

열식 질량 유량계 센서관의 과도 특성에 관한 연구

김동권[†] · 한일영^{*} · 김성진^{**}

Study on the Transient Characteristics of the Sensor Tube of a Thermal Mass Flow Meter

Dong Kwon Kim, Il Young Han, and Sung Jin Kim

Key Words : Thermal mass flow meter, Transient characteristics, Response time

Abstract

Thermal mass flow meters (TMFMs) are most widely used for measuring mass flow rates in the semiconductor industry. A TMFM should have a short response time in order to measure the time-varying flow rate rapidly and accurately. Therefore it is important to study transient heat transfer phenomena in the sensor tube of a TMFM that is the most critical part in the TMFM. In the present work, a simple numerical model for transient heat transfer phenomena of the sensor tube of a TMFM is presented. Numerical solutions for the tube and fluid temperatures in a transient state are obtained using the proposed model and compared with experimental results to validate the proposed model. Based on numerical solutions, heat transfer mechanism in a transient state in the sensor tube is explained. Finally, a correlation for predicting the response time of a sensor tube is presented. The correlation is verified by experimental results.

기호설명

A	: 단면적, m^2
D_{in}	: 센서관의 내경, m
D_{out}	: 센서관의 외경, m
h_i	: Interfacial heat transfer coefficient, W/m^2K
L	: 센서관의 길이, m
L_h	: 히터의 길이, m
L_s	: 센서관 중심에서 센서까지의 거리, m
P	: 센서관의 Wetted perimeter, m
R_r	: 센서관 단위 길이당 외부로의 열손실, mK/W
T	: 특성 온도, K
\bar{T}	: 평균 온도, K

1. 서론

반도체 제조 공정이나 화학 공정에는 기체 유량의 측정과 제어가 중요하므로 많은 종류의 유량계가 사용된다. 특히 열식 질량 유량계(Thermal Mass Flow Meter)는 1% 미만의 정밀도를 유지하면서 질량 유량을 측정하는 장치로, 50sccm 이하의 아주 작은 유량을 측정할 수 있고⁽¹⁾, 부식성 기체의 유량 측정에도 쓰일 수 있다는 장점이 있어, 반도체 산업에서 가장 널리 쓰이고 있는 유량계이다⁽²⁾.

일반적으로 열식 질량 유량계는 센서관, Bypass Tube, 그리고 전기 회로부로 구성되어 있다(Fig. 1). 센서관은 온도 Sensor 들과 Heater 가 부착된 가늘고 긴 Stainless steel tube 이다⁽³⁾. 실제로 질량 유량의 측정이 센서관 상에 부착된 온도 Sensor 들에 의해 이루어지므로, 센서관은 열식 질량 유량계에서 가장 중요한 부분이다.

열식 질량 유량계의 유량 측정 원리는 Fig. 2 에 모식적으로 표현되어 있다. 열식 질량 유량계는

[†] 한국과학기술원 기계공학과 대학원
E-mail : dkkim79@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3083 FAX : (042)869-8207

