

단속가열식 액체용 극소질량유량 계측기에 관한 수치해석적 연구

김택영^{*†}

* 한국산업기술대학교 기계공학과

Numerical Study on the Pulse Heating Type Infinitesimal Liquid Mass Flow Meter

Taig Young Kim^{*†}

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic Univ.

(Received April 9, 2014 ; Revised October 31, 2014 ; Accepted November 4, 2014)

Key Words: Liquid Mass Flow Meter(액체용 질량유량계측기), Pulse Heating Type(펄스가열방식), Circular Tube Convective Heat Transfer(원형관 대류열전달)

초록: 반도체 생산에 사용되는 액체용 극소 질량유량계측기의 새로운 설계 안에 대하여 수치해석적으로 연구하였다. 내경 0.3mm 정도인 원관 외부에 히터를 일정한 폭 권선하고, 히터로부터 일정거리 떨어진 후류에 온도계측용 써미스터를 권선하는 형상이다. 히터에 단일펄스 가열을 하면 일정시간 경과 후 써미스터가 최고온도를 겪는다. 최고온도까지 걸리는 시간은 질량유량과 거의 반비례하며, 이를 이용하여 질량유량을 계측할 수 있다. 관벽을 통한 전도열전달과 액체유동에 의한 대류열전달이 복합적으로 작용하므로 관내유동의 평균속도와 관벽을 통한 최고온도의 이동속도는 큰 차이를 나타내며, 상호 비선형적인 특성을 보인다. 본 연구에서는 센서관의 내·외경, 히터의 권선폭 및 히터와 써미스터 사이의 거리를 설계변수로 고려하여 수치해석적으로 제안한 설계사항을 분석하였으며, 설계인자의 최적화에 대한 검토를 수행하였다.

Abstract: Numerical study on the new design of the liquid mass flow meter in infinitesimal flow rate for semiconductor production is performed. The heater and thermistor are wired on the circular tube about 0.3mm inner diameter with designed gap between them. After the time interval from the single pulse heating the thermistor reaches its peak temperature and this time interval is almost inversely proportional to the liquid mass flow rate. The axial conduction in tube wall and convection through the flow is combined. As a result, the peak temperature moving velocity is much smaller than flow mean velocity and there is no linear relationship between them. In this study, the effects of design parameters such as the tube inner/outer diameter, wired heater width, and the gap between heater and thermistor are investigated and the trends of optimization in these parameters are discussed.

- 기호설명 -

c_p : 유체의 비열
 c_t : 계측관 벽의 비열
 d_i : 계측관 내경
 d_o : 계측관 외경
 k : 유체의 열전도도
 k_t : 계측관 벽의 열전도도
 l_{gap} : 히터와 써미스터 사이의 간격

l_{ht} : 히터 권선 폭
 \dot{m} : 유체의 질량유량
 Δp : 계측관을 통한 압력손실
 q_{if} : 관 내벽의 열유속
 q_{ht} : 히터의 열유속
 r : 반경방향 좌표계
 R_o : 계측관 외피의 열저항
 t : 시간 좌표계
 Δt_s : 써미스터 최고온도 발생 시간
 T : 유체의 온도
 T_m : 유체의 단면 평균온도

† Corresponding Author, tagikim@kpu.ac.kr
 © 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- T_o : 입구 및 주위 온도
 T_s : 써미스터 온도
 T_t : 계측관 온도
 u : 유체의 완전발달 속도분포
 z : 축 좌표계
 ρ : 유체의 밀도
 ρ_t : 계측관의 밀도

