

# 미소 유량 센서에 관한 실험적 연구

김 태훈<sup>†</sup> · 김 성진<sup>\*</sup>

## Experimental Study on a Micro Flow Sensor

Tae Hoon Kim and Sung Jin Kim

**Key Words :** Micro Flow Sensor (미소 유량 센서), Low Mass Flow Rate (미소 질량 유량)

### Abstract

In the present paper, a micro flow sensor, which can be used at bio-delivery systems and micro heat pumps, is developed. For this, the micro flow sensor is integrated on a quartz wafer ( $\text{SiO}_2$ ) and is manufactured by simple and convenient microfabrication processes. The micro flow sensor aims for measuring mass flow rates in the low range of about 0~20 SCCM. The micro flow sensor is composed of temperature sensors, a heater, and a flow microchannel. The temperature sensors and the heater are manufactured by the sputtering processes in this study. In the microfabrication processes, stainless steel masks with different patterns are used to deposit alumel and chromel for temperature sensors and nichrome for the heater on the quartz wafer. The microchannel is made of Polydimethylsiloxane(PDMS) easily. A deposited quartz wafer is bonded to the PDMS microchannel by using the air plasma. Finally, we confirmed the good operation of the present micro flow sensor by measuring flow rate.

### 기호설명

- $L$  : 히터에서 채널 입구까지의 거리  
 $L_{sp}$  : 히터와 온도 센서 간의 거리  
 $\alpha$  :  $L$  과  $L_{sp}$  의 비  
 $X$  : 채널 입구로부터의 거리

### 1 서론

MEMS기술의 출현은 생물학 분야, 연료 전지, 고성능 열 교환기 및 냉각 장치, 화학 분야 등의 다양한 응용 분야가 있는 마이크로 유체 시스템의 발전을 가능하게 하였다. 이러한 응용 분야에서 정밀한 유량의 제어가 필요하게 되는데 지금까지 사용되어져 온 상업용 유량 센서들은 민감도

(sensitivity)의 한계, 크기의 한계 등의 문제로 마이크로 유체 시스템에 바로 적용하기에는 부적절하다<sup>(1)</sup>. 이에 MEMS 기술이 마이크로 유체 시스템에 바로 적용할 수 있는 유량 센서의 개발을 위해 사용되고 있다<sup>(2-4)</sup>.

실리콘 기술(Silicon Technology)에 근간을 둔 미소 유량 센서는 1974년에 Putten과 Middelhoek<sup>(5)</sup>에 의해 처음으로 제시되었다. 그 이후 다양하고 많은 미소 유량 센서가 개발 되었다. 1990년 대에 들어서 미소 유량 센서는 보다 복잡하고 독특한 공정 과정을 가지는 방향으로 전개가 되었다. 그 결과 유량 센서는 채널이 집적화 된 구조로 발전하게 되었고 이전에는 유체가 미소 유량 센서 주변을 흘러갔지만 유체가 미소 유량 센서 내부를 흐르게 되었다. 즉, 미소 유량 센서를 만드는데 있어서 기존에 센서를 중심으로 한 기술 발전과 더불어 채널을 만들고 집적화 하는 기술까지 부가되었다.

이와 같이 발전해 온 다양한 미소 유량 센서 중에 열식 유량 센서가 마이크로 유체 시스템에 많이 적용되고 있다. 그 이유는 다른 방식의 유량 센서와 비교하여 열식 유량 센서는 작게 만들 수

<sup>†</sup> 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
 E-mail : gue13@kaist.ac.kr  
 TEL : (042)869-3083 FAX : (042)869-8207

<sup>\*</sup> 한국과학기술원 기계공학과

있고, 짧은 응답 시간을 가지며, 구동하는데 적은 전력을 소비 하는 등의 장점을 가지고 있기 때문이다<sup>(6)</sup>.