^{*} 한국과학기술원 기계공학과 대학원

^{**} 한국과학기술원 기계공학과

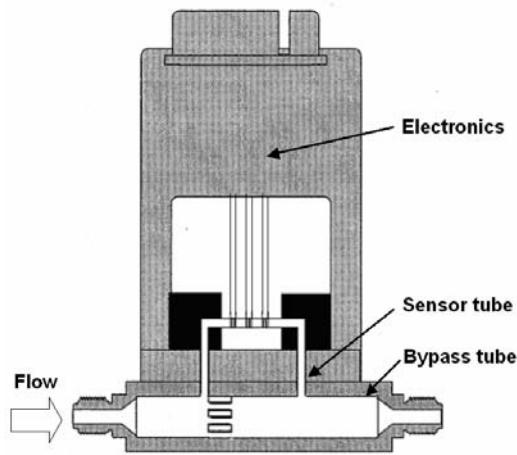


Fig. 1 Schematic diagram of a TMFM

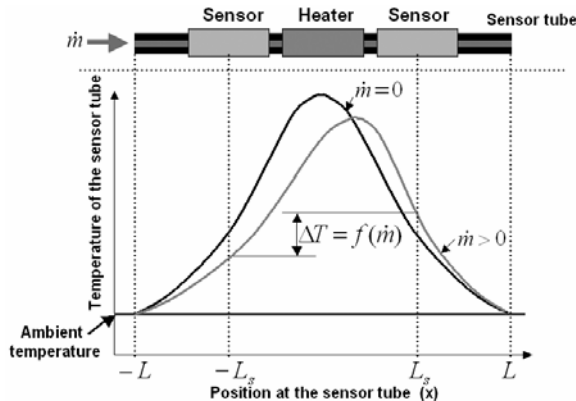


Fig. 2 Schematic layout of the sensor tube

Upstream sensor 와 Downstream sensor 간의 온도차를 측정하여 유량을 측정한다. 만약, 센서관 내부로 유체가 흐르지 않는다면 ($\dot{m}=0$) 센서관의 온도 구배는 대칭적이고 Upstream sensor 와 Downstream sensor 간의 온도차도 생기지 않는다. 하지만 유체가 흐르게 되면 센서관의 온도 구배는 비대칭적이 되고 Upstream sensor 와 Downstream sensor 간에 온도차가 발생하게 된다. 이 때 발생하는 온도차가 유량에 비례하기 때문에 Sensor 간의 온도차를 측정하면 유량을 측정할 수 있다.

열식 질량 유량계는 유량을 정확하고 빠르게 측정하기 위해 반드시 빠른 응답 시간을 가져야 한다. 특히 센서관의 응답 시간은 열식 질량 유량계의 응답 시간에 지배적인 영향을 미치므로 센서관은 빠른 응답 시간을 가져야 한다. 따라서 열식 질량 유량계의 성능을 향상 시키기 위해서는, 센서관의 과도 특성에 대해 연구하고 센서관의 응답 시간에 대해 분석하는 것이 매우 중요하다. 하지만 Tomas 로부터 시작된 센서관에 대한 연구들은⁽⁴⁾ 센서관에서의 정적 열전달 현상의 분석에 초점이 맞추어져 있거나^(3,5,6) 센서관의 동적 특성을 정성

적으로 분석하는데 그쳤기 때문에^(7,8) 센서관에서의 과도 열전달 현상에 대해 엄밀하게 분석할 수 없었고 센서관의 응답 시간을 정량적으로 예측할 수 없었다.

본 연구에서는 열식 질량 유량계 센서관에서의 과도 열전달 현상 해석을 위한 수치 모델을 제시하였다. 제시된 모델을 통하여 과도 상태에서의 관 온도 및 유체 온도에 대한 수치해를 구하였으며 구해진 수치해를 실험 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 검증된 수치해를 통해 과도 상태의 센서관에서 일어나는 열전달 현상에 대해 분석하였고 센서관의 응답 시간을 정량적으로 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다.

2. 수학적 모델

본 연구에서 다루고자 하는 센서관의 물리적 모델은 Fig. 3 과 같다. 열식 질량 유량계에서는 히터로부터 센서관에 일정한 열량이 가해진다.

$$q' = \begin{cases} q'_0 & (-L_h \leq x \leq L_h) \\ 0 & (x < -L_h, x > L_h) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 q' 은 관의 단위 길이당 가해지는 열량이고 L_h 는 가열부의 길이이다. 센서관의 동적 특성을 살펴보기 위해 $t < 0$ 일 때에는 유체가 흐르지 않다가 $t = 0$ 일 때부터 일정한 질량 유량이 생기는 경우를 생각해 본다.

$$\dot{m} = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \dot{m}_0 & (t \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

센서관은 크게 관 영역과 유체 영역으로 나눌 수 있다. 따라서 관의 반경 방향 평균온도 및 유체의 반경 방향 평균 온도를 이용하여 센서관 내의 열전달 현상을 묘사할 수 있다. 우선 관 영역에 대해서는 식 (3)의 지배 방정식이 성립한다.

$$k_i A_i \bar{T}_i'' + h_i P (\bar{T}_f - \bar{T}_i) - \frac{1}{R_i} (\bar{T}_i - T_{amb}) + q' = A_i \rho_i C_i \frac{\partial \bar{T}_i}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 좌변의 첫번째 항은 축 방향의 전도를 나타내고, 두번째 항은 유체로의 열전달을 의미하며, 세번째 항은 주변으로의 열손실을 나타낸다. 또한 유체에 대해서는 식 (4)의 지배 방정식이 성립한다.

$$k_f A_f \bar{T}_f'' - \dot{m} C_f \bar{T}_f' + h_i P (\bar{T}_i - \bar{T}_f) = A_f \rho_f C_f \frac{\partial \bar{T}_f}{\partial t} \quad (4)$$

