국표준과학연구원

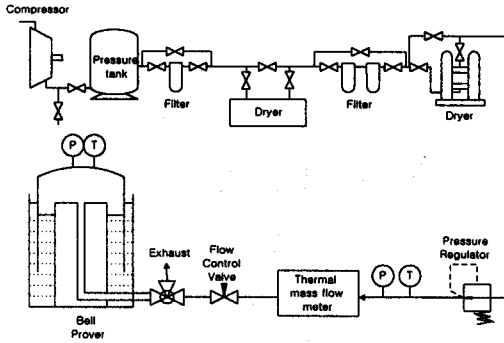


Fig. 1 Schematic diagram of test system

할 경우에는 약 2-3%의 유량 측정 오차가 추가로 발생하는 것으로 제조회사에서는 주장하고 있다. 또한 사용 압력에 관해서는 TMF 전 후단의 허용 최대 압력 차이만을 제시하고 있으며 압력 변화에 의한 영향에 대해 구체적인 자료는 발표되어 있지 않다.

본 연구에서는 제조할 때 압력이 1 MPa이고 사용 기체가 질소로 설정된 TMF를 사용하여 기체 종류를 공기, 알곤 및 질소로 변화시켜 비열 변화에 의한 유량 측정 변화를 실험하였다. 또한 사용 압력을 변화시켜 유량 측정 정확도를 확인하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

TMF 특성 실험에 사용된 실험 장치는 현재 국가 표준 기체 유량 장치로 사용되고 있는 벨푸루버(Bell Prover) 시스템이다. 실험에 사용한 TMF의 유량 측정 범위는 2-20 L/min 이다.

Fig. 1에서 TMF 전단에는 압력 조절 밸브, 온도와 압력을 측정하기 위한 센서가 설치되며 후단에는 실험 유량을 조절하기 위한 니들 밸브가 설치되어 있다. TMF를 통과한 기체는 벨푸루버로 수집된다. 벨푸루버는 내통과 외통으로 구성되며 사이공간은 기름으로 채워져 기체 누설을 방지하게 되어 있다.

내통을 통해 유량계를 통과한 기체가 외통에 수집되면 외통은 상승한다. 외통에는 정밀 리니어 스케일이 부착되어 있어 2 μ m 분해능으로 외통의 상승 높이를 측정한다. 외통의 단면적은 내경 마이크로미터로 단면적을 측정하였다. 따라서 기체 수집 시간과 외통 내부 기체의 압력 및 온도를 측정하면 기체의 부피 유동율을 결정할

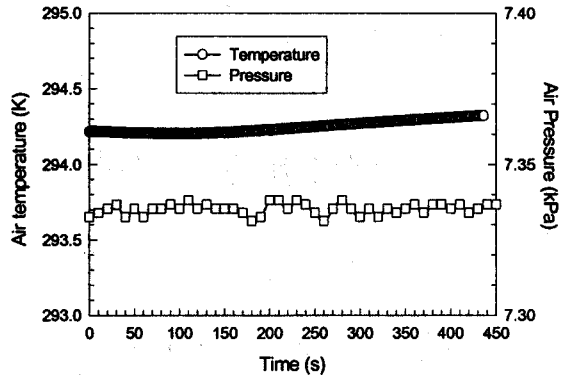


Fig. 2 Temperature and pressure stability of test system

수 있다. 벨푸루버는 국가 기체 유량 표준기로 사용되고 있으며 유량 측정 불확도는 $\pm 0.2\%$ 이다.

실험에 사용한 기체는 공기, 알곤 및 질소이다. 공기는 공기 압축기를 사용하여 0.8 MPa로 저장조에 저장된 후 필터와 제습기를 거쳐 시험관으로 유입된다. 알곤과 질소는 실린더 형태로 공급되는 표준 가스를 사용하였으며 순도는 99.99%이다.

실험 압력은 0.2-0.8 MPa로 변화시켰다. 실험 압력 조절은 TMF 전단에 설치된 압력 조절 밸브를 사용하였으며 TMF 상류의 압력계를 기준으로 하였다. TMF 하단에는 니들 밸브를 설치하여 유량을 설정하고 TMF 전후단에 과도한 압력차가 발생하지 않도록 하였다.

실험에 사용한 압력계와 온도계 및 TMF의 0-5V 신호는 정밀 전압계(HP3457A)를 사용하여 컴퓨터로 수집하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 실험 장치 특성 실험

Fig. 2는 실험에 사용한 시스템의 온도와 압력 안정성을 실험한 결과이다. 온도와 압력은 TMF 전단에서 측정하였으며 온도는 평균 293.2 K이었으며 표준편차는 0.2 K이다. 압력은 7.338 kPa이며 표준편차는 0.003 kPa이다.

