

## 열전달 질량유량계 개발

지대성\*

### Development of Thermal Mass Flow Meter

Daesung Chi\*

*Key words:* Mass Flow Meter(질량유량계), Heat Transfer(열전달), Temperature(온도), Accuracy(정확도), Multi-point(다중점), Reproducibility(재현성), Response Time(응답 시간)

#### ABSTRACT

Thermal mass flow meter was developed using principle of convective heat transfer. The advantage of thermal mass flow meter is measuring mass flow directly, therefore, it is not required to use densitometer or temperature/pressure and DP gages. The final accuracy of this thermal mass flow meter is  $\pm 1.0\%$  or better, reproducibility is  $\pm 0.2\%$ , and the response time is 600 ms. The thermal mass flow meter was developed from a single point to multi-points (maximum is 9 points), and the number of points is determined according to desired accuracy and size of piping/duct. Since this thermal mass flow meter adopted microprocessor based design, it is intrinsically accurate, self-error detectable, and has self-diagnosis function. The applications of this thermal mass flow meter are for measurement and control of HVAC air flow, other gas flow, and liquid flow.

#### 1. 서 론

열전달 질량 유량계는 열선이 부착되지 않은 일반 온도계와 열선이 부착된 온도계 사이의 온도 차이를 측정하여 유체의 유량을 측정하는 유량계이다. 열선이 부착된 온도계는 온도 센서가 열선으로부터 열을 공급 받으며, 이 열은 온도계를 통과하는 유체에게 대류 열 전달 현상에 의하여 빼앗기게 된다. 이 현상을 정량적으로 규명하여 유량을 측정하는 것이다.

공기 조화 장치(HVAC)의 공기 유량 측정은 주로 피토투브(pitot tube), 열선유속계(hot wire anemometer), 회전유속계(vane anemometer) 등을 이용하여 간헐적으로 측정하여 왔으며, 이 경우 공기 유량의 제어는 불가능하였다. 또한 피토투브 원리를 이용하여 평균 유속을 용이하게 측정할 수 있는 평균 피토투브(averaging pitot tube)가 개발되었으며, 이 유량계를 이용하여 공기의 유량을 측정 및 제어가 가능하게 되었다. 그러나 이 평균 피토투브는 덕트(duct)의 크기가 매우 큰 경우 가격이 매우 고가이며, 더 나아가 온도계, 차압계, 압력계, 유량 계산을 위한 유량 컴퓨터(flow computer) 등을 추가적으로 필요로 하는 등 불편한 점이 매우 많았다.

\* (주)하이트롤 기술연구소

그러나 열전달 질량유량계는 덕트의 크기가 크지 않은 경우에 가격은 평균 피토 튜브와 비슷하며, 또한 덕트의 크기가 큰 경우는 가격 면에서 매우 유리하다. 또한 별도로 차압계, 압력계, 온도계, 유량 컴퓨터 등을 요구하지 않으므로 사용상 매우 편리하다는 장점이 있다. 더 나아가 부피 유량(단위 시간당 부피) 뿐만 아니라 질량 유량(단위 시간당 질량)도 측정이 가능하다는 이점이 있다.

열전달 질량유량계에는 소형 파이프 및 덕트용과 대형 파이프 및 덕트용이 있다. 소형은 주로 반도체 공장에서 많이 사용되며 유량계 및 유량 제어기가 같이 부착되어 있는 것이며, 대형은 주로 HVAC용 및 물용이 있다. 특히 대형의 경우는 1회선부터 다회선까지가 있으며, 파이프 또는 덕트의 크기, 적용에 따라 1회선 또는 다회선을 선택할 수 있다. 1회선 및 소형의 경우 이 유량계를 제조하는 회사는 국외에 10여 개의 회사가 있으며, 국내에는 없다. 대형 및 다회선 열전달 질량유량계의 경우 국내외를 통하여 이를 제조하는 회사는 국내에 1개 사를 포함하여 단 3개 회사에 지나지 않는다.

이번에 개발한 열전달 질량유량계는 대형 및 HVAC용으로 1회선부터 9회선까지 제작이 가능하며, 따라서 유량 측정 정확도가 높고, 응답 시간이 약 0.6초 정도로 빠르며, 특히 Microprocessor를 채용하여 설계되었기 때문에 자기 고장 진단(self-diagnosis) 기능을 구비하고 있다.

본 논문에서는 열전달 질량유량계의 유량 측정 원리, 개발된 유량계의 정확도 시험 결과, 현장 적용 시험 결과 등에 대하여 서술하고자 한다.

## 2. 열전달 질량유량계의 유량 측정 원리

아래의 Figure 1에서 열전달 질량유량계의 유량 측정 원리를 잘 보여 주고 있다.

