

< 논문 >

가열모드에 따른 열식 질량유량센서의 설계 해석

전홍규* · 이준식* · 박병규†

(2007년 6월 12일 접수, 2007년 8월 22일 심사완료)

Numerical Analysis on the Design of a Thermal Mass Air Flow Sensor with Various Heating Modes

Hong Kyu Jeon, Joon Sik Lee and Byung Kyu Park

Key Words: Thermal Mass Flow Sensor(열식 질량유량센서), Sensing Location (감지위치), Micro-Thermopile(마이크로 열전퇴), MEMS Sensor Design(멤스 센서 설계)

Abstract

Numerical simulations are conducted for the design of a micro thermal mass air flow sensor (MAFS), which consists of a microfabricated heater and thermopiles on the silicon-nitride (Si_3N_4) thin membrane structure. It is important to find the proper locations of these thermal elements in the design of MAFS with improved sensitivity. Three heating modes of the micro-heater are considered: constant temperature, constant power and heating pulses. The analyses are focused on the membrane temperature profile near the sensing section. Considered are the practical flow velocities, ranging from 3 m/s to 35 m/s, and the corresponding Reynolds numbers from 1000 to 10000. The results show that one of optimum sensing locations is about $100\mu\text{m}$ away from the microheater. It is concluded that the heating mode and configurations of thermal elements are the main factors for the MAFS with higher sensitivity.

기호설명

P : 열유속 [mW]
 Re : Reynolds 수 ($= u_i d_h / \nu$)
 S : 측정 민감도
 T : 온도 [K]
 T_o : 기준 ($u = 0$) 온도 [K]
 d_h : 수력 직경 [m]
 t : 시간 [ms]

t_i : 가열 펄스 시작점 [ms]
 t_d : 가열 시간 ($= t_o - t_i$) [ms]
 t_o : 가열 펄스 종료점 [ms]
 u : 유속 [m/s]
 x_e : 마이크로 히터 중앙을 기준으로 히터 외부선단에서 떨어진 거리 [mm]
 x_m : 멤브레인 기준 거리 [mm]

그리스문자

Δ : 상·하류 간 차이
 θ : 무차원 온도 [-]
 ν : 동적 점성도 [m^2/s]

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : bkpark@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1705 FAX : (02)887-2486

* 서울대학교 기계항공공학부

하첨자
down: 하류 (downstream)

- h : 히터
- i : 입구
- max : 최대
- up : 상류 (upstream)

1. 서론

유량측정은 많은 산업 및 연구분야에서 중요한 기반기술로서, 특히 자동차 엔진의 공연비 제어, 반도체 장비의 공정 제어, 의료 기기, 대기환경 측정 등 다양한 분야로 활용이 확대됨에 따라 최근에는 더욱 정밀하고 소형인 유량센서 기술이 주목을 받고 있다. 반도체제조 공정기술이 발달함에 따라 이를 이용하여 훨씬 단순하고 미세한 구조를 가지면서 성능이 향상된 저가의 마이크로 센서를 제작하는 것이 가능하게 되었다.

멤스(MEMS) 공정을 이용한 유량센서는 크게 열식과 비열식으로 나눌 수 있다. 비열식의 경우 유체의 저항력, 압력차, 코리올리(Coriolis) 힘 등의 원리를 이용하고 있어서 작동 유체의 밀도에 민감하거나 구조가 복잡한 단점을 가지고 있다. 기체 및 미소 액체 유량 측정에 상대적으로 유리한 열식의 경우에는 주로 열선/열막을 통한 열전달, 열량 측정(칼로리미터), 발열파의 열적 비행시간 측정 등의 원리를 응용하고 있다.^(1,2)

열식 질량유량센서는 기본적으로 단열이 양호한 박막구조 위에 열을 발생시키는 가열부와 유속의 변화에 따른 온도차를 측정하는 온도 감지부로 구성되어 있다. 일반적으로 단열 구조로는 기판보다 유체로의 열전달을 크게 하여 유속의 측정 감도를 높이기 위해 마이크로 브리지 및 박막 등 여러 형태의 구조가 많이 채용되고 있다.⁽³⁾

열식 마이크로 질량유량센서는 유속에 따른 대류 열전달의 변화를 이용하여 유속을 측정하기 때문에 설계 제작 시 열원에 의해 생기는 주변 온도 변화의 측정, 즉 온도감지 위치는 측정 유속 범위와 감도에 매우 큰 영향을 미치므로 중요한 설계인자이다. 또한 가열부는 전자회로를 이용하면 다양한 가열 모드로 제어할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 박막 구조 위에 다양한 가열 모드(일정 온도, 일정 열유속, 가열 펄스)로 작동하는 열식 질량 유량센서에 대해서 2차원 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 각 히터의 가열