일반적으로 사용되는 열식 유량 센서는 채널 내에 흐르는 유체와 가열된 센서 칩 간의 열전달 현상에 따라 온도차가 존재하게 되고 이 온도차와 흐르는 유체의 질량 유량과 관계를 이용하여 작동하게 된다. 그러므로 열식 유량 센서의 구조는 전형적으로 하나의 히터가 센서 칩의 표면의 중앙 지점에 놓여 있고 히터의 앞 단과 뒤 단에 대칭적으로 온도 센서가 놓여 지게 된다. 유량에 따라 측정되는 온도차가 달라지는 것을 이용하여 유량을 측정하기 때문에 정확한 유량을 측정하기 위해서는 유량에 따른 정확한 온도차를 측정하여야 한다.

이와 같이 열식 미소 유량 센서에서는 정확한 온도차를 측정하여야 한다. 이를 위해 기존의 연구자들은 다양한 온도 센서를 이용하여 왔다. Kersjes et al.<sup>(7)</sup> 과 Wiel et al.<sup>(8)</sup> 등은 그들의 연구에서 정확한 온도차를 측정하기 위해 다이오드(Diode) 온도 센서를 사용하였다. 다이오드 온도 센서는 온도에 따라 다이오드에 걸리는 순방향 전류가 변하는 것을 이용하여 온도를 측정하는 것으로 MEMS 공정을 이용하여 제작할 시에는 공정과정이 복잡하며 또한 온도 센서를 제작한 후 복잡한 보정(Calibration) 과정이 필요하다는 단점이 있다. 그리고 Rasmussen et al.<sup>(9)</sup> 은 정확한 온도차를 측정하기 위해 RTD 온도 센서를 사용하였다. RTD 온도 센서는 온도의 변화에 따른 저항의 변화를 이용하여 온도를 측정하는 것으로 Lead Wire의 저항 변화를 예측하기 힘들고 이에 온도 센서의 보정(Calibration) 과정이 복잡하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 지금까지 이어져 온 미소 유량 센서를 제작하는 공정 과정과 다른 새로운 방식의 공정 과정을 가지는 미소 유량 센서를 개발하고자 한다. 본 연구에서 개발하는 미소 유량 센서는 일반적으로 MEMS 공정에서 사용하는 PhotoResist(PR) Mask가 아닌 다루기 쉽고 재사용이 가능한 Stainless Steel Mask를 사용하여 제작한다. 또한 미소 유량 센서의 온도 센서는 공정 과정이 간단하고 보정 과정이 필요 없는 Micro-thermal Sensor Array<sup>(10)</sup>을 이용한다.

## 2 제작 방법

### 2.1 미소 유량 센서

본 연구에서 제작된 미소 유량 센서는 지금까

지의 선행 연구자들이 연구해 온 방법과 비교하여 더 간편하고 간단한 공정을 가지고 있다. 앞에서도 언급한 것처럼 열식 유량 센서를 이용해 유량을 측정하기 위해서는 열을 발생시키는 히터와 온도를 측정할 수 있는 온도 센서가 필요하게 된다. 히터와 온도 센서는 Quartz Wafer(SiO<sub>2</sub>) 위에 스퍼터링(Sputtering) 공정을 이용하여 증착 된다. 본 내용에서는 이 히터와 온도 센서를 제작하는 방법과 특성에 대하여 언급하고자 한다.