유체가 흐르는 파이프 또는 덕트 내에 유체의 건구 온도(dry bulb temperature)를 측정하는 온도 센서가 전단에 설치되어 있으며, 바로 후단에는 열선이 부착된 온도 센서가 설치되어 있다. 초기에 열선에 전기적인 열을 공급하지 않을 때는 유체가 흐르는 경우라도 두 온도 센서 사이에는 온도 차이가 발생하지 않는다. 여기서 열선에 전기적인 열을 공급하면 열선이 부착된 온도 센서의 온도는 상승하게 되며, 일정한 시간이 지나면 포화 상태에 이르게 된다. 여기서 열선에 공급되는 열량은 아래와 같다.

$$q = I \times V \quad (1)$$

여기서  $q$ 은 전기에 의하여 열선에 공급되는 열량,  $I$ 는 전류,  $V$ 는 전압을 가리킨다.

이 시점에서 유체를 파이프 또는 덕트 내에 흘리게 되면 열선이 부착된 온도 센서는 유체에게 열을 빼앗기므로 온도가 내려가게 된다. 이 때 유체가 열선이 부착된 온도 센서로부터 빼앗아 가는 열량은 Newton's Law of Cooling에 의하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

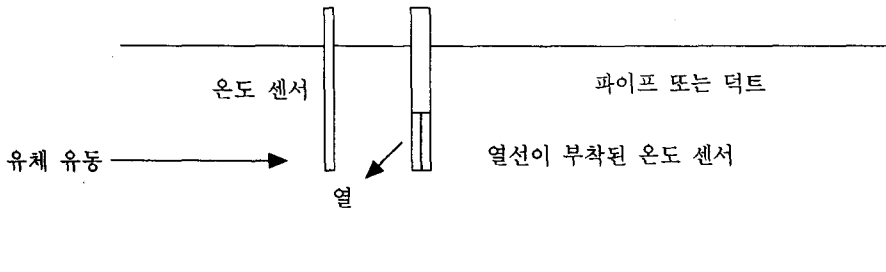


Figure 1. Principle of Thermal Mass Flow Meter

$$q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

여기서  $q$ 는 유체가 열선이 부착된 온도 센서로부터 빼앗아 가는 열량,  $h$ 는 대류 열전달 계수(convective heat transfer coefficient),  $A_s$ 는 열선이 부착된 온도 센서의 표면적,  $T_s$ 는 열선이 부착된 온도 센서의 온도,  $T_\infty$ 는 유체의 건구 온도를 가리킨다.

위의 식 (2)에서  $q$ 는 전기적인 열량으로 식 (1)로부터 알고 있는 값이며,  $A_s$  열선이 부착된 온도 센서의 크기로부터 알 수 있고,  $T_s$ 와  $T_\infty$ 는 온도 센서로부터 측정하는 값이다. 그러나 대류 열전달 계수,  $h$ 는 유체의 속도, 열선이 부착된 온도 센서의 크기, 유체의 밀도, 점도, 유체의 열전도도 값 및 Prandtl number에 의존하는 값으로 아래와 같은 방법을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Nu_D &= \frac{hD}{k} \\ &= CRe_D^m Pr^{1/3} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $Nu_D$ 는 Nusselt number로 열선이 부착된 온도 센서 표면의 온도 구배(temperature gradient)를 의미하며,  $h$ 는 대류 열전달 계수,  $D$ 는 열선이 부착된 온도 센서의 외경,  $k$ 는 유체의 열전도도,  $C$ 와  $m$ 은 레이놀즈 수 및 파이프 또는 덕트의 형상에 따른 상수,  $Pr$ 은 유체의 Prandtl number를 가리킨다. 마지막으로  $Re_D$ 는 Reynolds number로 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Re_D &= \frac{\rho VD}{\mu} \\ &= \frac{4\dot{m}D}{\pi D_h^2 \mu} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $V$ 는 유체의 속도,  $\dot{m}$ 은 질량 유량,  $D_h$ 는 파이프의 외경 또는 덕트의 경우 hydraulic diameter를 가리킨다. Hydraulic diameter는

아래 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (5)$$

여기서  $A$ 는 파이프 또는 덕트의 단면적,  $P$ 는 파이프 또는 덕트의 둘레를 가리킨다.