1. 서론

반도체 생산공정에서 기체를 정량공급하기 위하여 가장 많이 사용되는 유량계측장치는 가열식으로, 내경이 0.3mm 정도되는 매우 얇은 원관의 외부에 히터선과 히터 상·하류에 써미스터선을 감고, 이들 두 써미스터 사이의 온도차가 기체 질량 유량에 비례하는 특성을 이용하여 계측한다. 이와 같은 기체용 질량유량계측기(GMFM, Gas Mass Flow Meter)에 대하여 지난 수십 년간 많은 연구⁽¹⁻⁴⁾가 진행된 바 있다. 이와 함께 액체용 질량유량계측기(LMFM, Liquid Mass Flow Meter)는 0.1g/min 까지 극소유량에 대한 고도의 정밀계측이 요구되며, 일반적으로 코리올리힘을 이용한 계측기를 사용하는데,⁽⁵⁻⁷⁾ 이는 기구적으로 복잡하고 지속적으로 작동하는 구동부가 존재하므로 제작이 복잡하고 단가가 매우 높다. 최근에 GMFM 과 동일하게 가열방식이 적용되고 있으나, 열식 계측방법을 액체에 적용하면 히터 후류의 온도상승으로 증발에 의한 측정한계가 존재한다. 기존에 개발된 제품들은 이러한 문제를 해결하기 위하여 TEC(Thermo-Electric Cooler)소자에 의한 냉각방식을 사용하지만, 이 경우 TEC 냉각을 위한 방열판과 팬이 별도로 설치되어야 하므로 크기가 커지고, 소음이나 진동의 문제가 존재하여 극소량/고정밀 유량계측에는 적용이 불가능하다.

본 연구에서는 기술한 문제점에 대응하여, 정밀도도 높고 구조도 단순한 새로운 형상의 단속가열식 액체용 극소질량유량 계측기를 제안하였다. 제안한 계측기는 Fig. 1 에 도시한 바와 같이 매우 얇은 원관에 히터선을 감아 단속적으로 가열하고, 히터와 일정 거리 떨어진 후류에 써미스터선을 감아 이 위치에서 최고온도가 발생하는 시간을 측정한다. 단속가열의 종료시간으로부터 최고온도가 발생하는 시간까지의 간격은 액체의 질량유량에 반비례하는 특성을 갖는다. 이와 같은 방법은 TOF(Time Of Flight) 방식과 유사하지만 실제 측정되는 값은 전혀 다른 현상을 보인다. TOF 유량계측법은 유체를 직접 가열하고 가열된 유체의 이동

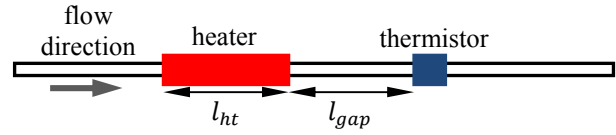


Fig. 1 Schematic diagram of the liquid mass flow meter suggested in present study

시간을 측정하여 평균속도를 구하는 방법^(8,9)이지만, 본 연구에서 제안한 LMFM 은 계측관이 너무 얇아서 관내에 유체를 직접 가열하거나 온도를 계측할 장치를 설치할 수 없다. 이에 따라 관 외피에 히터를 설치하게 되며, 히터는 관벽의 가열을 매개로 다시 유체를 가열한다. 결과적으로 관벽을 통한 전도열전달과 관내 유동에 의한 대류열전달이 복합적으로 작용하여 히터 후류의 관표면 온도에 영향을 미친다. 히터로부터 일정 구간 떨어진 써미스터의 온도가 시간에 따라 증감을 나타내고, 히터작동 종료 후 써미스터에 최고온도가 발생하는 시간을 측정하여 질량유량을 계측한다.

새로운 LMFM 의 구체적인 설계형상을 결정하려면 이론적인 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 비정상 복합 열전달현상에 대하여 자체 개발한 수치해석 프로그램을 이용하여 분석하였다. 본 연구의 대상인 극소유량에 대하여는 Re 수가 매우 작은 층류유동이 유지되므로, 수치해석을 통한 예측으로부터 상당히 타당한 결과를 도출할 수 있다. 특히, 실험으로는 계측이 어려운 관벽의 온도분포와 관 내벽에서의 열유속분포에 대한 변화를 고찰함으로써 복합 열전달 현상에 대한 구체적인 이해가 가능하다. 수치해석결과 액체의 질량유량과 최고온도 발생시간과는 서로 비례하는 영역이 있음을 확인하였으며, 이를 설계대상으로 하면 극소의 유량에 대하여 정밀한 계측이 가능하다. 계측기의 정밀도와 응답성 등에 대한 최적설계조건을 확보하기 위하여 관 내·외경, 히터선의 권폭, 히터와 써미스터 사이의 간격 등을 변수로 수치해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

제안한 단속가열식 LMFM 은 온도가 아닌 시간을 계측하므로 온도계측 시 발생하는 오차가 없으며, GMFM 과 비슷한 형상이나 써미스터가 한 개 적어서 기존의 GMFM 생산공정을 유지하며 생산성을 향상시킬 수 있는 구조이다.

