

열량형 질량 유량계의 성능 평가

최용문* · 박경암* · 윤복현** · 장 석** · 최해만* · 이생희*

A Study on the Performance of Thermal Mass Flowmeter

Y. M. Choi, K.-A Park, B. H. Yoon, S. Jang, H. M. Choi and S. H. Lee

Key Words: thermal mass flow meter(열량형 질량 유량계), mass flow controller(질량 유동 조절기), gas properties(기체 물성), response time(반응 시간)

Abstract

Thermal mass flow meter(TMf) and thermal mass flow controller(MFC) were used to measure and to control the mass flow rate of gases. TMf and MFC were designed for specified working pressure and gas. For the case of different working pressure and gases, the flow rate measurement accuracy decreased dramatically. In this study, a TMf and MFC was tested with three different gases and pressure range from 0.2 MPa up to 1.0 MPa. Effect of specific heat causes to increase flow measurement error as much as ratio of specific heat compared with reference gas. Changing of pressure causes to increase flow rate measurement error about -0.2% as the working pressure decreased 0.1 MPa. Response time of MFC was below 3.12 s for the case of increasing of flow rate. But the response time was increased up to 6.92 s for the case of decreasing of flow rate. When the solenoid valve was fully closed, a initial delay time of output of MFC was increased up to 1.36 s.

1. 서론

열량형 질량유량계(TMf: thermal mass flow meter)는 기체가 흐르는 주관에 모세관을 부착하여 열선을 감고 그 전후 단에 온도를 측정하는 센서를 설치한 형태로 구성되어 있다. 열선에 공급되는 열량을 일정하게 유지할 때 기체 유량에 따라 변하는 온도차를 측정하여 기체 유량을 측정한다. MFC(mass flow controller)는 TMf 하단에 유량 조절이 가능한 솔레노이드 밸브나 피에조 밸브를 설치하여 유량 조절과 측정을 동시에 수행한다. 따라서 TMf와 MFC는 미소 유량 제어에 주로 사용되고 있으며 반도체 제조 공정의 공정

가스 유량 제어와 원자력 발전소의 누설 가스 유량 측정 및 환경 계측 기기의 가스 유량 측정에 대량으로 사용되고 있다. TMf와 MFC의 측정 정확도는 제조회사에 따라 다르지만 일반형은 약 $\pm 2\%$ FS 이고 정밀형은 $\pm 1\%$ FS 이내이다⁽¹⁾.

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

일반적으로 TMf와 MFC는 제조회사에서 사용 기체와 사용 압력에 맞추어 생산되고 있다. 즉 TMf와 MFC 주관에 설치되는 오리피스 직경이나 층류 발생기를 사용 조건에 맞추어 선정

* 한국표준과학연구원

** 목포대학교

하여 조립하는 것이다. 만약 실제 사용 기체가 제조 당시의 기체와 다른 경우에는 질소나 공기의 정압 비열을 기준으로 정압 비열비를 이용하여 계산된 보정 계수를 사용하도록 권장하고 있다. 그러나 정압 비열비를 사용할 경우에는 약 2-3%의 유량 측정 오차가 추가로 발생하는 것으로 제조회사에서는 주장하고 있다. 또한 TMF와 MFC는 내부에 증류 발생기를 사용하기 때문에 많은 압력 손실이 발생되며 일반적으로 전후단 압력차가 45 kPa 이상일 때 흐름이 발생된다고 알려져 있다. 사용 압력에 관해서는 TMF 전 후단의 허용 최소 압력 차이만을 제시하고 있으며 압력 변화에 의한 영향에 관해 구체적인 자료는 발표되어 있지 않다.^(2,4)

MFC는 TMF 하단에 밸브가 추가된 형태이며 외부에서 보통 0-5 V 입력을 가하여 밸브의 개폐 정도를 조정한다. 반도체 제조 공정과 같은 미소 기체 유량을 조정할 경우에는 밸브의 과도 특성이 중요하다. 즉, 외부에서 가한 입력에 따라 밸브가 반응하여 실제 흐르는 유량이 변하는 응답 시간이 중요한 것이다.