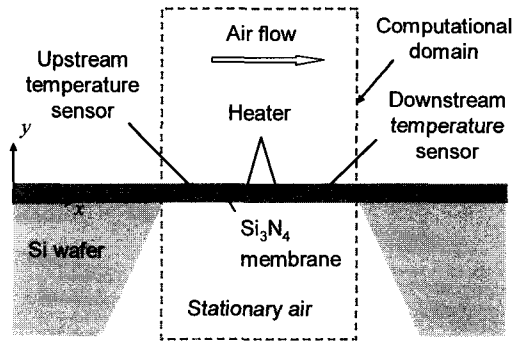


Fig. 1 Schematic of flow sensor and the computational domain

모드에서 높은 정밀도로 유속을 측정할 수 있는 온도 센서 위치를 파악하여 멤스공정을 이용한 고정밀 열식 질량유량센서의 설계 및 마이크로 제조를 도모하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 해석 방법

멤스공정으로 제작되는 마이크로 질량유량센서의 주요부를 Fig. 1에 나타냈다. 이 중에서 계산 영역은 가열부 및 감지부를 지지하고 있는 질화실리콘 박막을 기준으로 상부의 공기유동과 하부의 공동만을 포함하도록 설정하였다. 즉, 마이크로 센서 전체를 계산영역으로 설정할 경우 많은 격자수가 필요하고 계산 시간이 지나치게 오래 걸리므로, 센서에서 실제 유속 변화에 따른 온도 변화가 중요한 부분만을 설정하였다. 이 해석영역은 가로 1000 μm , 세로 1102 μm 이고, 해석영역 내부에는 마이크로 히터를 기준으로 상하 각각 1 μm 의 질화실리콘 지지막이 있으며, 공기주유동 영역은 박막 상부로부터 600 μm 이다. 격자는 GAMBIT 을 사용하여 생성하였고, FLUENT 6.0 을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 실제 해석에 앞서 격자 테스트를 통해 충분한 격자수와 간격을 유지하도록 하였으며, 이를 통해 가로 300, 세로 220개의 격자를 생성하였다. 히터와 박막 주변에 밀집시켜 격자를 배치하였고, 수렴 조건은 각 모드 및 조건에 대하여 모든 변수가 4×10^{-7} 이하의 잔여오차(residual error)를 유지하도록 설정하였다. 유동과 에너지 계산 시에는 2차 상류도식(upwind scheme)과 SIMPLE 알고리즘을

Table 1 Thermal properties of materials at room temperature (300 K)

Material	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/kg-K]	Thermal conductivity [W/m-K]
Air	1.225	1006.43	0.0242
Si	2330	712.50	150
Si ₃ N ₄	3184	710.61	2.31

사용하였다. 수치해석 모델은 Reynolds 수에 따라 층류와 표준 k-ε 난류모델을 사용하였고 난류강도는 균일유속을 기준으로 5%로 가정하여 계산을 수행하였다.

2.2 경계 조건

해석영역의 유동 경계조건을 설정하기 위해, 유속 5 ~ 35 m/s, 채널 높이 3 mm에 대해서 센서 전체 영역의 발달하는 경계층 유동에 대한 선행계산을 수행하고, 이를 통해 해당하는 유동장으로부터 본 해석영역의 입구 경계조건을 결정하였다(여기서 마이크로 센서 선단을 기준으로 한 Reynolds 수의 범위는 1000 ~ 10000 이다). 이때 온도 입구 경계조건은 상온(300 K)로 하였다. 지지박막의 하부는 예칭공정으로 만들 수 있는 공동으로 설정하였으며, 기저 물질인 실리콘의 온도 경계조건은 상온(300 K)으로 가정하여 계산도메인 외부의 온도 경계 조건은 모두 상온을 유지하도록 설정하였다. 마이크로 히터는 정밀제어기에 의해 일정 온도, 일정 열유속 및 가열 펄스로 조절되는 것으로 가정하였다. 본 해석에 사용한 유체 및 유량센서의 구성물질의 열물성치를 Table 1에 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1 일정 온도