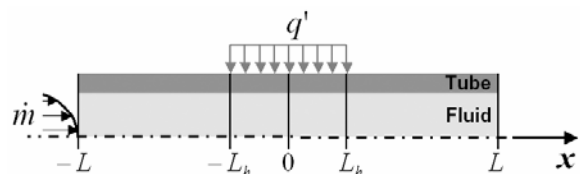


Fig. 3 Schematic diagram of a physical model

식 (3)과 식 (4)에서 관과 유체간의 열전달은 Interfacial heat transfer coefficient h_i 를 통해 표현되었다. h_i 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$h_i = \frac{q_{f'}'}{(\bar{T}_s - \bar{T}_f)} \quad (5)$$

여기서 $q_{f'}$ 는 관으로부터 유체로의 열유속이다. 식 (5)에서 유체의 Bulk mean temperature 대신에 평균 온도가 쓰였음에 주의하여야 한다. 본 연구에서는 h_i 의 값을 구하기 위해 일정 열유속이 가해지는 관내 층류 유동에 대한 Interfacial Nusselt number를 사용하였다.

$$Nu_i = \frac{h_i D_{in}}{k_f} = 6 \quad (6)$$

또한 경계 조건들은 다음과 같다.

$$\bar{T}_i(x = -L) = T_{amb} \quad (7)$$

$$\bar{T}_i(x = L) = T_{amb} \quad (8)$$

$$\bar{T}_f(x = -L) = T_{amb} \quad (9)$$

$$\bar{T}_f'(x = L) = 0 \quad (10)$$

여기서 관의 양 끝단의 온도는 대기 온도로 가정하였으며, 유체 출구에 대해서는 유체의 온도가 Local one-way behavior를 보인다고 보는 Patankar의 가정을 사용하였다⁹⁾. 지배방정식은 Control-volume-based finite difference method를 통해 수치 해석되었다. 전도항과 대류항은 Power law scheme을 사용해 Discretization되었고, 과도항은 Fully implicit scheme을 통해 Discretization되었다. Discretization된 지배 방정식들을 ADI method를 이용해 풀었다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서는 제안된 수학적 모델을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. Fig.4는 실험 장치의 개략도이다. 센서관의 길이는 91mm이고 재질은 stainless steel 304이다. 관에 열을 가하기 위해 관의 표면에 Nickel-Chromium alloy 재질의 열선을 감고, 관의 온도를 측정하기 위해 관의 축방향으

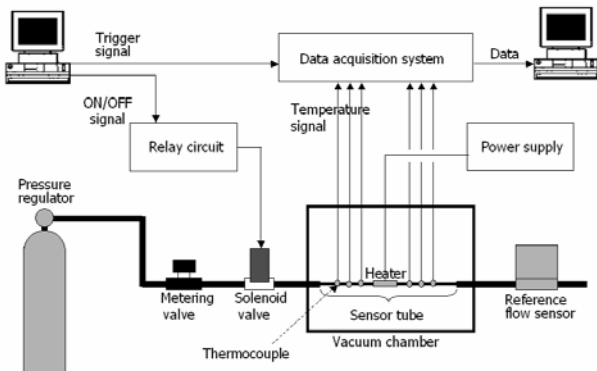


Fig. 4 Experimental apparatus

로 9개의 직경 0.0125mm K-type 열전대를 설치했다. 센서관은 Vacuum chamber 안에 설치하였는데, 그 이유는 10^{-4} torr 이하의 압력에서는 센서관 외부에서 발생하는 자연 대류의 효과를 무시할 수 있고 열손실이 복사에 의해서만 일어나므로 열손실량을 손쉽게 구할 수 있게 되기 때문이다. 작동 유체로는 열식 질량 유량계의 Calibration에 흔히 쓰이는 질소 가스를 썼다. 센서관에 흐르는 유량을 Setting하기 위해 Metering valve를 썼고, 관내 유량을 측정하기 오차 $\pm 1\%$ 의 Brooks사의 Model 5850 유량계를 사용했다. 과도 특성을 알아보기 위해 센서관의 상류에 부착된 Solenoid valve가 열리는 순간부터 온도를 측정했다. 실험은 0 ~ 50 sccm의 유량 범위에서 행해졌다.