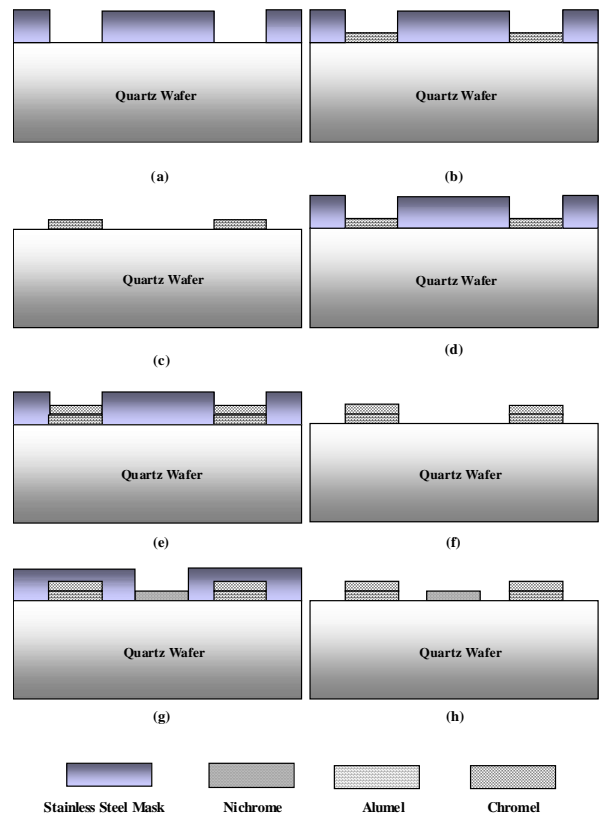


Fig. 1 Microfabrication Processes

미소 유량 센서에서 온도를 측정하기 위한 온도 센서는 일반적으로 MEMS 기구에서 사용되는 다이오드(Diode) 센서나 RTD 센서가 아닌 열전대(Thermocouple) 형식의 Micro-thermal Sensor Array<sup>(10)</sup>를 사용한다. 열전대의 측정 원리는 일반적으로 잘 알려진 Seebeck 효과를 사용하는 것이다. 일반적으로 금속 내에는 자유전자가 있으며 자유전자의 밀도는 금속에 따라 다르며, 또 고온으로 되면 될수록 밀도는 증가한다. 이런 특징을 응용하여 서로 다른 종류의 금속 A,B를 접합하여 그 양단에 온도차를 주게 되면 양단 간에 기전력이 생긴다. 이것을 열기전력(Thermoelectromotive Force)이라 부르며 이 현상을 Seebeck 효과라 부른다<sup>(11)</sup>. 본 연구에서는 앞에서 언급한 열기전력을 발생시

키기 위한 금속으로 K형 열전대에 해당하는 AlumeI 과 Chromel을 사용한다. Quartz Wafer 위에 증착 된 온도 센서는 일반적으로 사용되는 표준 K형 열전대와 똑 같은 센서 특성을 가지게 된다.

그림 1 은 미소 유량 센서를 제작하는 공정 과정의 순서도를 보여 준다. 그림 1 에서 보듯이 온도 센서에 해당하는 AlumeI 과 Chromel, 발열체에 해당하는 Nichrome 을 증착 하기 위해 일반적으로 MEMS 공정에서 사용하는 PR Mask 가 아닌 Stainless Steel Mask 를 사용한다. 본 연구에서 사용되는 Stainless Steel Mask 는 그림 2 에 나와 있다. PR Mask 가 한 번 쓰고 버리는데 반해 이 Stainless Steel Mask 는 계속하여 쓸 수 있다는 장점이 있고 또한 PR Mask 보다 다루기가 편리하다는 장점이 있다. 즉 비용 면에서나 공정 과정 면에 있어서 PR Mask 보다 Stainless Steel Mask 가 더 실용적이다. 각 Stainless Steel Mask 는 미소 유량 센서를 제작하기 위해 각각의 설계에 맞게 도안 되어 있다.