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 확인하기 위한 실험을 하였으며 사용 압력도 0.1 MPa에서 0.9 MPa로 변화시켜 유량 측정 정확도를 확인하였다.

MFC의 사용 목적은 일반적으로 유량 제어이므로 밸브의 반응 시간을 확인하기 위한 실험을 열선유속계를 사용하여 수행하였다.

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 5-50 L/min 이다.

Fig. 1에서 TMF 전단에는 압력 조절 밸브, 온도와 압력을 측정하기 위한 센서가 설치되며 후단에는 실험 유량을 조절하기 위한 니들 밸브가

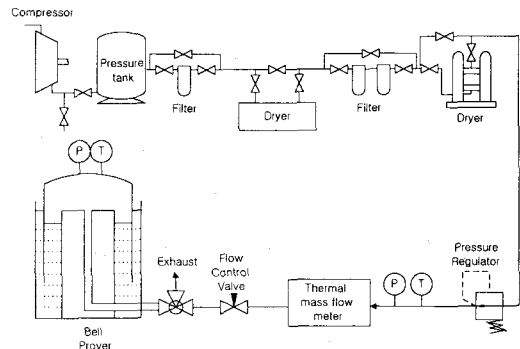


Fig. 1 Schematic diagram of test system

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 선형자가 부착되어 있어 2 μm 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 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 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.

MFC의 밸브 반응 시간과 과도 현상을 확인하기 위하여 하류 측에 열선유속계 센서를 설치하였다. 사용한 열선유속계는 TSI사의 IFA300으로 1차원 유속을 측정하는 I형 센서를 사용하였다.

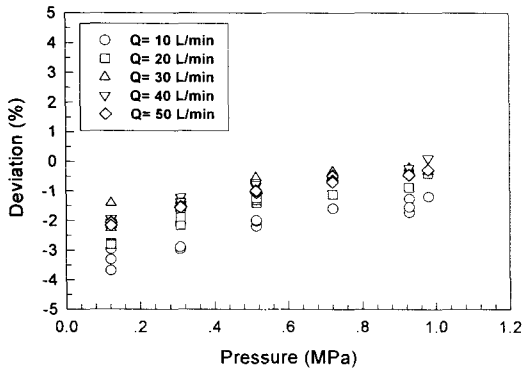


Fig. 2 Pressure dependency of TMF with nitrogen

MFC 밸브에 입력 신호로 0-5 V를 가한 후 MFC의 지지값과 열선유속계의 출력은 디지털 오실로스코프를 사용하여 컴퓨터로 수집하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

먼저 실험에 사용한 시스템의 온도와 압력 안정성을 실험하였다. 시스템에 일정한 유량을 흘리면서 온도와 압력을 TMF 전단에서 측정하였으며, 측정된 온도는 평균 293.2 K이었으며 표준편차는 0.2 K이다. 압력계와 압력 조절기의 안정성을 확인하기 위하여 상대적으로 정확도가 떨어지는 낮은 압력 영역인 7.338 kPa에서 실험하였는데 표준편차는 0.003 kPa이다.

시스템에서 발생시키는 유동율의 안정성을 확인하기 위하여 일정한 유량에서 TMF의 출력을 측정하였다. 유동률은 10 L/min이며 실험 시간 120 s일 때 TMF의 출력은 평균 0.9965 V이며 표준편차는 ± 0.0004 V이다. 온도, 압력, 수집 시간, 밸 푸루버 단면적, 및 전압 측정 불확도를 종합하면 유량 측정 불확도는 $\pm 0.21\%$ 이다.