2. 본론

LMFM 의 형상은 Fig. 1 에 도시한 바와 같으며, 원관 내부유동에 대한 비정상 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \rho u \frac{\partial}{\partial z}(c_p T) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

관의 내경이 0.3mm 정도로 매우 얇아서 내부유동의 Reynolds 수는 100 이하로 완전한 층류유동을 보장할 수 있으며, 입구길이도 계측기 전체길이 70mm 에 비하여 무시할 정도로 짧다. 그러므로 완전히 발달된 Hagen-Poiseuille 층류유동에 대한 포물선 속도식과 압력손실식을 적용할 수 있다. 이식에 대한 초기조건과 경계조건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} T(0, r, z) &= T_o \\ T(t, r, 0) &= T_o, \quad \frac{\partial T(t, r, L)}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial T(t, 0, z)}{\partial r} &= 0, \quad T(t, r_i, z) = T_t(t, r_i, z) \end{aligned} \quad (2)$$

초기의 유체온도는 입구온도와 같고, 출구는 단열조건과 동일하다. 관벽에서는 온도의 연속조건을 적용하였다.

LMFM 관벽을 지배하는 비정상 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_t c_t T_t) = k_t \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

이 지배방정식의 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_t(0, r, z) &= T_o \\ T_t(t, r, 0) &= T_o, \quad \frac{\partial T_t(t, r, L)}{\partial z} = 0 \\ -k_t \frac{\partial T_t(t, r_i, z)}{\partial r} &= -k \frac{\partial T(t, r_i, z)}{\partial r} \\ -k_t \frac{\partial T_t(t, r_o, z)}{\partial r} &= \begin{cases} \frac{T_t(t, r_o, z) - T_o}{R_o} - q_{ht} & \text{on heater} \\ \frac{T_t(t, r_o, z) - T_o}{R_o} & \text{remainder} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

관 내벽에서 열유속이 유체의 열유속과 같다는 조건을 적용하였다. 관 외피에서는 주위로의 열손실을 고려하였으며, 히터부에는 단속적인 가열을 상정하였다.

축대칭 원통형 좌표계에 대한 지배방정식 Eq. (1) 과 (2)를 차분화하여 수치해석을 수행하였다. 계산 영역은 센서의 총 길이를 고려하였으며, 액체영역과 고체영역은 Table 1 에 제시한 바와 같이 적용된 관의 형상에 따라 결정된다. 격자계는 반경방향과 축방향으로 [20(액체)+8(관벽)]×1980 개를 고려하였다. 공간 좌표계에 대하여는 2 차의 정확도를 갖는 중심차분법을 적용하였으며, 시간에 대하여는 4 차의 정확도를 갖는 Runge-Kutta 법으로 적분하였다. 수치해석 프로그램의 정확도를 확인하기 위하여 정상상태 대류열전달에 대한 해석을 수행하였다. 층류유동이므로 관벽이 모두 일정하게 가열되면 액체와 접촉하는 관 내벽의 Nu 수는 이론적으로 4.36 이며, 관벽의 온도가 일정하게 유지되면 3.66 이 되어야 한다.⁽¹⁰⁾ 일정한 가열조건에 대한 검증을 위하여 히터의 길이를 관 길이와 동일하게 하고 관벽의 열전도도를 매우 작은 값인 0.01 W/m·K 을 가정하였다. 유량의 변화에 대한 국소 Nusselt 수는 Nu(z)=4.363 으로 일정하며 이론값과 거의 일치한다. 등온조건에 대하여는 계측관 외피의 열저항을 R_o=0 K·m²/W 로 하고 관벽의 열전도도를 매우 큰 값인 10⁵ W/m·K 을 가정하여 관벽의 온도가 주위의 온도와 같게 일정하게 유지되도록 하였다. 해석 결과 여러 질량유량에 대하여 모두 이론값과 거의 동일한 Nu(z)=3.656 으로 일정하게 유지됨을 확인하였다. 비정상상태에서는 해석의 시간간격을 감소시키며 더 이상 결과에 변화가 없는 시간간격을 선택하였다.