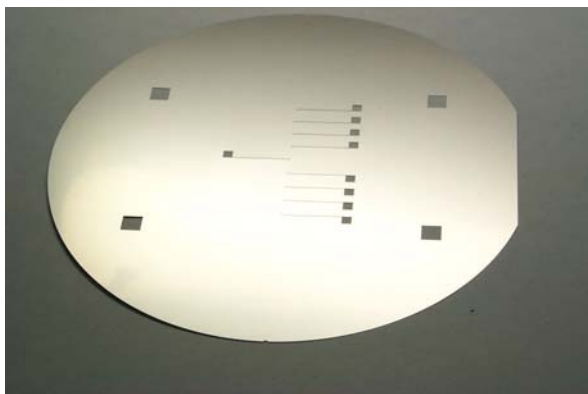


Fig. 2 Stainless Steel Mask for AlumeI

그림 3 은 그림 1 의 공정과정을 통하여 완성된 미소 유량 센서를 보여 준다. 그림 3 을 보면, 센서의 가운데 부분에 히터가 있고 그 부분을 전후에 9 개의 온도 센서가 놓여 있다. 앞에서도 언급했듯이 유량 측정을 위해서는 히터를 중심으로 앞 단과 뒤 단의 온도차를 알고 있으면 된다. 온도 센서는 그림에서 보는 것처럼 앞 단과 뒤 단에 대칭으로 각각 4 개의 온도 센서가 증착 되어 있다. 각 온도 센서 간의 거리는 4mm 로 일정하게 증착 되어 있다. 실제로 온도 센서는 앞 단에 하나, 뒤 단에 하나, 총 두 개의 온도 센서만 있어도 되지만 미소 유량 센서의 특성을 알아보기 위해 총 9 개의 온도 센서를 증착하였다. 가운데 부분에 두 개의 선이 만난 부분이 온도 센서의 접점(Junction)으로 그 부분에서의 온도를 측정하게 된

다. 접점의 크기는  $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$  로 설계되어 있다. 또한 미소 유량 센서의 선 폭은  $100\mu\text{m}$  로 설계되어 있다. 앞에서 언급한 것처럼 미소 유량 센서 내의 온도 센서는 K 형 열전대와 같은 동작 특성을 가진다. 이것을 확인하기 위해 일정한 온도를 유지하고 있는 항온조에 미소 유량 센서와 표준 열전대(Standard Thermocouple)를 넣어 미소 유량 센서의 온도 센서를 검증하였다. 그 결과 미소 유량 센서에서 생성되는 온도 센서의 신호는 표준 열전대의 신호와 비교하였을 때 약 1%내로 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 즉 보정(Calibration)과정 없이 바로 사용할 수 있다는 것을 재확인할 수 있었다.

이 미소 유량 센서 내의 온도 센서는 다른 다이오드 온도 센서나 RTD 온도 센서와 비교하였을 때 다음과 같은 장점이 있다. 첫째 PR Mask 대신 재활용이 가능하고 다루기 쉬운 Stainless Steel Mask 를 사용하여 공정과정이 편리하다는 것과, 둘째로 미소 유량 센서 내의 온도 센서는 표준 K 형 열전대와 같은 동작 특성을 가지기 때문에 보정(Calibration)과정 없이 바로 사용할 수 있다는 것이다.

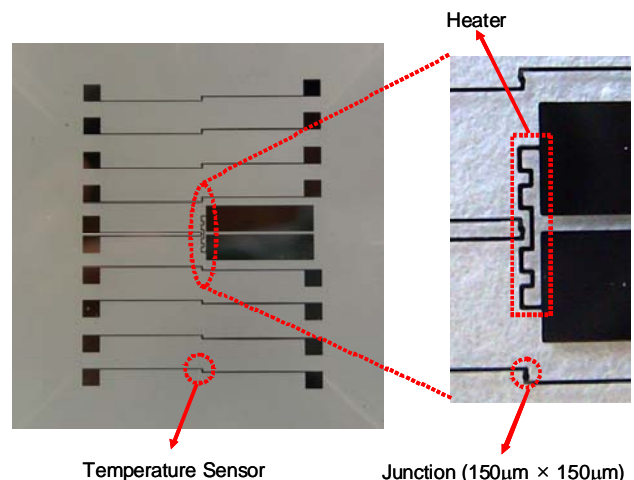


Fig. 3 Micro Flow Sensor

## 2.2 PDMS Microchannel 의 제작

일반적으로 Microchannel 을 만드는 방법은 여러 가지가 있다. Si Wafer 를 에칭(Etching)하여 만든다거나, PMMA(Polymethylmethacrylate)를 이용하여 만드는 방법, 그리고 PDMS(Polydimethylsiloxane)를 이용하여 만드는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 다루기 쉽고 만들기 쉬운 PDMS 를 이용하여 Microchannel 을 만들고자 한다.