3.1 압력에 의한 특성 변화 실험

일반적으로 TMF의 사용조건은 설계된 압력 범위에서 사용하도록 되어 있으며 전후 압력 차가 과도하게 발생하지 않도록 하고 있다. 이는 사용 압력이 변화되고 전후 압력 차가 과도하게 발생하면 내부에 있는 층류 소자에서 기체 흐름이 난류로 변화되어 유량을 측정하는 모세관과

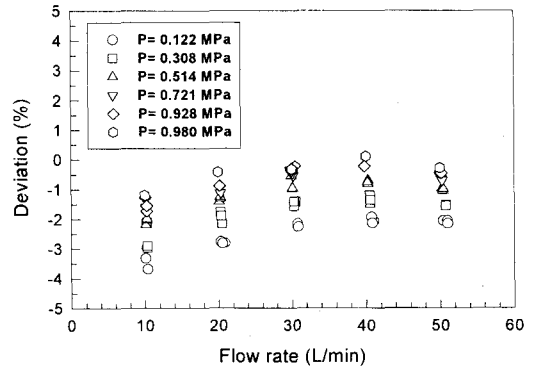


Fig. 3 Test results of TMF with nitrogen

주관의 선형비례가 성립하지 않기 때문이다. 따라서 사용압력이 변화되면 내부 층류 소자를 적합한 것으로 교체하도록 권유하고 있다. 본 실험에서는 압력 변화에 의한 TMF의 특성 변화를 확인하기 위하여 질소를 사용하여 실험하였다.

Fig. 2는 질소를 사용하여 TMF 전단의 압력을 0.1-0.98 MPa로 변화시켜 실험한 결과이다. 실험은 설정 압력과 유동율에서 3회 반복하였다.

Fig. 2의 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.

현재까지 사용 압력 변화에 의한 측정 편차를 보정할 방법은 제시되지 않고 있으나 본 실험의 결과로는 사용 압력이 제조 압력보다 0.1 MPa 감소하면 유량 측정 편차는 -0.2% 변화되며 측정 유량 범위가 다르더라도 유사한 경향을 나타내고 있다. 일반적인 보정 방법을 확인하기 위해서는 보다 다양한 TMF에 대한 데이터를 확보하는 것이 바람직하다.

3.2 비열에 의한 특성 변화 실험

TMF에 대한 비열 특성 실험을 하기 위하여 사용 기체를 질소, 공기 및 알곤을 사용하여 실험하였다. Fig. 3은 질소를 사용하여 실험한 TMF의 유량 측정 편차를 압력에 관해 정리한

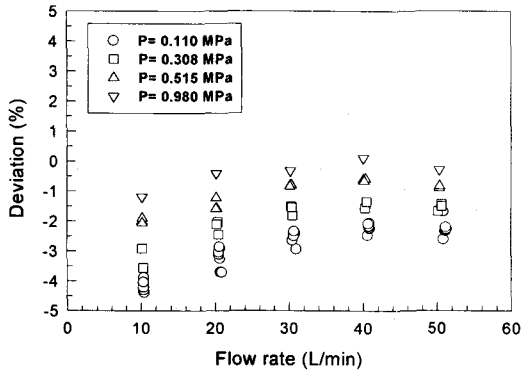


Fig. 4 Test results of TMF with air

것이다. Fig. 3에서 유량이 감소하면 측정 편차가 음의 방향으로 커지는 현상이 나타나는데 이는 TMF에 설치된 영점과 기울기 조정 저항을 미세 조절하여 유량에 관계없이 일정하게 조정할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 TMF의 특성을 확인하기 위하여 별도의 조정을 하지 않았다. Fig. 4는 질소와 정압 비열이 비슷한 공기를 사용하여 동일한 실험을 반복한 결과이다. 실험 압력은 0.11 MPa에서 0.52 MPa까지이며 0.98 MPa에서 측정된 데이터는 제조회사에서 질소를 사용하여 측정된 값이다. 일반적으로 사용되는 질소의 정압 비열은 28.98 J/mole K 이고 공기의 정압 비열이 29.13 J/mole K이므로 정압 비열 차이에 의한 영향은 거의 나타나지 않으며 압력 변화에 대한 유량 측정 편차의 변화는 질소와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5는 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 제조할 때 사용한 기체와 실제 사용 기체의 정압 비열비를 사용하여 실제 사용 가스가 유독성 가스이어서 직접 사용 가스로 교정할 수 없거나 실제 가스로