일정 온도(constant temperature, CT)로 가열되는 마이크로 히터 주위를 수치해석하여 각 Reynolds 수에 대해서 박막 길이에 따른 무차원 온도 분포를 Fig. 2에 나타냈다. 여기서 x_m 축은 박막의 유동 방향 길이를 나타내고, θ 는 박막온도 T , 히터온

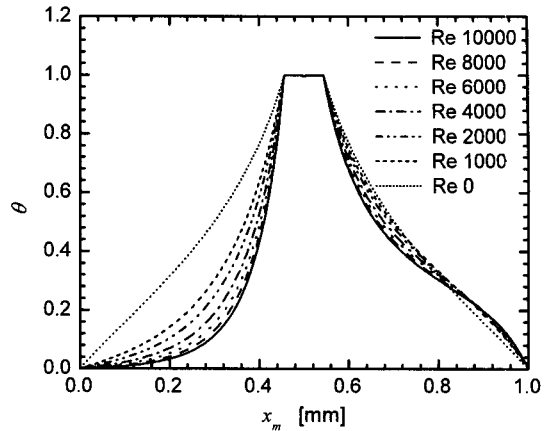


Fig. 2 Temperature profile of membrane for various Reynolds numbers (CT mode)

도 T_h 및 유동 입구온도 T_i 로 무차원화 한 특성 온도로서 다음과 표시된다.

$$\theta = \frac{T - T_i}{T_h - T_i} \quad (1)$$

Reynolds 수가 0인 경우에는 공기의 유동이 없으므로 상하류 온도분포곡선이 좌우 대칭성을 나타내고 있으며, 이 온도분포가 직선이 아닌 곡선형상인 것은 공기층으로의 전도열전달에 의한 것이다. 전도 및 자연대류 열전달 메카니즘의 기준을 나타내는 임계 Rayleigh 수는 일정 온도 조건인 경우 약 1300으로 보고된 바가 있고,⁽⁴⁾ 본 해석 모드들에서는 Rayleigh 수가 500 이하로 자연대류의 영향이 거의 없음을 재확인하였다.

박막의 온도 변화는 히터로부터 떨어져 있는 거리에 따라 달라지고, 유속이 증가할수록 히터를 기준으로 상류의 온도 강하가 하류의 온도 강하보다 더 크게 나타남을 알 수 있다. 상류에서는 유속이 증가함에 따라 대류 냉각 효과가 발생하여 전체 지점에서 온도가 감소한다. 그러나 히터에서 발생한 열이 대류에 의해 운반되어 하류에서는 고온공기에 의해 가열되어 온도 감소가 크지 않으며, 하류 끝 부분의 온도는 유동이 없는 경우보다 오히려 증가한다. 따라서 본 계산조건인 경우 질량유량센서의 응답은 상류에 설치된 온도 센서에 의해 크게 좌우되며, 측정감도 향상과 유동방향을 감지하기 위해서는 상류와 하류의 온도차를 이용하는 것이 바람직하다.⁽⁵⁾

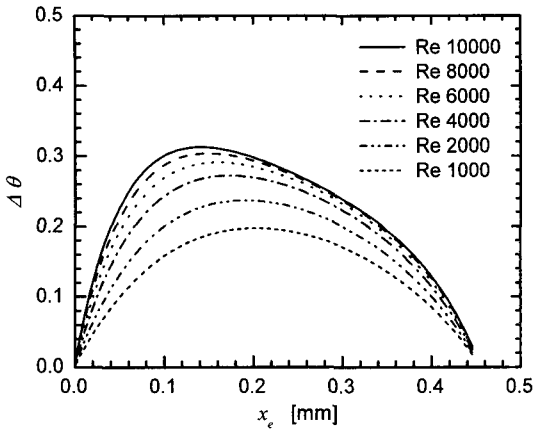


Fig. 3 Normalized temperature differences in the membrane (CT mode)

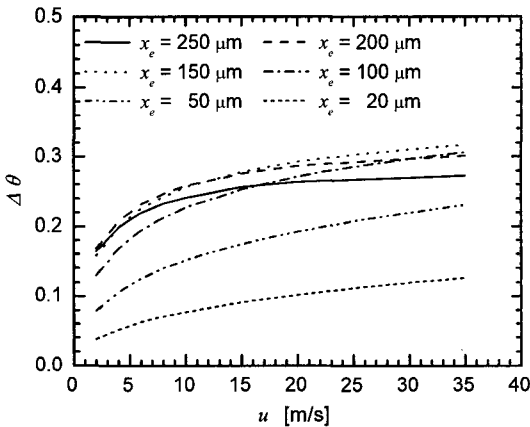


Fig. 4 Normalized temperature differences for flow velocity at various sensor locations (CT mode)