먼저 베이클라이트(Bakelite)를 이용하여 원하는 채널 형상을 가지는 주형(master)을 제작한 후 PDMS 용액(PDMS Oligomer와 Cross-linking Agent를

10:1 의 비율로 잘 섞는다)을 붓는다. PDMS 용액 속에 있는 기포를 제거하기 위해 진공 Chamber에 넣고 Degassing 작업을 한다. PDMS 용액을 경화시키기 위해 2~3 시간 동안 75°C로 Hot Plate 위에서 경화(Curing)를 시켜준다. 경화를 시킨 후 주형에서 경화된 PDMS를 조심스럽게 떼어내면 PDMS Microchannel이 완성되게 된다. 그림 4 는 완성된 PDMS Microchannel을 보여준다.



Fig. 4 PDMS Microchannel

### 2.3 접합 방법 (Bonding Method)

앞에서 제작한 미소 유량 센서를 이용하여 유량을 측정하기 위해서는 미소 유량 센서가 증착된 Quartz Wafer 와 PDMS 미소 채널을 잘 접합하여야 한다. 미소 유량 센서가 유리의 종류인 Quartz Wafer 위에 증착 되어 있고 또한 Microchannel 은 PDMS 를 이용하여 만들었기 때문에 바이오 분야에서 PDMS 와 유리를 붙이는 기술로 많이 쓰이는 Air Plasma 를 이용하여 접합을 한다.

앞서 제작한 PDMS Microchannel 표면을 메탄올을 이용하여 잘 세척하여 준다. 강하고 완전한 접합을 위해서는 PDMS 표면을 아주 깨끗하게 잘 세척하여 주어야 한다. 또한 미소 유량 센서가 증착되어 있는 Quartz Wafer 도 표면을 Heptane 용액을 이용하여 개질 한다. 표면을 세척한 PDMS Microchannel 과 Quartz Wafer를 진공 챔버에 넣는다. 공기를 진공 챔버 내에 주입시켜주고 챔버 내의 압력이 약 750mTorr이 되도록 진공을 뽑아준다. 충분한 진공을 뽑은 후 진공 챔버 내에 약 100W의 전력을 약 10 초간 인가 시켜 준다. 진공 챔버에서 PDMS Microchannel과 Quartz Wafer를 꺼낸 후 빠른 시간 내에 두 개를 접합한다. PDMS Microchannel과 Quartz Wafer는 접합 후 바로 강력하게 결합된다. 만약 좀 더 강력한 접합을 원할 시 접합 후 약 60~85°C로 일정 시간 놓아두면 더욱 더 강력한 접합을 만들 수 있다. 그림 5 는 위와 같은 방법으로 PDMS Microchannel과 미소 유량 센서가 접합된 그림을 보여 준다.