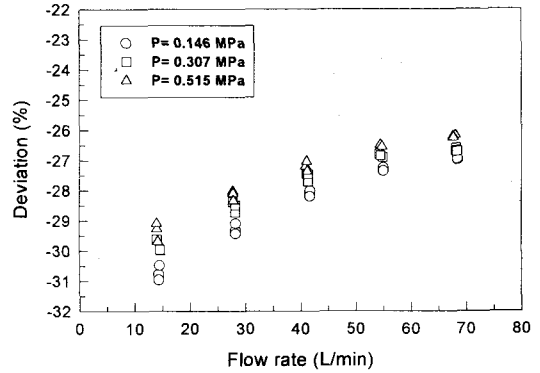


Fig. 5 Test results of TMF with argon

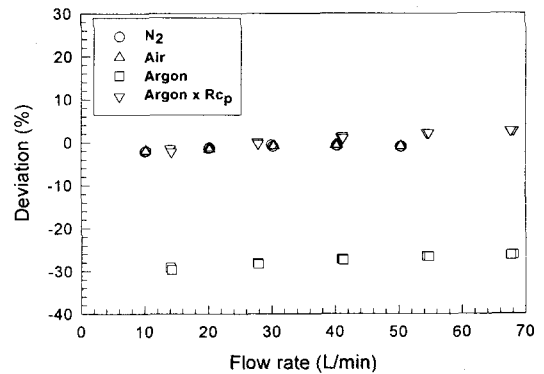


Fig. 6 Specific heat dependency of TMF(0.52 MPa)

교정되지 않은 열량형 질량 유량계를 사용할 때 적용한다. 알곤의 질소에 대한 정압 비열 비(R_{Cp})는 1.391이다.

Fig. 6에 관내 압력이 0.52 MPa인 상태에서 실험한 모든 기체의 실험 결과를 나타내었다. 알곤에 대해서는 질소에 대한 정압 비열비로 보정한 결과를 동시에 나타내었다. 정압 비열비를 사용하여 보정한 결과는 평균 +0.9% 정도의 편차를 나타내고 있다.

3.3 MFC 반응 특성 실험

MFC는 TMF에 전자 제어 밸브가 조합된 상태로 사용되는데 미소 기체 유량을 제어할 수 있는 효과적인 유량 제어 장치이다. 실험에 사용된 MFC에는 솔레노이드형의 밸브가 부착되어 있고 외부에서 0-5 V 입력을 가해 유량을 제어한다. MFC의 순간 반응 특성은 크게 3가지로 볼 수 있는데, 입력 신호와 MFC 유량 지시값 변화 및

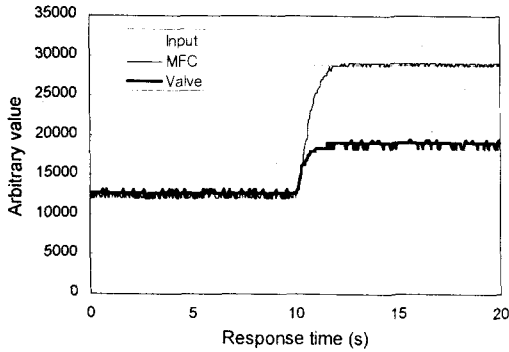


Fig. 7 Response of MFC, flow rate=20→100%

밸브 제어 특성이다. 입력 신호의 반응 특성은 전원부의 특성이므로 크게 중요하지 않지만 안정되고 빠른 반응 특성을 갖는 전원 공급기가 필요한 것은 사실이다.

본 실험에서 중점적으로 측정된 것은 MFC의 유량 지시값 변화와 밸브의 반응 특성이다. MFC 유량 지시값은 보통 0-5 V 출력이며 센서부와 내부 전자 회로의 반응 속도에 따라 변하며 일부 제품에서는 지시부의 반응 속도를 목적에 맞게 변화시킬 수 있도록 하고 있다. 따라서 MFC의 응답 특성을 대표하는 값은 밸브의 응답 특성인 것이다. 밸브의 응답 특성을 확인하기 위하여 MFC 후단에 열선 유속계를 설치하였다. 사용된 열선 유속계의 직경은 $5\mu\text{m}$ 이며 다른 신호와 함께 40 ms 간격으로 데이터를 수집하였다. 제조 회사에서 제시하는 밸브의 응답 속도는 일반적으로 0-100% 유량 변화에서 3초 이내이다.