Table 1 Computational case to optimize the design

Cases	Tube gage	l_{ht}	l_{gap}
Case 1	IG26	15mm	15mm
Case 2	IG24	15mm	15mm
Case 3	IG22	15mm	15mm
Case 4	IG24	10mm	15mm
Case 5	IG24	20mm	15mm
Case 6	IG24	15mm	10mm
Case 7	IG24	15mm	20mm
Remark	IG26: $d_i=0.26\text{mm}$, $d_o=0.36\text{mm}$ IG24: $d_i=0.38\text{mm}$, $d_o=0.56\text{mm}$ IG22: $d_i=0.46\text{mm}$, $d_o=0.72\text{mm}$		

여는 4 차의 정확도를 갖는 Runge-Kutta 법으로 적분하였다. 수치해석 프로그램의 정확도를 확인하기 위하여 정상상태 대류열전달에 대한 해석을 수행하였다. 층류유동이므로 관벽이 모두 일정하게 가열되면 액체와 접촉하는 관 내벽의 Nu 수는 이론적으로 4.36 이며, 관벽의 온도가 일정하게 유지되면 3.66 이 되어야 한다.⁽¹⁰⁾ 일정한 가열조건에 대한 검증을 위하여 히터의 길이를 관 길이와 동일하게 하고 관벽의 열전도도를 매우 작은 값인 0.01 W/m·K 을 가정하였다. 유량의 변화에 대한 국소 Nusselt 수는 Nu(z)=4.363 으로 일정하며 이론값과 거의 일치한다. 등온조건에 대하여는 계측관 외피의 열저항을 R_o=0 K·m²/W 로 하고 관벽의 열전도도를 매우 큰 값인 10⁵ W/m·K 을 가정하여 관벽의 온도가 주위의 온도와 같게 일정하게 유지되도록 하였다. 해석 결과 여러 질량유량에 대하여 모두 이론값과 거의 동일한 Nu(z)=3.656 으로 일정하게 유지됨을 확인하였다. 비정상상태에서는 해석의 시간간격을 감소시키며 더 이상 결과에 변화가 없는 시간간격을 선택하였다.

설계 최적화에 대한 평가를 위하여 관 내·외경과 히터의 권선폭, 히터와 써미스터 간격 등 Table 1 에 제시한 7 가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 히터의 열량은 최고 온도 발생시간에 영향을 미치지 않으므로 열량에 대한 평가는 생략하였다.

3. 결과 및 검토

Table 1 에 제시한 계산 중, Case 1, 2, 3 은 관 내·외경 d_i 와 d_o , Case 2, 4, 5 는 히터의 권선 폭 l_{ht} , Case 2, 5, 7 은 히터와 써미스터 사이의 거리 l_{gap} 의 변화에 따른 LMFМ 설계의 최적화를 비교/평