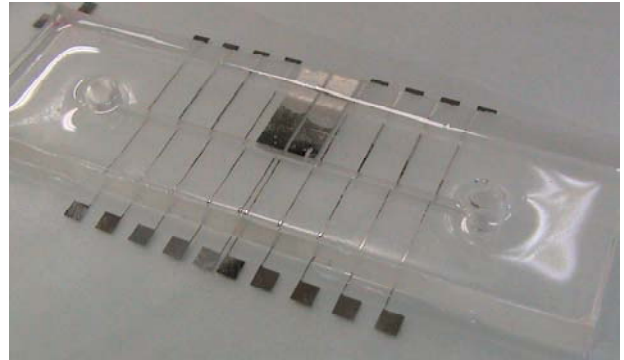


Fig. 5 The Micro Flow Sensor with the PDMS Microchannel

## 3 미소 유량 센서의 실험

위와 같이 완성된 미소 유량 센서의 특성을 조사하기 위해서 실험을 수행하였다. 작동 유체는 일반적으로 유량 센서를 보정하는데 많이 사용되는 질소 가스를 사용하였다. 미소 유량 센서 내의 채널로 지나가는 질소의 유량을 정확하게 측정하기 위해 유량 범위가 0~100SCCM(Standard Cubic Centimeter per Minute)에서 이미 보정 되어 있는 Brooks Instrument 사의 MFM(Mass Flow Meter)을 사용하였다. 미소 유량 센서의 채널의 단면은 정사각형으로 길이 4cm, 폭 800 $\mu$ m, 높이 800 $\mu$ m 이다. 히터에 인가한 전력은 0.8W 이고 Agilent Technologies 의 DC Power Supply 를 이용하였다. 총 9 개의 온도 센서로부터 발생하는 신호는 실시간으로 Data Acquisition 을 통하여 받았다. 온도 센서의 각 위치는 X=0.004, 0.008, 0.012, 0.016, 0.02, 0.024, 0.028, 0.032, 0.036 [m] 이다.

## 4 결과 및 토의

### 4.1 미소 유량 센서 내의 열전달 현상

질소 가스가 PDMS Microchannel 을 흘러갈 때 그림 6 에서 보는 것처럼 질량 유량의 변화에 따른 미소 유량 센서의 표면의 온도 분포는 변하게 된다. 유체가 흐르지 않을 때에는 히터에서 방출되는 열이 전도에 의해서만 전달되기 때문에 히터를 중심으로 온도 분포는 대칭이 되게 된다. 그러나 유체가 흐르게 되면 앞 단에서는 센서 표면에서 유체로 열전달이 일어나고 뒤 단에서는 유체에서 센서 표면으로 열전달이 일어나기 때문에 센서 표면의 앞 단의 온도는 내려가고 뒤 단의 온도는

상승하게 되어 앞 단과 뒤 단의 온도차가 생기게 된다(12). 그림 7 은 이와 같은 현상을 잘 보여 주는 그림이다. 이와 같이 유량에 따른 앞 단과 뒤 단의 온도차가 달라지는 것을 이용하여 미소 유량 센서는 유량을 측정할 수가 있게 된다.

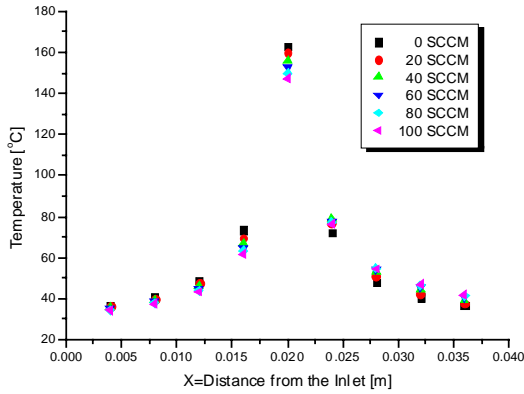


Fig. 6 Temperature Distribution (0.8W)

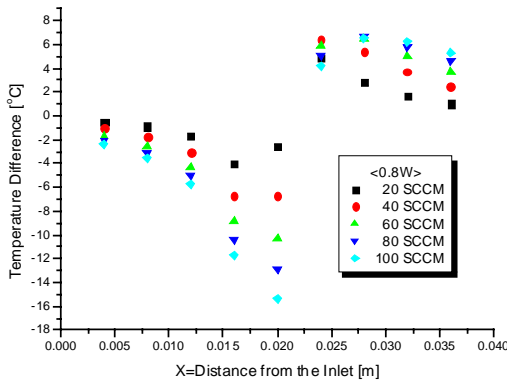


Fig. 7 Temperature difference between temperature at zero flow and temperature at non-zero flow