본 연구에서 실험한 온도 영역은 온도 안정성을 확인한 실험한 영역과 일치하지만 압력 안정

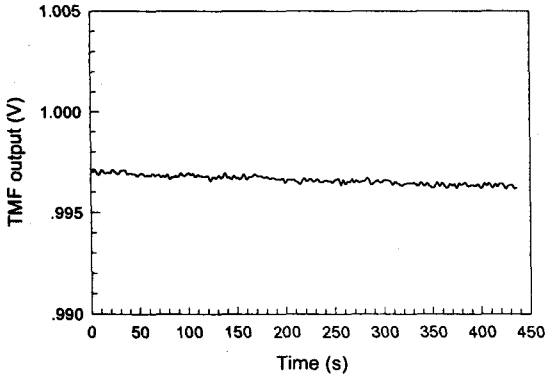


Fig. 3 Output voltage from TMF

성은 낮은 영역에서 실험하였다. 그 이유는 일반적으로 압력계와 압력 조절기의 특성은 낮은 사용 영역에서 측정 정확도가 떨어지기 때문이다. 따라서 낮은 압력 영역에서 압력 측정 표준편차가 0.003 kPa이므로 본 연구에서 실험한 압력 영역에서는 상대적으로 압력 측정 정확도는 향상된다.

Fig. 3은 일정한 유량에서 TMF의 출력을 측정하는 것이다. 실험 시간은 440 s이며 TMF의 출력은 0.997 V에서 0.996 V로 변화하고 있다. 실제 실험에서는 벨푸루버에 기체를 수집하는 시간이 약 120 s 이내이므로 위의 결과보다는 작은 변화가 발생할 것으로 판단된다. 출력 평균은 0.9965 V이며 표준편차는 ± 0.0004 V이다. 온도, 압력, 수집 시간, 벨 푸루버 단면적, 및 전압 측정 불확도를 종합하여 연구에서 실험한 결과의 유량 측정 불확도는 $\pm 0.2\%$ 이내임을 확인하였다.

3.2. 압력과 비열에 의한 특성 변화 실험

일반적으로 TMF의 사용조건은 제조회사에서 제작할 당시의 압력 범위에서 사용하도록 되어 있으며 전후 압력차를 약 0.05 MPa 미만으로 제한하고 있다. 이는 사용압력이 변화되고 전후 압력차가 과도하게 발생하면 내부에 있는 층류 소자에서 기체 흐름이 난류로 변화되어 유량을 측정하는 모세관과 주관의 선형비례가 성립하지 않기 때문이다. 따라서 사용압력이 변화되면 내부의 층류소자를 적합한 것으로 교체하도록 권유하

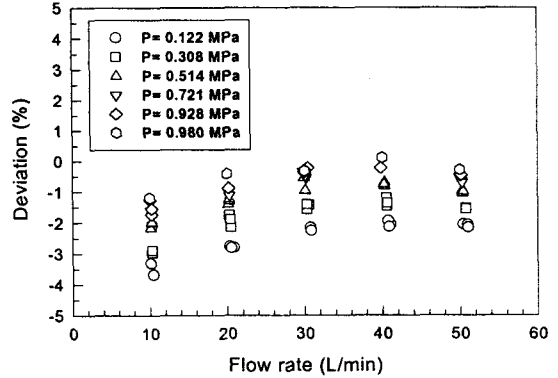


Fig. 4 Test results of TMF with nitrogen

고 있다.

본 실험에서는 압력 변화에 의한 TMF의 특성 변화를 확인하기 위하여 공기, 질소, 및 알곤을 사용하여 실험하였다.

Fig. 4는 질소를 사용하여 TMF 전단의 압력을 0.1-0.98 MPa로 변화시켜 실험한 결과이다. 실험은 설정 압력과 유동율에서 3회 반복하였다. Fig. 4의 실험 결과 중에서 0.98 MPa에서 결과는 제조회사에서 제공한 결과이다. 실험 압력 0.12 MPa에서 TMF의 유량 측정 편차는 유량 범위 10-50 L/min에서 평균 -2.5% 이내이다. 압력이 증가할수록 측정 편차는 감소하여 실험 압력 0.928 MPa에서는 -0.72% 로 제조회사에서 제공한 결과 -0.5% 와 일치한다.