Fig. 7에 실험한 결과 중에 대표적인 경우로 선정된 20-100%로 유량이 증가할 때 외부 입력 신호, MFC 지시 값, 및 밸브 반응 시간을 나타내었다. 외부 입력 신호는 1 V에서 5 V로 변화시켰는데 약간의 흔들림 외에는 매우 안정된 변화를 나타내고 있으며 변화 시간은 약 80 ms 이다. MFC 지시값의 변화 시간은 2초이며 초기에 80 ms의 지연이 나타나며 외부 입력 신호에 잘 반응함을 알 수 있다. 밸브의 반응 시간은 1.68 초로 MFC 지시값의 변화 시간보다 약간 빠르며 초기 지연 시간은 역시 80 ms 이다.

Fig. 7에서 일부 제조 회사에서 제시한 큰 유량 증가가 있을 때 나타나는 불안정한 유량의 과도 증가 현상(over shoot)은 보이지 않았다. 동일한 실험을 유량이 증가하는 여러 가지 경우에 대해

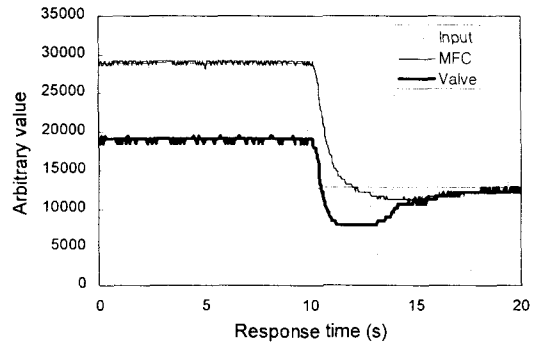


Fig. 8 Response of MFC, flow rate=100→20%

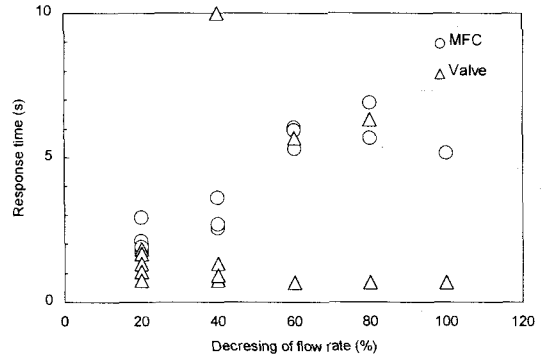


Fig. 9 Response time of MFC: all case of decreasing of the flow rate

실험하였으나 밸브의 반응 시간은 1.92 초 이내였으며 MFC 출력의 반응 시간은 3.12 초 이내이며 과도 증가 현상은 관찰하지 못하였다.

Fig. 8은 100-20%로 유량이 감소하는 경우에 대한 실험 결과이다. 외부 입력 신호의 반응 특성은 Fig. 7과 동일하다. MFC 출력과 밸브 응답 특성은 각각 초기에 실제 유량보다 낮은 과도 특성(under shoot)을 나타내고 있다. MFC 출력은 과도 특성이 안정되기까지 6.92 초 걸리며 밸브의 안정 시간은 6.32 초이다.

이와 같은 과도 현상은 유량이 감소하는 경우에 일부 유량 변화 영역에서 관찰되었으며 Fig. 9에 MFC와 밸브의 반응 시간을 나타내었다. Fig. 9에서 유량 감소율이 40% 이상인 경우에는 실제 유량 보다 낮은 유량이 지시되는 과도 특성이 관찰되었다. 그러나 유량 변화가 40% 이상이라도 임의의 유량에서 0%로 유량이 변하는 경우에는 밸브의 응답 시간은 0.68 초 이내로 빠른 응답 속도를 나타냈으나 MFC 출력의 응답 시간