4. 결과 및 토의

4.1 센서관에서 일어나는 과도 열전달 현상

Fig. 5 ~ Fig. 7은 과도 상태에서의 센서관 벽면 온도 구배를 보여준다. 그림에서 보듯, 수학적 모델의 결과가 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 초기 상태에서 센서관의 온도 구배는 대칭적이지만 시간이 흐를수록 센서관 앞단과 뒷

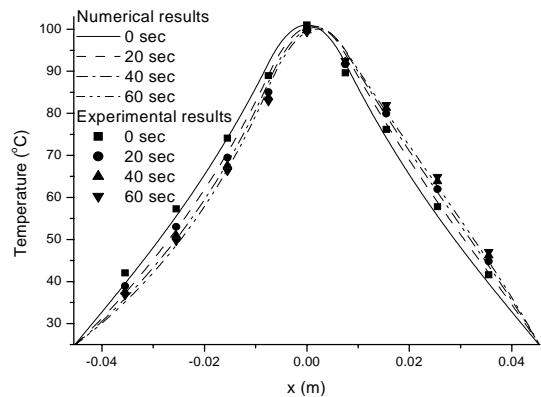


Fig. 5 Tube wall temperature profiles ($D_{out}=1.257\text{mm}$, $D_{in}=0.977\text{mm}$, $\dot{m}=10\text{sccm}$)

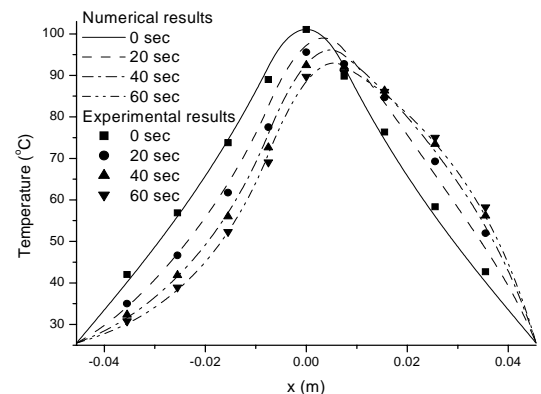


Fig. 6 Tube wall temperature profiles ($D_{out}=1.257\text{mm}$, $D_{in}=0.977\text{mm}$, $\dot{m}=30\text{sccm}$)

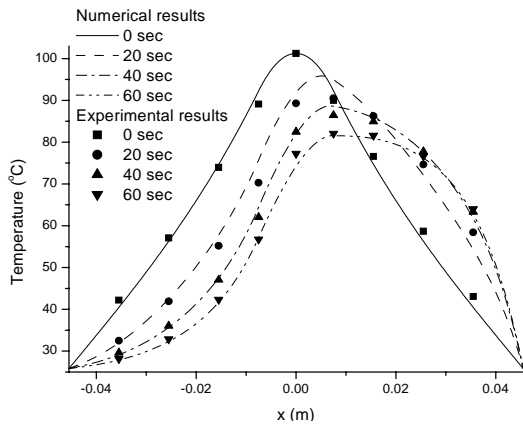


Fig. 7 Tube wall temperature profiles
($D_{out}=1.257\text{mm}$, $D_{in}=0.977\text{mm}$, $\dot{m}=50\text{sccm}$)