마이크로 히터의 중심으로부터 같은 거리만큼 떨어진 지점에 위치한 두 온도센서 간의 무차원 온도차 $\Delta\theta$ 를 Fig. 3에 나타냈다. 유속에 따른 무차원 온도차는 포물선 형태를 나타내며, 유속이 증가할수록 곡선의 최대점은 히터로 가까워지고 $\Delta\theta$ 증가율은 감소함을 알 수 있다. 따라서 일정 유속 이상에서는 유속 변화에 따른 $\Delta\theta$ 변화가 작아 유속을 측정할 수 없는 한계점에 도달하고, 이것은 히터와 센서 사이의 거리에 따라 좌우된다. 히터 선단으로부터 20 ~ 250 μm 떨어진 위치에서 유속 변화에 따른 $\Delta\theta$ 를 Fig. 4에 나타냈다. 히터에서의 이격거리

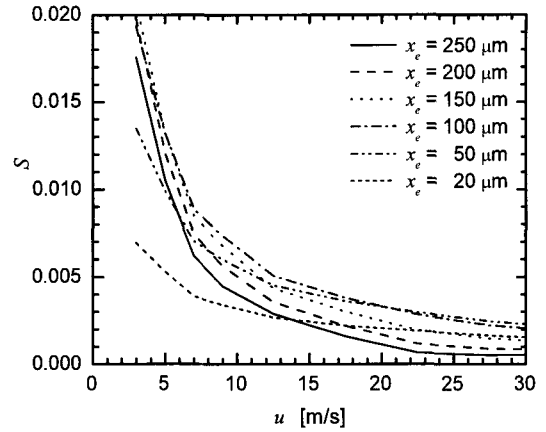


Fig. 5 Sensitivity variations of sensor operating at CT mode for flow velocity at various sensor locations

가 100 μm 이상일 때 고찰한 유속범위에서 상대적으로 $\Delta\theta$ 가 크지만 히터와의 거리가 멀어 질수록 고속 구간에서 $\Delta\theta$ 증가율이 둔화됨을 알 수 있다. 따라서 온도센서 위치를 결정하는데 있어 전체 유속범위에서 $\Delta\theta$ 뿐만 아니라 측정감도도 고려하여 적절한 위치를 선정해야 한다.

측정 감도는 여러 가지 방법으로 표현할 수 있지만, 본 연구에서는 유속 변화에 대한 상하류의 온도 차의 변화율로 다음과 같이 정의한다.

$$S = \frac{d(\theta_{down} - \theta_{up})}{d(v)} \quad (2)$$

히터로부터 떨어진 거리에 따른 측정감도를 Fig. 5에 나타냈다. 유속에 따른 $\Delta\theta$ 곡선과 반대로 유속이 증가할수록 측정감도는 감소하는 경향을 나타내고, 저속의 경우에는 히터에서 멀리 떨어진 지점에서, 고속의 경우에는 히터에 비교적 가까운 지점에서 높은 감도를 갖고 있다. 따라서 가능한 한 넓은 유속범위에서 최대한 높은 감도를 얻기 위해서 본 연구의 일정 온도 모드로 가열하는 열식 질량유량 센서의 온도측정 센서위치는 150 μm 이하로 설정하는 것이 바람직하며, 여러 사항들을 고려하여 온도측정 위치를 히터로부터 약 100 μm 떨어진 지점으로 정하는 것이 합리적이다.

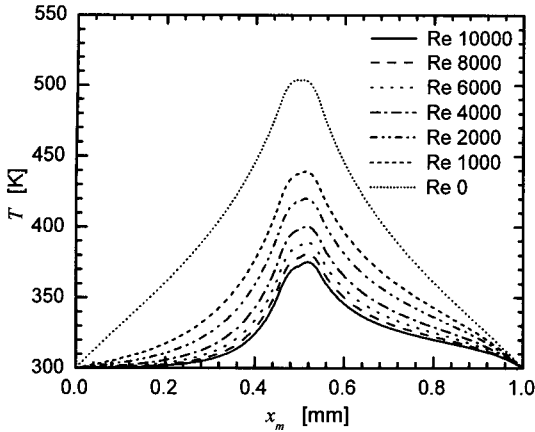


Fig. 6 Temperature profile of membrane for various Reynolds numbers (CP mode, 40 mW)