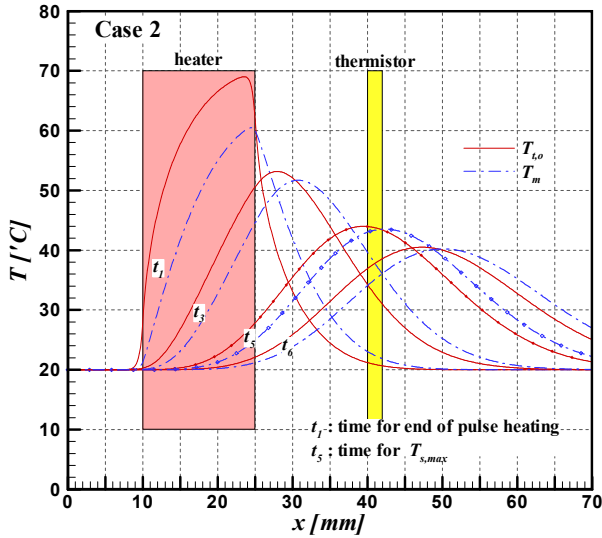


Fig. 2 Axial temperature variations for several time slots

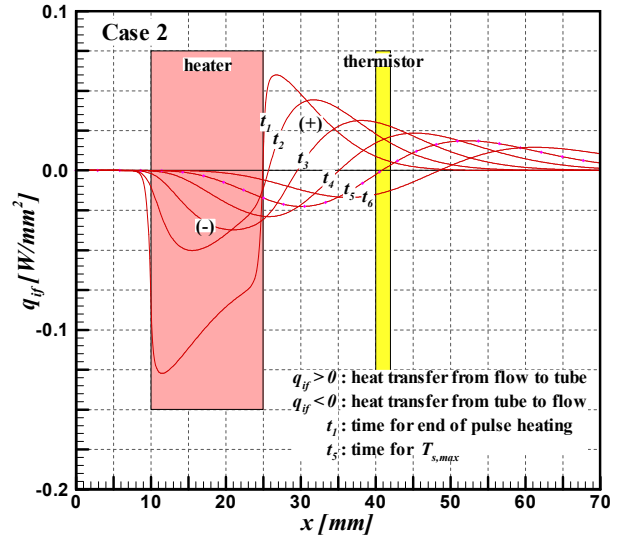


Fig. 3 Interface heat flux variations at the tube inner surface for several time slots

가하기 위한 것이다. 기호 IG 는 상용으로 판매되는 관의 Tube gage 로써, 표의 비고란에 각각의 관경을 기록하였다. 관의 재질은 SUS 이며, 유체는 물을 고려하였다. 히터의 가열량은 모든 경우 2.5W 이고, 가열시간은 0.5s 이다.

질량유량의 계측원리를 정량적으로 설명하기 위하여 Case 2 의 해석결과를 Fig. 2, 3, 4 에 도시하였다. 히터의 단속가열이 끝난 직후부터 계측관과 내부유동 단면평균 온도의 축방향 변화를 Fig. 2 에 도시하였다. 가열이 끝난 직후(t_1)에는 계측관 표면 온도와 유체 단면평균 온도 모두 히터부에서 가장 높다. 히터의 하류는 유동의 온도가 계측관 열전달뿐 아니라 유동의 대류열전달에 의하여 가열됨을 알 수 있다. 시간이 경과하면 축방향 전도 열전달에 의하여 전체적으로 온도가 감소한다. 히터부의 가장 온도가 높은 유체가 하류로 이동하며 계측관과 대류로써 열교환을 함에 따라 계측관 표면의 최고온도 발생위치도 하류로 이동한다. 이러한 현상에 의하여 써미스터에서 최고온도가 나타나고(t_5) 다시 온도가 하강하기 시작한다. 계측관 표면에서 최고온도부의 이동속도는 유동의 평균속도보다 현저히 느리므로 TOF 형 센서와는 구분된다.

상기에 기술한 사항을 계측관과 유체 사이 열교환량으로써 분석하기 위하여 계측관 내벽에서 열유속을 Fig. 3 에 도시하였다 히터작동이 끝난 직후(t_1), 히터부에서 계측관으로부터 유동으로의 열전달이 최대가 된다. 특히, 히터부에 유입되는 유체의 온도가 가장 낮으므로 이 부분의 열유속이