Fig. 5는 질소를 사용하여 실험한 TMF의 유량 측정 편차를 압력에 관해 정리한 것이다. 압

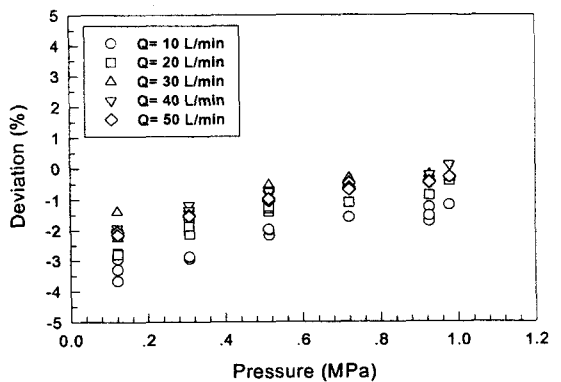


Fig. 5 Pressure dependency of TMF with nitrogen gas

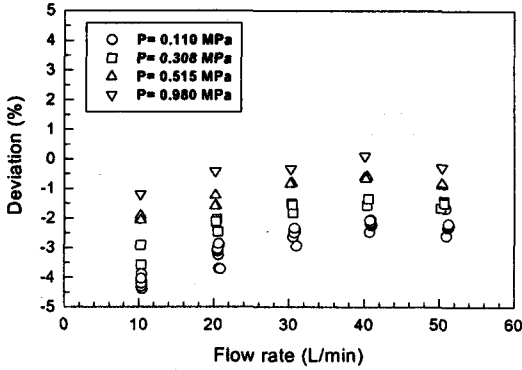


Fig. 6 Test results of TFM with air

력이 제조 압력 보다 0.1 MPa 변화되면 유량 측정 편차는 -0.2% 변화되며 측정 유량 범위가 다르더라도 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 6은 질소와 정압 비열이 비슷한 공기를 사용하여 동일한 실험을 반복한 결과이다. 실험 압력은 0.11 MPa에서 0.52 MPa까지이며 0.98 MPa에서 측정한 데이터는 제조회사에서 질소를 사용하여 측정한 값이다. 일반적으로 사용되는 질소의 정압 비열은 28.98 J/mole K 이고 공기의 정압 비열이 29.13 J/mole K 이므로 정압 비열 차이에 의한 영향은 나타나지 않으며 압력 변화에 대한 유량 측정 편차의 변화는 질소와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 동일한 실험을 알곤을 사용하여 수행한 결과이다. 압력 범위는 공기를 사용한 경우와 동일하다. 알곤 압력이 0.52 MPa 일 때 유량 측정 편차는 공기로 실험한 경우보다 약 -27% 낮은 값을 나타낸다. 일반적으로 사용되는 알곤의 정압 비열은 20.83 J/mole K이고 공기의 정압 비열 보다 -28% 낮다. 따라서 알곤으로 실험한 경우에 발생하는 유량 측정 편차는 정압 비열 변화에 의한 것이다.

TMF 제조회사에서는 일반적으로 두가지 방법으로 정압 비열 변화에 의한 유량 측정 정확도 변화를 보정하도록 권고하고 있다. 첫째는 제조할 때 사용한 기체와 실제 사용 기체의 정압 비열비를 사용하는 것이다. 두 번째는 열전달 관계식을 이용하여 K factor를 사용하는 것이다. 두 방법은 실제 사용 가스가 유독성 가스이어서 직접 사용 가스로 교정할 수 없거나 실제 가스로

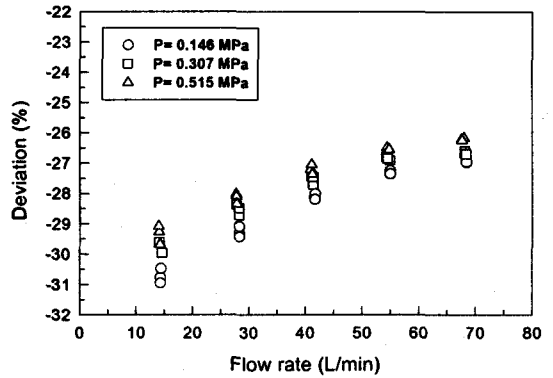


Fig. 7 Test results of TFM with argon

교정되지 않은 열량형 질량 유량계를 사용할 때 적용한다. 기본 관계식은 다음 식(1)과 같다.

$$Q_1/Q_2 = K_1/K_2 \quad (1)$$

여기서, Q는 부피 유량이고 K는 K factor이며 첨자 1은 실제 사용 가스를 표시하고 첨자 2는 기준 가스이며 일반적으로 질소를 사용한다.