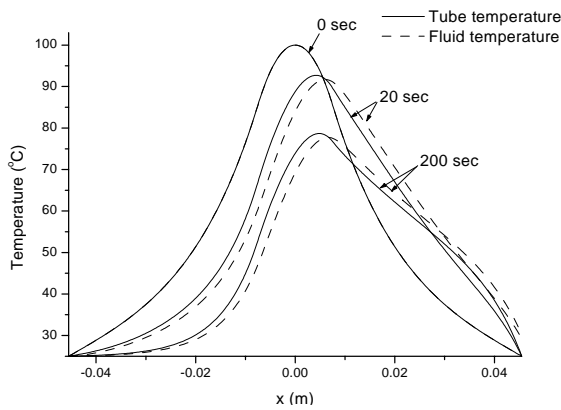


Fig. 8 Tube temperatures and fluid temperatures

단간의 온도차가 커지는 것을 볼 수 있다. Fig. 8 는 과도 상태에서의 관의 온도 구배 및 유체의 온도 구배를 보여준다. 유체가 흐르지 않을 때에는 관 온도와 유체 온도의 차이가 없다. 하지만 유체가 흐르기 시작하면 센서관의 앞단에서는 관의 온도가 유체의 온도보다 높게되고 센서관의 뒷단에서는 관의 온도가 유체의 온도보다 낮아진다. Fig. 8 으로부터 과도상태 센서관의 열전달 Mechanism 은 다음과 같이 설명할 수 있다. 과도 상태에서는 낮은 온도의 유체가 센서관의 입구를 통해 센서관의 앞단으로 흘러 들어온다. Heater 로부터 공급되는 열에 의해 센서관 앞단에서의 관의 온도는 인접한 유체의 온도보다 높기 때문에 관에서 유체쪽으로 열이 전달되고 유체는 가열되게 된다. 센서관 앞단에서 가열된 유체는 센서관 뒷단으로 흘러 들어간다. 가열된 유체의 온도는 뒷단의 관의 온도보다 높다. 따라서 센서관의 뒷단에서는 유체에서 관쪽으로 열전달이 일어난다. 결국 유체의 흐름은 센서관의 앞단에서 뒷단으로 열을 전달시키게 되고, 센서관의 앞단과 뒷단의 온도차가 증가하게 된다. 하지만 시간이 흐름에 따라 센서관 앞단에서 주변으로의, 센서관 뒷단에서 주변으로의,

센서관 뒷단에서 앞단으로의 축방향 전도량이 변하게 된다. 결국, 축방향 전도에 의해 전달되는 열량의 변화량이 유체에 의해 앞단에서 뒷단으로 전달되는 열량과 같아지게 되고, 센서관의 온도는 정상 상태에 이르게 된다.

4.2 센서관의 응답 시간

센서관의 응답 시간은 여러가지 방법으로 정의될 수 있다. 본 연구에서는 센서관의 응답 시간을 다음과 같이 정의했다.

$$\frac{[\bar{T}_i(-L_s, t_{resp}) - \bar{T}_i(L_s, t_{resp})] - [\bar{T}_i(-L_s, 0) - \bar{T}_i(L_s, 0)]}{[\bar{T}_i(-L_s, t_{final}) - \bar{T}_i(L_s, t_{final})] - [\bar{T}_i(-L_s, 0) - \bar{T}_i(L_s, 0)]} = 0.95 \quad (11)$$

여기서 t_{final} 은 정상 상태에 이를 때까지 걸리는 시간이고 t_{resp} 는 응답 시간이다. 식 (11)에서 응답 시간은 센서관의 온도차가 정상 상태 값의 95%에 이를 때 까지 걸리는 시간을 나타낸다. L_s 는 센서관의 중심에서 각 센서까지의 거리이다.

본 연구에서는 응답 시간을 정량적으로 예측할 수 있는 상관식을 제시하도록 하겠다. 이를 위해서 우선 응답 시간에 대한 상관식이 어떤 함수 형태를 가져야 하는지 Scale analysis 를 통해 알아본다. 분석을 단순화 하기 위해 다음을 가정한다.

$$\bar{T}_i \approx \bar{T}_f \approx \bar{T} \quad (12)$$

$$k_i A_i \gg k_f A_f \quad (13)$$

$$A_i \rho_i C_i \gg A_f \rho_f C_f \quad (14)$$

위 가정에 의해 식 (3)과 식 (4)는 식 (15)로 단순화 된다.

$$k_i A_i \bar{T}'' - \dot{m} C_f \bar{T}' + q' - \frac{1}{R_f} (\bar{T} - T_{amb}) = A_i \rho_i C_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (15)$$

우선 반경방향 열손실이 무시할 만할 때에 대해 생각해 보자. 식 (15)에서 열손실항을 지우면 식 (16)이 된다.

$$k_i A_i \bar{T}'' - \dot{m} C_f \bar{T}' + q' = A_i \rho_i C_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (16)$$

식 (16)에서부터 식 (17) ~ 식 (22)를 얻을 수 있다.

$$k_i A_i \bar{T}(-L_s, 0)' + q' = 0 \quad (17)$$

$$k_i A_i \bar{T}(L_s, 0)' + q' = 0 \quad (18)$$

$$k_i A_i \bar{T}(-L_s, \infty)' - \dot{m} C_f \bar{T}(-L_s, \infty)' + q' = 0 \quad (19)$$

$$k_i A_i \bar{T}(L_s, \infty)' - \dot{m} C_f \bar{T}(L_s, \infty)' + q' = 0 \quad (20)$$

$$k_i A_i \bar{T}(-L_s, t)'' - \dot{m} C_f \bar{T}(-L_s, t)' + q' = A_i \rho_i C_i \frac{\partial \bar{T}(-L_s, t)}{\partial t} \quad (21)$$

$$k_i A_i \bar{T}(L_s, t)'' - \dot{m} C_f \bar{T}(L_s, t)' + q' = A_i \rho_i C_i \frac{\partial \bar{T}(L_s, t)}{\partial t} \quad (22)$$