#### 4.2 질량 유량과 온도차와의 관계

그림 8 은 질량 유량과 미소 유량 센서에서 히터의 앞 단과 뒤 단의 온도차와의 관계를 보여준다. 그림에서 보듯이 질량 유량과 미소 유량 센서의 앞 단과 뒤 단의 온도차와의 관계는 적은 질량 유량에서 선형적으로 비례한다는 것을 확인할 수 있다. 질량 유량이 증가하게 되면 앞 단의 온도는 계속하여 감소한다. 반면에 뒤 단의 온도는 증가하다가 감소하게 된다. 이에 히터의 앞 단과 뒤 단의 온도차는 계속 일정하게 증가하지 않게 된다.

그림 8 에서는 또 다른 결과를 보여 준다. 히터로부터 멀리 떨어진 온도 센서에서의 온도차는 히터에서 가까운 거리에 있는 온도 센서에서의 온도차보다 작게 된다. 그러나 그림에서 보듯이 질량

유량과 온도차와의 관계가 선형인 구간은 히터로부터 멀리 떨어진 온도 센서의 경우가 더 긴 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 유량 센서는 질량 유량과 온도차가 선형적인 관계를 가지는 구간에서 사용을 하게 된다. 따라서 온도 센서가 히터로부터 멀리 떨어질수록 온도차는 작게 나지만 선형인 구간은 길어지기 때문에 작동 환경에 따라 적절한 온도 센서의 위치가 존재하게 될 것이다.

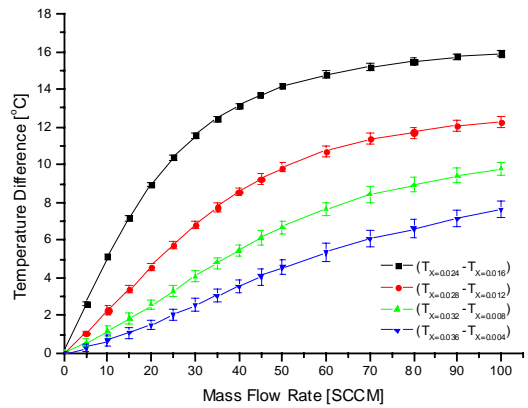


Fig. 8 The Relations between Mass Flow Rate and Temperature Differences

#### 4.3 온도차와 온도 센서 위치와의 관계

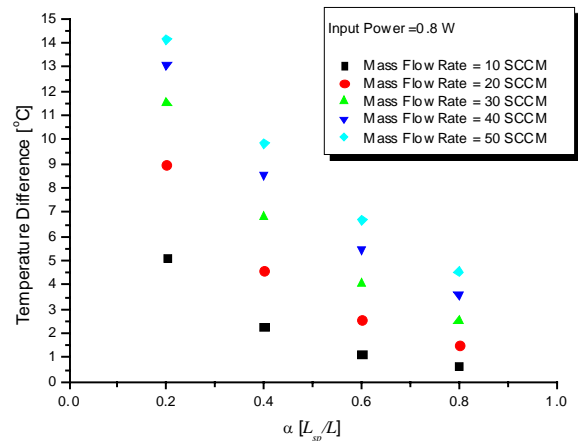


Fig. 9 The Relations between Temperature Differences and Temperature Sensor Positions

그림 9 는 온도차와 온도 센서의 위치와의 관계를 보여준다. 여기서  $\alpha$ 는  $L_{sp}$ 와  $L$ 의 비를 나타내는 것으로  $\alpha$ 값이 크면 클수록 미소 유량 센서의 가운데에 위치하는 히터로부터 멀리 떨어져 있다는 것을 뜻한다. 그림 9에서 보는 것처럼  $\alpha$ 값이 크면 클수록