3.2 일정 열유속

일정 열유속(constant power, CP)으로 가열하는 박막히터 주위에 대한 온도 분포를 Fig. 6에 나타냈다. 일정 열유속 모드인 경우 유속이 증가하면 최고온도를 비롯하여 박막 전체의 온도가 강하함을 알 수 있다. 이것은 히터에서 발생한 일정한 열량에서 대류 열전달에 의한 손실이 증가하기 때문에 나타나는 자명한 결과이다. 박막 최고온도의 감소율은 유속에 따라 급격히 줄어들고 상하류 온도 분포는 비대칭성이 증가함을 알 수 있다. 개념적으로 일정 열유속으로 가열되는 마이크로 히터를 채용한 열식 질량유량센서는 유동의 상하류 두 지점에서의 온도차 ΔT 를 이용하는 방법과 유동이 없는 비유동상태의 온도분포 및 유동상태의 온도분포 차를 이용하여 유속을 측정하는 방법이 가능하다. 그러나 상하류에서의 온도차를 이용하는 경우, Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 유속이 증가함에 따라 ΔT 가 증가하고 측정감도가 좋은 영역은 매우 좁은 반면, 일정 유속 이상에서는 히터로부터 감지위치의 거리가 멀어짐에 따라 ΔT 의 구배를 이용한 유속 측정이 가능하지만 측정감도가 현저히 떨어지게 된다. 즉, 저속구간(5 m/s 이하)에 대해서는 온도 측정 위치를 100 μm 에서 150 μm 사이에 설치하는 것이 유속 측정에 유리하며, 고속구간(10 m/s 이상)에서는 150 μm 에서 200 μm 사이가 유리하여, 측정 유속 구간에 따라 온도 측정 위치를 다르게 설정해야 한다.

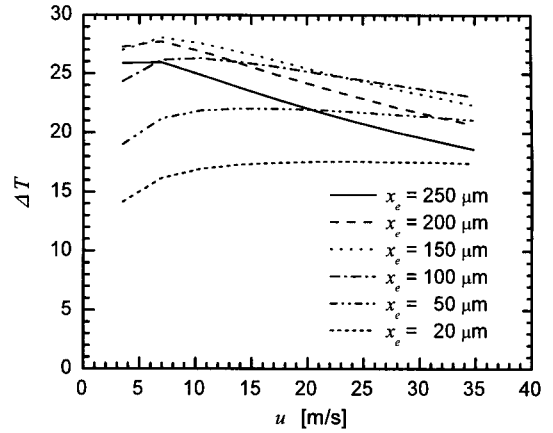


Fig. 7 Temperature differences for flow velocity at various sensor locations (CP mode, 40 mW)

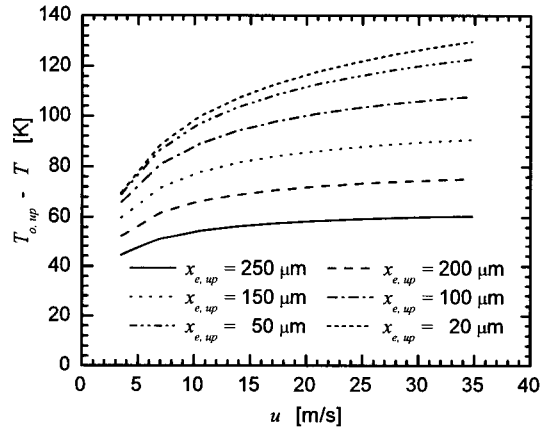


Fig. 8 Upstream temperature differences between no-flow and flow conditions at various sensor locations (CP mode, 40 mW)

한편 임의의 정해진 위치에서 비유동상태 및 유동상태 간의 상대적인 온도 차를 이용할 경우 대류에 의해 발생하는 열손실을 이용하므로 상류와 하류 영역 각각을 유속 측정에 이용할 수 있고, 특히 상류에서 더 큰 측정감도를 가진다. 이 방법은 상류의 한 지점에서만 측정하기 때문에 유동방향을 알 수 없으므로 하류의 온도센서를 보조적으로 이용하는 것이 좋다. 상류의 온도 측정 위치에 따른 유동 및 비유동 상태의 온도차를 Fig. 8에 나타냈다. 온도 측정 위치가 마이크로 히터에 가까울수록 온도구배가 크고 유속에 따른 온도차도 증가함을 알 수 있다. 따라서 이 경우