식 (17) ~ 식 (22)를 조합하면 식 (23) ~ 식 (26)을 얻게 된다.

$$k_i A_i (\bar{T}(L_s, 0)' - \bar{T}(-L_s, 0)') = 0 \quad (23)$$

$$k_i A_i (\bar{T}(L_s, \infty)' - \bar{T}(-L_s, \infty)') - \dot{m} C_f (\bar{T}(L_s, \infty)' - \bar{T}(-L_s, \infty)') = 0 \quad (24)$$

$$k_i A_i (\bar{T}(L_s, \infty)' + \bar{T}(-L_s, \infty)') - k_i A_i (\bar{T}(L_s, 0)' + \bar{T}(-L_s, 0)') - \dot{m} C_f (\bar{T}(L_s, \infty)' + \bar{T}(-L_s, \infty)') = 0 \quad (25)$$

$$k_i A_i (\bar{T}(L_s, t)' - \bar{T}(-L_s, t)') - \dot{m} C_f (\bar{T}(L_s, t)' - \bar{T}(-L_s, t)') = A_i \rho_i C_i \frac{\partial (\bar{T}(L_s, t) - \bar{T}(-L_s, t))}{\partial t} \quad (26)$$

식 (23) ~ 식 (26)에 대한 Scale analysis 를 수행하기 위해서는 센서관의 특성 온도를 정의해야 한다. Fig. 9 를 보면 알 수 있듯, 센서관의 온도는 2 가지의 특성 온도로 나타낼 수 있다. 하나는 센서관 앞단에 대한 특성온도 T_D 이고 다른 하나는 센서관 뒷단에 대한 특성온도 T_U 이다. 이 2 개의 특성 온도를 이용하여 식 (23) ~ 식 (26)에 대한 Scale analysis 를 수행하면 식 (27) ~ 식 (30)를 얻게 된다.

$$\frac{k_i A_i}{L^2} T_i^U \sim \frac{k_i A_i}{L^2} T_i^D \quad (27)$$

$$\frac{k_i A_i}{L^2} (T_F^D - T_F^U) \sim \frac{\dot{m} C_f}{L} (T_F^D + T_F^U) \quad (28)$$

$$\frac{k_i A_i}{L^2} (T_i^D + T_i^U) \sim \frac{k_i A_i}{L^2} (T_F^D + T_F^U), \frac{\dot{m} C_f}{L} (T_F^D - T_F^U) \quad (29)$$

$$\frac{k_i A_i}{L^2} (T_T^U - T_T^D), \frac{\dot{m} C_f}{L} (T_T^D + T_T^U) \sim A_i \rho_i C_i \frac{(T_F^D - T_F^U) - (T_i^D - T_i^U)}{t_{resp}} \quad (30)$$

여기서 하첨자 I, F, T 는 각각 초기 상태, 최종 상태, 과도 상태를 의미한다. 식 (27) ~ 식 (30)를 정리하면, 반경 방향 열손실이 무시할 만할 때 응답시간은 식 (31), 식 (32)와 같이 주어진다.

$$t_{resp} \sim \frac{A_i \rho_i C_i L}{\left(\frac{k_i A_i}{L}\right)} \left(\frac{k_i A_i}{L^2} \gg \frac{\dot{m} C_f}{L} \text{ 일 때}\right) \quad (31)$$

$$t_{resp} \sim \frac{A_i \rho_i C_i L}{(\dot{m} C_f)^2} \left(\frac{k_i A_i}{L}\right) \left(\frac{k_i A_i}{L^2} \ll \frac{\dot{m} C_f}{L} \text{ 일 때}\right) \quad (32)$$

유사한 방법으로, 축방향 전도가 무시할 만할 때에 대해서 응답 시간은 식 (33), 식 (34)로 주어진다.

$$t_{resp} \sim \frac{\rho_i c_i A_i L}{\left(\frac{L}{R_r}\right)} \left(R_r \gg \frac{\dot{m} C_f}{L} \text{ 일 때}\right) \quad (33)$$