록 온도차는 작게 나는 것을 확인할 수 있다. 만약 히터에 나온 열이 미소 유량 센서를 따라 균일하게 전달된다면 히터의 앞쪽 끝 부분과 뒤쪽 끝 부분의 온도차는 거의 0이 될 것이다. 또한 온도 센서가 히터로부터 아주 멀리 떨어져 있다고 생각하면 그 지점에서의 온도차도 역시 거의 0이 될 것이다. 따라서  $\alpha$ 가 0에서 1 사이에 히터의 앞 단과 뒤 단의 온도차가 최대가 되는 값이 존재하게 될 것이다. 본 연구에서는  $\alpha$ 값이 0.2보다 작은 지점에서 온도차가 최대가 되는 온도 센서의 위치가 존재하게 될 것임을 알 수가 있다.

## 5 결론

본 연구에서는 기존의 공정 방법보다 간편하고 편리한 공정과정을 가지는 새로운 미소 유량 센서를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 미소 유량 센서는 일반적으로 사용되는 PR Mask 대신에 Stainless Steel Mask 를 사용하여 비용과 공정 과정 면에 있어서 기존의 PR Mask 를 사용한 그것보다 장점을 가지고 있다. 또한 미소 유량 센서의 온도 센서는 열전대와 같은 특성을 가지고 있기 때문에 복잡한 보정 과정 없이도 온도를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이와 같이 제작된 미소 유량 센서는 실험을 통하여 적은 질량 유량을 측정할 수 있는 미소 유량 센서로서의 가능성을 확인할 수 있었으며 온도 센서의 위치에 따라 미소 유량 센서의 성능에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 제작된 미소 유량 센서는 향후 마이크로 유체 시스템에 적용되어 미소 질량 유량을 측정하고 제어할 수 있게 될 것이다.

## 후 기

본 연구는 국가 지정 연구실 사업(2-578)에서 수행된 결과이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) S. Wu, Q. Lin, Y. Yuen, Y. Tai, 2001, MEMS flow sensors for nano-fluidic applications, *Sens. Actuators A89*, 152-158.
- (2) M. Ashauer, H. Closch, F. Hedrich, N. Hey, H. Sandmaier, W. Lang, 1999, Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles, *Sens. Actuators A73*, 7-13.
- (3) A. Glaninger, A. Jachimowicz, F. Kohl, R. Chabicovsky, G. Urban, 2000, Wide range semiconductor flow sensors, *Sens. Actuators A85*, 139-146.
- (4) H. Ernst, A. Jachimowicz, G. A. Urban, 2002, High resolution flow characterization in Bio-MEMS, *Sens. Actuators A100*, 54-62.
- (5) A.F.P. van Putten, S. Middelhoek, 1974, Integrated silicon anemometer, *IEEE Electron. Lett.* 10, 425-426.
- (6) N.T. Nguyen, 1997, Micromachined flow sensors-review, *Flow Meas. Instrum.* 8, 7-16.
- (7) R. Kersjes, J. Eichholz, A. Langerbein, Y. Manoli, W. Mokwa, 1993, An integrated sensor for invasive blood-velocity measurement, *Sens. Actuators A37-38*, 674-678.
- (8) A.J. van der Wiel, C. Linder, N.F. de Rooij, 1993, A liquid velocity sensor based on the hot-wire principle, *Sens. Actuators A37-38*, 693-697.
- (9) A. Rasmussen, C. Mavriplis, M. E. Zaghoul, O. Mikulchenko, K. Mayaram, 2001, Simulation and optimization of a microfluidic flow sensor, *Sens. Actuators A88*, 121-132.
- (10) S. P. Jang, S. J. Kim, K. W. Paik, 2003, Experimental investigation of thermal characteristics for a microchannel heat sink subject to an impinging jet, using a micro-thermal sensor array, *Sens. Actuators A105*, 211-224.
- (11) R. S. Figliola, D. E. Beasley, 1995, Theory and design for mechanical measurement, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons Inc., Chap.8.