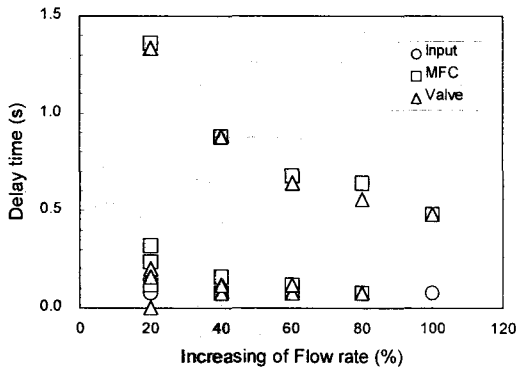


Fig. 10 Initial delay time of MFC

은 크게 나타났다. 또한 유량 변화가 20%인 경우에는 MFC 지시값과 밸브의 반응 시간이 2.92초 이내이며 유량 증가시의 특성과 비슷하다.

Fig. 7에서 세 가지 신호의 초기 지연 시간이 약 80 ms로 나타났는데 유량이 감소하는 경우에는 모든 실험한 경우에 세 가지 신호의 지연 시간은 0.5 초 이내로 측정되었다.

유량이 증가하는 경우의 결과는 Fig. 10과 같이 MFC의 지시값과 밸브의 초기 지연 시간이 유량 증가 20%일 때 최대 1.36초로 측정되었다. 다른 유량 변화 영역에서도 같은 현상이 관찰되었는데 초기 유량이 0%이었다가 다른 유량으로 변화하는 경우이다. 즉, 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 열릴 때 걸리는 초기 작동 시간이 밸브가 열린 상태에서 다른 상태로 변화할 때 걸리는 시간보다 많이 걸리는데 이는 밸브의 초기 구동 마찰력 때문으로 생각된다. 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 유량 증가량이 커질 수록 지연 시간이 짧아지는 이유는 솔레노이드 밸브에 가해지는 전압이 유량 증가량이 클수록 증가하여 초기 작동 힘이 크기 때문이라고 생각된다.

4. 결론

열량형 질량 유량계와 MFC를 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 측정하고 반응 시간을 측정하였다.

TMF 사용 압력이 제조 당시의 압력인 1.0 MPa 보다 0.1 MPa 감소하면 유량 측정 편차는 -0.2% 발생

함을 확인하였다. 따라서 TMF를 제조 당시에 설정 압력과 크게 차이가 있는 압력에서 사용할 경우에는 적절한 교정을 하여 사용해야 한다.

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 질소에 대한 정압 비열비에 해당하는 약 27%의 유량 측정 편차가 발생하였다. 그러므로 사용 기체가 유독하여 사용 기체로 교정할 수 없는 경우에는 가능한 정압 비열이 유사한 기체를 사용하여 교정하여 사용하는 것이 바람직하다.

MFC의 반응시간을 측정한 결과 유량이 증가할 경우에는 과도 증가 응답 특성이 발견되지 않았으나 감소할 경우에는 과도 감소 응답 특성이 관찰되었다. 유량이 증가할 때 응답 속도는 밸브보다 MFC 지시값의 응답 시간이 약간 느렸으며 최대 3.12 초로 제조회사의 실험 값과 일치하였다. 그러나 유량이 감소할 때 응답 시간은 최대 6.92 초이었다.

MFC 밸브의 개폐를 조절하는 외부 입력 전압의 지연 시간은 80 ms였으며 유량이 감소하는 경우에 MFC 지시값과 밸브의 초기 지연 시간은 0.5초 이내로 측정되었다. 그러나 유량이 증가하는 경우에는, 특히 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 유량이 증가하는 경우에는 최대 1.36 초이었다.

후기

본 연구는 과학기술부 진공기술기반확립사업의 일부로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Spitzer, D. W., 1990, Industrial Flow Measurement, Instrument Society of America
- (2) Brooks Instrument, 1996, Mass Flow Meter Instruction manual
- (3) Sierra Instruments, 1993, Mass Flow Meter Instruction Manual
- (4) MKS, Thermal Mass Flow meter Manual