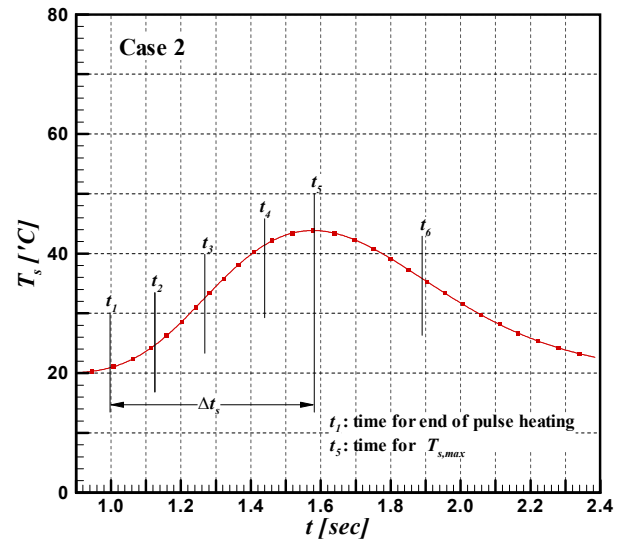


Fig. 4 Transient variation of thermistor temperature

최대가 된다. 온도분포에서 예측한 바와 같이 히터를 지나고 나면 오히려 역전되어 유동으로부터 계측관으로의 열전달이 발생한다. 시간이 경과함에 따라 열전달이 역전되는 위치가 후류로 이동한다. 써미스터에서 최고온도가 발생하는 시간(t_5)에 써미스터에서 열전달 역전이 나타난다.

써미스터 온도의 시간에 따른 변화를 Fig. 4 에 도시하였다. 써미스터 온도는 복합적인 열전달의 결과로 최고 값을 갖는 증감 분포를 나타내며, 히터작동이 끝난 직후부터 최고온도가 발생하는 시간까지의 간격 $\Delta t = t_5 - t_1$ 을 측정할 수 있다. 상기에 설명한 바와 같이 써미스터 온도가 최고가

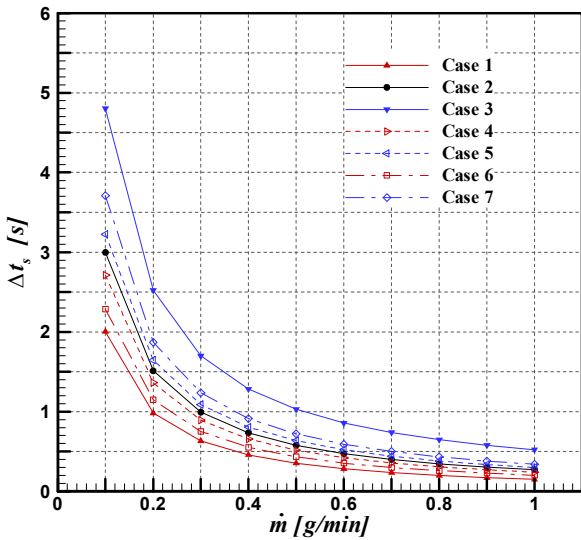


Fig. 5 Time interval variations along the mass flow rate

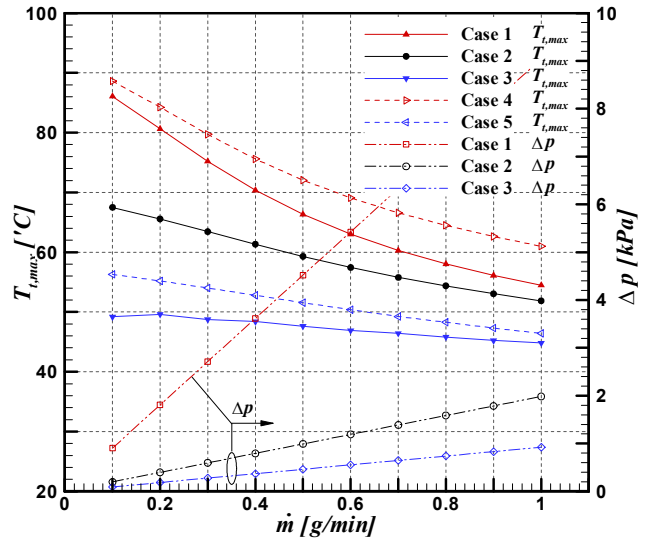


Fig. 7 Variations of the tube maximum temperature and pressure drop along the mass flow rate