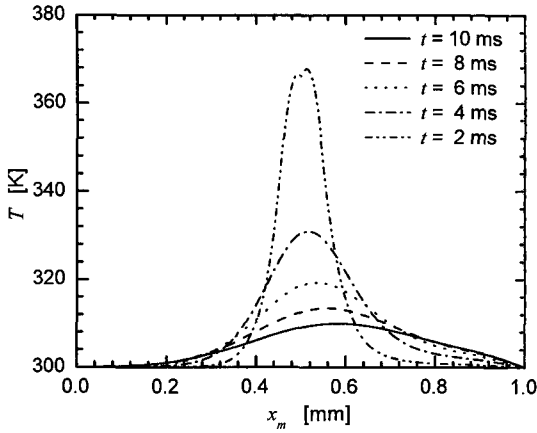


Fig. 9 Temperature profiles of membrane with time (Re 5000, 70 mW, $t_d = 2$ ms)

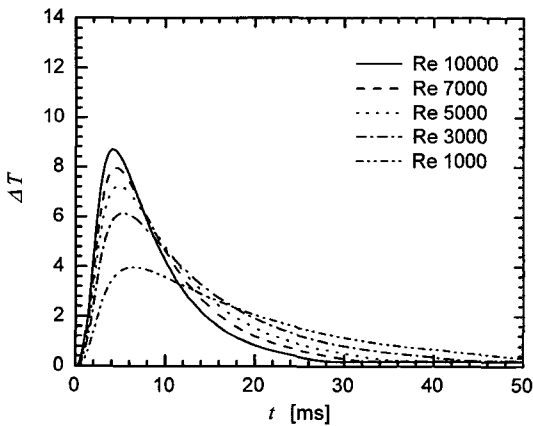


Fig. 10 Temperature differences with time for various Reynolds numbers ($100 \mu\text{m}$, 70 mW, $t_d = 2$ ms)

측정감도와 정밀도를 향상시키기 위해서는 가능한 한 히터에 가깝게 온도 센서를 설치하는 것이 유리함을 알 수 있다.

3.3 가열 펄스

가열 펄스(heating pulses, HP) 모드로 제어하는 질량유량센서에서는 열적 비행시간 및 온도차를 이용함으로써 유속 측정이 가능하다. Reynolds 수 5000, 열유속 70 mW, 가열 시간 2 ms인 경우 시간에 따른 센서지지 박막 중심층의 온도 분포를 Fig. 9에 나타냈다. 여기서 계산시간 간격은 $1 \mu\text{s}$ 로 하였다. 박막의 온도 분포는 가열 펄스가 끝나는 시점에서 가장 크며, 시간 경과에 따라 열

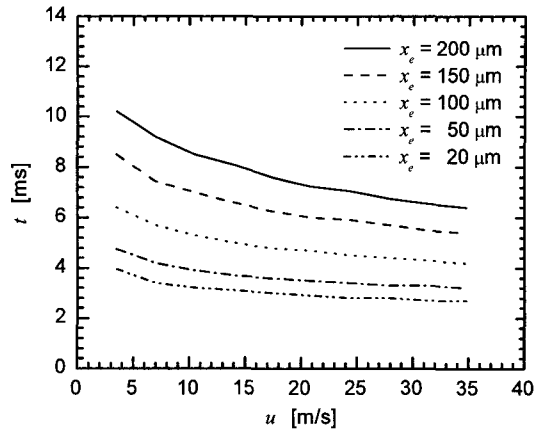


Fig. 11 Thermal time-of-flight for flow velocity at various sensor locations (70 mW, $t_d = 2$ ms)

전달에 의해 박막 전체로 열이 전파되는 모습을 볼 수 있다.

가열 펄스 모드로 제어되는 마이크로 히터를 채용한 열식 유량센서에서 박막 온도 분포로부터 시간 변화에 따른 상·하류의 온도차 ΔT 를 Fig. 10에 나타냈다. 히터에서 생성된 발열파는 유동 방향으로 진행할수록 유속분포 및 열확산에 의해 파형이 넓어진다.⁽⁷⁾ 또한 유속이 증가할수록 열적 비행시간은 줄어들고 열확산 시간이 감소하므로 감지되는 ΔT 및 그 변화율이 증가하고, 유속측정시 가열펄스간의 상호간섭이 없는 유효 가열 주파수를 약 30Hz까지 증가시킬 수 있다.