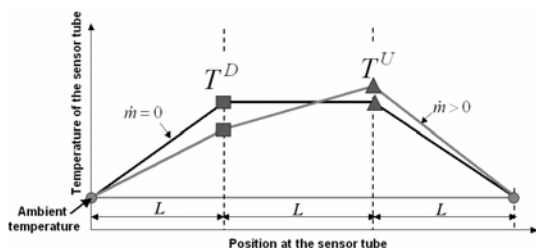


Fig. 9 Characteristic temperatures

$$t_{resp} \sim \frac{\rho_i c_i A_i L}{(\dot{m} C_f)^2} \left(\frac{L}{R_r}\right) \left(R_r \ll \frac{\dot{m} C_f}{L} \text{ 일 때}\right) \quad (34)$$

식 (31) ~ 식 (34)의 결과에 의해 응답 시간에 대한 상관식의 형태가 식 (35)와 같다는 것을 알 수 있다.

$$t_{resp} \approx \frac{\rho_i c_i A_i L}{\left(C_1 \frac{k_i A_i}{L} + C_2 L \frac{1}{R_r}\right) \left[1 + \left(\frac{\dot{m} C_f}{C_3 \frac{k_i A_i}{L} + C_4 L \frac{1}{R_r}}\right)^2\right]} \quad (35)$$

상관식을 완성하기 위해서는 상관식의 계수들의 값을 알아야 하는데 이는 앞서 검증된 수학적 모델을 이용한 수치 해석을 통해 구할 수 있다. 구해진 상관식의 계수들을 Table 1 에 나타내었다.

식 (35)와 수치 해석 결과를 비교하여 Fig. 10 에 나타내었다. 상관식이 수치 해석 결과와 잘 일치하는데, 이것은 식 (35)가 타당한 함수 형태이고 계수들이 정확히 구해졌음을 의미한다. Fig. 11 과 Fig. 12 는 식 (35)와 본 연구에서 수행한 실험 결과들을 비교한 것으로 식 (35)가 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

L_h / L_s	L_s / L	Coefficients			
		C_1	C_2	C_3	C_4
0.25	0.2	3.427	0.4407	1.986	0.2356
	0.4	3.341	0.3349	1.955	0.2268
	0.6	3.352	0.2745	1.927	0.2319
	0.8	3.445	0.2421	1.875	0.2425
0.5	0.2	3.415	0.4382	1.983	0.2344
	0.4	3.350	0.3379	1.961	0.2248
	0.6	3.367	0.2933	1.924	0.2366
	0.8	3.498	0.2846	1.877	0.2483
0.75	0.2	3.411	0.4291	1.986	0.2303
	0.4	3.337	0.3441	1.954	0.2277
	0.6	3.391	0.3203	1.925	0.2404
	0.8	3.571	0.3500	1.879	0.2506

Table 1 Coefficients for the correlation

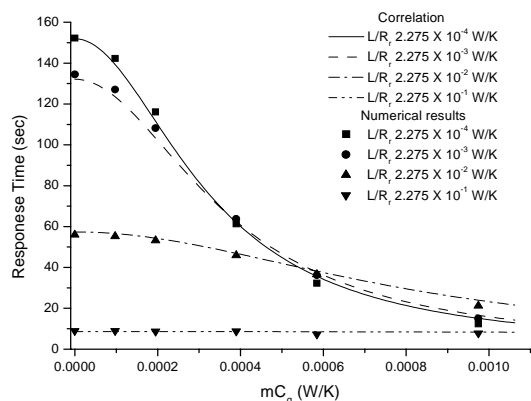


Fig. 10 Comparison between response times by using the correlation and by using the simple numerical model ($L_h/L_s=0.5, L_s/L=0.2, \rho_i c_i A_i L=8.243 \times 10^{-2} \text{ J/K}, k_i A_i/L=1.609 \times 10^{-4} \text{ W/K}$)

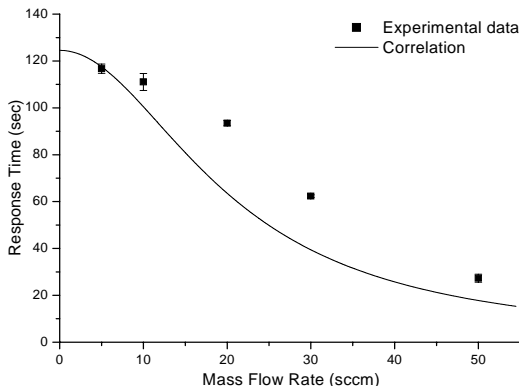


Fig. 11 Response times of the sensor tube ($D_{out}=1.257$ mm, $D_{in}=0.977$ mm, $L_H/L_S=0.5$, $L_S/L=0.2$)