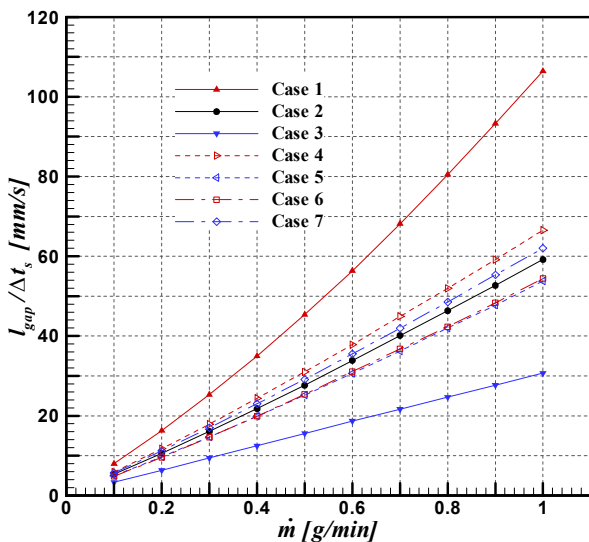


Fig. 6 Variations of the normalized time intervals along the mass flow rate

되는 시간은 유동의 대류열전달과 관벽을 통한 전도열전달이 복합적으로 작용한 결과이다. 유동의 질량유량에 따라 대류열전달율이 변하므로 시간 간격도 영향을 받는다.

Fig. 5 에는 질량유량 변화에 따른 시간 간격의 변화를 다양한 센서 형상에 대하여 도시하였다. 질량유량이 증가하면 대류에 의한 최고온도 이동 속도가 빨라져서 계측시간이 감소한다. 그림으로부터 계측시간이 질량유량에 거의 반비례하는 특성을 가질 것으로 예측할 수 있다.

l_{gap} 을 기준으로 규격화한 계측시간의 역수인 $l_{gap}/\Delta t$ 를 구하여 질량유량에 대한 변화를 Fig. 6

에 도시하였다. 질량유량이 증가함에 따라 규격화한 값이 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 그러나 계측관의 설계형상에 따라 선형도가 다르다. 관 내경이 가장 큰 IG22 인 경우 선형성이 가장 우수하며, 관 내경이 감소할수록 비선형성이 강해진다. l_{ht} 는 넓을수록 선형성이 우수하다. l_{gap} 이 크면 계측시간이 길어지지만 l_{gap} 으로 규격화를 하였으므로 $l_{gap}/\Delta t$ 값은 증가한다.

액체 유량계측기로서 사용하려면 다른 물리적 특성도 만족하여야 한다. 계측기를 통한 압력손실이 너무 크면 적용하기 어렵다. 가열식이므로 온도가 너무 높아서 증발온도를 초과해도 사용이 불가능하다. 응답특성을 고려한다면 계측시간이 너무 길어도 사용에 제약이 따른다. Fig. 5 에 도시한 바와 같이 관경이 증가하면 유동속도가 감소하므로 계측시간이 느려진다. IG22 관인 경우 응답속도가 거의 5s 로 사용이 어렵다. 유량계측기로서 적절한 응답속도인 3s 를 고려한다면 IG24 인 센서관에서 l_{ht} 와 l_{gap} 이 모두 15mm 이하여야 한다. 물론 관경이 작은 IG26 의 경우도 유속이 빨라서 만족된다. Fig. 7 에는 최고온도와 압력손실을 도시하였다. IG26 인 경우 최고온도가 86°C 로 높고, 압력손실도 9kPa 까지 증가하여 사용이 어렵다. l_{ht} 가 10mm 로 감소하면 히터부의 단위면적당 열유속이 증가하여 온도가 90°C 정도로 상승하므로 제한적이다.

전반적인 설계내용에 대한 결과를 분석하면 최적화의 경향을 추출할 수 있다. 관경이 클수록 선형성이 좋으나 응답속도가 늦어진다. 관경이 감소

하면 선형성이 나빠지고, 최고온도와 압력손실이 증가하여 제한이 따른다. l_{ht} 가 작으면 선형성이 감소하고 최고온도도 상승하므로 적용이 제한된다. 반대로 l_{ht} 가 증가하면 응답시간이 길어지므로 사용할 수 없다. l_{gap} 의 변화는 선형성에 영향을 미치며, 이 값이 증가하면 응답속도가 느려서 사용할 수 없다.