히터에서 생성된 발열파가 유속에 따라 주어진 거리에 도달하는데 걸리는 시간을 Fig. 11에 나타냈다. 히터와 온도센서간 거리가 증가할수록 발열파의 도달 시간이 증가하고, 시간 변화율이 늘어남을 알 수 있다. 따라서 본 해석조건에서 온도 측정 센서는 히터로부터 먼 곳에 설치할수록 좋고, 그 거리는 약 $100 \mu\text{m}$ 이상이 바람직함을 알 수 있다. 동일한 조건에서 유속에 따라 주어진 지점에 도달하는 ΔT_{max} 를 Fig. 12에 나타냈다. 히터로부터 센서까지의 거리가 가까울수록 유속에 따라 넓은 범위에서 단조 증가하고, 거리가 멀어질수록 증가율이 점점 감소하여 변화가 거의 없어 측정감도가 현저히 저하됨을 알 수 있다. 이것은 히터로부터 멀리 떨어진 경우 열확산의 영향으로 인해 이동 중 많은 열이 주변 유체로 소산되어 온도 상승이 크지 않기 때문이다.

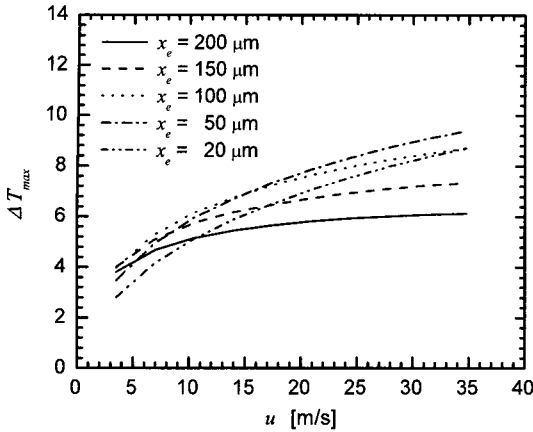
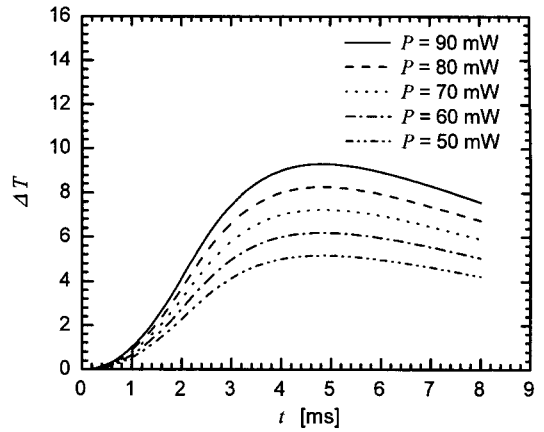


Fig. 12 Maximum temperature differences for flow velocity at various sensor locations (70 mW, $t_d = 2$ ms)

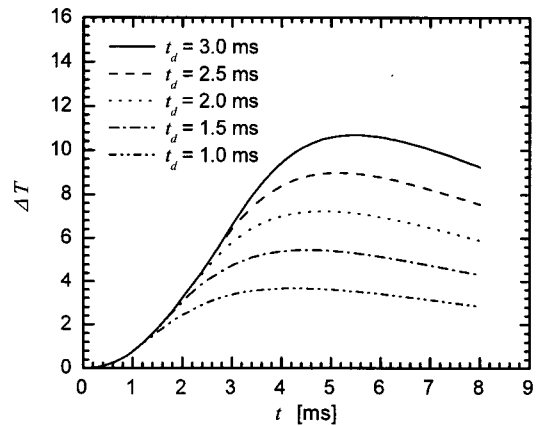
따라서 ΔT_{max} 를 이용한 유속 측정의 경우 온도 측정 센서는 히터 가까이 설치하는 것이 유리하고 그 거리는 $150 \mu\text{m}$ 이하가 바람직하다.

일정한 유속(Re 5000)에서 가열 펄스의 에너지량이 온도차에 미치는 영향을 파악하기 위해서 먼저 주어진 가열 펄스의 세기가 50 ~ 90 mW로 변할 때 시간의 경과에 따른 온도차를 Fig. 13(a)에 나타냈다. 주어진 유속에서 가열 펄스의 세기가 증가해도 발열과의 도달시간에는 변화가 없고 ΔT 만 증가함을 알 수 있다. 즉, 가열 펄스의 세기는 열적 비행시간에 영향을 주지 않고, 상·하류의 최대온도차만을 선형적으로 증가시키므로 히터와 센서간 거리가 큰 경우에도 유속측정이 가능해진다. 또한 가열 듀티 비(heating duty ratio) 즉, 히터의 가열 시간을 1 ~ 3 ms로 변화시켜 에너지량을 증가시킬 경우 주어진 거리 $100 \mu\text{m}$ 에서 시간에 따른 온도차를 Fig. 13(b)에 나타냈다. 가열 시간이 증가할수록 공급 에너지량이 증가하고 전도 열량의 증가로 인해 온도차가 증가하여 상·하류 최대온도차의 측정범위가 넓어진다. 그러나 공급 에너지량은 측정유체의 물성을 변화시키지 않는 범위 내에서 이루어져야 하는 것은 명확한 전제조건이다.