위의 식 (3)에서  $h$ 를 구하기 위해서는  $D$ ,  $k$ ,  $Re_D$ ,  $Pr$ ,  $C$  및  $m$ 의 값들을 알아야 한다. 여기서 한가지 문제점은 우리가 구하는 것은 질량 유량이며, 또한 질량 유량을 알아야 만이 Reynolds number를 구할 수 있고, 이 후에  $h$ 를 구할 수 있는 것이다. 따라서 우선 질량 유량 또는 유체의 속도를 가정하고 이 가정한 질량 유량 또는 유체의 속도를 이용하여 Reynolds number를 구한 다음 식 (3)을 이용하여  $h$ 를 구한다. 여기서 구한  $h$ 는 식 (2)를 이용하여 구한  $h$ 값과 일치하여야 한다. 만일 가정한 질량 유량 또는 유체의 속도를 이용하여 구한  $h$ 값이 식 (2)를 이용하여 구한  $h$ 값과 일치하지 않으면 이 두  $h$ 값이 일치할 때까지 질량 유량 또는 유체의 속도 값을 다시 가정하여 일치할 때까지 반복하여 계산하여야 한다.

여기서 두 온도 센서의 온도 차이와 질량 유량과의 관계를 그래프로 그리면 아래와 같다. 이 변수 사이의 관계는 선형적이 아니다.

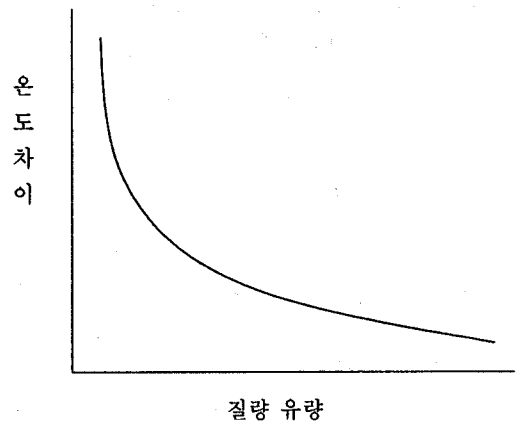


그림 2. 온도 차이와 질량 유량과의 관계 그래프

그림 2에서 보는 바와 같이 질량 유량이 낮으면 유체가 열선이 부착된 온도 센서로부터 빼앗아 가는 열량이 적으므로 온도 차이는 커지게 되며, 질량 유량이 높으면 열선이 부착된 온도 센서로부터 빼앗아 가는 열량이 커지므로 온도 차이는 줄어들게 된다.

### 3. 열전달 질량유량계의 유량 측정 정확도 시험

개발한 열전달 질량유량계를 한국표준과학연구원의 표준 풍동(wind tunnel)에서 유량 측정 정확도 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 열전달 질량유량계는 3회선 열전달 질량유량계 2대를 92 x 92 cm의 풍동에 가로로 설치하여 시험을 수행하였으며, 시험 장치의 setup을 아래의 그림 3에서 보여 주고 있다.

위의 그림 3에서 보는 바와 같이 3회선 열전달 질량유량계 2대를 가로로 설치하여 변환기에 연결하여 유량을 측정하였으며, 풍동 내의 유속 및 유량 측정을 위하여 피토 튜브(pitot tube)를 표준 digital manometer와 연결하여 표준 유속 및 유량을 구하였다. 풍동에 흘린 공기의 유속은 4 m/s부터 16 m/s까지 변화시키면서 시험을 수행하였다. 시험은 4, 8, 10, 12, 14, 16 m/s에서 수행하였으며, 16 m/s부터 4 m/s까지, 다시 4 m/s부터 16 m/s까지, 또 다시 16 m/s부터 4 m/s까지로 3번에 걸쳐 시험을 수행하였다. 시험 결과로는 모든 시험 구간에서 유량 측정 정확도는  $\pm 0.9\%$ FS 이내로 다른 미국회사의 제품에 비하여 매우 우수한 유량 측정 정확도를 보여주었다.

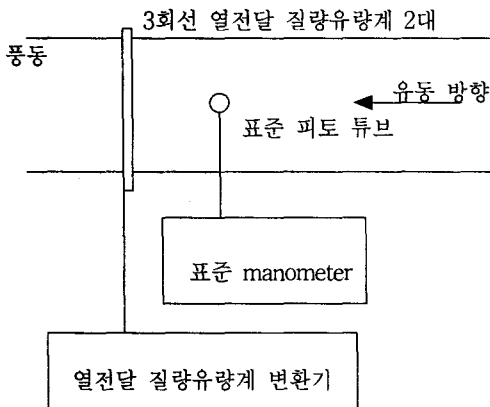


그림 3. 시험 장치의 setup

개발한 제품의 반복성은  $\pm 0.2\%$ FS으로 나타났으며, 열전달 질량유량계의 응답 시간은 약 0.6 초로 나타났다.

또한 개발한 열전달 질량 유량계를 올진 원자력발전소에서 현장 시험을 수행하였다. 올진 원자력발전소 현장에서의 성능 시험은 한국표준과학연구원에서 수행한 유량 측정 정확도 시험과는 다른 유량 제어에 대한 성능 시험이 추가된 시험이었다. 유량 측정에 부가하여 공기 덕트 상에 설치된 댐퍼(damper)를 제어하여 공기 유량을 일정하도록 제어하는 성능 시험이었다. 이 시험에서는 4회선 열전달 질량유량계 2대를 사용하였다. 표준 유량은 피토 튜브와 차압계를 이용하여 측정하였으며, 유량 측정 정확도는 한국표준과학시험연구원에서의 시험과 유사한  $\pm 0.8\%$ FS로 나타났다.