제안한 질량유량계측기는 시간을 계측하므로 온도계측 시 발생하는 오차를 배제할 수 있고, 기체용 열식 질량유량계측기와 비슷한 형상이나 써미스터가 한 개 적어서 기존의 계측기 생산공정을 유지하며 생산성을 향상시킬 수 있는 구조이다.

4. 결 론

정밀한 계측이 요구되는 액체용 극소 질량유량 계측기의 새로운 설계 안에 대하여 수치해석적으로 연구하였다. 설계 최적화에 가장 중요한 인자로 판단되는 내·외경, 히터의 권선 폭, 히터와 써미스터 사이의 거리 등의 변화에 대하여 수치해석 결과를 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 제안한 단속가열식 유량계측기는 계측관을 통한 전도열전달과 유동에 의한 대류열전달의 복합적인 작용을 이용하여 후류에 설치한 써미스터의 최고온도가 발생하는 시간을 계측하는 방식이다.

(2) 계측관의 내·외경이 증가하면 선형성이 향상되나 응답속도가 느려진다. 반대의 경우 선형성도 나빠지고, 최고온도와 압력손실이 증가하여 사용에 제한이 따른다.

(3) l_{ht} 가 작으면 선형성이 감소하고 최고온도도 상승하므로 적용이 제한된다. 반대로 l_{ht} 가 증가하면 응답시간이 길어지므로 사용할 수 없다.

(4) l_{gap} 의 변화는 선형성에 영향을 미치며, 이 값이 증가하면 응답속도가 느려서 사용할 수 없다.

후 기

본 연구는 중소기업청 산학연공동기술개발사업의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

(References)

- (1) Toda, K., Maeda, Y., Sanemasa, I., Ishikawa, K. and Kimura, N., 1998, "Characteristics of a Thermal Mass-flow Sensor in Vacuum Systems," *Sensors and Actuators A*, Vol. 69, pp. 62~67.
- (2) Kim, S. J. and Jang, S. P., 2001, "Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer Phenomena in a Sensor Tube of a Mass Flow Controller," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1711~1724.
- (3) Viswanathan, M., Kandaswamy, A., Sreekala, S. K. and Sajna, K. V., 2002, "Development, Modeling and Certain Investigations on Thermal Mass Flow Meters," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 12, pp. 353~360.
- (4) Kim, D. K., Han, I. Y. and Kim, S. J., 2007, "Study on the Steady-state Characteristics of the Sensor Tube of a Thermal Mass Flow Meter," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1206~1211.
- (5) Cheesewright, R., Clark, C., Belhadj, A. and Hou, Y. Y., 2003, "The Dynamic Response of Coriolis Mass Flow Meters," *J. Fluids and Structures*, Vol. 18, pp. 165~178.
- (6) Henrt, M. P., Clark, C., Duta, M., Cheesewright, R. and Tombs, M., 2003, "Response of a Coriolis Mass Flow Meter to Step Changes in Flow Rate," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 14, pp. 109~118.
- (7) Clark, C., Wang, S. and Cheesewright, R., 2006, "The Performance Characteristics of a Micro-machined Coriolis Flow Meter: An Evaluation by Simulation," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 17, pp. 325~333.
- (8) Gaskin, I., Shapiro, E. and Drikakis, D., 2011, "Theoretical, Numerical, and Experimental Study of the Time of Flight Flowmeter," *ASEM J. Fluid Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 1~8.
- (9) Liu, R. P., Fuent, M. J., Henry, M. P. and Duta, M. D., 2001, "A Neural Network to Correct Mass Flow Errors Caused by Two-phase Flow in a Digital Coriolis Mass Flowmeter," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 12, pp. 55~63.
- (10) Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2011, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed., John Wiley & Sons Inc.