따라서 열적 비행시간을 이용하는 경우 설계유속이 정해지면 유속에 따른 유효비행시간 및 최대온도차의 측정감도를 고려하여 히터와 센서간의 거리를 결정하며, 필요에 따라 측정유체의 물성 변화에 영향을 미치지 않도록 가열 세기 및



(a) Power magnitude ($t_d = 2$ ms)



(b) Power width (P = 70 mW)

Fig. 13 Effects of (a) magnitude and (b) width of heating pulse on the temperature difference (Re 5000, $100 \mu\text{m}$)

가열 시간을 조절함으로써 유효한 측정범위를 확장할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 이용하여 뱀스공정으로 제조되는 열식 마이크로 질량유량센서의 설계에 대해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 마이크로 히터가 일정 온도 모드로 작동하는 경우, 민감도와 측정 신호를 고려하여, 상·하류 영역에 각각 히터로부터 약 $100 \mu\text{m}$ 지점에 온도 측정 센서를 설치하는 것이 바람직하다.

(2) 일정 열유속 모드의 경우, 상·하류 온도 차를 이용하면 저속의 제한된 유속에서만 측정이 가능하고, 상류의 온도차를 이용할 경우 히터 가까운 곳에 온도 센서를 설치하는 것이 좋다.

(3) 가열 펄스 모드의 경우, 열적 비행시간 및 상·하류의 온도차를 이용하여 유속을 측정할 때 공급에너지 량(가열 펄스의 크기와 폭)을 조절함으로써 유효 측정범위의 확대가 가능하다.

후 기

이 연구는 2005년도 서울시 산학연 협력사업의 신기술 연구개발 지원 사업으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Nguyen, N. T., 1997, "Micromachined Flow Sensors - A review," *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 8, No. 1, pp. 7~16.
- (2) Ashauer, M., Glosch, H., Hedrich, F., Hey, N., Sandmaier, H. and Lang, W., 1999, "Thermal Flow Sensor for Liquids and Gases Based on Combinations of Two Principles," *Sensors and Actuators*, A 73, pp. 7~13.
- (3) Buchner, R., Sosna, C., Maiwald, M., Benecke W. and Lang W., 2006, "A high-temperature Thermopile Fabrication Process for Thermal Flow Sensors," *Sensors and Actuators*, A 130, pp. 262~266.
- (4) Sparrow, E. M., Goldstein, R. J. and Jonsson, V. K., 1964, "Thermal Instability in a Horizontal Fluid Layer : Effect of Boundary Conditions and Non-linear Temperature Profile," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 18, pp. 513~528.
- (5) Sabate, N., Santander, J., Fonseca, L., Gracia, I. and Cane, C., 2004, "Multi-range Silicon Micromachined Flow Sensor," *Sensors and Actuators*, A 110, pp. 282~288.
- (6) Lammerink, T. S. J., Tas, N. R., Elwenspoek, M. and Fluitman, J. H. J., 1993, "Micro-Liquid Flow Sensor," *Sensors and Actuators*, A 37, pp. 45~50.
- (7) Elwenspoek, M., 1999, "Thermal Flow Micro Sensors," *Proceeding of IEEE Semiconductor Conference*, pp. 423~435.
- (8) Madou, M. J., 2002, *Fundamentals of Microfabrication*, Second Edition, CRC Press.
- (9) Park, B. K., Lee, J. S. and Oh, D. W., 2006, "Flow Sensing Devices and Micro Mass Flowmeter with Configurations of Cooling Air Channels," *KR Pat.*, 10-0692072, G01F 1/69.
- (10) Qiu, L., Hein, S., Obermeier, E., and Schubert, A., 1996, "Micro Gas-Flow Sensor with Intergated Heat Sink and Flow Guide," *Sensors and Actuators*, A 54, pp. 547~551.