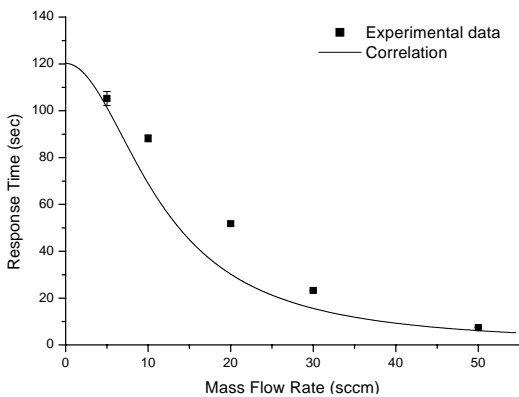


Fig. 12 Response times of the sensor tube ($D_{out}=0.812$ mm, $D_{in}=0.562$ mm, $L_H/L_S=0.5$, $L_S/L=0.2$)

상관식으로부터 열식 질량 유량계 센서관 응답 시간의 몇가지 경향에 대해 알 수 있다.

- 1) 응답 시간은 항상 센서관의 열용량($\rho_t c_t A_t L$)에 비례한다.
- 2) 유량이 작은 경우 응답 시간은 축방향 전도량과 반경방향 열손실량이 클수록 빠르다. 반대로 유량이 큰 경우 응답 시간은 축방향 전도량과 반경방향 열손실량이 작을수록 빠르다.
- 3) 응답시간은 질량 유량이 커질수록 빨라진다.
- 4) 응답 시간은 유체의 열전도도에만 영향을 받고 나머지 유체의 물성치에는 거의 영향을 받지 않는다.

5. 결 론

본 연구에서는 열식 질량 유량계 센서관에서의

과도 열전달 현상 해석을 위한 간단한 모델을 제시하였다. 제시된 모델을 통하여 과도 상태에서의 관 온도 및 유체 온도에 대한 수치해를 구하였으며 구해진 수치해를 실험 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 검증된 수치해를 통해 과도 상태의 센서관에서 일어나는 열전달 현상에 대해 분석하였고 센서관의 응답 시간을 정량적으로 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다.

후 기

이 논문은 Center for Electronic Packaging Materials of Korea Science and Engineering Foundation 의 지원에 의하여 연구되었음

참고문헌

- (1) Van der Wiel, A. J., Linder, C., De Rooij, N. F., and Bezinge, A., 1993, "A Liquid Velocity Sensor based on the Hot-wire Principle," *Sensors and Actuators, A* **37-38**, pp. 693-697.
- (2) Tison, S. A., 1996, "A Critical Evaluation of Thermal Mass Flow Meters," *J. Vac. Sci. Technol., A* **14(4)**, pp. 2582-2591.
- (3) Rudent, P., and Navratil, P., 1998, "Design of a New Sensor for Mass Flow Controller using Thin-film Technology based on an Analytic Thermal Model," *J. Vac. Sci. Technol., A* **16(6)**, pp. 3559-3563.
- (4) Widmer, A. E., Fehlmann, R., and Rehwald, W., 1992, "A Calibration System for Calorimeter Mass Flow Device," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **15**, pp. 213-220.
- (5) Komiya, K., Higuchi, F., and Ohtani, K., 1998, "Characteristics of a Thermal Gas Flowmeter," *Rev. Sci. Instrum.*, **59(3)**, pp. 477-479.
- (6) Kim, S. J., and Jang, S. P., 2001, "Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer Phenomena in a Sensor Tube of a Mass Flow Meter," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **44**, pp. 1711-1724.
- (7) Hinkle, L. D., and Mariano, C. F., 1991, "Toward Understanding the Fundamental Mechanisms and Properties of the Thermal Mass Flow Controller," *J. Vac. Sci. Technol., A* **9(3)**, pp. 2043-2047.
- (8) Toda, K., Maeda, C., Sanemasa, I., Ishikawa, K., and Kimura, N., 1993, "Characteristics of a Thermal Mass-flow Sensor in Vacuum Systems," *Sensors and Actuators, A* **69**, pp. 62-67.
- (9) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corp., New York.