유량 제어에 대한 성능 시험은 설정 유량 값을 일정한 값으로 설정한 후에 개발한 열전달 질량유량계가 설정된 값으로 얼마나 신속하고 정확하게, 안정되게 찾아가는가를 시험하였다. 운전 초기에 설정된 값으로 찾아가는 시간은 약 20초 정도로 나타났으며, 초기 이후에는 열전달 질량유량계의 응답 시간(약 0.6 초)을 따라 자동으로 유량을 조절함을 확인하였다. 이 결과 우수하게 설정된 값을 찾아 안정되게 유량을 제어함을 확인할 수 있었다.

### 4. 개발된 열전달 질량유량계의 특징

개발한 열전달 질량유량계는 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

- 1) 유량 측정 정확도는  $\pm 1.0\%$ FS 이내로 타 회사의 정확도에 비하여 우수하다.
- 2) 유량 측정 반복성은  $\pm 0.2\%$ FS 이내로 타 회사의 정확도에 비하여 우수하다.
- 3) 이 열전달 질량유량계는 기체뿐만 아니라 열선에 공급하는 열량을 변경시켜주면 액체의 유량 측정도 가능하다.
- 4) 이 열전달 질량 유량계는 타 회사의 제품과는 달리 Microprocessor를 채택하였으므로, 자기 진단 기능이 있으며, 고장시 고장 부위 및 원인 등을 알려주고, 잘못된 값을 읽어 들이는 경우 바로 직전의 값을 채택하는 기능 등 유지 보수 및 기능상 많은 장점을 가지고 있다.
- 5) 이 열전달 질량유량계는 소구경 및 소형 덕트용 및

높은 정확도를 요구하지 않는 경우에 사용할 수 있는 1회선부터 대구경 및 대형 덕트용 및 높은 정확도를 요구하는 경우에 사용 가능한 다회선(2회선부터 9회선까지)까지 있다.

- 6). 특히 다회선 열전달 질량유량계를 선택하면, 직관부가 짧아 유속 분포가 일그러지는 경우에도 어느 정도 유량 측정 정확도를 보장할 수 있다.
- 7). 차압 유량계를 사용할 때 요구되는 온도계, 차압계, 압력계, 유량 컴퓨터 등이 필요하지 않으므로 설치비가 매우 저렴하다.

## 5. 결 론

이번에 새로이 개발한 열전달 질량유량계는 1회선부터 9회선까지이므로 파이프 또는 덕트의 크기, 적용 현장의 유량계 설치 조건, 예산, 요구되는 유량 측정 정확도 등에 따라 선택이 가능하도록 설계되었다. 또한 Microprocessor를 채택하여 유량 측정 정확도 및 반복성을 높였으며, 자기 진단 기능 등 다양한 기능도 추가하였다. 유량 측정 정확도는  $\pm 1.0\%$ FS, 반복성은  $\pm 0.2\%$ FS로 나타났다. 이러한 종류의 열전달 질량유량계는 종전에 주로 기체용으로만 사용하여 왔으나, 새로이 개발된 열전달 질량유량계는 간단히 공급하는 열량만 증가시키게 되면 액체용으로도 사용이 가능하도록 설계되었다.

이 열전달 질량유량계는 앞으로 국내 산업계에서 특히 대구경 파이프 및 대형 덕트에서의 액체 유량 측정

및 기체 유량 측정의 경우 비교적 저렴한 설치 및 구입 가격으로, 비교적 낮은 보수 유지비용으로 많은 사용될 것으로 기대된다. 특히 전량 수입에 의존하여오던 이 유량계가 국산화됨으로서 외화 절약에 많은 효과가 있을 것으로 기대가 되는 바이다.

## 후 기

본 연구 개발은 (주)한국전력주식회사의 기술개발 자금의 지원을 통하여 이루어졌으며, (주)한국전력주식회사 관계자 여러분에게 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

- (1) Fox, R. W. and McDonald, A. T., 1985, "Introduction to Fluid Mechanics," 3rd Ed., John Wiley & Sons, New York.
- (2) Incropera, F. P. and DeWitt D. P., 1985, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," John Wiley & Sons, New York.
- (3) "Handbook of Chemistry and Physics," 1981-1982, CRC Press Inc., Boca Raton.
- (4) 지대성 외 11명, 1998, "열전달 질량유량계 개발," KEPRI-95,C16, 전력연구원.