모세관에 대해서 열역학 법칙을 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$H = m c_p \Delta T/N \quad (2)$$

식 (2)에서 H는 모세관에 가한 열량이며, m은 가스의 질량 유량, c_p 는 정압 비열, ΔT 는 가열 코일 전후의 온도차, N은 가스의 분자구조에 따른 보정 계수이며 다음 Table 1과 같다.

여기서 모세관을 흐르는 기체의 질량 유량은,

Table 1 Values of correction factor, N

Number of Atoms in the gas molecular	N
Monatomic	1.040
Diatomic	1.000
Triatomic	0.941
Polyatomic	0.880

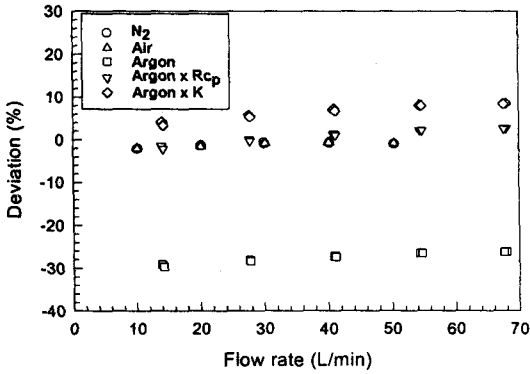


Fig. 8 Specific heat dependency of TMF

$$m = \rho Q \quad (3)$$

이고, ΔT 는 유량계에서 출력되는 전압에 비례하므로 다음 식 (4)와 같은 관계가 성립된다.

$$\Delta T = a E \quad (4)$$

여기서 a 는 비례 상수이다. 식 (3)과 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면,

$$Q = \frac{b N}{\rho c_p} \quad (5)$$

여기서, $b(=H/aE)$ 는 유량계의 출력 전압이 일정하다면 상수이다. 따라서 식 (1)과 식 (5)는 식 (6)으로 정리된다.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{K_1}{K_2} = \left(\frac{N_1}{\rho_1 c_{p1}} \right) / \left(\frac{N_2}{\rho_2 c_{p2}} \right) \quad (6)$$

위의 식 (6)을 사용하여 질소에 대한 알곤의 상대 K 값은 1.457이며, 알곤의 질소에 대한 정압 비열비(R_{cp})는 1.391이다.

Fig. 8에 0.52 MPa에서 실험한 모든 기체의 실험 결과를 나타내었다. 알곤에 대해서는 질소

에 대한 상대 K값을 사용하여 정압 비열 변화를 보정한 결과와 정압 비열비로 보정한 결과를 나타내었다. 상대 K값으로 보정한 결과는 평균 +6.5% 정도 높은 편차를 나타내고 있으며 정압 비열비를 사용하여 보정한 결과는 평균 +0.9% 정도의 편차를 나타내고 있다.

5. 결 론

열량형 질량 유량계(TMFC: thermal mass flow meter)를 사용하여 사용 압력을 0.1 MPa에서 0.9 MPa로 변화시키고 사용 기체를 공기, 질소 및 알곤으로 변화시켜 압력 변화와 비열 변화에 의한 유량 측정 특성을 측정하였다.

TMF 사용 압력이 제조 당시의 압력인 1.0 MPa 보다 0.1 MPa 감소하면 유량 측정 편차는 -0.2% 발생함을 확인하였다. 따라서 TMF를 제조 당시에 설정 압력과 크게 차이가 있는 압력에서 사용할 경우에는 적절한 교정을 하여 사용해야 한다.

사용 기체를 변화시킨 결과에 의하면 정압 비열이 제조 당시의 기체인 질소와 큰 차이가 없는 공기인 경우에는 유량 측정 편차나 압력 변화에 의한 편차 변화가 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 알곤인 경우에는 정압 비열비에 해당하는 약 27%의 유량 측정 편차가 발생하였다. 그러므로 실제 사용 기체가 유독하거나 사용 기체를 변화 시킬 경우에는 가능한 정압 비열이 유사한 기체를 사용하여 교정하여 사용하는 것이 바람직하다.

재교정을 하지 않고 제조 당시의 기체와 정압 비열이 다른 기체를 사용할 경우에는 두 기체의 정압 비열비를 사용하여 측정된 유량값을 보정하여 사용하면 유량 측정 불확도 $\pm 3.5\%$ 이내에서 사용할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Brooks Instrument, Mass Flow Meter Instruction manual, 1996
- (2) Sierra Instruments, Mass Flow Meter Instruction Manual, 1993
- (3) MKS, Thermal Mass Flowmeter Manual